الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

NATIONAL HIGHER SCHOOL FOR HYDRAULICS
"The Mujahid Abdellah ARBAOUI"

المدرسة الوطنية العليا للري
"المجاهد عبد الله عرباوي"
ⴰⵖⵓⵔⴱⴰⵣ ⴰⵖⵓⵍⵏⴰⵡ ⵉⵎⵉⵏⵓⴳ ⵏ ⵜⵎⵓⵙⵡⵉⵜ

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

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

Option : CONCEPTION DES OUVRAGES HYDROTECHNIQUES

THEME :

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

Présenté par :
IKHLEF Roumaissa

Devant les membres du jury

Nom et Prénoms	Grade	Qualité
A. ZEROUAL	M.C.A	Président
S. TOUMI	M.C.B	Examinateur
D.E. BOURI	M.C.B	Examinateur
N. LAOUCHE	M.C.B	Examinateur
M.K. MIHOUBI	Professeur	Promoteur

Session : Décembre 2023



Dédicace



"C'est avec une profonde reconnaissance et une sincérité du cœur que je souhaite dédier ce travail à ceux qui ont joué un rôle essentiel dans mon parcours. À toi, ma chère maman **Yasmina,** *source inépuisable d'amour et de soutien, ainsi qu'à toi, mon cher papa* **Nadir,** *phare de sagesse, de force et d'encouragement. Ton dévouement et tes enseignements ont constitué des piliers indispensables à ma réussite, et tes sacrifices ont tracé la voie de mon succès.*

J'espère ardemment qu'un jour, je pourrai exprimer ma gratitude envers vous de manière significative, ne serait-ce qu'en partie pour tout ce que vous avez fait pour moi. Que Dieu vous accorde bonheur et une longévité épanouissante.

Je souhaite également dédier ce travail à mes frères, **Oussama** *et* **Achref,** *à mes sœurs,* **Imane** *et* **Douaa,** *ainsi qu'à toute ma famille. Un merci spécial à toutes mes amies, en particulier* **Imane Senadi**, **Karima,** **Loubna**, **Asma**, **Nourhane**, **Mounia**, **Sabrina** *et* **Ines,** *qui ont été présentes à chaque étape de mon parcours. Leur encouragement et leur soutien ont été inestimables, et je suis reconnaissante de les avoir à mes côtés.*

À tous ceux qui me sont chers, je vous adresse mes plus sincères remerciements. Votre influence positive a contribué à façonner cette réalisation, et je suis reconnaissante de pouvoir partager ce travail avec vous."

Roumaissa

Remerciements

Avec une profonde gratitude, je tiens à exprimer ma reconnaissance envers le Tout-Puissant qui, par sa grâce, m'a octroyé la santé et la persévérance indispensables, me permettant ainsi de mener à bien ce mémoire.

En tout premier lieu, je souhaite exprimer ma sincère reconnaissance envers mon encadreur, le **Professeur Mustapha Kamel Mihoubi**. Son soutien indéfectible, ses conseils éclairés et, plus particulièrement, ses critiques constructives ont grandement contribué à l'enrichissement significatif de ce travail.

Mes remerciements vont également aux membres du jury, dont la générosité de temps et l'expertise ont été précieuses pour l'évaluation de ce mémoire. Leur engagement envers l'excellence académique représente une source d'inspiration.

Un sincère merci s'adresse également à l'ensemble du personnel et des enseignants de l'École Nationale Supérieure de l'Hydraulique (ENSH). Leur dévouement à l'éducation et à la formation a joué un rôle déterminant dans mon parcours académique.

Je tiens également à exprimer ma profonde reconnaissance envers **moi-même**. La traversée de défis particulièrement complexes a nécessité une force intérieure et une détermination qui ont dépassé mes propres attentes. Réussir à mener à bien ce mémoire en surmontant ces obstacles a renforcé ma conviction personnelle et m'a permis de découvrir en moi une résilience insoupçonnée. Je ressens une fierté sincère et la conviction que chaque défi surmonté a contribué à forger le héros que je suis devenu et cela me motive pour affronter avec confiance les défis futurs.

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

Roumaissa

ملخص:

تهدف هذه الدراسة إلى تحليل التدابير الواجب اتخاذها لحماية وسط مدينة برج ميرا، صاحبة بلدية تسكريوت، من الفيضانات المتكررة لروافد آيت اسماعيل وأڤريون. النهج الذي تم اعتماده لتجنب مخاطر الفيضان يتضمن تحليلًا عميقًا لمخاطر الفيضان، وتقييمًا للتحديات والضعف، وتحديد المناطق المعرضة للفيضان، باستخدام أدوات محاكاة هيدروليكية مثل ArcGIS، HEC-GEO، و HEC-RAS. بعد ذلك، يتم تطوير واختيار متغير تقني اقتصادي بدقة، تتمثل في قناة من الڤابيون لواد أڤريون وتغطية بالحصى لواد آيت إسماعيل. تم اختيار هذه النسخة من من بين العديد من الاقتراحات والسيناريوهات المختلفة للتخطيط من أجل تعزيز قدرة المدينة على التحمل أمام مخاطر الفيضانات. هذا النهج الاستباقي يهدف إلى ضمان الأمان والاستدامة في برج ميرا، ممثلاً بذلك مساهمة هامة في إدارة مستدامة لمخاطر الفيضانات.

الكلمات المفتاحية: برج ميرا، الحماية، مخاطر الفيضانات، المحاكاة الهيدروليكية، المناطق المعرضة للفيضانات، المتغير التكنو-اقتصادي.

Résumé :

Cette étude a pour objectif d'analyser les mesures de protection nécessaires pour le centre de la ville de Bordj Mira, chef-lieu de la commune de Taskriout, face aux crues récurrentes des affluents Ait Smail et Agrioune. L'approche adoptée pour prévenir les risques d'inondation implique une analyse approfondie de l'aléa des crues, une évaluation des enjeux et de la vulnérabilité, ainsi que la détermination des zones inondables, utilisant des outils de simulation hydrauliques tels qu'Arc GIS, HEC GEO, et HEC-RAS Ensuite, une variante technico-économique est développée avec rigueur, consistant en un canal en gabions pour l'oued Agrioune et un revêtement en enrochement pour l'oued Ait Smail. Cette variante est choisie parmi différentes propositions et scénarios d'aménagement afin de renforcer la résilience de la ville face aux risques d'inondations. Cette démarche proactive vise à garantir la sécurité et la durabilité de Bordj Mira, représentant ainsi une contribution significative à la gestion durable des risques d'inondation.

Mots clés : Bordj Mira, Protection, risques d'inondations, Simulation hydraulique, Zone inondables, Variante technico-économique.

Abstract:

The main objective of this study is to analyze the protection measures needed for the center of Bordj Mira city, capital of Taskriout municipality, against the recurrent flooding of Ait smail and Agrioune tributaries.an approach taken to prevent flooding risks in this city it involves an in-depth analysis of flooding risks, assessment of issues and vulnerability as well as the determination of flood-prone areas; using hydraulic simulation tools such as: Ars GIS, HEC, GEO, and HEC-RAS. Subsequently, a technically and economically viable alternative is rigorously developed, consisting of a gabion channel for the Agrioune river and RIP-RAP for the Ait Smail river. This alternative is chosen from various proposals and development scenarios to enhance the city's resilience against flood risks. This proactive strategy aims to ensure the safety and sustainability of Bordj Mira, thereby making a significant contribution to the sustainable management of flood risks

Key words: Bordj Mira, Protection, Floods risks, Hydraulic simulation, Flood-prone areas, Technico-economic variant.

Table des matières :

CHAPITRE I : Problématique des inondations en Algérie dans un contexte de changement climatique

I.1 Définition des notions abordées :....1
I.1.1 Le risque :....1
I.1.2 L'aléa :....2
I.1.3 Vulnérabilité :....2
I.2 La genèse des inondations :....3
I.2.1 Le processus de genèse du ruissellement et/ou des crues :....3
I.2.2 La genèse du ruissellement selon Horton :....3
I.2.3 Genèse du ruissellement et des crues dans le concept des « aires contributives » :..4
I.2.4 État de surface et organisations pelliculaires superficielles :....5
I.3 L'évènement des inondations :....5
I.3.1 Dans le monde :....5
I.3.2 En Méditerranée et le Maghreb :....6
I.3.3 En Algérie :....7
I.3.4 Les causes des inondations en Algérie :....9
I.4 La stratégie en Algérie de lutter contre les inondations :....9
I.4.1 Le cadre réglementaire :....9
I.4.2 Mesure structurelle ou protection physique :....9
I.4.3 Mesures opérationnelles :....9
I.4.4 Mesures préventives :....10
I.5 Les crues d'Oued Agrioune :....10
I.5.1 La crue de Décembre 1967 :....10
I.5.2 La crue de Février 1984 :....10
I.5.3 La crue de décembre 1984 :....11
I.5.4 La crue de janvier 2003 :....11
I.6 Les crues d'oued Ait Smail :....11
I.6.1 La crue de septembre et janvier 2009 :....11

I.6.2 La crue de 23 Novembre 2023 : 11

CHAPITRE II : Description de la zone d'étude

II.1 Description de la zone d'étude : 16
II.2 Le bassin versant de l'oued Agrioune : 16
II.2.1 Situation géographique : 17
II.2.2 La géologie : 18
II.2.3 Le réseau hydrographique : 19
II.3 La sismicité : 20
II.4 La situation climatologique : 21
II.4.1 La température : 21
II.4.2 Le vent : 22
II.4.3 L'humidité : 23
II.4.4 Les précipitations : 23
II.4.5 Les phénomènes climatiques secondaires : 24

CHAPITRE III : Étude hydrologique

III.1 Bassin versant : 27
III.1.1 Caractéristiques principales du bassin versant : 27
III.1.1.1 Caractéristiques géographiques : 28
III.1.1.2 Caractéristiques morphologiques : 28
III.1.1.3 Caractéristiques géométriques : 28
III.1.1.4 Caractéristiques hydrographiques : 31
III.1.1.5 Étude du réseau hydrographique : 44
III.2 Étude des crues : 55
III.2.1 L'analyse fréquentielles des pluies des crues maximales annuelles avec la station hydrométrique Fermatou : 55
III.2.1.1 Présentation de la station hydrométrique : 55
III.2.1.2 Choix du modèle fréquentiel : 57
III.2.2 Détermination des débits maximums fréquentiels par la méthode du Gradex : 64
III.2.2.1 Description de la méthode : 64
III.2.2.2 Principe de la méthode : 64
III.2.2.3 Hypothèses de la méthode : 65
III.2.2.4 Les étapes de la méthode : 66

III.2.2.5 Application de la méthode : 68
III.2.3 L'hydrogramme de crue : 74
III.2.4 Choix de la crue de projet : 80
III.3 Étude de transport solide : 81
III.3.1 Méthode de Tixeront (1960) : 82
III.3.2 Méthode d'estimation au nord Algérien : 83
CHAPITRE IV : Simulation des écoulements Hydrauliques et cartographie des zones inondables à risque
IV.1 Généralités : 86
IV.1.1 La physique d'un modèle hydraulique : 86
IV.1.2 Définition de l'écoulement à surface libre : 87
IV.1.3 Définition de l'écoulement stationnaire (permanent) : 88
IV.1.4 Définition de l'écoulement non stationnaire (non permanent) : 88
IV.2 Dimensionnement des canaux : 88
IV.2.1 Détermination du coefficient de Chézy : 88
IV.2.1.1 Formule de Manning (1891) : 88
IV.2.1.2 Formule de Pavlovski (1940) : 89
IV.2.1.3 Formule d'Agroskine : 89
IV.2.1.4 Formule de Bazin (1897) : 89
IV.3 Diagnostique et simulation du cours d'eau sans Aménagement : 90
IV.3.1 Étendue de la zone d'étude : 90
IV.3.2 Descriptif du réseau : 90
IV.4 Simulation de l'écoulement du cours d'eau : 93
IV.4.1 Choix du type de modèle hydraulique : 93
IV.4.2 Présentation du logiciel HEC-RAS : 93
IV.4.2.1 Objectif du logiciel : 94
IV.4.2.2 Fonctionnement de HEC-RAS : 94
IV.4.3 Application d'HEC-RAS sur l'Oued : 95
IV.4.3.1 Banque de données nécessaires à l'application du modèle HEC-RAS : 95
IV.4.3.2 Les données géométriques : 95
IV.5 La cartographie du risque d'inondation : 118
IV.5.1 La carte de l'aléa inondation : 119

IV.5.1.1 Carte des profondeurs : 119
IV.5.1.2 Carte des vitesses : 121
IV.5.1.3 Classes d'aléa : 122
IV.5.2 Cartographie de la vulnérabilité : 124
IV.5.3 Cartographie du risque : 127
IV.5.4 Maîtrise de l'urbanisation : 128

CHAPITRE V : Étude des variantes d'aménagement

V.1 Présentation des grandes orientations : 132
V.1.1 La protection contre l'érosion : 132
V.1.1.1 Érosion des berges : 132
V.1.1.2 Érosion du lit : 133
V.1.2 La protection contre les crues : 133
V.1.2.1 Protection directe (Rapprochée) : 133
V.1.2.2 Protection indirecte (Éloignée) : 134
V.2 Étude des variantes : 135
V.2.1 Canal en béton armé : 135
V.2.2 Canal en gabions : 135
V.2.3 Choix des Digues pour la Protection Contre une Crue de Référence : 136
V.2.4 Canal en enrochement : 137
V.2.5 Redimensionnement du pont sur l'oued Ait Smail : 137
V.3 Critères d'évaluation de la variante d'aménagement : 137
V.4 Aménagement proposé sur le tronçon de l'oued Agrioune : 138
V.4.1 Première variante : Canal en béton armé : 138
V.4.1.1 Le tronçon de l'oued Agrioune avant la confluence : 138
V.4.1.1.1 Dimensionnement : 139
V.4.1.1.2 Paramètres d'écoulement : 140
V.4.1.1.3 Les sections en travers : 141
V.4.1.1.4 Estimation du coût de la variante : 142
V.4.1.2 Le tronçon de l'oued Agrioune après la confluence : 143
V.4.1.3 Dimensionnement : 143
V.4.1.4 Paramètres d'écoulement : 145
V.4.1.5 Les sections en travers : 146

V.4.1.6 Estimation du coût de la variante :.....147
V.4.2 Deuxième variante : Canal en gabions :.....148
V.4.2.1 Le tronçon de l'oued avant la confluence :.....148
V.4.2.1.1 Dimensionnement :.....148
V.4.2.1.2 Paramètres d'écoulement :.....149
V.4.2.1.3 Section en travers :.....150
V.4.2.1.4 Estimation du coût de la variante :.....151
V.4.2.2 Le tronçon de l'oued après la confluence :.....152
V.4.2.2.1 Dimensionnement :.....152
V.4.2.2.2 Paramètres d'écoulement :.....153
V.4.2.2.3 Section en travers :.....154
V.4.2.2.4 Estimation du coût de la variante :.....155
V.4.3 Troisième variante : Canal en enrochement :.....156
V.4.3.1 Le tronçon de l'oued Avant la confluence :.....156
V.4.3.1.1 Dimensionnement :.....156
V.4.3.1.2 Paramètres d'écoulement :.....157
V.4.3.1.3 Les sections en travers :.....158
V.4.3.1.4 Estimation du coût de la variante :.....159
V.4.3.2 Le tronçon de l'oued après la confluence :.....160
V.4.3.2.1 Dimensionnement :.....160
V.4.3.2.2 Paramètres d'écoulement :.....161
V.4.3.2.3 Les sections en travers :.....162
V.4.3.2.4 Estimation du coût de la variante :.....163
V.4.4 Critères du choix de la variante adéquate :.....164
V.4.5 Résultats :.....165
V.5 Aménagement proposé sur le tronçon de l'oued Ait Smail :.....166
V.5.1 Première variante : Canal en béton armé :.....166
V.5.1.1 Dimensionnement :.....167
V.5.1.2 Paramètres d'écoulement :.....168
V.5.1.3 Les sections en travers :.....169
V.5.1.4 Estimation du coût de la variante :.....170
V.5.2 Deuxième variante : Redimensionnement du pont :.....171

V.5.2.1 Propositions d'aménagements : 173
V.5.2.2 Redimensionnement : 173
V.5.2.3 Choix de l'ouvrage de franchissement : 174
V.5.2.4 Schéma de l'ouvrage proposé : 176
V.5.2.5 Résultats de simulation de l'ouvrage proposé : 177
V.5.2.6 Les paramètres d'écoulement : 179
V.5.2.7 Conception des buses et dalots : 180
V.5.3 Troisième variante : Revêtement en enrochement : 181
V.5.3.1 Dimensionnement du canal : 181
V.5.3.2 Paramètres d'écoulement : 182
V.5.3.3 Les sections en travers : 183
V.5.3.4 Conception des mesures de protection des roches : 184
V.5.3.4.1 La sélection de la vitesse d'écoulement pour le dimensionnement : 185
V.5.3.4.2 Type et granulométrie des roches : 186
V.5.3.5 Alignement et longueur des revêtements 186
V.5.3.6 Profondeur à laquelle les roches sont fondées (profondeur sous le niveau actuel du lit) : 186
V.5.3.7 Élévation du sommet de la protection rocheuse : 187
V.5.3.8 Epaisseur de protection : 187
V.5.3.9 Matériau de support ou couche filtrante : 187
V.5.3.10 La pente du talus : 188
V.5.3.11 Dimensionnement des roches pour les berges : 188
V.5.3.12 Les caractéristiques du rip rap : 189
V.5.3.13 Estimation du coût de la variante : 189
V.5.4 Choix de la variante adéquate : 190
V.5.5 Résultats : 190
V.5.6 Vue en 3D des oueds après l'aménagement : 191
V.5.7 Les cartes de profondeur d'eau après aménagement : 193
V.5.8 Stratégies Proactives et Engagement Communautaire : 194

CHAPITRE VI : Organisation du chantier

VI.1 Rôles et responsabilités des intervenants sur chantier : 200
VI.1.1 Le maître de l'ouvrage « MOA » : 200
VI.1.2 Le maître d'œuvre « MOE » : 200
VI.1.3 L'entrepreneur : 200
VI.2 Installations du chantier : 201
VI.2.1 Installations destinées au personnel : 201
VI.2.2 Installations destinées au stockage des matériaux : 201
VI.2.2.1 Pierres : 201
VI.2.2.2 La grille en acier galvanisé : 201
VI.2.2.3 Le géotextile : 202
VI.2.2.4 L'énergie électrique : 202
VI.2.2.5 L'alimentation en eau potable : 202
VI.2.2.6 L'alimentation en carburant : 202
VI.2.3 Installations destinées à la réparation des engins : 202
VI.2.4 Installations pour la préfabrication : 202
VI.3 Les moyens de chantier : 202
VI.3.1 Les moyens humains : 202
VI.3.2 Les moyens matériels : 203
VI.4 Devis quantitatif et estimatif du projet : 203
VI.5 La Planification : 204
VI.5.1 Définition : 204
VI.5.2 Étapes de la planification : 204
VI.5.3 Plannings des travaux : 205
VI.5.4 Techniques de la planification : 205
VI.5.4.1 Méthodes basées sur le réseau : 206
VI.5.5 Différentes méthodes basées sur le réseau : 207
VI.5.5.1 Méthode C.P.M {Critical Path Method} (Méthode française) : 207
VI.5.5.2 Méthode P.E.R.T (Program Evaluation and Review Technical): 207
VI.5.5.3 Méthodes basées sur le graphique : 208
VI.5.6 Méthode de calcul de P.E.R.T : 208
VI.5.6.1 Les paramètres de la méthode P.E.R.T : 208

VI.5.6.2 Chemin critique (C.C) : 209
VI.5.7 Diagramme de Gantt : 209

CHAPITRE VII : Protection et sécurité du travail

VII.1 Les causes des accidents durant la phase de construction : 216
VII.1.1 Facteur matériel : 216
VII.1.2 Facteur humain : 217
VII.2 Les mesures de prévention contre les accidents du travail : 217
VII.3 Les équipements de protection : 218
VII.3.1 Individuel : 218
VII.3.2 L'ordre dans le chantier et aux postes de travail : 222
VII.3.3 Blindage : 222
VII.3.4 Les mesures de prévention contre les incendies : 222
VII.4 Les travaux de terrassement : 223
VII.5 Plan de sécurité adapte aux travaux de réalisation : 224
VII.6 Signalisation de sécurité : 225
VII.6.1 Description des panneaux de signalisation : 226
VII.6.2 Les principes recommandés pour la conception et la mise en œuvre d'une signalisation de sécurité efficace : 226
VII.6.3 Implémentation de la signalisation de sécurité sur le site de construction : 227

Table des figures :

CHAPITRE I :

Figure I.1 : Genèse du ruissellement selon Horton (Cosandey, 1990).....3
Figure I.2 : Genèse du ruissellement selon la théorie des aires contributives (Merot et al., 1981).....4
Figure I.3 : Les inondations et les tempêtes depuis 1990 (Isabelle, 2005). 5
Figure I.4 : Observation de l'érosion intensive du lit et des berges de l'oued, ...12
Figure I.5 : Image illustrant les deux rives du pont post-catastrophe, ...12
Figure I.6 : Image témoignant de la dégradation du lit mineur de l'oued, ...13
Figure I.7 : Image révélant la dégradation du béton sur la rive droite du pont, ...13

CHAPITRE II :

Figure II.1 : La situation de la zone d'étude au sein des wilayas et des communes. 17
Figure II.2 : Carte de situation des sous bassins de la zone d'étude par rapport au bassin versant de l'oued Agrioune.....18
Figure II.3: Profil en long de l'oued Agrioune (LEM ,2007). 19
Figure II.4: Classification sismique des wilayas d'Algérie (Addenda, 2003). 20
Figure II.5 : Courbes de répartition mensuelle des températures. 22
Figure II.6: Répartition des vitesses des vents en m/s (2006-2015). 23
Figure II.7: Evolution de la pluviométrie mensuelle interannuelles. 24

CHAPITRE III :

Figure III.1 : Carte hypsométrique des sous bassins versants Bordj Mira et Ait Smail. 32
Figure III.2 : Répartition des surfaces et la courbe hypsométrique de la zone d'étude. 33
Figure III.3 : Répartition des surfaces et la courbe hypsométrique du sous bassin versant Ait Smail. 34
Figure III.4 : Répartition des surfaces et la courbe hypsométrique du sous bassin versant Bordj Mira. 35
Figure III.5 : Carte des pentes pour les sous bassins versants Bordj Mira et Ait Smail. 37
Figure III.6 : Carte des courbes de niveaux des sous bassins versants Bordj Mira et Ait Smail. 38
Figure III.7 : Réseau hydrographique des sous bassins versants Bordj Mira et Ait Smail.....45
Figure III.8 : Situation de la station hydrométrique de Fermatou (Source : ANRH-Blida). ...56
Figure III.9 : Représentation graphique de la loi de Gumbel de la station Fermatou (150601). 60

Figure III.10 : Représentation graphique de la loi log normale de la station Fermatou (150601). 61
Figure III.11: Graphe comparatif des résultats d'ajustement par la méthode de Gumbel et Log normale pour la station 150601. 63
Figure III.12 : Graphe représente ajustement graphique pour les pluies et droite d'extrapolation pour les débits (Laborde, 2000). 66
Figure III.13 : Graphe de l'ajustement des pluies et la droite d'extrapolation des débits 72
Figure III.14 : Hydrogramme de crue de la zone d'étude par la méthode Skolovsky. 79
Figure III.15 : Hydrogramme du Bordj Mira par la méthode Skolovsky. 79
Figure III.16 : Hydrogramme de crue d'Ait Smail par la méthode Skolovsky. 80
Figure III.17 : Hydrogramme de la crue du projet. 81

CHAPITRE IV :

Figure IV.1 : Définition des variables hydrauliques intervenant dans les équations de Saint-Venant, d'après (Langendoen, 2000) : 87
Figure IV.2 : Vue générale vers l'amont prise du viaduc de la RN 09 (2019). 90
Figure IV.3 : Différentes vues du pont. 91
Figure IV.4 : vue du viaduc et de l'Agrioune en amont de la confluence. 92
Figure IV.5 : Emplacement de l'exutoire sur l'oued Agrioune à la sortie de la ville Bordj Mira. 92
Figure IV.6 : Interface du logiciel HEC-RAS (version 6.4.1). 94
Figure IV.7 : TIN (réseau irrégulier triangulé) de la zone d'étude. 96
Figure IV.8 : Insertion fichier de projection. 97
Figure IV.9 : Insertion des données du terrain. 97
Figure IV.10 : Profil de terrain de la section en travers N° 1140 de l'oued Ait Smail avant et après correction de la géométrie. 98
Figure IV.11 : Définition du tracé de l'oued Agrioune et Ait Smail et ces sections en travers. 99
Figure IV.12 : Introduction des données hydrauliques des oueds. 100
Figure IV.13 : Définition des conditions aux limites. 101
Figure IV.14 : Profil en long de l'oued Agrioune avant la confluence à l'état naturel pour une crue centennale. 103
Figure IV.15 : Profil en long de l'oued Ait Smail à l'état naturel pour une crue centennale. 103
Figure IV.16 : Profil en long de l'oued Agrioune après la confluence à l'état naturel pour une crue centennale. 104
Figure IV.17 : Vue en Plan en 3D des Oueds. 104
Figure IV.18 : Courbe de tarage du tronçon modélisé d'Oued Agrioune avant la confluence. 105
Figure IV.19 : Courbe de tarage du tronçon simulé d'Oued Ait Smail. 105
Figure IV.20 : Courbe de tarage du tronçon modélisé d'Oued Agrioune après la confluence. 106

Figure IV.21 : Les Profils en travers de quatre sections choisies de l'oued Agrioune avant la confluence.....107
Figure IV.22 : Les Profils en travers de quatre sections choisies de l'oued Ait Smail. 108
Figure IV.23 : Le Pont qui Enjambe l'oued Ait Smail 109
Figure IV.24 : L'emplacement du pont sur les deux rives de l'oued Ait Smail. 110
Figure IV.25 : Les Profils en travers de quatre sections choisies de l'oued Agrioune après la confluence.....111
Figure IV.26 : Variation de la vitesse d'écoulement en fonction de la distance dans l'oued Agrioune avant la confluence. 112
Figure IV.27 : Variation de la vitesse d'écoulement en fonction de la distance dans l'oued Ait Smail. 112
Figure IV.28 : Variation de la vitesse d'écoulement en fonction de la distance dans l'oued Agrioune après la confluence. 113
Figure IV.29 : Evolution du nombre de Froude en fonction de la distance d'oued Agrioune avant la confluence. 114
Figure IV.30 : Evolution du nombre de Froude en fonction de la distance d'oued Ait Smail. 114
Figure IV.31 : Evolution du nombre de Froude en fonction de la distance d'oued Agrioune après la confluence. 115
Figure IV.32 : Carte de profondeur d'eau pour la période de retour 100 ans. 120
Figure IV.33 : Carte de vitesse d'eau pour la période de retour 100 ans. 121
Figure IV.34 : Carte de l'aléa pour la crue centennale.....123
Figure IV.35 : Carte d'occupation du sol de la zone d'étude. 125
Figure IV.36 : Carte de vulnérabilité de la zone d'étude. 126
Figure IV.37 : Carte de risque d'inondation de la zone d'étude. 127
Figure IV.38 : Carte de zonage réglementaire pour une crue de 100 ans. 129

CHAPITRE V :

Figure V.1 : Coupe en travers d'un canal en gabion. (Data source : IKHLEF_Roumaissa_Autodesk_AutoCAD). 136
Figure V.2 : La profondeur normal du tronçon de l'oued Agrioune avant la confluence, (Source : Ras-mapper). 138
Figure V.3 : Les dimensions du canal trapézoïdale en béton armé du tronçon à aménager de l'oued Agrioune avant la confluence, (Source : logiciel Flow-master). 139
Figure V.4 : Sections en travers d'un canal trapézoïdale en béton armé pour une crue centennale pour le tronçon de l'oued Agrioune avant la confluence. 141
Figure V.5 : La profondeur normal du tronçon de l'oued Agrioune après la confluence, (Source : Ras-mapper). 143
Figure V.6 : Les dimensions du canal trapézoïdale du tronçon à aménager de l'oued Agrioune après la confluence, (Source : logiciel Flow-master). 144
Figure V.7 : Profils en travers d'un canal trapézoïdale pour une crue centennale pour le tronçon de l'oued Agrioune après la confluence.....146

Figure V.8 : Profils en travers d'un canal en gabion pour une crue centennale pour le tronçon de l'oued Agrioune avant la confluence. 150
Figure V.9 : Profils en travers d'un canal gabionné pour une crue centennale pour le tronçon de l'oued Agrioune avant la confluence. 154
Figure V.10 : Les dimensions du canal trapézoïdale en enrochement du tronçon à aménager de l'oued Agrioune avant la confluence, (Source : logiciel Flow-master). 156
Figure V.11 : Profils en travers d'un canal trapézoïdale en enrochement pour une crue centennale pour le tronçon de l'oued Agrioune avant la confluence. 158
Figure V.12 : Les dimensions du canal trapézoïdale du tronçon à aménager de l'oued Agrioune après la confluence, (Source : logiciel Flow-master). 160
Figure V.13 : Profils en travers d'un canal trapézoïdale en enrochement pour une crue centennale pour le tronçon de l'oued Agrioune après la confluence. 162
Figure V.14 : La profondeur normal du tronçon de l'oued Ait Smail (Source : Ras-mapper). 166
Figure V.15 : Les dimensions du canal trapézoïdale du tronçon à aménager de l'oued Ait Smail, (Source : logiciel Flow-master). 167
Figure V.16 : Profils en travers d'un canal trapézoïdale pour une crue centennale pour le tronçon de l'oued Ait Smail. 169
Figure V.17 : Détail du pont rive gauche. 171
Figure V.18 : Détail du pont rive droite. 172
Figure V.19 : Coupe type du pont (data source : IKHLEF_Roumaissa_Autodesk_AutoCAD). 172
Figure V.20 : Coupe en travers type d'un dalot multiple projeté (data source : IKHLEF_Roumaissa_Autodesk_AutoCAD). 175
Figure V.21 : Redimensionnement de l'ouvrage rive gauche, (Source : logiciel : HEC-RAS). 176
Figure V.22 : Redimensionnement de l'ouvrage rive droite (Source : logiciel : HEC-RAS). 176
Figure V.23 : Vue en amont de l'ouvrage en rive gauche. 177
Figure V.24 : Vue en aval de l'ouvrage rive gauche. 177
Figure V.25 : Vue en amont de l'ouvrage en rive droite. 178
Figure V.26 : Vue en aval de l'ouvrage en rive droite. 178
Figure V.27 : Les dimensions du canal trapézoïdale en enrochement du tronçon à aménager de l'oued Ait Smail, (Source : logiciel Flow-master). 181
Figure V.28 : Profils en travers d'un canal trapézoïdale en enrochement pour une crue centennale pour le tronçon de l'oued Ait Smail. 183
Figure V.29 : Vue en 3D du tronçon de l'oued Agrioune avant la confluence. 191
Figure V.30 : Vue en 3D du tronçon de l'oued Agrioune après la confluence. 192
Figure V.31 : Vue en 3D de l'oued Ait Smail. 192
Figure V.32 : Carte de profondeur d'eau après aménagement pour T = 100 ans. 193
Figure V.33 : Carte du risque d'inondation lors d'une crue exceptionnelle de T =250 ans. 195

CHAPITRE VI :

Figure VI.1 : Relation entre les personnes du chantier (Ghomari, 2013) 201
Figure VI.2 : Schéma représentatif de la méthode de PERT. 209
Figure VI.3 : Réseau P.E.R.T du projet. 212
Figure VI.4 : Diagramme de GANTT du projet.....213

CHAPITRE VII :

Figure VII.1 : Équipements de protection individuelle des yeux, (Source : SETON).....218
Figure VII.2 : Équipements de protection individuelle de la tête et le cou, (Source : SETON et Hansler Smith).....219
Figure VII.3 : Les protection auditives, (Source : SETON et Cotral). 219
Figure VII.4 : Équipements de protection individuelle des main et bras, (Source : SETON). 220
Figure VII.5 : Équipements de protection individuelle des pieds, (Source : SETON et Gaston MILLE).....220
Figure VII.6 : Equipements de protection respiratoire, (Source : Amazon et 3 M).....221
Figure VII.7 : Equipements de protection corporelle, ...221
Figure VII.8 : Système du blindage (Source : Canada-shoring).....222

Liste des tableaux :

CHAPITRE I :

Tableau n°I.1 : Recensement des inondations catastrophiques en Algérie (1970-2023) (Le CRSTRA, 2004). 8

CHAPITRE II :

Tableau n° II.1: Répartition mensuelle des températures (Source : ONM). 21
Tableau n° II.2 : La répartition des vitesses des vents en m/s (2006-2015) (Source : ONM).22
Tableau n° II.3 : Répartition de l'humidité pour la période (2005-2016), (Source ONM). 23
Tableau n° II.4 : Répartition des pluies mensuelles interannuelles de la station pluviométrique 150613.....24
Tableau n° II.5 : Position géographique de la station de Kherrata (Hamdani, 2012).....25
Tableau n° II.6 : Nombre de jours d'apparition de caractéristiques climatiques secondaires. (Hamdani, 2012).....25

CHAPITRE III :

Tableau n°III.1 : Les paramètres hydro-morphométriques des sous bassins. 31
Tableau n°III.2 : Paramètres Hypsométriques de la zone d'étude. 33
Tableau n°III.3 : Paramètres Hypsométriques du sous bassin versant « Ait Smail ». 34
Tableau n°III.4 : Paramètres Hypsométriques du sous bassin versant « Bordj Mira ».....35
Tableau n°III.5 : caractéristiques altimétriques des sous bassins versants.....36
Tableau n°III.6 : pente moyenne de sous bassin Ait Smail.....39
Tableau n°III.7 : pente moyenne de sous bassin Bordj Mira. 40
Tableau n°III.8 : Classification ORSTOM du relief à partir de l'indice de pente global. 41
Tableau n°III.9 : Indice de pente global pour les deux sous bassins versants.....41
Tableau n°III.10 : Classification des reliefs d'après ORSTOM,1963.....43
Tableau n°III.11 : Résultats de calculs des pentes et la dénivelée spécifique du sous bassin « Ait Smail ».....43
Tableau n°III.12 : Résultats de calculs des pentes et la dénivelée spécifique du sous bassin « Bordj Mira ». 43
Tableau n°III.13 : calcul du rapport de confluence pour sous bassin versant « Ait Smail ». .46
Tableau n°III.14 : calcul du rapport de confluence pour sous bassin versant « Bordj Mira ». 46
Tableau n°III.15 : calcul du rapport des longueurs pour sous bassin versant « Ait Smail »...47
Tableau n°III.16 : calcul du rapport des longueurs pour sous bassin versant « Bordj Mira ».47
Tableau n°III.17 : La densité de drainage de les deux sous bassins versants. 48

Tableau n°III.18 : La densité hydrographiques et le coefficient de torrentialité pour les deux sous bassins versants. 48
Tableau n°III.19 : Résultats du calcul du temps de concentration en heure pour les deux sous bassins étudiés. 52
Tableau n°III.20 : Valeurs retenus du temps de concentration pour les trois bassins versants. 53
Tableau n°III.21 : Paramètres hydrographiques des deux sous bassins versants. 53
Tableau n°III.22 : caractéristiques géomorphologiques des deux sous bassins versants. 54
Tableau n°III.23 : Les caractéristiques de la station hydrométrique « Fermatou » 56
Tableau n°III.24 : Série des débits maximales annuels prise de la station 150601 (Source : ANRH Alger). 57
Tableau n°III.25 : Caractéristiques de la série des débits de la station 150601. 57
Tableau n°III.26 : Résultats d'ajustement à la loi de Gumbel de la station 150601. 59
Tableau n°III.27 : Comparaison des caractéristiques de la loi de Gumbel et de l'échantillon. 60
Tableau n°III.28 : Résultats d'ajustement à la loi log normale de la station 150601 61
Tableau n°III.29 : Comparaison des caractéristiques de la loi log normale et de l'échantillon. 62
Tableau n°III.30 : Résultats du test de $\chi 2$ de la station Hydrométrique 150601. 64
Tableau n°III.31 : Caractéristique des stations pluviométriques (Source : ANRH Alger). 68
Tableau n°III.32 : Répartition des précipitations maximales journalières prise de la station Fermatou. 68
Tableau n°III.33 : Répartition des précipitations maximales journalières prise de la station Souk El Ténine. 69
Tableau n°III.34 : Répartition des précipitations maximales journalières prise de la station Ain Roua. 69
Tableau n°III.35 : Résultats de calcul de b' pour les trois stations prises. 71
Tableau n°III.36 : Résultats de l'ajustement pour déférentes périodes de retours pour les stations prises. 73
Tableau n°III.37 : Résultats de l'ajustement des stations prises. 73
Tableau n°III.38 : Coefficient de forme de l'hydrogramme de crue "δ" 75
Tableau n°III.39 : les valeurs du temps de base, montée et décrue. 75
Tableau n°III.40 : Valeurs du débits centennales en fonction du temps pour la zone d'étude. 76
Tableau n°III.41 : Valeurs du débits centennales en fonction du temps pour le sous bassin « Bordj Mira ». 77
Tableau n°III.42 : Valeurs du débits centennales en fonction du temps pour le sous bassin « Ait Smail ». 78
Tableau n°III.43 : crue de projet recommandée selon la classification du comité national australien des grands barrages (CNAGB). 80
Tableau n°III.44 : Estimation du coefficient de perméabilité. 82
Tableau n°III.45 : Résultats de calcul de la lame d'eau écoulée. 83
Tableau n°III.46 : Résultats de calcul de la dégradation spécifique. 83

Tableau n°III.47 : Résultats de calcul des apports solides. 84

CHAPITRE IV :

Tableau n° IV.1 : Coefficients de Manning en lit Mineur appliqué à l'Oued Agrioune et oued Ait Smail. 102
Tableau n° IV.2 : Récupératif des détails du pont existant sur l'oued Ait Smail. 109
Tableau n° IV.3 : Récupératif des résultats de la simulation de l'écoulement pour la période de retour T=100ans (Source : Logiciel HEC-RAS). 116
Tableau n° IV.4 : Critères d'évaluation de l'aléa inondation. 122
Tableau n° IV.5 : Les valeurs de référence de type d'occupation pour la vulnérabilité (Guigo et al., 2002). 124
Tableau n° IV.6 : Croisement et zonage de l'aléas et enjeux (Smith et al., 2014). 128

CHAPITRE V :

Tableau n° V.1 : Dimensions de l'aménagement en béton armé du tronçon de l'oued Agrioune avant la confluence (canal en béton armé). 139
Tableau n° V.2 : Résultats de la simulation d'écoulement d'un canal trapézoïdale en béton armé du tronçon de l'oued Agrioune avant la confluence, (Source : HEC-RAS). 140
Tableau n° V.3 : Devis de la variante canal en béton armé pour le tronçon de l'oued Agrioune avant la confluence. 142
Tableau n° V.4 : Dimensions de l'aménagement du tronçon de l'oued Agrioune après la confluence (canal en béton armé). 143
Tableau n° V.5 : Résultats de la simulation d'écoulement d'un canal trapézoïdale en béton armé du tronçon de l'oued Agrioune après la confluence, (Source : HEC-RAS). 145
Tableau n° V.6 : Devis de la variante canal en béton armé pour le tronçon de l'oued Agrioune après aménagement. 147
Tableau n° V.7 : Résultats de calcul des nombres de caisses pour le canal gabionné du tronçon de l'oued Agrioune avant la confluence. 148
Tableau n° V.8 : Récupératif des paramètres de la variante du gabionnage (tronçon oued Agrioune avant la confluence). 148
Tableau n°V.9 : Résultats de la simulation d'écoulement d'un canal en gabion du tronçon de l'oued Agrioune avant la confluence (Source : HECRAS). 149
Tableau n°V.10 : Devis de la variante canal en gabions pour le tronçon de l'oued Agrioune avant la confluence. 151
Tableau n° V.11 : Résultats de calcul des nombres de caisses pour le canal gabionné du tronçon de l'oued Agrioune après la confluence. 152
Tableau n° V.12 : Récupératif des paramètres de la variante du gabionnage (tronçon oued Agrioune avant la confluence). 152
Tableau n° V.13 : Résultats de la simulation d'écoulement d'un canal gabionné du tronçon de l'oued Agrioune après la confluence (Source : HECRAS). 153
Tableau n° V.14 : Devis de la variante (canal en gabion) du tronçon de l'oued Agrioune après la confluence. 155

Tableau n° V.15 : Dimensions de l'aménagement du tronçon de l'oued Agrioune avant la confluence (canal en enrochement). 156
Tableau n° V.16 : Résultats de la simulation d'écoulement d'un canal trapézoïdale en enrochement du tronçon de l'oued Agrioune avant la confluence, (Source : HEC-RAS). 157
Tableau n° V.17 : Devis de la variante canal en enrochement pour le tronçon de l'oued Agrioune avant la confluence. 159
Tableau n° V.18 : Dimensions de l'aménagement du tronçon de l'oued Agrioune après la confluence (canal en enrochement). 160
Tableau n° V.19 : Résultats de la simulation d'écoulement d'un canal trapézoïdale en enrochement du tronçon de l'oued Agrioune après la confluence, (Source : HEC-RAS). 161
Tableau n° V.20 : Devis de la variante canal en enrochement pour le tronçon de l'oued Agrioune après la confluence. 163
Tableau V.21 : Critères du choix de la variantes adéquate dans le tronçon de l'oued Agrioune avant la confluence. 164
Tableau n° V.22 : Dimensions de l'aménagement du tronçon de l'oued Ait Smail (canal en béton armé). 167
Tableau n° V.23 : Résultats de la simulation d'écoulement d'un canal trapézoïdale en béton armé du tronçon de l'oued Ait Smail, (Source : HEC-RAS).....168
Tableau n° V.24 : Devis de la variante canal en béton armé pour le tronçon de l'oued Ait Smail. 170
Tableau n° V.25 : Avantages et inconvénients des différentes solutions proposées (El Harti & Ait Ichou, 2017) 174
Tableau n° V.26 : Pré-dimensionnement des dalots projetés. 175
Tableau n° V.27 : Résultats de la simulation d'écoulement du tronçon de l'oued Ait Smail {Pont rive gauche}, (Source : HEC-RAS). 179
Tableau n° V.28 : Résultats de la simulation d'écoulement du tronçon de l'oued Ait Smail {Pont rive gauche}, (Source : HEC-RAS). 179
Tableau n° V.29 : Dimensions de l'aménagement du tronçon de l'oued Ait Smail (canal en enrochement). 181
Tableau n° V.30 : Résultats de la simulation d'écoulement d'un canal trapézoïdale en enrochement du tronçon de l'oued Ait Smail, (Source : HEC-RAS). 182
Tableau n° V.31 : Les caractéristiques calculées du riprap. 189
Tableau n° V.32 : Devis de la troisième variante pour le tronçon de l'oued Ait Smail. 189
Tableau n° V.33 : Critères du choix de la variantes adéquate dans le tronçon de l'oued Ait Smail. 190

CHAPITRE VI :

Tableau n° VI.1 : Engins utilisés. 203
Tableau n° VI.2 : Le devis des différents travaux de l'aménagement du projet sur l'oued Agrioune et l'oued Ait Smail. 204
Tableau n° VI.3: Liste des tâches pour le projet. 210
Tableau n° VI.4: Succession des tâches pour le projet. 211

CHAPITRE VII :

Tableau n° VII.1 : Plan de sécurité au travail (Sedrati, 2018). 225
Tableau n° VII.2 : Signification des couleurs de sécurité (Cartier & Sabater, 2004). 226

ANNEXES :

Table I : Série pluviométrique de la station **«** 150601 » Fermatou. IV
Table II : Série pluviométrique de la station « 030207 » Souk El Ténine. V
Table III : Série pluviométrique de la station « 030205 » Ain Roua. VI
Table IV : Série hydrométrique prise de la station 150601. VII

Liste des Planches :

Planche n°1 : Plan de masse des oueds avec localisation des points noires.

Planche n°2 : Plan du réseau hydrographique des sous bassins versants.

Planche n°3 : Profils au long et sections en travers des tronçons aménagés.

Planche n°4 : Plan d'aménagement des oueds.

Planche n°5 : Schémas des différentes variantes proposées.

Planche n°6 : Coupes et détails de la variante d'aménagement variante choisie.

Planche n°7 : Organisation des travaux.

Liste des abréviations :

Abréviations	Signification
1D	Unidimensionnel
2D	Bidimensionnel
3M	Minnesota Mining and Manufacturing Company,
ANRH	Agence Nationale des ressources hydrauliques
ARMCO	Arabian American Oil Company
BA	Béton Armé
BV	Bassin versant
Ca	Coefficient d'allongement
CETMEF	Le Centre d'études techniques maritimes et fluviales
CID	Conseil Ingénierie et Développement
CNAGB	Comité national australien des grands barrages
CP	Coefficient de pointe
CRSTRA	Centre de Recherche Scientifique et Technique sur les Régions Arides
Ct	Coefficient de torrentialité
DA	Dinar Algérien
Dd	Densité de drainage Km/Km² ;
DRCR	La Direction des Routes et de la Circulation Routière (MAROC)
Ds	Le transport solide en (t/Km²/an)
EM-DAT	The Emergency Events Database
ESRI	Environmental systems research institute
Fr	Nombre de Froude
G	Accélération due à la gravité (m/s²)
GIP	Le Groupement d'intérêt public
GRADEX	Gradient de l'exponentielle
HEC- RAS	Hydrologic Engineering Center's River Analysis System
I	Pente hydraulique
IBV	Pente du bassin Versant
Ic	Pente du talweg principale (%)
IFACI	L'Institut français des auditeurs et contrôleurs internes
Im	Pente moyenne du bassin versant m/Km
Imoy	Pente moyenne du cours d'eau m/Km
Ip	Indice de pente de Roche %
IP	Pente piézométrique
Ir	Pente longitudinale du radier
JICA	L'Agence japonaise de coopération internationale
Kc	Indice de compacité
KG	L'indice de compacité de Gravelius
Le	Lamme d'eau écoulée (mm)
MEDD	Ministère de l'Environnement et Développement Durable
MEN	Mécanisme d'examen des normes
MNT	Model numérique du terrain
NGA	Nivellement Général de l'Algérie
OIT	L'Organisation internationale du Travail
OMM	L'Organisation météorologique mondiale

ONA	Office national d'Assainissement
ONM	Office National de la Météorologie
ORSTOM	Office de la recherche scientifique et technique outre-mer
P	Périmètre (Km) ;
Pj.max	Pluie maximal journalière (mm)
PPRI	Plan de Prévention du Risque Inondation
Qmoy	Débit moyen de la crues (m^3/s)
Qt	Débit à l'instant t (m^3/s) ;
RC	Rapport de la confluence
RH	Rayon hydraulique (m)
RL	Rapport des longueurs
RN	Route Nationale
S	Surface du bassin versant
SBV	Sous Bassin versant
SCS	Soil Conservation Service,
SEAAL	Société des Eaux et de l'Assainissement d'Alger
SEACO	La Société de l'Eau et de l'Assainissement de Constantine,
SEOR	La Société de l'Eau et de l'Assainissement d'Oran
SIG	Système d'Information Géographique
Sm	Surface mouillée (Km^2)
SONATRACH	Société nationale pour la recherche, la production, le transport, la transformation, et la commercialisation des hydrocarbures
SPW	Le Service public de Wallonie
SST	Sécurité et de santé au travail
Ta	Désigne la dégradation spécifique en (T /Km^2/an)
Tb	Temps de base (h)
Tc	Temps de concentration (heures)
Td	Temps de décrue (h)
TIN	Triangulated Irregular Network
Tm	Temps de montée de la crue (heures)
Tr	Temps de réalisation
TSA	Tout sur l'Algérie
UNISCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
Vr	Vitesse de ruissellement (km/h)

Outils du travail :

★ ***Arc GIS :***

ArcGIS est une suite complète de logiciels d'information géographique (SIG) développée par la société américaine ESRI (Environmental Systems Research Institute, Inc.). Un SIG est un système informatique conçu pour capturer, stocker, manipuler, analyser et présenter des données spatiales, permettant ainsi de comprendre et de visualiser des informations liées à la géographie. ArcGIS offre un ensemble d'outils et de fonctionnalités pour la création, la gestion et l'analyse de données géographiques, facilitant la prise de décision basée sur des éléments spatiaux. La suite comprend des applications telles que :

- ✓ ***ArcMap :***
  Fonction : Éditer des fichiers au format géodatabase.
  Utilisation : Cartographie et analyse géospatiale.

- ✓ **ArcCatalog :**
  Fonction : Gérer les données, permettant d'obtenir des informations détaillées sur les objets édités.
  Utilisation : Système de gestion de bases de données géographiques.

- ✓ **ArcToolbox :**
  Fonction : Regrouper des outils dédiés à la transformation des données.
  Utilisation : Faciliter les opérations de traitement et d'analyse sur les données géographiques.

★ ***HYFRAN :***

Le logiciel HYFRAN-PLUS offre la possibilité d'ajuster un large éventail de distributions statistiques à une série de données, sous réserve de la vérification des hypothèses d'indépendance, d'homogénéité et de stationnarité (voir Publications sur le Système d'Aide à la Décision). Un Système d'Aide à la Décision (SAD) a été élaboré pour guider le choix de la classe de distributions la plus appropriée afin d'estimer le quantile des périodes de retour élevées. L'équipe du Professeur Bernard Bobée, titulaire de la chaire en hydrologie statistique de 1992 à 2004, a développé HYFRAN.

★***HEC-RAS :***

HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System) est un logiciel de modélisation hydraulique développé par le US Army Corps of Engineers. Il est utilisé pour l'analyse des écoulements dans les rivières, les canaux et d'autres systèmes hydrauliques. HEC-RAS permet de simuler les caractéristiques hydrauliques, telles que les débits, les niveaux d'eau et les vitesses d'écoulement, afin d'évaluer les risques d'inondation, de concevoir des ouvrages hydrauliques et de planifier des aménagements riverains.

★ ***Ras Mapper :***

RAS Mapper est un logiciel intégré à HEC-RAS, spécialisé dans la cartographie des résultats d'analyses hydrauliques et hydrosédimentaires. Il permet de visualiser, analyser et interpréter de manière graphique les données générées par HEC-RAS, facilitant ainsi la compréhension des modèles hydrauliques et des simulations de cours d'eau.

★ ***Flow Master :***

Le logiciel Flowmaster est un outil de simulation spécialisé dans la modélisation des systèmes de fluides, permettant d'analyser le comportement des fluides, tels que les liquides ou les gaz, dans des systèmes complexes. Il est utilisé pour concevoir et optimiser les réseaux de fluides, tels que les systèmes hydrauliques et pneumatiques, offrant des fonctionnalités avancées pour la visualisation et l'analyse des résultats afin d'améliorer la performance des systèmes fluidiques.

★ ***Autocad :***

AutoCAD est un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO) développé par Autodesk. Il est utilisé pour créer des dessins précis en deux ou trois dimensions et il offre des outils puissants de modélisation, de dessin et de documentation pour soutenir le processus de conception.

★ ***MS Project :***

Microsoft Project (MS Project) est un logiciel de gestion de projet développé par Microsoft. Il offre des fonctionnalités pour planifier, suivre, et gérer des projets en permettant aux utilisateurs de définir des tâches, des ressources, des délais, et des dépendances. MS Project facilite le suivi de l'avancement du projet, la gestion des ressources, la collaboration d'équipe, et fournit des outils pour la création de tableaux de bord et de rapports visuels. Il est largement utilisé dans diverses industries pour la gestion efficace de projets de différentes tailles et complexités (GPE, 2010).

Introduction générale :

Les inondations sont parmi les aléas naturels les plus fréquents et dévastateurs à l'échelle mondiale. De 1994 à 2013, elles ont constitué 43 % des catastrophes naturelles répertoriées, affectant près de 2,5 milliards de personnes (UNISDR, 2015).

Au cours des prochaines décennies, le changement climatique, l'urbanisation et la croissance démographique devraient accroître considérablement l'impact des inondations côtières, fluviales et pluviales (Bregje K. van et al., 2017). En particulier, les zones les plus concernées sont les régions méditerranéennes (MED).(Giorgi, 2006).

Le risque d'inondation en Algérie figure parmi les dix risques majeurs qui représente un obstacle significatif au développement économique et social recensés sur le territoire selon la loi 04-20 du 25 décembre 2004 portant sur la prévention des risques majeurs et la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable (Nouri et al., 2016) . En moyenne, plus de 30 cas d'inondations sont enregistrés chaque année (Tabet-Aoul, 2008).

Comme tous les grands oueds algériens, l'oued Agrioune, drainant un bassin d'une superficie de 938,48 km^2, est réputé comme l'un des cours d'eau les plus redoutables. Il traverse plusieurs villes, dont la ville de Bordj Mira, où il se conflue avec l'oued Ait Smail, laissant présager des crues d'une dangerosité sans précédent.

Les débordements de l'oued Agrioune et de l'oued Ait Smail provoquent des inondations récurrentes dans la ville de Bordj Mira. Le dernier événement s'est déroulé le 23 novembre 2023, lorsque des pluies torrentielles ont détruit un pont récemment construit, entraînant le décès de deux personnes. Cependant, les inondations de 2009 ont laissé des séquelles importantes, submergeant le pont et l'îlot central, où se trouve la gare routière.

Des inondations plus anciennes, telles que celles de décembre 1967, février et décembre1984 et janvier 2003, qui ont laissé une empreinte mémorable dans les esprits.

Pour garantir la protection des populations et de leurs moyens de subsistance, il est primordial de mettre en place une gestion efficace des risques d'inondation. On accorde de plus en plus d'importance aux mesures qui se basent sur la nature et qui permettent de faire face au risque d'inondation (Bregje K. van et al., 2017). C'est dans cette perspective que cette étude est menée, ayant pour objectif général de déterminer le niveau de crue du projet en utilisant le modèle de simulation hydraulique HEC-RAS 1D et 2D. Ce modèle de simulation hydraulique permet de définir les limites du champ d'inondation en se basant sur une étude topographique, fournissant ainsi une évaluation précise des zones susceptibles d'être touchées par les crues de référence.

Quelles sont les étapes à suivre pour évaluer la probabilité d'une inondation lors d'un événement pluvial à venir et quelles mesures doivent être prises pour minimiser ou éliminer ce risque ?

Ce modeste travail vise à répondre à ces questions et à de nombreuses autres. Il repose sur une étude hydrologique, une simulation des écoulements dans leur état naturel, des calculs hydrauliques et une conception assistée par ordinateur. L'objectif final est de proposer des solutions d'aménagement tout en préservant l'environnement de la zone d'étude.

Dans le premier chapitre, on aborde les concepts clés tels que l'aléa, la vulnérabilité et le risque, afin de comprendre la formation d'une inondation et de pouvoir la modéliser et la cartographier. Il présente ensuite une analyse des événements marquants de l'historique national des inondations, puis une description des crues survenues dans la zone d'étude et des dommages associés. Le deuxième chapitre établit une nomenclature des caractéristiques géographiques, géologiques, hydrogéologiques et climatiques de la région d'étude, en se basant sur les données recueillies auprès des établissements concernés.

Le troisième chapitre vise à présenter, dans un premier temps, les caractéristiques physiologiques et géomorphologiques des deux sous-bassins versants en utilisant des logiciels SIG tels que Arcmap, Global Mapper et Google Earth. Ces systèmes sont conçus pour collecter, stocker, traiter, analyser et présenter tous types de données spatiales, géographiques et topographiques de la zone d'étude. Dans la deuxième partie, une étude hydrologique sera élaborée pour prévoir les débits des crues des oueds Ait Smail et Agrioune correspondant à différentes périodes de retour. Cette étude repose sur une analyse statistique fréquentielle de la série des débits disponibles en utilisant le logiciel HYFRAN.

Le quatrième chapitre se consacre au diagnostic de l'état actuel des oueds, en évaluant les hauteurs des tirants d'eau associées aux débits anticipés à partir des résultats obtenus précédemment. L'objectif est de réaliser une simulation hydraulique du comportement naturel des oueds (sans aménagement) en utilisant le logiciel HEC-RAS et l'Outil RAS Mapper. Cette démarche permet d'obtenir les profondeurs d'eau correspondantes et d'identifier les zones à risque de débordement nécessitant des aménagements.

Le cinquième chapitre a élaboré le dimensionnement hydraulique de la section d'écoulement appropriée en proposant plusieurs variantes d'aménagement. De plus, l'établissement d’une estimation financière de l'aménagement recommandé.

En sixième étape, une étude d'organisation de chantier sera faite dans le but de superviser le bon déroulement du projet, offrant ainsi une estimation du coût et du délai de réalisation de l'aménagement. Par la suite, un dernier chapitre sera consacré à la protection et à la sécurité au travail, aspects essentiels visant à assurer le bien-être des travailleurs et la prévention des accidents professionnels.

Enfin, nous terminâmes par une synthèse générale de nos résultats. Cette conclusion résume brièvement les différentes sections abordées précédemment.

CHAPITRE I :

Problématique des inondations
en Algérie dans un contexte
de changement climatique

I. CHAPITRE I :

PROBLÉMATIQUE DES INONDATIONS EN ALGÉRIE DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENT CLIMATIQUE

Introduction :

Les inondations extrêmes provoquées par les précipitations peuvent s'aggraver en cas de changement climatique futur (Hirabayashi et al., 2013) , augmentant ainsi le risque qu'elles posent pour les vies humaines, les biens et les activités économiques (Dottori et al., 2018). Essentiellement, une atmosphère future plus chaude pourrait contenir une plus grande quantité de vapeur d'eau, selon l'équation de Clausius-Clapeyron, et donc potentiellement générer plus de précipitations (Emori & Brown, 2005) . Bien que les mécanismes physiques de ce phénomène soient bien connus, les caractéristiques de tels événements dans le cadre des futurs changements climatiques dépendent des conditions régionales et locales(Takayama et al., 2023).

I.1 Définition des notions abordées :

I.1.1 Le risque :

Selon (Dervaux I, 1983), le mot risque vient de l'italien risco. Au XVIe siècle, ce mot a été présent dans deux domaines, l'un maritime où il signifie « danger lié à une entreprise », et l'autre militaire où il désigne « la chance ou la malchance d'un soldat ». En revanche,(Galland J-P, 1998) nie toute relation étymologique entre le risque et le monde maritime. (Glatron S, 2003) et (Veyret et al., 2004) relient l'apparition de ce concept à la naissance du système d'assurances vers la fin du XIVe siècle. Un système conçu par les marchands-banquiers italiens garantissant les marchandises sur leur trajet contre une prime versée par l'armateur.

La littérature est très riche en définitions. Selon (Scarwell & Laganier, 2004), le risque d'inondation peut être défini comme « un élément d'une infrastructure régionale dans la mesure où il influence le développement et l'organisation des territoires en tant que facteur limitant par les impacts passés, actuels ou potentiels des manifestations hydrologiques mais également en tant que porteur de développement en raison des effets bénéfiques que constituent les zones inondables […]. Enfin, au-delà de sa matérialité, l'inondation est également un élément du vécu quotidien qui peut être appréhendé comme un objet perçu, interprété, médiatisé ».

I.1.2 L'aléa :

L'aléa peut être défini comme étant un événement offensif d'une durée donnée et doté d'une probabilité d'occurrence sur un territoire (Griot & Ayral, 2002) Selon (Lang et al., 2009) l'aléa « est une menace caractérisée par des propriétés physiques et une probabilité d'occurrence ».(Dauphiné, André, 2001) propose d'assimiler l'aléa à une probabilité d'occurrence utilement complétée par une dimension spatio-temporelle.

En France, le Ministère de l'Écologie et du Développement Durable (MEDD,2003) a opté pour la classification suivante : « aléa courant » (période de retour de 5- 20 ans) ; « aléa rare » (période de retour de 50-200 ans) ; « aléa exceptionnel » (période de retour supérieure à 200 ans). (Ledoux, 2006) propose une répartition autre que celle adapté par MEDD, définissant les événements « rares » et « exceptionnels » comme ceux dotés respectivement d'une période de 10-100 ans et supérieure à 100 ans.

Classiquement, l'aléa est déterminé selon trois critères : « une magnitude (composante énergétique), une probabilité d'occurrence (composante temporelle) et une aire d'impact (composante spatiale) » (Beck, 2006).

I.1.3 Vulnérabilité :

Les définitions concernant le concept de vulnérabilité peuvent être citées dans l'ordre chronologique :

- La vulnérabilité est appréhendée comme le degré de perte et de dommage causé par l'aléa. Elle est souvent étudiée dans le but de mieux comprendre la manifestation de l'aléa sur le territoire (Thouret & d'Ercole, 1996).

- Une définition plus technique a été proposée par(Gendreau N, 1999) dans laquelle la vulnérabilité correspond à « la fragilité des installations humaines dans l'absolu. Autrement dit, cette notion s'appréciera de la même façon pour un élément donné, quels que soient sa position et le risque considéré. Elle est mesurée par une période de retour, ce qui lui confère la même dimension que l'aléa ».

- « À l'approche classique de la vulnérabilité, qui mesure un endommagement potentiel des biens et des personnes et ses répercussions sur l'environnement économique (…), la vulnérabilité des sociétés à travers leurs capacités à répondre à des crises potentielles ». Ici, la vulnérabilité n'est plus estimée en post-crise, mais bien avant la survenue de la catastrophe. Ainsi, on passe d'une politique de gestion de crise et de réparation de dégâts à une politique de prévention (Menad, 2012).

- Considère la vulnérabilité comme un facteur intrinsèque de la société, cette dernière étant en transformation permanente. Ainsi, la vulnérabilité est avant tout le produit de l'histoire évolutive d'une société donnée (Menad, 2012).

En général, on distingue deux termes pour décrire la vulnérabilité : la vulnérabilité directe et la vulnérabilité indirecte.

•La vulnérabilité directe désigne les éléments concrets tels que les objets matériels et les biens. Elle est employée pour évaluer la probabilité que ces biens subissent des conséquences suite à un contact immédiat avec un phénomène dangereux.(Eleutério, 2012)

•La vulnérabilité indirecte : est utilisée pour déterminer la probabilité que les actifs soient indirectement affectés par un risque ou induisent d'autres impacts(Eleutério, 2012).

I.2 La genèse des inondations :

Les crues rapides restent les principales causes des inondations. Elles sont caractérisées par leur rapidité d'apparition et la violence des pluies qui en sont à l'origine. Leur rareté en augmente leur imprévisibilité et lorsqu'elles surviennent (Boubchir, 2008) , selon (Dunne et al., 1975) : « La part essentielle de l'écoulement rapide de crue semble produite sous forme de ruissellement de surface sur de petites surfaces saturées proches des cours d'eau» et (Humbert, 1982) écrit : « Il semble plutôt que la majorité des crues soit régie par le comportement des zones saturées dans les talwegs, et notamment par les variations spatiales de leurs affleurements».

I.2.1 Le processus de genèse du ruissellement et/ou des crues :

Selon les recherches, trois ensembles fondamentaux de processus ont été identifiés pour expliquer l'émergence du ruissellement et/ou des crues. Le premier fait référence à la théorie de Horton, le deuxième concerne les aires contributives, et la troisième repose sur l'existence d'organisations pelliculaires superficielles.

I.2.2 La genèse du ruissellement selon Horton :

Le ruissellement "hortonien" se produit lorsque l'intensité des pluies dépasse la capacité d'infiltration des sols (figure I.1). Les premières pluies pénètrent dans le sol, créant une saturation superficielle à travers laquelle l'infiltration atteint la valeur de la conductivité hydraulique à saturation (K), qui dépend principalement de la texture et de la structure du sol. Ce type de ruissellement se produit sur des sols très peu perméables, tels que certains sols argileux, ou lorsque la surface du sol est compactée, comme sur les chemins, les zones fréquentées par le bétail ou les parties des champs régulièrement traversées par des engins agricoles. Ce type de ruissellement peut également être observé lors de simulations de pluie sur des sols entièrement recouverts de végétation, sans modification de l'état de surface. Une fois généré sur le versant, le ruissellement peut rejoindre le cours d'eau et provoquer une augmentation du débit, également appelée crue (Cosandey, 1990).

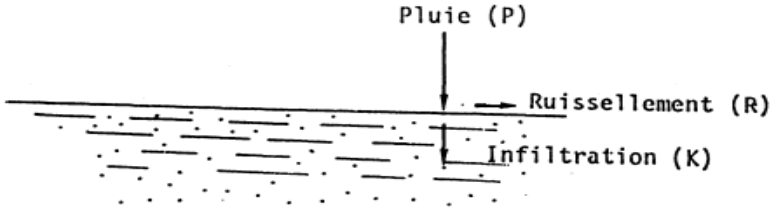


Figure I.1 : Genèse du ruissellement selon Horton (Cosandey, 1990).

I.2.3 Genèse du ruissellement et des crues dans le concept des « aires contributives » :

À l'origine de la théorie des "aires contributives" se trouve une observation fréquente selon laquelle il existe une corrélation positive entre le débit précédant une crue et le "coefficient d'écoulement rapide", qui représente le pourcentage du volume de pluie qui s'écoule pendant la crue (en supposant que toutes les autres variables restent constantes). Cette corrélation a été interprétée en suggérant que le débit de base reflète généralement l'état moyen de l'humidité du bassin. Cependant, cet argument ne peut être retenu, car il n'y a pas de relation systématique entre le débit de base et l'humidité des sols (et donc leur capacité potentielle à absorber la pluie). Le débit du cours d'eau, en régime non influencé, témoigne directement de l'état de la réserve hydrologique, ou bien quand la nappe peut être proche de la surface et l'état de la réserve hydro logique se marquer directement dans le paysage sous la forme de zones humides dont l'extension varie. De là est née l'idée que les crues n'étaient produites que par les précipitations tombant sur ces surfaces imperméables parce que saturées : l'eau peut, soit ruisseler directement en surface, soit exfiltrer directement dans le cours d'eau (figure I.2) (Cosandey, 1990).

Lorsque la crue est générée, la couverture du sol, ou même l'intensité de la pluie importent peu pour le volume de l'écoulement puisque théoriquement tout ce qui tombe sur les surfaces saturées ruisselle jusqu'au drain, ou bien participe indirecte ment à la crue par transmission de pression dans la nappe. C'est d'ailleurs à partir de cette hypothèse que différents travaux, notamment anglo-saxons, ont tenté de cerner les extensions maximales des zones saturées, soit à partir d'observations de terrain (Dunne et al., 1975) ,soit à partir de la topographie (Beven & Kirkby, 1979), afin de prévoir les écoulements de crue.

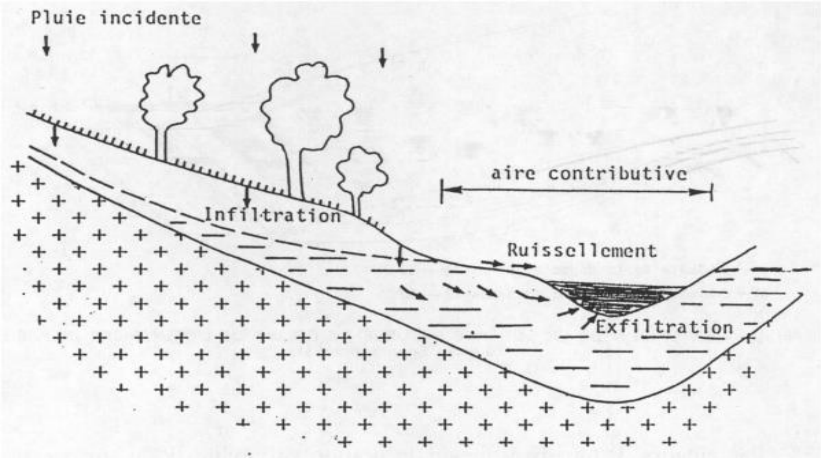


Figure I.2 : Genèse du ruissellement selon la théorie des aires contributives (Merot et al., 1981).

I.2.4 État de surface et organisations pelliculaires superficielles :

Lorsque le sol est peu ou mal couvert par la végétation, les processus de formation du ruissellement et de l'écoulement rapide de crue peuvent changer radicalement. L'impact des gouttes de pluie provoque un tassement de la surface du sol, la fragmentation des agrégats et la redistribution des particules en surface, ce qui entraîne progressivement la fermeture des pores et l'imperméabilisation du sol (Boiffin, 1984). Sur cette croûte structurale ainsi formée, le ruissellement diffus commence à se produire, transportant des particules de sol dans les micro-dépressions de la topographie où elles se déposent en couches stratifiées, renforçant encore l'imperméabilisation du sol. La présence de ces dépôts stratifiés est une preuve que le ruissellement a déjà commencé à se produire.(Cosandey, 1990).

I.3 L'évènement des inondations :

I.3.1 Dans le monde :

Dans le monde, les dégâts annuels liés aux crues ont été estimés à 50 milliards de dollars par an durant la décennie 1990-1999 et une augmentation des coûts de 4 % par an semble se dessiner (Ketrouci, 2014).

Selon la base de données internationale sur les catastrophes EM-DAT, 2 470 crues ont été recensées lors des vingt dernières années (1999 et 2009). Ces catastrophes ont provoqué environ 147 457 de victimes et les dommages ont été estimés à 372.5 milliards de Dollars (Oujbbour, 2015).

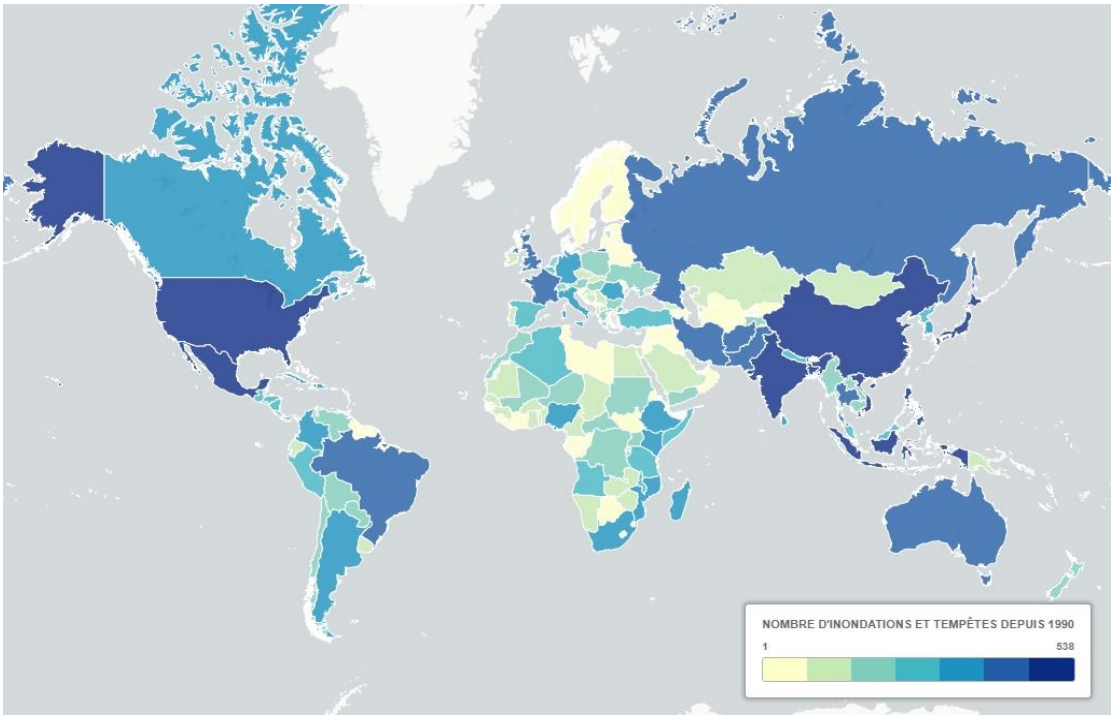


Figure I.3 : Les inondations et les tempêtes depuis 1990 (Isabelle, 2005).

Aujourd'hui, le monde assiste à des changements climatiques majeurs dans toutes ses régions (Schmidt et al., 2013) entraînant des catastrophes naturelles, notamment des inondations dues aux fortes précipitations (Bekhira et al., 2019).

•En 1931, la Chine a compté une des plus grandes inondations qui ont entraîné dans le même pays 3,7 millions de morts (Bourdé et al., 2022).

•En 1953, une violente dépression, survenue pendant une marée de vives eaux, cause des dégâts majeurs dans trois pays longeant la mer du Nord : le Royaume-Uni, la Belgique et la Hollande. Plus de 2000 personnes perdent la vie, dont 1800 aux Pays-Bas où l'état d'urgence est décrété (Isabelle, 1953).

•En 1998, les inondations du fleuve Yangtsé en 1998 (Chine) sont meurtrières secouent le bassin du Yangzi Jiang, en Chine. Le bilan provisoire s'élève à 140 morts et disparus. Plus de 28 000 habitations sont endommagées et les autorités chinoises estiment à 38 millions, le nombre de personnes affectées par ces intempéries. Les provinces les plus touchées sont celles de Jiangxi, Hubei et Hunan (au centre), Anhui, Zhejiang, Jiangsu (à l'est) et Chongqing (au sud-est) (la croix, 2020).

• En 2004, un tsunami a été induit par un séisme de magnitude 9.0, à l'Ouest de l'île de Sumatra. Les ondes du tsunami se sont propagées dans l'Océan Indien, avec une amplitude de l'ordre de 0.5 à 1 m. Leur déferlement sur les côtes a affecté tout le périmètre de l'Océan Indien, mais, c'est en Indonésie (province d'Aceh), au Sri Lanka, en Inde et en Thaïlande, que les effets ont été les plus dramatiques causant une dévastation généralisée et entraînant la perte de près de 230 000 vies (R. Brown & Chanson, 2012).

• En 2005, l'ouragan Katrina (États-Unis), un des plus puissants enregistrés dans l'histoire américaine, frappe la Louisiane ainsi que d'autres États du sud des Etats-Unis. Estimer environ de 2000 le nombre de morts liés directement à ce désastre naturel, la majorité dans l'État de la Louisiane (Isabelle, 2005).

•En 2010, les inondations au Pakistan sont Déclenchées par de fortes pluies de mousson, ces inondations ont affecté de vastes régions du Pakistan, entraînant une perte de plus de 1500 morts humaines, et déplacement de millions de personnes et des dommages considérables aux infrastructures (Khandekar, 2010).

I.3.2 En Méditerranée et le Maghreb :

La région méditerranéenne a été le théâtre de nombreuses inondations dévastatrices,

• **Inondation de Florence (Italie) en 1966 :** des crues remarquables en certains points exceptionnelles et dévastatrices ont sévi sur la moitié septentrionale d'Italie au début de novembre 1966. Elles ont notamment produit un véritable désastre Florence mais de très graves dégâts aussi dans le Frioul la Vénétie la région du Haut-Adige et sur Ombrone petit fleuve côtier

de Toscane situé au sud de Florence. Les eaux ont envahi la ville, causant la mort de plus de 100 personnes et endommageant de nombreux trésors artistiques et culturels, y compris des œuvres d'art de grande valeur (Pardé, 1968).

• **Les crues torrentielles des 12 et 13 novembre 1999 :** dans la nuit du vendredi 12 au samedi 13 novembre 1999, d'intenses précipitations se sont déversées sur quatre départements : l'Aude, bien sûr, mais aussi les Pyrénées-Orientales, le sud du Tarn et l'ouest de l'Hérault. Le bilan humain s'est alourdi : 34 morts dont 24 dans le seul département de l'Aude (Vinet, 2003).

• **Inondations en Grèce (2002) :** des pluies abondantes ont frappé plusieurs régions de la Grèce, notamment en Attique, provoquant des inondations généralisées. Seize personnes ont été tuées, dont quinze à Mandra, pour la plupart noyées après avoir été bloquées dans des sous-sols ou dans leurs voitures (Hồng Nga, 2017).

• **Inondations au Maroc (2014) :** à Guelmim, à environ 200 kilomètres au sud d'Agadir, onze nouveaux corps ont été découverts à proximité de l'oued Talmaadart. Ce secteur de Guelmim est le plus touché, avec au moins 24 morts. Six personnes, dont une fillette de neuf ans, ont notamment été emportées par les eaux en furie de l'oued Tamsourt (Talha, 2014).

• **Inondations en Tunisie (2018) :** le mercredi 17 octobre 2018, la région de Kasserine au Centre-ouest est l'une des régions les plus touchées par les inondations. Ces fortes inondations ont provoqué six morts et également d'importants dégâts comme le débordement de plusieurs cours d'eau et des pertes en terres par érosion hydrique (Hmidi, 2019).

• **Inondations en Libye (2023) :** le nord-est de la Libye a été frappé par des inondations sans précédent, provoquées par la tempête Daniel. Le bilan humain provisoire est très lourd avec au moins 3 800 morts et 5 000 disparus dans ce pays déjà ravagé par des années de guerre et de chaos.
Le déferlement d'eau dans la nuit de dimanche à lundi à Derna a rompu deux barrages en amont et provoqué des dégâts énormes dans cette ville côtière de 100 000 habitants où des pâtés de maisons entiers, des voitures et un nombre incalculable de personnes ont été emportés dans la mer Méditerranée (Heyman, 2023).

I.3.3 En Algérie :

Parmi les quatorze risques majeurs répertoriés par l'ONU, le risque d'inondation en Algérie fait partie des dix risques majeurs présents sur le territoire est cité par la loi 04-20 du 25 décembre 2004 relative à la prévention des risques majeurs et la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable (Kaada, 2004).

Selon les analyses sur une période de 163 ans, et avec seulement 107 évènements, l'ensemble des dégâts additionnés par catégorie expose les pertes humaines qui s'élèvent à 4 211 morts,

529 blessés, 144 disparus et 78 168 sinistrés ainsi que les pertes économiques cumulées qui atteignent 32,86 milliards de dinars algériens (284 millions d'euros) (Nouri et al., 2016).

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

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

I.3.4 Les causes des inondations en Algérie :

•Situations météorologiques remarquables : se traduisant par une forte pluviosité (pluies importantes, orages violents).

•Les inondations liées à l'effet de l'homme : la défaillance des réseaux d'assainissement et de collecte des eaux pluviales, le gonflement des oueds par des décombres et des détruits et d'autres agissements humains qui favorisent les dégâts lors des averses saisonnières.

•Topographie défavorable : qui associée à la forte concentration et l'effet d'urbanisation présentent de grands risques.

•Crues torrentielles : (crue-éclair) affectant le plus souvent les petits bassins.

• Grands bassins versants : résultant le plus souvent de précipitations importantes généralisées sur de grandes étendues et caractérisées par leur longue durée et la quantité de leur écoulement.

• Transport solide significatif : dans 56% des cas (Le CRSTRA, 2004).

I.4 La stratégie en Algérie de lutter contre les inondations :

Le Ministère des Ressources en Eau s'est engagé à traiter cette problématique en élaborant des études visant à protéger les agglomérations exposées aux inondations, puis en mettant en œuvre les mesures préconisées. À l'heure actuelle, des solutions de protection des villes contre les inondations sont concrètement mises en place grâce à des projets intégrés dans différents programmes de développement.

I.4.1 Le cadre réglementaire :

Loi N° 04-20 du 13 Dhou El Kaada 1425 correspondant au 25 décembre 2004 relative à la prévention des risques majeurs et à la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable ont institué dix (10) risques majeurs dont celui relatif aux risques climatiques se subdivise en 06 autres risques majeurs

I.4.2 Mesure structurelle ou protection physique :

Les digues longitudinales, barrages excréteurs et bassins de rétention, aménagement et recalibrage d'oueds... etc, sont des mesures de protection ;

I.4.3 Mesures opérationnelles :

Dispositif d'intervention, activé à chaque émission de Bulletin Météo Spécial. Ce dispositif consiste à déployer les équipes d'exploitation ONA-SEAAL, SEOR et SEACO aux points inondables à identifier ;

I.4.4 Mesures préventives :

Développement et mise en place des outils de prévention et d'alerte (systèmes perte pilotes Oued El Harrach, Oued Mekkara), modernisation des stations hydrométriques de l 'ANRH PPRI PILOTES.

Par ce que le risque zéro n'existe pas. Il est essentiel d'adopter une approche proactive face aux inondations. C'est pourquoi, dans le cadre de l'élargissement du Plan National de l'Eau, qui définit la politique de gestion et de préservation à long terme des ressources en eau, le secteur des ressources en eau s'est engagé à élaborer une stratégie nationale de gestion des risques d'inondation. Cette stratégie vise à définir les mesures structurelles et non structurelles nécessaires à moyen et long terme pour atténuer les effets néfastes de ce phénomène, en particulier la perte de vies humaines.

I.5 Les crues d'Oued Agrioune :

D'après Estimation des crues de l'oued Agrioune a son embouchure et de la crue décennale de l'oued Béni Smail à Bordj Mira, trois crues supérieures à 1000 m^3/s se sont produites au barrage entre 1957 et 1968 :

- 1400 m^3/s le 18 janvier 1958 ;
- 1009 m^3/s le 10 novembre 1967 ;
- 1300 m^3/s le 12 décembre 1967.

I.5.1 La crue de Décembre 1967 :

Le rapport DCE l'EGA décrit surtout les dégâts causés par la tempête sur les bâtiments des différents services et le débordement des petits oueds sur les routes. Ainsi que les gabions de protection de laissent droite du pont de Darguina sur L'oued Agrioune ont été emportés par la crue mettant en danger sa stabilité.

I.5.2 La crue de Février 1984 :

Le rapport d'astreinte relève les dégâts causés par la crue de l'oued Agrioune :

- La destruction de la passerelle provisoire à Bordj Mira ;
- Affouillement au niveau du masque de mur de soutènement au lieu-dit Tabazit ;
- Dégâts légers sur les terres agricole à l'embouchure de l'oued. Les inondations créent régulièrement des déchaussements et des ruptures de la conduite d'alimentation en eau potable de Bejaïa, conduite qui suit le cours de l'oued Agrioune.

I.5.3 La crue de décembre 1984 :

La crue s'est étalée sur 3 jours, les 29, 30 et 31 décembre 1984, la pointe de la crue est estimée à plus de 595 m3/s.

I.5.4 La crue de janvier 2003 :

L'hiver 2002-2003 a été particulièrement pluvieux sur le bassin de l'oued Agrioune. Il est noté 1024 mm à Bordj Mira. Le débit de pointe en entrée dans la retenue a atteint 276,6 m^3/s. Plusieurs crues faibles à moyennes se sont succédés en janvier 2003 (les 11, 17 et 25) et ont été amorties par la retenue.

I.6 Les crues d'oued Ait Smail :

I.6.1 La crue de septembre et janvier 2009 :

Les pluies torrentielles de 2009 dans l'oued Ait Smail ont entraîné une submersion totale du pont et de l'îlot central, provoquant la coupure de la route reliant les deux rives.

I.6.2 La crue de 23 Novembre 2023 :

Mercredi et jeudi, des pluies torrentielles ont touché plusieurs régions du nord de l'Algérie. À Bordj Mira, à l'est de Bejaia, un événement rare s'est produit : les eaux d'une rivière importante ont emporté un pont nouvellement construit. Heureusement, une situation plus grave a été évitée.

Les fortes pluies ont entraîné une crue exceptionnelle de la rivière Tassift Nbarthith, emportant un pont récemment érigé sur l'ancienne route nationale RN 9 à Bordj Mira. Cet incident s'est produit jeudi en début de soirée, lorsque le pont, confronté à l'ampleur des eaux provenant d'un vaste bassin versant, a cédé sous la pression de la crue.

Le pont emporté par les eaux tumultueuses de la Tassift Nbarthith a été récemment construit dans le cadre de la réhabilitation de la route des gorges de Kherrata, anciennement connue sous le nom de RN 9, reliant Béjaïa à Sétif. (TSA, 2023).

▪ Voici quelques images illustrant cette catastrophe :



Figure I.4 : Observation de l'érosion intensive du lit et des berges de l'oued, (Crédit photo : IKHLEF Roumaissa, prise le 25 novembre 2023).



Figure I.5 : Image illustrant les deux rives du pont post-catastrophe, (Crédit photo : IKHLEF Roumaissa, capturée le 25 novembre 2023).



Figure I.6 : Image témoignant de la dégradation du lit mineur de l'oued,
(Crédit photo : IKHLEF Roumaissa, capturée le 25 novembre 2023).



Figure I.7 : Image révélant la dégradation du béton sur la rive droite du pont,
(Crédit photo : IKHLEF Roumaissa, capturée le 25 novembre 2023).

Conclusion :

Ce premier chapitre a permis de fixer un cadre théorique comme base de réflexion à propos du risque d'inondation, en abordant à la fois le principal phénomène qui l'accentue, la notion de risque et ses notions connexe, les caractéristiques du risque d'inondation et comment en assurer la gestion.

Le changement climatique est de plus en plus difficilement contestable. Les conséquences du changement sont potentiellement dévastatrices, entraînent notamment un réchauffement généralisé du climat, une élévation du niveau des mers et une augmentation des phénomènes extrêmes. Ainsi, les risques dont notamment celui d'inondation sont amplifiés au sein des territoires littoraux, en particulier au sein des côtes basses (Verlynde, 2018).

La capacité à gérer l'impact de l'inondation varie également d'un pays, d'une région, d'une communauté et d'un groupe de population à l'autre. Le problème de protection contre les inondations ne possède pas de solution unique, car ce sont les conditions locales qui commandent. On peut dire qu'il y a autant de problèmes différents à résoudre que de zones inondables.

De plus, la réalisation de telle ou telle protection nécessite la réunion d'un certain nombre de conditions qui la plupart du temps limite les possibilités et les résultats. Il faut donc rechercher toujours le type de protection le mieux adapté à la zone à protéger en prenant les marges de sécurité suffisantes, car les méthodes d'études ne sont pas toujours précises (Elfetni, 2019).

CHAPITRE II :

Description de la zone d'étude.

II. CHAPITRE II :

DESCRIPTION DE LA ZONE D'ÉTUDE

Introduction :

Le deuxième chapitre de cette étude se focalise sur la présentation globale du bassin versant de la zone d'étude, offrant ainsi des indications géographiques et physiographiques qui constituent des bases essentielles pour comprendre les mécanismes hydrologiques. En effet, des paramètres tels que l'altitude, la pente et la forme du bassin versant, en lien avec la lithologie, fournissent des informations sur le type de réponse hydrologique du bassin. Cette analyse approfondie de la configuration géographique et des caractéristiques physiques du bassin versant permettra de mieux appréhender les processus hydrologiques qui y interviennent.

II.1 Description de la zone d'étude :

❁La ville de Bordj-Mira est le chef-lieu de la commune de Taskriout et le point de passage vers Sétif, Kherrata et la commune d'Aït-Smail wilaya de Bejaïa. Selon les cordonnées 36° 32′ 51″ nord, 5° 16′ 24″ Est.

❁L'Oued Agrioune traverse les villes : Kherrata, Bordj Mira, Derguina et souk el Ténine.
❁L'Oued Agrioune emprunte le défilé de Chaabet Al Akra puis débouche en mer au niveau de Souk El Ténine. Notre zone d'étude est constituée par :

- L'oued Agrioune, du barrage d'Ighil Edma au débouché en mer à Souk El Ténine, sur un linéaire d'environ de 20 km ;
- L'oued d'Ait Smail, affluent de l'oued Agrioune sur un linéaire de 1000 m en amont de la confluence,

II.2 Le bassin versant de l'oued Agrioune :

Notre zone d'étude est constituée de deux sous-bassins versants dans le bassin de l'oued Agrioune. Ils ont été sélectionnés de manière à inclure le sous-bassin de Bordj Mira, qui abrite l'oued Agrioune, ainsi que le sous-bassin Ait Smail, qui est le cours d'eau de l'oued Ait Smail, également appelé Beni Smail. Ces deux cours d'eau se rejoignent dans la ville de Bordj Mira.

II.2.1 Situation géographique :

l'oued Agrioune prend sa source dans les montagnes de Kabylie sur le flanc ouest du massif des Babor, dans la wilaya de Bejaia a environs 60 km au sud-est du chef-lieu et a environs 40 km au nord de la ville de Sétif .Dans le bassin versant de Ighil Emda qui est un sous bassin du bassin hydrographique (côtier Constantinois ouest), il nait de la confluence de trois oueds en amont de Kherrata qui sont ,Oued Berd ,Oued Atteba, et Oued Embarek , zone aujourd'hui noyée par la retenue du barrage d'Ighil Emda (Mekaouche, 2017).

En aval de Kherrata, l'oued Agrioune emprunte le défilé du Chabet El akra puis débouche en mer au niveau de Souk El Ténine. Avec une confluence avec l'Oued Ait Smail à Bordj Mira, une confluence avec l'oued Ighzer Ouftis a Darguina et une confluence avec l'oued Bourzazen (Mekaouche, 2017).

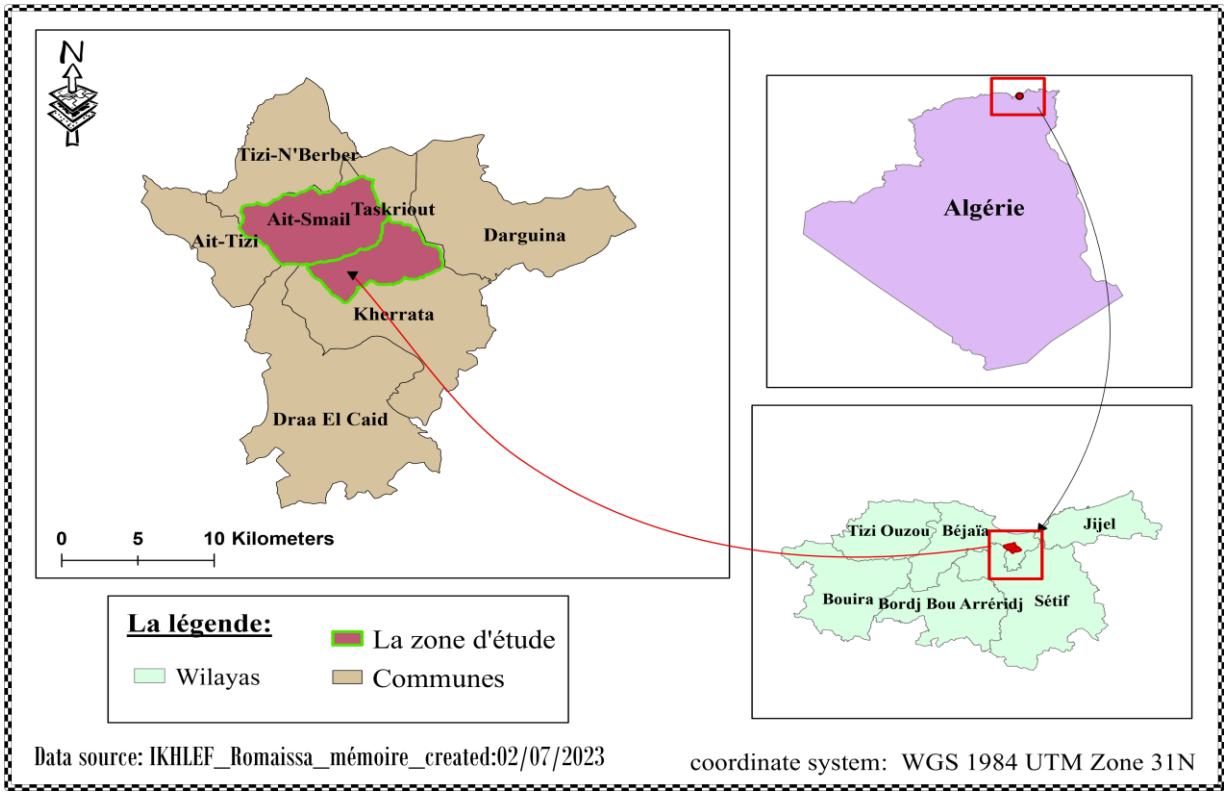


Figure II.1 : La situation de la zone d'étude au sein des wilayas et des communes.

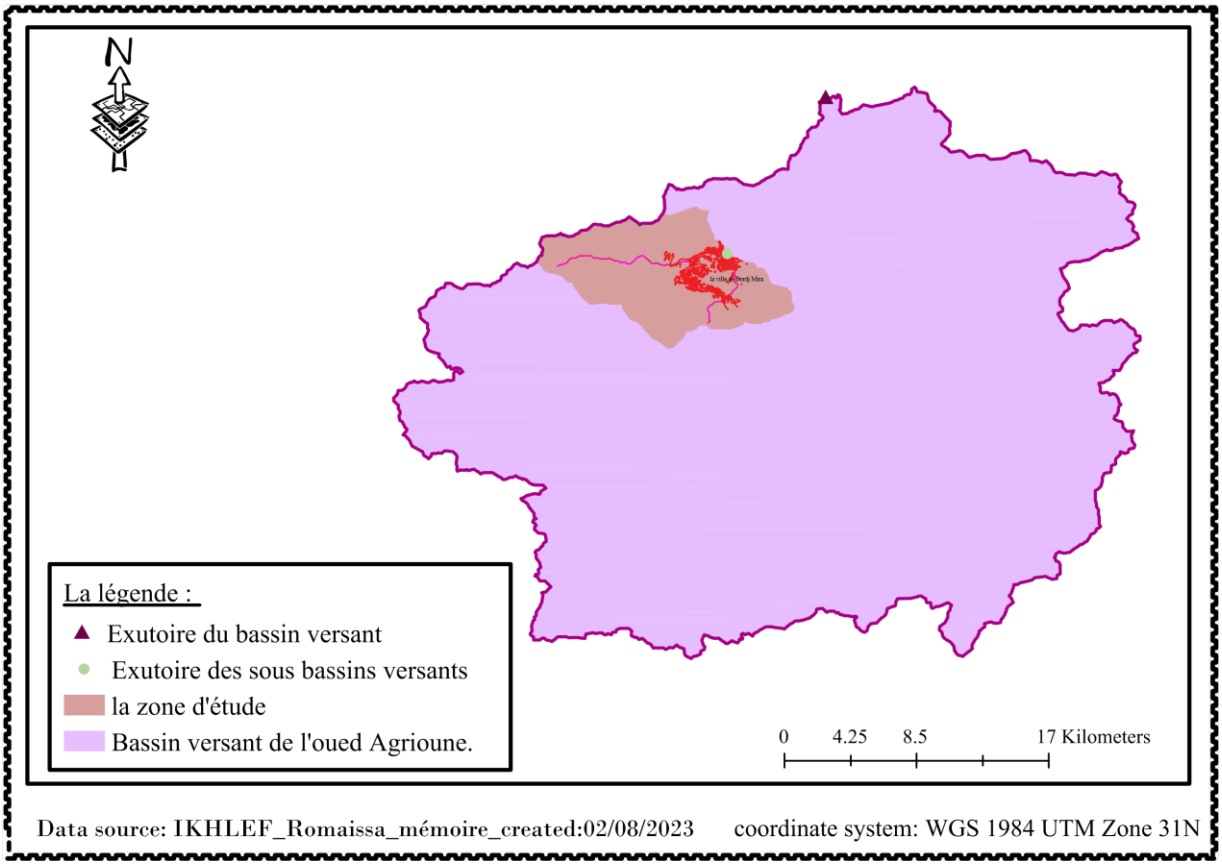


Figure II.2 : Carte de situation des sous bassins de la zone d'étude par rapport au bassin versant de l'oued Agrioune.

II.2.2 La géologie :

•L'analyse géologique du bassin versant d'Oued Agrioune s'est basée sur deux cartes, qui sont produites et actualisées par le service de l'exploration de SONATRACH attaché au ministère de l'industrie et de l'énergie de l'Algérie (Annexe n°01) :

▪Carte géologique au 1/50000 ◦ Kherrata.

▪ Carte géologique au 1/50000 ◦ Ain Roua.

•La chaine des Babor dessine une limite franche entre le bassin amont de l'Oued Agrioune à Kherrata et les bassins versants des affluents situés au nord.

❋Au niveau de Kherrata jusqu'à Bordj Mira, les massifs de Babor, de Mellal, de Takoucht, sont constitués de calcaire jurassique qu'entaillent profondément les gorges de Chaabet El Akra. Ces formations ou l'on trouve des calcaires marneux-schisteux, des calcaires massifs et dolomie,

❋Le bassin d'Ait Smail est quant à lui majoritairement recouvert des marnes schisteuses et des bouliers de pentes en contrebas des sommets calcaires dolomitiques.

II.2.3 Le réseau hydrographique :

▪L'Oued Agrioune nait de la confluence de trois oueds au niveau de virrou d'Ighil Emda, aujourd'hui barré par le barrage du même nom. L'affluant principale, l'Oued Bared prend naissance sur les versents nord du Djebel Megres. Il draine les différents massifs suivant un axe d'écoulement Sud-Nord avant d'amorcer un coude vers l'ouest à l'approche du Djebel Babor et de déboucher dans la retenue d'Ighil Emda. Dans la retenue d'Ighil Emda, l'Oued el Bared conflue avec l'Oued Attaba et l'Oued Adjiouene pour former l'Oued Agrioune.

▪À l'aval du barrage d'Ighil Emda, l'Oued Agrioune traverse la localité de kherrata avec une pente de l'ordre de 0.009 m/m. Il rejoint ensuite la retenue de Kherrata formée par le barrage de Chaabet el Akra. Ce barrage marque l'entrée des gorges de Kherrata que l'Oued Agrioune a prondément taillé dans les formations calcaires des Babors sur près de 6 Km jusqu'à Bordj Mira. La pente du cours d'eau augmente fortement pour atteindre 0.045 m/m.

▪À la sortie des gorges, la pente de l'oued Agrioune faiblit pour s'établir à 0.01 m/m. Dans la traversée de Bordj Mira, il conflue avec l'Oued Ait Smail, après avoir suivi un écoulement Sud-Nord depuis Kherrata, il prend une direction Ouest Est sur 5 Km.

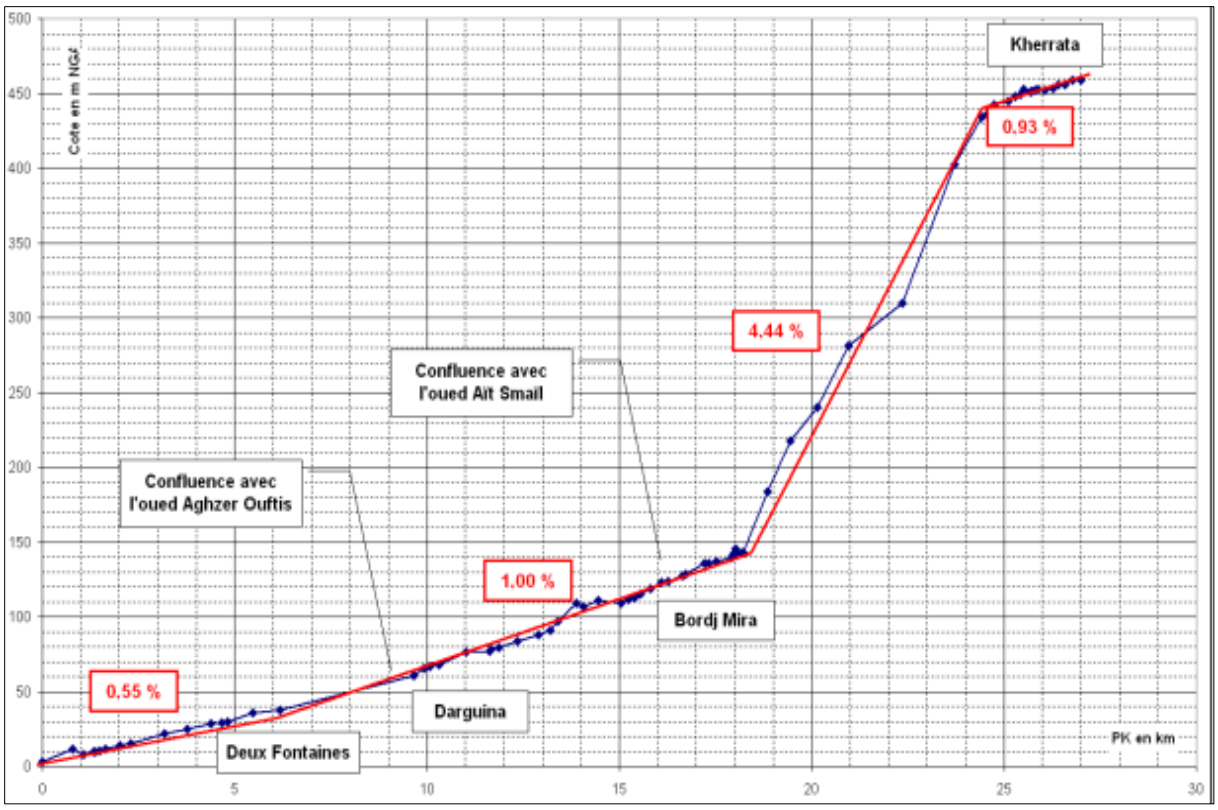


Figure II.3: Profil en long de l'oued Agrioune (LEM ,2007).

II.3 La sismicité :

En termes de sismicité, l'Algérie, compte tenu de sa localisation dans une zone à convergence de plaque est une région à forte sismicité. Au cours de son histoire, elle a subi un grand nombre de séismes destructeurs.

Le territoire national est divisé en 05 zones de sismicité croissante, définies comme suit :

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

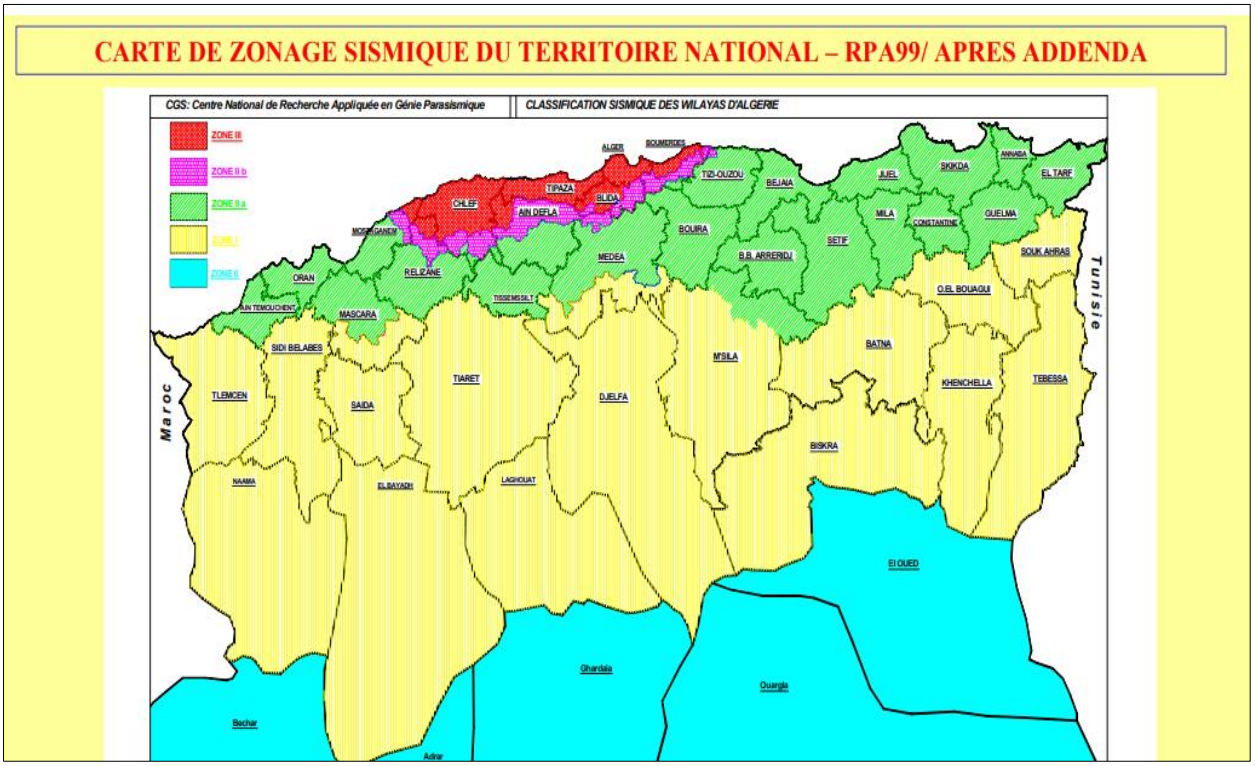


Figure II.4: Classification sismique des wilayas d'Algérie (Addenda, 2003).

▪La figure ci-dessus montre que notre zone d'étude est classée en zone II.a ; une zone à sismicité moyenne.

II.4 La situation climatologique :

★Le climat de l'Algérie est partout méditerranéen caractérisé par une période pluvieuse allant en moyenne de Septembre à Mai et un été sec et ensoleillé. L'Atlas tellien (dont notre zone fait partie) joue le rôle d'un rempart qui provoque la condensation et les précipitations d'une partie de la vapeur d'eau amenée par les vents soufflant de la mer. L'altitude entraîne une diminution générale de la température, l'éloignement de la mer, une augmentation des amplitudes diurnes et annuelles.

★Les données climatologiques sont fournies par différents secteurs spécialisés dans le relevé, le traitement et le stockage des données, tels que :

▪La température, la vitesse du vent et l'évaporation sont fournies par l'ONM (Office Nationale de Météorologie).

▪La pluviométrie est fournie au niveau de l'ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydriques) de la wilaya d'Alger.

II.4.1 La température :

Les mesures de température dans le bassin versant ont un caractère fragmentaire, malgré ça, elles seront esquissées en soulignant plus particulièrement l'importance de la saison sèche et donc l'effet déterminant de l'évapotranspiration, paramètre essentiel du déficit d'écoulement. La connaissance de la saison sèche permet ainsi de connaître la durée durant laquelle les sols sont soumis à l'effet de température qui est un agent de météorisation qui fragilise la consistance des formations superficielles et prépare le matériau pour être érodé. Les stations météorologiques existantes du bassin versant ne fournissent pas les valeurs de la température de l'aire, c'est pourquoi nous avons opté pour la station la plus proche (Houbib, 2012).

➢ Les valeurs de températures moyennes mensuelles et annuelles de la station représentative du bassin versant, avec les minima, les minimales absolues, les maximas et les maximales absolues sont présenté dans le Tableau suivant :

Tableau n° II.1: Répartition mensuelle des températures (Source : ONM).

T(C°)	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avril	Mai	Juin	Juill	Aou	Annuel
MIN	0.4	1.1	3.2	5.5	9.2	13.5	16.9	16.7	13.9	9.1	4.5	1.3	7.9
Min absolue	-6.4	-6.2	-5.6	-2.4	-2.3	3.2	7.0	8.4	4.8	-0.5	-2.8	-9.3	-9.3
Moy	4.8	6.1	8.6	11.8	15.8	20.6	24.7	24.3	20.4	14.8	9.3	5.7	13.9
Max	9.2	11	14	18.1	22.4	27.7	32.5	31.9	27	20.4	14	10.1	19.9
Max absolue	20.4	24.1	25.6	29	33.4	38	41	38.8	36.8	26	20	20.4	41

❋Le tableau n° II.1 montre que : La température moyenne annuelle est égale à 13,9°C.

❋ Les mois les plus chauds de l'année sont ceux de l'été, à savoir juin, juillet, août et septembre, au cours desquels les températures moyennes dépassent les 20°C. De novembre à mars, les températures moyennes mensuelles restent en dessous de la moyenne annuelle. Les températures minimales et maximales absolues sont de -9,30°C et 41°C, respectivement. L'amplitude thermique annuelle s'élève donc à 31,7°C.

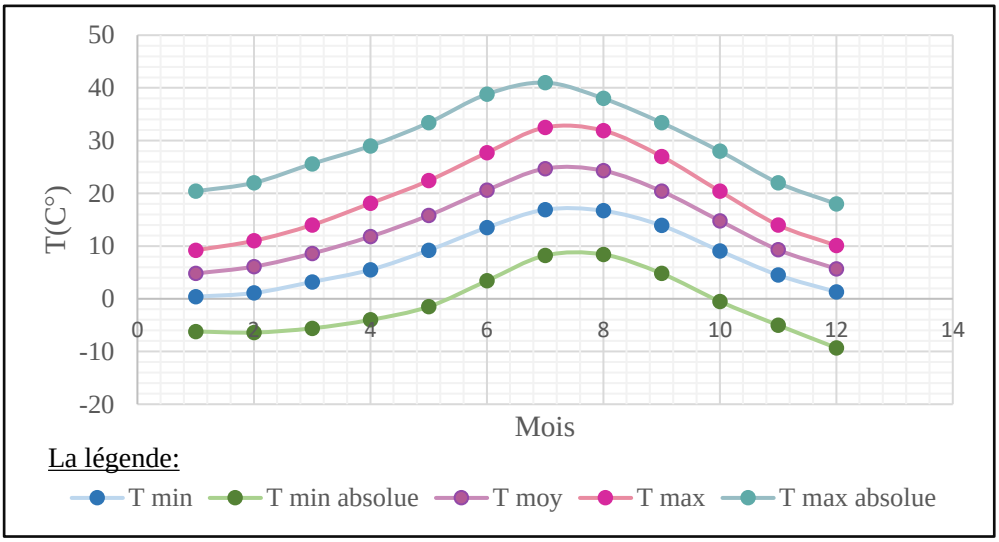


Figure II.5 : Courbes de répartition mensuelle des températures.

II.4.2 Le vent :

L'étude des vents est indispensable pour la réalisation des ouvrages d'art et dans le domaine hydraulique. Il contient de connaître leur répartition mensuelle quant à leur vitesse et leur fréquence sans pour autant négliger leur direction (Touaibia, 2015).D'après les mesures de la station de Bejaïa Aéroport pour la période (2006-2015) les vitesses du vent sont représentées ci-dessous :

Tableau n° II.2 : La répartition des vitesses des vents en m/s (2006-2015) (Source : ONM).

Vitesses	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout
V_{max}(m/s)	12.2	12.7	12.2	10.4	10.2	9.5	9.7	9	9.8	12.6	12.6	13.8
V_{min}(m/s)	9.4	9	9.2	7.1	8	8	7.1	7.7	7.1	8.2	7.4	7.2
V_{moy}(m/s)	10.5	10.7	10.8	9.5	8.9	8.6	8.5	8.6	9	9.8	10.2	10.1

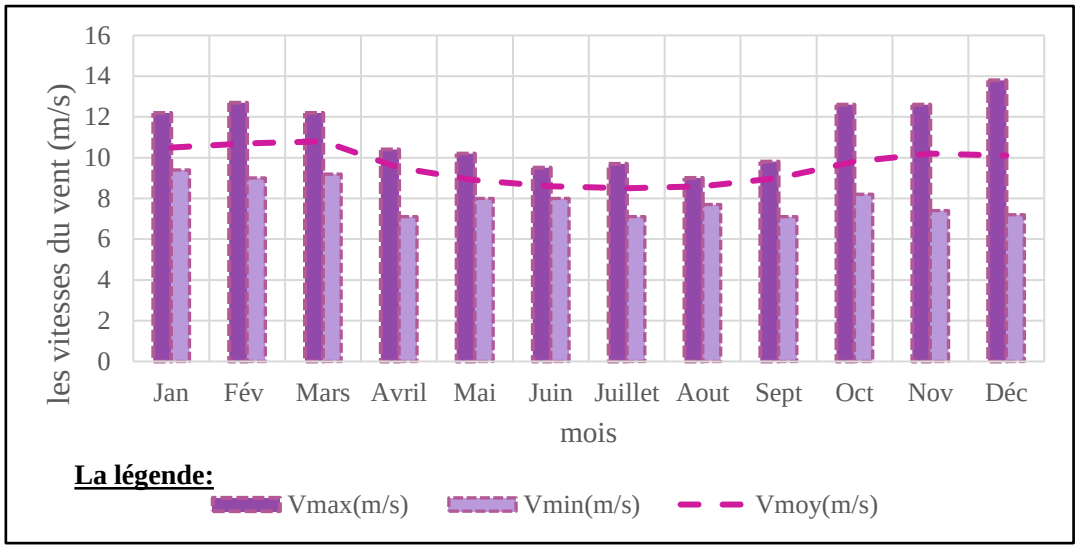


Figure II.6: Répartition des vitesses des vents en m/s (2006-2015).

II.4.3 L'humidité :

Les données sont récupérées de la station de Bejaia Aéroport pour la période (2006-2015) et résumés dans le Tableau n° II.3 :

Tableau n° II.3 : Répartition de l'humidité pour la période (2005-2016), (Source ONM).

Humidité	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout
Hum, Max	82	85	83	84	83	83	82	79	84	80	82	82
Hum, Min	73	73	73	73	73	73	72	71	71	70	67	67
Hum, Moy	77.4	77.4	78.3	78.8	78.8	77.3	75.9	76.1	76.7	76.6	76.3	77.3

II.4.4 Les précipitations :

❋Les précipitations sont définies comme l'ensemble des eaux météorologiques recueillies par un bassin versant ou une surface bien déterminée. La hauteur de précipitation est la hauteur de la lame d'eau précipitée qui s'accumulerait sur une surface horizontale si toutes les précipitations y étaient sous forme liquide (Touaibia, 2015).

❋Nous avons pris la station pluviométrique Zeïri « 150613 », dont les données sont récupérées de l'ANRH-Alger.

Tableau n° II.4 : Répartition des pluies mensuelles interannuelles de la station pluviométrique 150613.

Humidité	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Annuel
P_{moy} (mm)	38.9	36.6	53.8	76.8	72.6	53.8	54.3	48.7	42.2	20	4.5	15.3	517.4
P_{moy} (%)	7.52	7.07	10.4	14.8	14	10.4	10.49	9.41	8.16	3.87	0.8	2.96	100

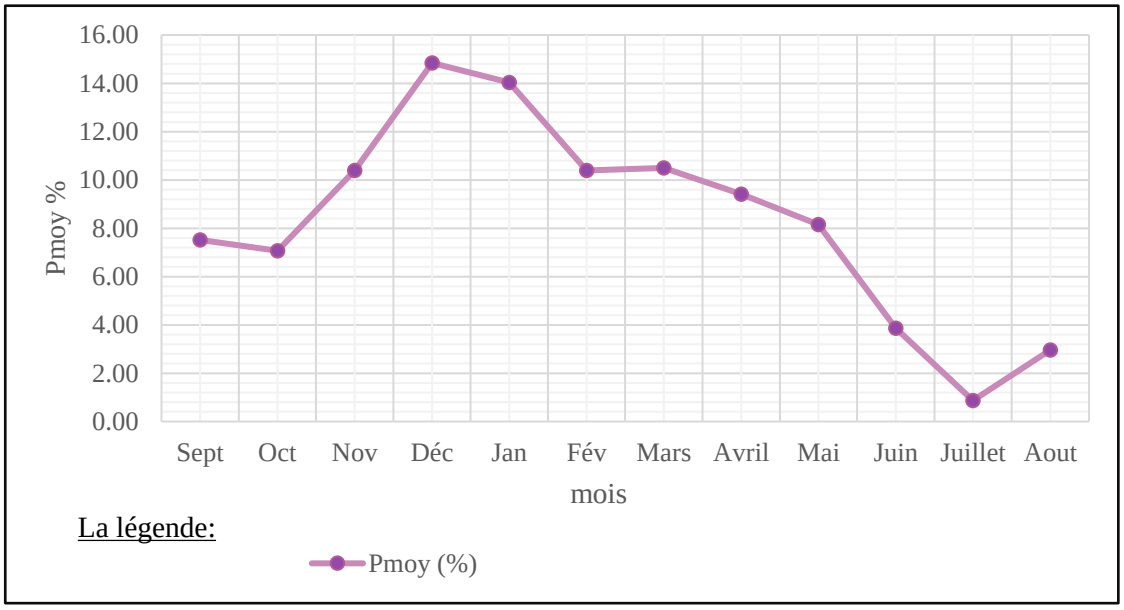


Figure II.7: Evolution de la pluviométrie mensuelle interannuelles.

❋La répartition mensuelle des pluies montre que les valeurs maximas en hiver dépassent les 14%. Les minimas sont atteints dans la période estivale 3% notamment entre juillet et août. 50% des précipitations tombent en hiver.

II.4.5 Les phénomènes climatiques secondaires :

Les phénomènes climatiques secondaires se manifestent à des échelles plus locales que les pluies, dont l'analyse repose sur l'évaluation du nombre de jours où elles se produisent chaque année. Ces phénomènes sont considérés comme des facteurs intervenant dans les processus d'érosion, à l'instar de la cryoclastie, qui provoque la fragmentation des roches due aux cycles de gel et de dégel successifs.

➢Les données concernent la période allant de 1923 à 1938, elles sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau n° II.5 : Position géographique de la station de Kherrata (Hamdani, 2012).

Station	Longitude (m)	Latitude (m)	Z(m)	Emplacement	Série d'observation
Kherrata	5.28	36.5	470	Ponts et chaussées	1913-1938

➢ Les valeurs mensuelles des phénomènes climatiques secondaires sont présentées dans le Tableau n° II.6.

Tableau n° II.6 : Nombre de jours d'apparition de caractéristiques climatiques secondaires. (Hamdani, 2012).

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Annuel
Pluie	13	12	13	9	8	5	2	2	6	9	12	13	104
Gelée blanche	6.3	3.71	0.3	0	1	2	3	4	5	5	1.9	6.6	19.4
Grêle	2.2	2.2	2.1	1.1	0.5	0.1	0	0.1	0.2	0.1	0.5	2	11.1
Orage	1.3	1.6	1.9	1.8	3.5	3.6	2.2	3.3	3.6	1.9	1.1	1.3	27.1

Conclusion :

L'étude diagnostique permet tout d'abord d'acquérir une connaissance approfondie de la zone d'étude sous tous ses aspects (géologique, climatique, hydrologique, etc.). Cela facilite la compréhension des véritables causes des inondations, qu'il s'agisse des oueds, des chaabas, ou de leur interaction. En période de crue, cette étude permet également de mieux appréhender leur comportement. De plus, elle permet d'évaluer les dégâts causés et de fournir une idée préliminaire sur les mesures envisagées avant de se lancer dans les études hydrologique et hydraulique.

L'Oued Agrioune prend sa source dans les montagnes de la Kabylie, à l'ouest du massif de Babor. La région présente un climat de l'Atlas tellien qui varie entre un climat de montagne pluvieux, froid avec des chutes de neige et un climat de plaines plus sec, chaud avec des écarts thermiques importants.

La pluviométrie totale annuelle de 517.4 mm dont 75 % des précipitations annuelles tombent en l'espace de 6 mois durant les mois de novembre et avril, et une apparition des phénomènes climatologiques secondaires tels que la gelée blanche, grêle, les orages ...

CHAPITRE III :

Étude hydrologique

III. CHAPITRE III :

ÉTUDE HYDROLOGIQUE

Introduction :

L'hydrologie est la science qui traite de la présence et de la distribution, dans le temps et dans l'espace, des eaux superficielles et souterraines de la Terre et de leurs propriétés chimiques, biologiques et physiques ainsi que de leur interaction avec l'environnement physique (OMM/UNISCO, 1992).Elle permet la compréhension des différents états de l'eau lors de sa circulation de l'atmosphère vers la Terre et de son retour vers l'atmosphère.(OMM, 2008).

L'étude hydrologique pour la réalisation d'un ouvrage hydrotechnique relève d'une importance considérable. Elle vise au final d'estimer les débits maximums pour différentes périodes de retour (10 ans, 20 ans, 50 ans, 100 ans). Dont elle consiste à :

- Délimiter les bassins versants qui se déversent dans notre zone d'étude.
- Délimiter les différentes caractéristiques des bassins versants délimités.
- Identifier les stations pluviométriques proches et calcul de la moyenne annuelle des précipitations, ainsi que de différentes fréquences (10 ans, 20 ans, 50 ans, 100 ans).
- Calcul des débits correspondant aux périodes de retour de 10 ans, 20 ans, 50 ans et 100 ans en utilisant des formules empiriques.

III.1 Bassin versant :

III.1.1 Caractéristiques principales du bassin versant :

Le bassin versant ou d'alimentation au droit d'une section de mesure. Est défini comme la totalité de la surface topographique drainée par ce cours d'eau et ses affluents en amont de cette section. Tous les écoulements qui prennent naissance à l'intérieur de cette surface topographique passe obligatoirement par la section de mesure pour poursuivre leur trajet à l'aval.

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

III.1.1.1 Caractéristiques géographiques :

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

▪Longitude :X= 587.113 Km ;

▪Latitude : Y = 4063.897 Km ;

▪L'altitude : Z = 132m.

III.1.1.2 Caractéristiques morphologiques :

Les caractéristiques physiographiques d'un bassin versant influencent fortement sa réponse hydrologique, et notamment le régime des écoulements en période de crue ou d'étiage. Le temps de concentration T_c qui caractérise en partie la vitesse et l'intensité de la réaction du bassin versant à une sollicitation des précipitations, est influencé par diverses caractéristiques morphologiques : en premier lieu, la taille du bassin (sa surface), sa forme, son élévation, sa pente et son orientation. A ces facteurs s'ajoutent encore le type de sol, le couvert végétal et les caractéristiques du réseau hydrographique. Ces facteurs, d'ordre purement géométrique ou physique, s'estiment aisément à partir de cartes adéquates ou en recourant à des techniques digitales et à des modèles numériques.

O La surface et le périmètre :

La surface du bassin versant (en km^2) est l'aire de réception des précipitations et d'alimentation des cours d'eau, les débits vont donc être en partie reliés à sa surface. Elle est donc définie comme la totalité de la surface topographique drainée par un cours d'eau et ses affluents à l'amont de cette section. Tandis que le périmètre (km) représente toutes les irrégularités du contour ou de la limite du bassin versant. Le contour du bassin est constitué par une ligne joignant tous les points les plus élevés. Il n'influence pas directement l'état d'écoulement du cours d'eau au niveau du bassin versant (Faye, 2018) **.**
Les paramètres susmentionnés sont déterminés par le logiciel ArcGIS sur le MNT de notre zone d'étude.

OLa longueur du thalweg principal :

Un talweg correspond à la ligne formée par les points ayant la plus basse altitude, soit sans une vallée, soit dans le lit d'un cours d'eau.

III.1.1.3 Caractéristiques géométriques :

▸ L'indice de compacité de Gravelius (K_G) :

L'indice de compacité renseigne sur la forme du bassin versant qui a une influence sur le débit de crue et donc sur l'allure de l'hydrogramme, résultant d'une pluie donnée.

$$K_G = \frac{P}{2\pi\sqrt{\frac{S}{\pi}}} = 0.28 \times \frac{P}{\sqrt{S}} \qquad \text{(III.1)}$$

Avec :

- S : Superficie du bassin (Km^2) ;
- P : Périmètre du bassin (Km) ;
- K_G : Indice de compacité de Gravelius (1914) dénommé coefficient de compacité (Compactness Coefficient).

Pour

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

Plus le K_G est grand, plus le bassin versant sera allongé, plus le temps que met une goutte d'eau tombée sur le point le plus éloigné en amont du bassin versant pour arriver à l'exutoire sera important d'où la crue sera moins violente. Donc l'indice de compacité est proportionnellement lié au temps de concentration Tc.

o Le rectangle équivalent ou rectangle de Gravelius :

La notion de rectangle équivalent a été introduite dans l'étude géomorphologique des bassins et elle permet la comparaison des bassins entre eux de point de vue de l'influence de la forme sur l'écoulement, en possédant la même superficie et le même périmètre que le bassin considéré et par conséquent le même indice de compacité.

Le périmètre et la surface du rectangle sont respectivement :

$$P = 2 \times (L_r + l_r) \qquad \text{(III.2)}$$

$$\text{Et} \quad S = L_r \times l_r \qquad \text{(III.3)}$$

La longueur L_r et la largeur l_r en Km sont données par la résolution de P et S :

$$K_G = 0.28 \times \frac{P}{\sqrt{S}} \ldots \qquad \text{(III.4)}$$

De ces relations (III.2) ;(III.3) et (III.4) on obtient une équation de 2ème degré qui admet deux solutions Lr ; lr :

$$L_r = \frac{K_G\sqrt{S}}{1.128}\left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.128}{K_G}\right)^2}\right) \qquad (III.5)$$

$$l_r = \frac{K_G\sqrt{S}}{1.128}\left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.128}{K_G}\right)^2}\right) \qquad (III.6)$$

Avec :

- L_r et l_r : la longueur la largeur du rectangle (km)
- S : la surface du bassin versant (km^2).
- K_G : l'indice de compacité.

Coefficient d'allongement :

Ce coefficient est obtenu par la relation suivante :

$$C_a = \frac{{L_{cp}}^2}{S} \qquad (III.7)$$

Avec :

- L_{cp} : longueur du talweg principal ;
- S : la surface du bassin versant (km^2).

•Ce coefficient fournit des informations sur le comportement hydrologique de la zone étudiée :

Un coefficient d'allongement élevé suggère un bassin versant plus allongé. Ce dernier peut influencer le mode d'écoulement de l'eau à travers le réseau hydrographique, ayant éventuellement un temps de concentration plus court. Cependant, il peut également réagir plus rapidement aux précipitations, entraînant des crues plus rapides.

•Les paramètres hydro-morphométriques du bassin versant sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau n°III.1 : Les paramètres hydro-morphométriques des sous bassins.

Désignation		Symbole	Unité	Sous bassins versants	Valeur
Superficie		S	Km^2	Ait Smail	41.22
				Bordj Mira	24.73
Périmètre		P	Km	Ait Smail	28.33
				Bordj Mira	25.43
Indice de compacité de Gravilus		K_G	/	Ait Smail	1.24
					BV moins compact.
				Bordj Mira	1.43
					Bassin est allongé
Longueur du Talweg principale		L_{cp}	Km	Ait Smail	10.98
				Bordj Mira	9.64
Coefficient d'allongement		C_a	/	Ait Smail	2.92
				Bordj Mira	3.76
Rectangle équivalent	**Longueur**	L	Km	Ait Smail	9.99
				Bordj Mira	10.18
	Largeur	l		Ait Smail	4.13
				Bordj Mira	2.43

III.1.1.4 Caractéristiques hydrographiques :

▶Étude du relief :

L'influence du relief sur l'écoulement se conçoit aisément, car de nombreux paramètres hydrométéorologiques varient avec l'altitude (précipitations, températures, etc.) et la morphologie du bassin. En outre, la pente influe sur la vitesse d'écoulement. Le relief se détermine-lui aussi au moyen d'indices ou de caractéristiques suivants :

▪La courbe hypsométrique ;

▪L'altitude moyenne ;

▪L'indice de pente globale I_g ;

▪L'indice de pente roche I_p ;

▪Densité de drainage Dg.

a. Courbe hypsométrique :

▪L'hypsométrie fait référence à la proportion relative d'une zone à différentes élévations dans une région, et la courbe hypsométrique est une courbe de relation zone-élévation qui décrit la distribution de la zone par rapport à l'élévation (Strahler, 1952).

▪Pour estimer ces paramètres on doit présenter la répartition hypsométrique après planimétrie des aires partielles comprises entre les courbes de niveau maîtresses et les différentes côtes.

▪La carte hypsométrique obtenue à partir du Modèle Numérique du Terrain (MNT), montre l'existence des altitudes essentiellement faibles d'environ 132 m au niveau de l'exutoire et au fur et à mesure qu'on s'éloigne, les altitudes deviennent de plus en plus élevées jusqu'à atteindre l'altitude maximale de 1870m (figure III.1).

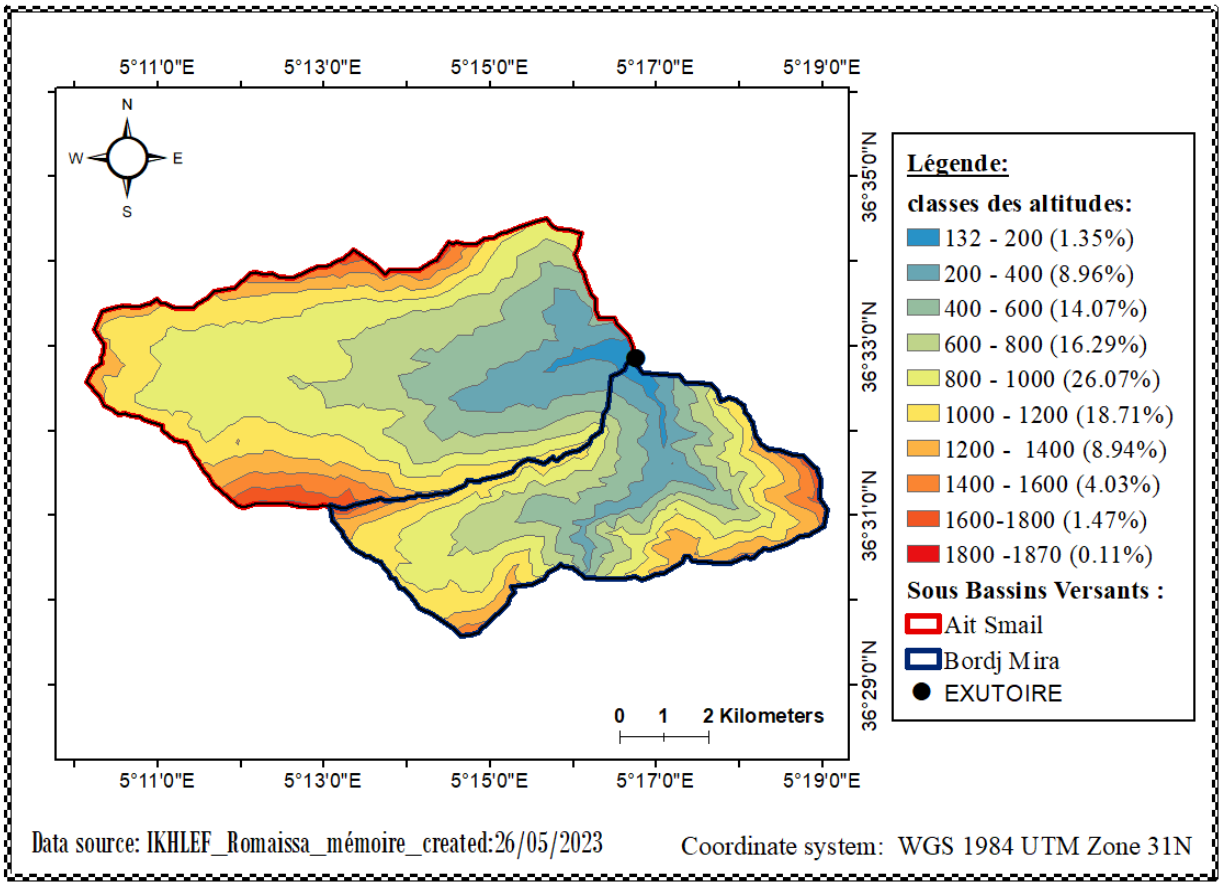


Figure III.1 : Carte hypsométrique des sous bassins versants Bordj Mira et Ait Smail.

▪La répartition des surfaces élémentaires et leurs cumule en fonction des altitudes ont été obtenues avec logiciel ArcGIS donnés sous forme des tableaux et la répartition des surfaces et les courbes hypsométriques de chaque sous bassin sont représentées ci-dessous :

Tableau n°III.2 : Paramètres Hypsométriques de la zone d'étude.

Altitude	Élévation(m)	Surface partielle (km^2)	Surface partielle (%)	Surface cumulées (%)
132-200	166	0.892302	1.35	100
200-400	300	5.907712	8.96	98.65
400-600	500	9.278756	14.07	89.69
600-800	700	10.742853	16.29	75.62
800-1000	900	17.196444	26.07	59.33
1000-1200	1100	12.338541	18.71	33.26
1200-1400	1300	5.895967	8.94	14.55
1400-1600	1500	2.659546	4.03	5.61
1600-1800	1700	0.96758	1.47	1.58
1800-1870	1835	0.071865	0.11	0.11

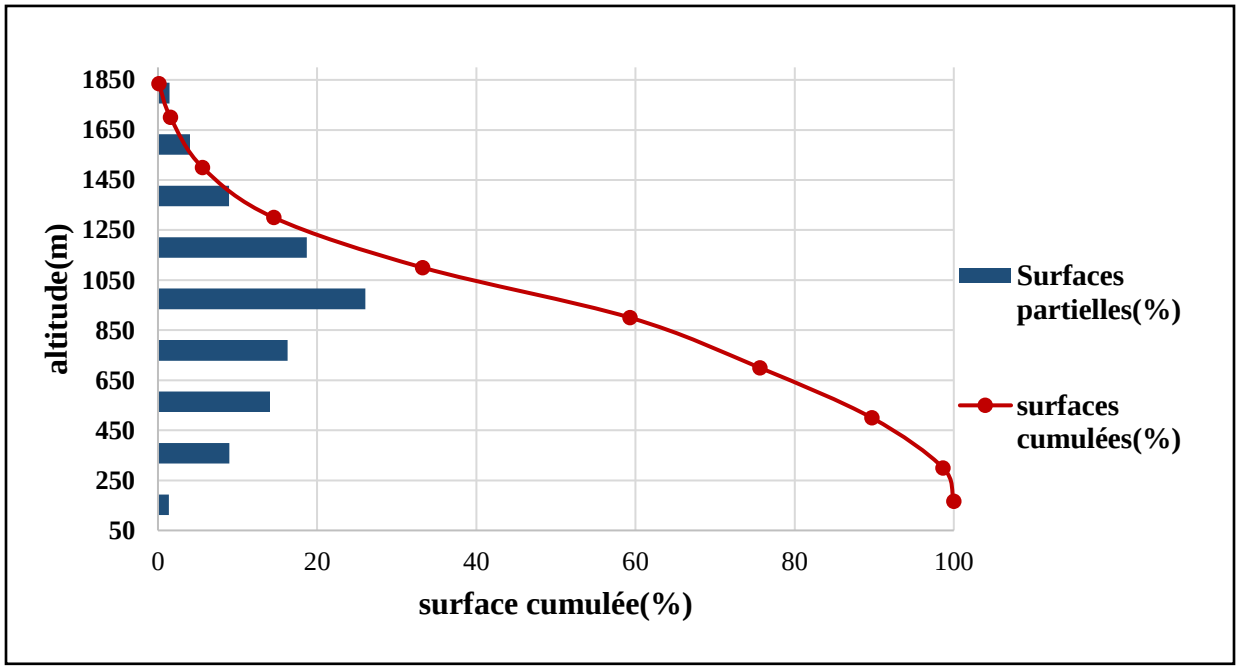


Figure III.2 : Répartition des surfaces et la courbe hypsométrique de la zone d'étude.

Tableau n°III.3 : Paramètres Hypsométriques du sous bassin versant « Ait Smail ».

Altitude	Élévation(m)	Surface partielle (km^2)	Surface partielle (%)	Surface cumulées (%)
133-200	166.5	0.5572	1.35	100
200-400	300	3.488428	8.46	98.65
400-600	500	5.37347	13.04	90.18
600-800	700	6.317322	15.33	77.15
800-1000	900	11.832519	28.71	61.82
1000-1200	1100	7.631989	18.52	33.11
1200-1400	1300	3.334732	8.09	14.60
1400-1600	1500	1.849438	4.49	6.51
1600-1800	1700	0.760158	1.84	2.02
1800-1870	1835	0.071865	0.17	0.17

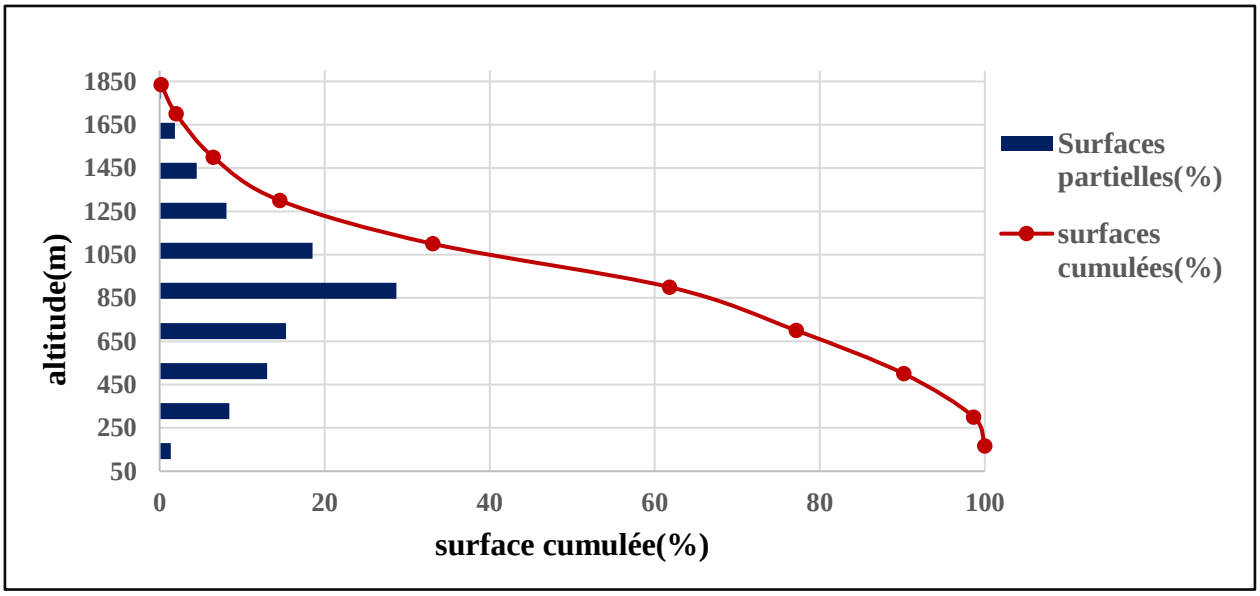


Figure III.3 : Répartition des surfaces et la courbe hypsométrique du sous bassin versant Ait Smail.

Tableau n°III.4 : Paramètres Hypsométriques du sous bassin versant « Bordj Mira ».

Altitude	Élévation(m)	Surface(km^2)	Surface partielle (%)	Surface cumulées (%)
132 - 293.5	212.35	1.158697	4.69	100
293.5 - 455	374.25	2.613278	10.57	95.31
455 - 616.5	535.75	3.226826	13.05	84.74
616.5 - 778	697.25	3.518267	14.23	71.69
778 - 939.5	858.75	4.193568	16.96	57.46
939.5 - 1101	1018.25	4.400399	17.80	40.50
1101 - 1262.5	1181.75	3.000314	12.14	22.70
1262.5 - 1424	1343.25	1.759635	7.12	10.57
1424 - 1585.5	1504.75	0.605275	2.45	3.45
1585.5 - 1747	1666.25	0.247754	1.00	1.00

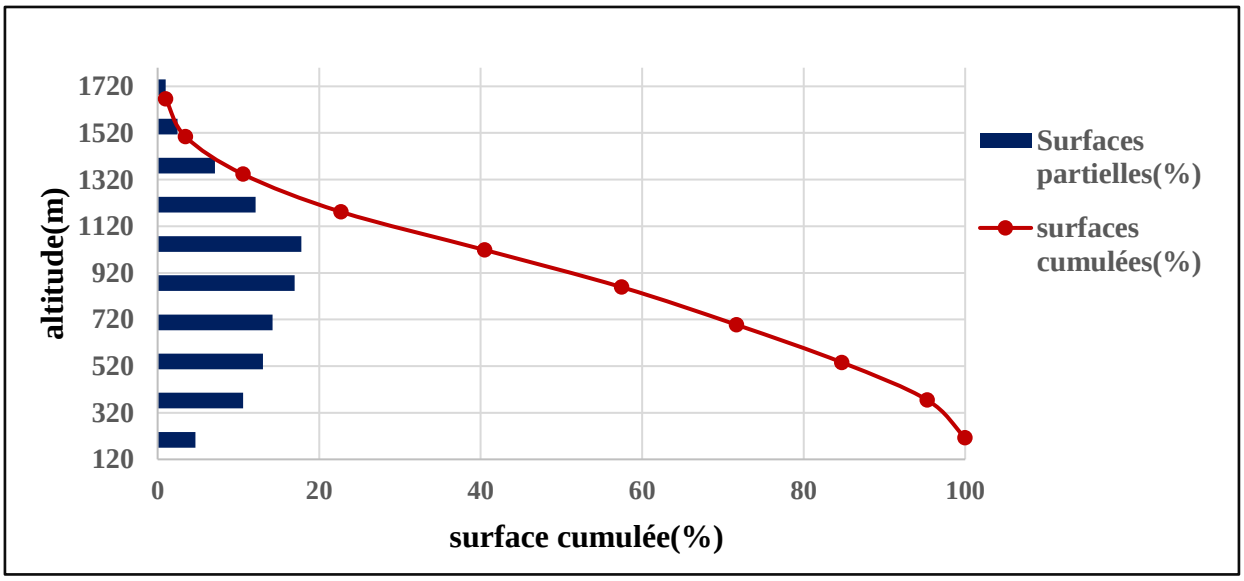


Figure III.4 : Répartition des surfaces et la courbe hypsométrique du sous bassin versant Bordj Mira.

b. Détermination des altitudes :

•Altitude maximale et minimale « H_{max}, Hmin » :

Elles déterminent l'amplitude altimétrique du bassin versant et interviennent aussi dans le calcul de la pente, déterminés d'après la carte topographique.

•Altitude moyenne « H_{moy} » :

L'altitude moyenne du bassin est un indice important qui intègre et présente l'influence de la zonalité climatique verticale et elle est déterminée par la somme du Produit des surfaces partielles Si comprises entre les courbes de niveau, et des altitudes moyennes correspondantes Hi.

Analytiquement :

$$H_{moy} = \sum \frac{S_i \times H_i}{S} \qquad \text{(III.8)}$$

Si : surface partielle entre deux courbes de niveau (Km^2) ;
Hi : Altitude moyenne entre deux courbes de niveau consécutives n-1 et n en (m) ;
S : Superficie du bassin versant (Km^2).

•L'altitude médiane « $H_{méd}$ » :

▪ L'altitude médiane **$H_{5\%}$:** c'est la projection du point qui correspond à 5% de la surface cumulée sur la courbe hypsométrique.

▪L'altitude médiane **$H_{50\%}$** : correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 50% de la surface totale du bassin, sur la courbe hypsométrique. Cette grandeur se rapproche de l'altitude moyenne dans le cas où la courbe hypsométrique du bassin concerné présente une pente régulière.

▪ L'altitude médiane **$H_{95\%}$** : c'est la projection du point qui correspond à 95% de la surface cumulée sur la courbe hypsométrique.

Tableau n°III.5 : caractéristiques altimétriques des sous bassins versants.

Sous bassin versant	**H_{max}**	**H_{min}**	**H_{moy}**	**$H_{5\%}$**	**$H_{50\%}$**	**$H_{95\%}$**
Ait Smail	1870	133	869.20	1650	984	384
Bordj Mira	1747	132	838.08	1420	920	384

c. Les indices de pente :

▪Le but de ces indices est de caractériser les pentes d'un bassin versant et de permettre des comparaisons et des classifications.

▪ Elle influence directement le débit de pointe lors d'une averse.

▪La carte des pentes donne la topographie générale de la région. La plus grande partie de la carte est occupée par des pentes fortes. Au niveau de l'exutoire, les pentes deviennent très faibles avec un relief plat (figure III.5).

▪Ainsi que la carte des courbes de niveaux qui représente une carte topographique dont le relief représenté par un système de courbes de niveau équidistantes (figure III.6).

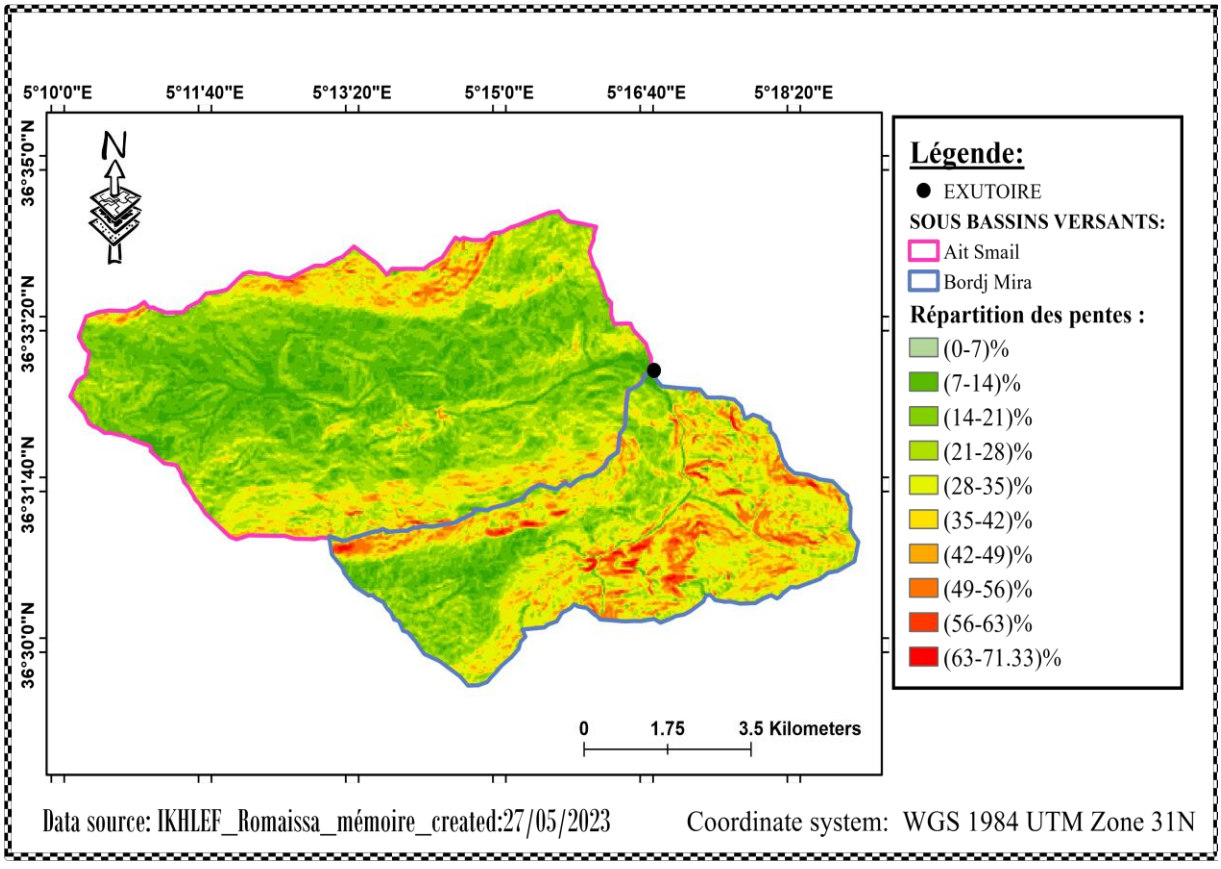


Figure III.5 : Carte des pentes pour les sous bassins versants Bordj Mira et Ait Smail.

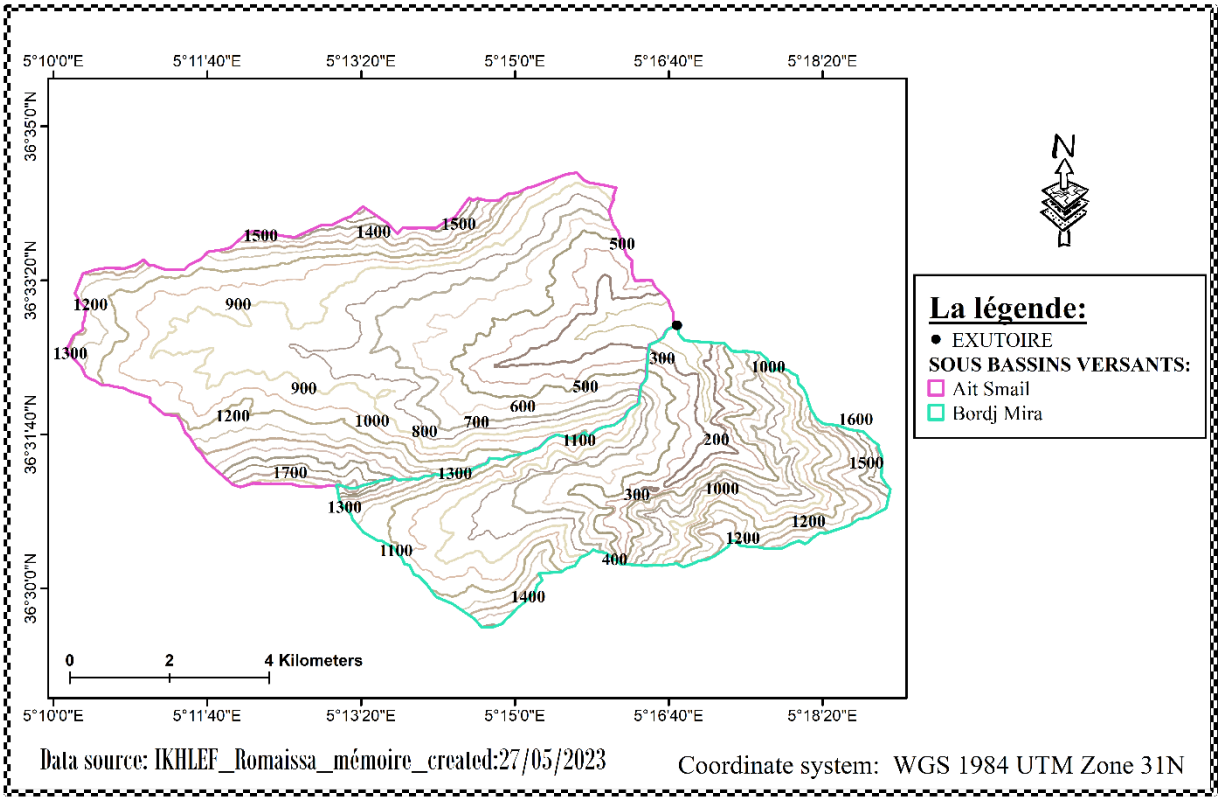


Figure III.6 : Carte des courbes de niveaux des sous bassins versants Bordj Mira et Ait Smail.

★La pente des sous bassins versants :

Elle est définie par la formule suivante :

$$I_{BV} = \frac{(H_{max} - H_{min})}{L_{cp}} \qquad \text{(III.9)}$$

Avec :

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

H_{max} et H_{min} : Altitudes maximale et minimale (m).

★La pente moyenne des sous bassins versants :

La pente moyenne est une caractéristique importante qui renseigne sur la topographie du bassin. Elle est considérée comme une variable indépendante. Elle donne une bonne indication sur le temps de parcours du ruissellement direct (donc sur le temps de concentration Tc) et influe directement sur le débit de pointe lors d'une averse (Touaibia, 2015).

▪La méthode proposée par Carlier et Leclerc (1964) consiste à calculer la moyenne pondérée des pentes de toutes les surfaces élémentaires comprises entre deux altitudes données. Une valeur approchée de la pente moyenne est alors donnée par la relation suivante :

$$I_{mBV} = \frac{\Delta H(0.5L_1 + L_2 + L_3 \ldots\ldots + 0.5L_n)}{S} \qquad \text{(III.10)}$$

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

Tableau n°III.6 : pente moyenne de sous bassin Ait Smail.

Courbes de niveaux	**Longueur(km)**	$\Delta H(m)$	**Surface (Km^2)**	**I_{mBV} (m/km)**
200	3.568	100	41.22	**420.27**
300	7.034			
400	9.210			
500	9.327			
600	10.941			
700	12.274			
800	15.647			
900	23.483			
1000	19.802			
1100	17.756			
1200	14.893			
1300	11.567			
1400	8.545			
1500	6.702			
1600	1.130			
1700	2.499			
1800	1.286			

Tableau n°III.7 : pente moyenne de sous bassin Bordj Mira.

Courbes de niveaux	Longueur(km)	$\Delta H(m)$	Surface (Km^2)	I_{mBV} (m/km)
200	3.772	100	24.73	**707.045**
300	8.758			
400	13.735			
500	15.374			
600	15.532			
700	15.939			
800	17.137			
900	18.100			
1000	18.411			
1100	15.356			
1200	13.062			
1300	9.945			
1400	5.746			
1500	3.215			
1600	2.280			
1700	0.755			

Indice de pente M. ROCHE « I_p » :

I_p est la moyenne de la racine carrée des pentes mesurées sur le rectangle équivalent, et pondérée par les surfaces comprises entre 2 courbes de niveau Hi est Hi-1. Il est donné par la Formule suivante :

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_i^n \sqrt{S_i (H_i - H_{i-1})} \qquad \text{(III.11)}$$

Avec :
- L : longueur de rectangle équivalent (m).
- Si : surface partielle (%) comprise entre 2 courbes de niveau consécutives ;

Hi et Hi-1 : la distance entre les courbes de niveau appelée aussi dénivelée.

★Indice de pente globale « Ig » :

Cet indice permet de déduire la nature du relief en se référant à la classification de l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre – Mer (ORSTOM) depuis 1998 sous l'appellation de l'Institut de recherche pour le développement (IRD).
Il est défini comme étant le rapport de l'altitude comprise entre 5% et 95% de la surface du bassin et la longueur du rectangle équivalant. On prend deux points S1, est S2 sur l'axe de l'abscisse telle que 95% de la surface du bassin soit comprise entre ces deux valeurs et que 5% de la surface totale du bassin soit inférieure à S1 et 5% soit supérieure à S2 (Touaibia, 2015).Il est donné par la formule suivante :

$$I_g = \frac{D}{L} = \frac{(H_{5\%} - H_{95\%})}{L} \qquad \text{(III.12)}$$

Avec :

D : Dénivelée entre H5% et H95% en (m).
L : Longueur du rectangle équivalent en (m).
$H_{5\%}$ et $H_{95\%}$ sont respectivement les altitudes correspondantes à S5% et S95%(m).

Tableau n°III.8 : Classification ORSTOM du relief à partir de l'indice de pente global.

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	I_g>0.1

Tableau n°III.9 : Indice de pente global pour les deux sous bassins versants.

SBV	$H_{5\%}$ (m)	$H_{95\%}$ (m)	L (m)	I_g (m/m)	Classification
Ait Smail	1650	384	9900	**0.13**	**Relief très fort**
Bordj Mira	1420	384	10180	**0.102**	**Relief très fort**

Indice de pente moyenne d'un cours d'eau « I_c » :

La pente moyenne du cours d'eau détermine la vitesse avec laquelle l'eau se rend à l'exutoire du bassin donc le temps de concentration. Cette variable influence donc sur le débit observé. Une pente abrupte favorise et accélère l'écoulement superficiel tandis qu'une pente douce ou nulle donne à l'eau le temps de s'infiltrer. Entièrement ou en partie dans le sol. Le calcul des pentes moyennes et partielles de cours d'eau s'effectue à partir du profil longitudinal du cours d'eau principal et de ses affluents. La méthode la plus fréquemment utilisée pour calculer la pente longitudinale du cours d'eau consiste à diviser la différence d'altitude entre les points extrêmes du profil par la longueur totale du cours d'eau (Touaibia, 2015).

Il est donné par la formule suivante :

$$I_c = \frac{\Delta H}{L} \qquad \text{(III.14)}$$

Avec :

- ΔH : dénivelée entre deux points suffisamment distants (m).
- ΔL : distance entre ces deux points (km).

La dénivelée spécifique « Ds » :

▪Puisque l'indice de pente globale décroît pour un même bassin lorsque la surface augmente. La dénivelée spécifique Ds ne présente pas cet inconvénient (Touaibia, 2015).
La dénivelée spécifique est définie par la formule suivante :

$$D_s = I_g\sqrt{S} = D\sqrt{\frac{I}{L}} \qquad \text{(III.15)}$$

Avec :

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

▪La dénivelée spécifique « Ds » permet d'utiliser la classification de l'O.R.S.T.O.M. (Tableau n° III.10) qui permet définir les différents types de relief des bassins versants quelque soient leurs superficies. La dénivelée spécifique est définie comme suit :

Tableau n°III.10 : Classification des reliefs d'après ORSTOM,1963.

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

Les résultats de calcul des indices de pente sont compilés dans les Tableaux n° III.11 et n° III.12, ci-après :

Tableau n°III.11 : Résultats de calculs des pentes et la dénivelée spécifique du sous bassin « Ait Smail ».

Paramètres	Symboles	Unités	Valeurs
Pente du bassin versant	I_{BV}	m/Km	**158.20**
Pente moyenne de bassins versant	I_{mBV}	m/Km	**420.27**
Indice de pente globale	I_g	m/m	**0.13**
Indice de pente moyenne du cours d'eau	I_c	m/m	**0.17**
Indice de pente de Roche	I_p	%	**3.87**
Dénivelée spécifique	D_s	m	**834.64**
Relief	/		**Très fort**

Tableau n°III.12 : Résultats de calculs des pentes et la dénivelée spécifique du sous bassin « Bordj Mira ».

Paramètres	Symboles	Unités	Valeurs
Pente du bassin versant	I_{BV}	m/Km	**167.53**
Pente moyenne de bassins versant	I_{mBV}	m/Km	**707.045**
Indice de pente globale	I_g	m/m	**0.102**
Indice de pente moyenne du cours d'eau	I_c	%	**0.15**
Indice de pente de Roche	I_p	%	**3.76**
Dénivelée spécifique	D_s	m	**507.24**
Relief	/		**Très fort**

III.1.1.5 Étude du réseau hydrographique :

★Caractéristiques du réseau hydrographique :

On appelle ainsi l'ensemble des canaux de drainage naturels, permanents ou temporaires, par où s'écoulent les eaux provenant du ruissellement ou restituées par les nappes souterraines, soit sous forme de sources, soit par restitution continue le long du lit du cours d'eau (Roche, 1963).

La forme et la texture du réseau de drainage, sont étudiées pour identifier l'influence exercée par le sol et le substratum sur ces réseaux (Parvis, 1950).

L'analyse des réseaux hydrographiques et ses hiérarchisations, joue un rôle important dans la compréhension des mécanismes de ruissellement et de la genèse des crues. On peut classifier les réseaux hydrographiques selon deux facteurs (Belazreg, 2019) :

★Hiérarchisation du réseau :

•Classification de Strahler (1957) :

Cette classification permet de décrire sans ambiguïté le développement du réseau de drainage d'un bassin de l'amont vers l'aval. Elle se base sur les règles suivantes :

▪ Tout cours d'eau dépourvu de tributaires est d'ordre 1 ;

▪ Le cours d'eau formé par la confluence de deux cours d'eau d'ordre différent prend l'ordre du plus élevé des deux ;

▪ Le cours d'eau formé par la confluence de deux cours d'eau du même ordre est augmenté de 1 ;

▪ Un bassin versant à l'ordre le plus élevé de ses cours d'eau, soit l'ordre du cours d'eau principal à l'exutoire.

➢Le réseau hydrographique des sous bassins versants est représentée dans la figure (III.7).

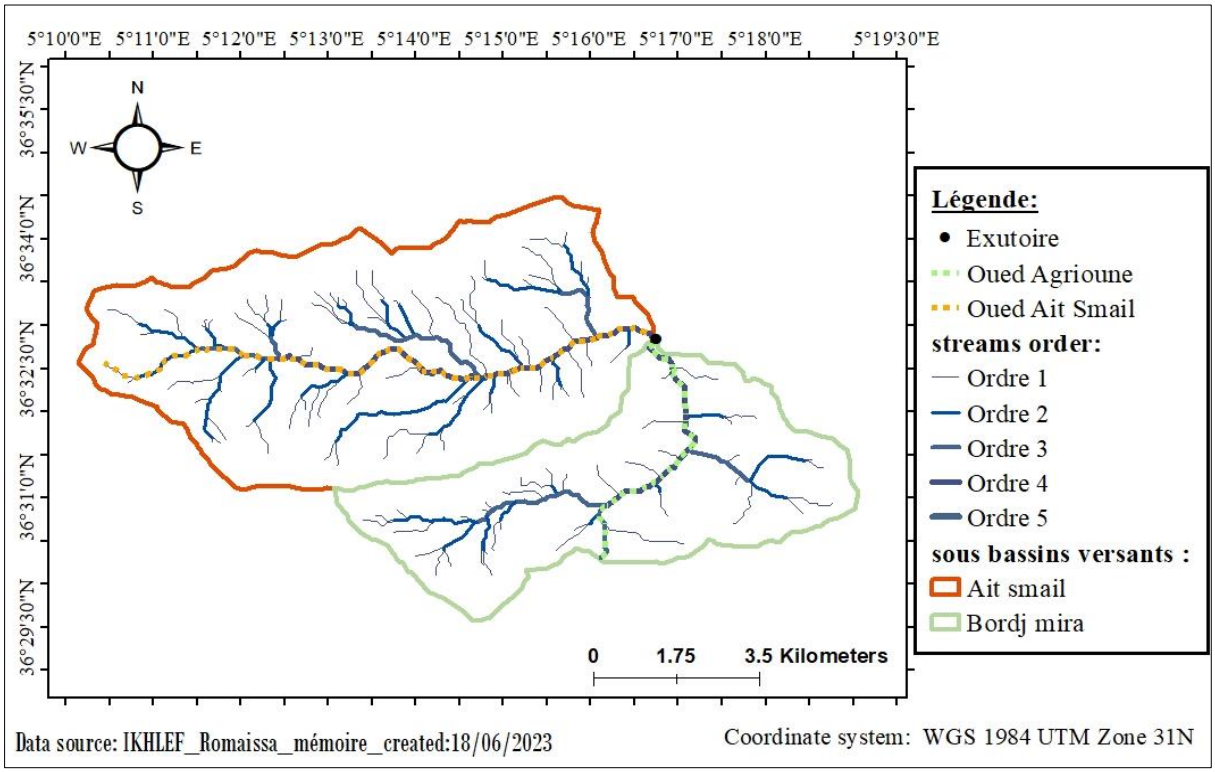


Figure III.7 : Réseau hydrographique des sous bassins versants Bordj Mira et Ait Smail.

★Formes du réseau hydrographique :

Les lois de Horton : rapport de confluence et rapport de longueur sont des formules empiriques qui permettent de différencier les formes du réseau hydrographiques.

▪Rapport de la confluence « R_c » :

C'est un élément important à considérer pour établir des corrélations d'une région à une autre. Selon Strahler (1964), le R_c varie de 3 à 5 pour une région où la géologie n'a aucune influence, il est défini par :

$$R_c = \frac{N_n}{N_{n+1}} \qquad \text{(III.16)}$$

Avec :
- R_c : rapport de confluence.
- N_n : nombre de cours d'eau d'ordre n.
- N_{n+1} : nombre de cours d'eau d'ordre n+1.

▪R_c exprime le développement du réseau de drainage. Lorsque le réseau est bien organisé, les nombres de cours d'eau successifs forment une série géométrique inverse.

Tableau n°III.13 : calcul du rapport de confluence pour sous bassin versant « Ait Smail ».

Ordre	Nombre du talwegs	R_c	R_c
1	188	2.02	**2.61**
2	93	5.17	
3	18	0.64	
4	28	/	

Tableau n°III.14 : calcul du rapport de confluence pour sous bassin versant « Bordj Mira ».

Ordre	Nombre du talwegs	R_c	R_c
1	102	1.62	**4.42**
2	30	1.67	
3	18	1.38	
4	13	13	
5	1	/	

•Les deux valeurs de Rc sont compris entre $3<R_C<5$ donc c'est une région où la géologie n'a aucune influence pour un bassin circulaire c'est un rapport faible avec un réseau dendritique.

▪Rapport des longueurs « R_L » :

C'est le rapport des longueurs moyennes des cours d'eau d'ordre n aux longueurs moyennes des cours d'eau d'ordre n -1, donné par :

$$R_L = \frac{L_n}{L_{n+1}} \qquad \text{(III.17)}$$

Avec :
- L_n : longueur de cours d'eau d'ordre n.
- L_{n+1} : longueur de cours d'eau d'ordre n+1.

Tableau n°III.15 : calcul du rapport des longueurs pour sous bassin versant « Ait Smail ».

Ordre	Longueur des talwegs (km)	R_L	R_L
1	38.72	1.79	**1.99**
2	21.64	3.35	
3	6.47	0.83	
4	7.77	/	

Tableau n°III.16 : calcul du rapport des longueurs pour sous bassin versant « Bordj Mira ».

Ordre	Longueur des talwegs (km)	R_L	R_L
1	19.52	2.64	**7.37**
2	7.4	1.4	
3	5.3	1.09	
4	4.87	24.35	
5	0.2	/	

★Le profil en long :

Le profil en long du cours d'eau On a l'habitude de représenter graphiquement la variation altimétrique du fond du cours d'eau en fonction de la distance à l'émissaire. Il permet de définir sa pente moyenne.

★La densité de drainage « D_d » :

La densité de drainage est un élément de description et d'estimation du temps de résidence des eaux souterraines. La densité de drainage, définie par (Horton, 1945) cité dans (Coulon, 2015), est le rapport de la longueur totale du réseau hydrographique sur la surface du bassin versant (un terrain dont l'ensemble des eaux sont drainées par un même point) occupée, soit :

$$D_d = \frac{\sum_{i=1}^{n} L_i}{S} \qquad \text{(III.18)}$$

Avec :

D_d : Densité de drainage en km/km^2 ;
$\sum$ Li : 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 : La surface du bassin versant en km^2.

•Les résultats du calcul sont dans le tableau suivant :

Tableau n°III.17 : La densité de drainage de les deux sous bassins versants.

Sous bassin versant	n	S (Km^2)	$\sum L_i$ (Km)	D_d (Km/km^2)
Ait Smail	4	41.22	74.60	**1.81**
Bordj Mira	5	24.73	37.11	**1.5**

▸ La densité hydrographique des thalwegs élémentaires « F1 » :

La densité hydrographique représente le nombre de canaux d'écoulement par unité de surface. Elle se définit par la formule suivante :

$$F_1 = \frac{\sum N_1}{S} \qquad \text{(III.19)}$$

Avec :
F1 : Densité hydrographique (Km^{-2}) ;
N1 : Nombre de cours d'eau d'ordre 1 ;
A : Superficie du bassin versant (Km^2).

★ Le coefficient de torrentialité « C_t » :

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

$$C_t = D_d \times F_1 \qquad \text{(III.20)}$$

Avec
Dd : Densité de drainage en km/km^2 ;
F1 : Densité hydrographique (Km^{-2}).

▪Les résultats de calcul sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau n°III.18 : La densité hydrographiques et le coefficient de torrentialité pour les deux sous bassins versants.

Sous bassin versant	S(Km^2)	N_1	F_1 (Km^{-2}).	C_t
Ait Smail	41.22	188	**4.56**	**8.25**
Bordj Mira	24.73	102	**4.13**	**6.19**

❁La valeur du coefficient de torrentialité est grande ce qui montre que l'écoulement dans les talwegs d'ordre 1 est de grande torrentialité.

★Le temps de concentration « T_c » :

Le temps de concentration est le temps écoulé entre le début d'une précipitation et l'atteinte du débit maximal à l'exutoire du bassin versant. Il correspond au temps nécessaire pour permettre à l'eau de ruisseler du point le plus reculé du bassin versant jusqu'à l'exutoire (Nicolas, 2007).

Il est composé de trois termes différents :

▪**Th :** Temps d'humectation, c'est le temps nécessaire à l'imbibition du sol par l'eau qui tombe avant qu'elle ne ruisselle ;

▪**Tr :** Temps de ruissellement, ou d'écoulement, c'est le temps qui correspond à la durée d'écoulement de l'eau à la surface ou dans les premiers horizons de sol jusqu'à un système de collecte (cours d'eau naturel, collecteur) ;

▪ **Ta :** Temps d'acheminement, c'est le temps mis par l'eau pour se déplacer dans le système de collecte jusqu'à l'exutoire. Tel que :

$$T_c = \max\left(\sum(T_h + T_r + T_a)\right) \qquad \text{(III.21)}$$

Les méthodes et les formules utilisées reflètent un caractère régional, traduit par des paramètres propres à la région dans laquelle sont développées ces formules. Il faut en général choisir la formule qui correspond le mieux au type de bassin-versant analysé, pour cela on donne la priorité à celle qui nous semble applicable, élaborées dans les conditions physicogéographiques analogues à celles de la partie Nord de l'Algérie (Bennis, 2004). L'estimation du temps de concentration est obtenue grâce à des formules empiriques suivantes :

▪ **Formule de Kirpich 1940 :**

Cette méthode est adaptée aux bassins versants dont la superficie varie entre 0,4 ha et 81 ha, dont les sols sont argileux et dont la pente moyenne est comprise entre 3% et 10% (Bennis, 2004). Le temps de concentration est alors calculé à partir de l'équation suivante :

$$T_c = 0.0663 \frac{{L_{cp}}^{0.77}}{{I_g}^{0.385}} \qquad \text{(III.22)}$$

Avec :

- T_c : Temps de concentration (h).
- L_{cp} : Longueur du cours d'eau principal (m).
- I_g : Indice de pente globale (%).

▪ **Formule de Giandotti 1937 :**

La formule est donnée par :

$$T_c = \frac{4\sqrt{S}+1.5\times L_{cp}}{0.8\times\sqrt{H_{moy}-H_{min}}} \qquad \text{(III.23)}$$

Avec :

T_c : Temps de concentration (h) ;
H_{moy} et H_{min} : Altitudes moyenne et minimale du bassin versant (m) ;
S : Surface du bassin versant (km^2) ;
L_{cp} : Longueur du cours d'eau principal (km).

▪ **Formule de SCS ANRH (Sogreah 1986/1989) :**

La formule est donnée par :

$$T_c = \left(\frac{0.87\times {L_{cp}}^3}{H_{moy}-H_{min}}\right)^{0.385} \qquad \text{(III.24)}$$

Avec :

T_c : Temps de concentration (h) ;
H_{moy} et H_{min} : Altitudes moyenne et minimale du bassin versant (m) ;
L_{cp} : Longueur du cours d'eau principal (km).

▪ **Formule de Solovsky (1968) :**

La formule est donnée par :

$$T_c = 4 \times \left(\frac{S\times {L_{cp}}^{0.333}}{\sqrt{I_{BV}}}\right)^{0.75} \qquad \text{(III.25)}$$

Avec :

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

Pour les petits cours d'eau, la vitesse du ruissellement selon l'auteur est de 1,5m/s.

- **Formule de Ventura :**

La formule est donnée par :

$$T_c = 0.1275 \times \frac{\sqrt{S}}{\sqrt{I_{BV}}} \quad \text{(III.26)}$$

Avec :

T_c : Temps de concentration (h) ;
I_{bv} : Pente du bassin versant (m/km) ;
S : Surface du bassin versant (km^2).

- **Formule de Turazza :**

La formule est donnée par :

$$T_c = \frac{0.108 \times (S \times L_{cp})^{1/3}}{{I_c}^{0.5}} \quad \text{(III.27)}$$

Avec :

T_c : Temps de concentration (h) ;
S : Surface du bassin versant (km^2) ;
I_c : Pente du cours d'eau principal (m/m).
L_{cp} : Longueur du cours d'eau principal (km).

- **Formule Espagnole :**

La formule est donnée par :

$$T_c = 0.126 \times 60 \times \left(\frac{L_{cp}}{{I_c}^{0.25}}\right)^{0.76} \quad \text{(III.28)}$$

Avec :

T_c : Temps de concentration (h) ;
I_c : Pente moyenne du cours d'eau principale ;
L_{cp} : Longueur du cours d'eau principal (km).

- **Formule de Passini :**

La formule est donnée par :

$$T_c = 6.48 \frac{(S \times L_{cp})^{1/3}}{\sqrt{I_c}} \quad \text{(III.29)}$$

Avec :

T_c : Temps de concentration (mins) ;
I_c : Pente moyenne du cours d'eau principale ;
S : Surface du bassin versant (km^2) ;
L_{cp} : Longueur du cours d'eau principal (km).

• Les résultats obtenus pour les deux sous bassins versants étudiés sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau n°III.19 : Résultats du calcul du temps de concentration en heure pour les deux sous bassins étudiés.

	Sous bassin versant	
	Ait Smail	Bordj Mira
Ventura	0.065	0.05
Kirpich	0.92	0.91
SCS ANRH	1.19	1.04
Giandotti	1.94	1.62
Turazza	2.01	1.73
Passini	2	1.72
Solovsky	17.72	11.45
Espagnole	65.41	60.67

L'analyse de ces résultats obtenus montre un rapprochement entre certaines formules, ce qui permet de distinguer quatre groupes :

- Le premier groupe renferme la formule de Ventura.
- Le deuxième regroupe la formule de Kirpich et celle de SCS ANRH.
- Le troisième rassemble les formules de Giandotti, Turazza et Passini.
- Le dernier groupe est constitué de la formule de Solovsky et la formule Espagnole.

•Les valeurs obtenues par les formules du premier et du dernier groupe sont relativement éloignés de la tendance générale, ils ont été donc écartés lors du choix des valeurs moyennes.

•Le tableau suivant donne les valeurs du temps de concentration retenus :

Tableau n°III.20 : Valeurs retenus du temps de concentration pour les trois bassins versants.

	Sous bassin versant	
	Ait Smail	Bordj Mira
KIRPICH	0.92	0.91
SCS ANRH	1.19	1.04
GIANDOTTI	1.94	1.62
TURAZZA	2.01	1.73
PASSINI	2	1.72
Valeurs retenues moyennes :	**Tc = 1.62 h**	**Tc = 1.41 h**

•Vitesse de ruissellement « V_r » :

On entend par ruissellement, l'écoulement par gravité à la surface du sol, suivant la pente du terrain et dans le micro-réseau hydrographique, des eaux météorologiques qui ont échappé à l'infiltration, à l'évaporation et au stockage superficiel. C'est, tout simplement, le rapport entre la longueur parcourue par le temps de concentration :

$$V_r = \frac{L_{cp}}{T_c} \qquad \text{(III.30)}$$

Avec :

V_r : vitesse de ruissellement (km/h) ;
L_{cp} : Longueur du cours d'eau principal (km) ;
T_c : Temps de concentration (h).

▪On résume les résultats de calcul des paramètres hydrographiques dans le Tableau n° (III.21) :

Tableau n°III.21 : Paramètres hydrographiques des deux sous bassins versants.

Paramètres	Symbole	Unités	Sous bassins	
			Ait Smail	Bordj Mira
Densité de drainage	D_d	Km/km^2	**1.81**	**1.5**
Densité hydrographique	F_1	Km^{-2}	**4.56**	**4.13**
Coefficient de torrentialité	C_t	-	**8.25**	**6.19**
Temps de concentration	T_c	heures	**1.62**	**1.41**
Vitesse de ruissellement	V_r	Km/h	**6.78**	**6.84**

•Ci-dessous le tableau qui résume les caractéristiques géomorphologiques des deux sous bassins versants.

Tableau n°III.22 : Caractéristiques géomorphologiques des deux sous bassins versants.

Paramètres		Symbole	Unités	Sous bassins	
				Ait Smail	Bordj Mira
Surface		S	Km^2	**41.22**	**24.73**
Périmètre		P	Km	**28.33**	**25.43**
Longueur du thalweg principal		L_{cp}	Km	**10.98**	**9.64**
Indice de compacité		K_G	/	**1.24**	**1.43**
Coefficient d'allongement		C_a	/	**2.92**	**3.76**
Rectangle équivalent	Longueur	L	Km	**9.99**	**10.18**
	Largeur	l		**4.13**	**2.43**
Altitude	Maximale	H_{max}	m	**1870**	**1747**
	Moyenne	H_{moy}		**133**	**132**
	Minimale	H_{min}		**869.2**	**838.08**
	Médiane	$H_{5\%}$		**1650**	**1420**
		$H_{50}\%$		**984**	**920**
		$H_{95\%}$		**384**	**384**
Pente du bassin versant		I_{BV}	m/Km	**158.20**	**167.53**
Pente moyenne de bassins versant		I_{mBV}	m/Km	**420.27**	**707.045**
Indice de pente globale		I_g	m/m	**0.13**	**0.102**
Indice de pente moyenne du cours d'eau		I_c	m/m	**0.17**	**0.15**
Indice de pente de Roche		I_p	%	**3.87**	**3.76**
Dénivelée spécifique		D_s	m	**834.64**	**507.24**
Densité de drainage		D_d	Km/km^2	**1.81**	**1.5**
Densité hydrographique		F_1	Km^{-2}	**4.56**	**4.13**
Coefficient de torrentialité		C_t	-	**8.25**	**6.19**
Temps de concentration		T_c	heures	**1.62**	**1.41**
Vitesse de ruissellement		V_r	Km/h	**6.78**	**6.84**

III.2 Étude des crues :

Pour un projet de protection contre les inondations, la détermination du débit de pointe est une étape primordiale, pour le choix de l'aménagement approprié et la délimitation des zones inondables. Après avoir délimité les bassins versants de la zone d'étude et déterminé leurs caractéristiques, on vise dans cette étape à évaluer les débits des crues pour des périodes de retours allant de 10 à 100 ans.

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

L'analyse fréquentielle d'une longue série de débits maximaux permet d'estimer le temps de retour d'une valeur particulière. Cette prédiction repose sur la définition et la mise en œuvre d'un modèle fréquentiel qui est une équation décrivant (modélisant) le comportement statistique d'un processus. Ces modèles décrivent la probabilité d'apparition d'un événement de valeur donnée. C'est du choix du modèle fréquentiel (et plus particulièrement de son type) que dépendra la validité des résultats de l'analyse fréquentielle (ENAC/ISTE/HYDRAM, 2004).Dans cette étude, nous avons opté pour l'utilisation d'une loi d'ajustement statistique. Ces lois sont couramment utilisées pour ajuster les séries de pluies maximales et les débits associés.

III.2.1.1 Présentation de la station hydrométrique :

- La première étape dans l'étude de l'aménagement consiste à réaliser une étude des précipitations maximales annuelles, en vue de déterminer les pluies extrêmes correspondant à différentes périodes de retour. Pour ce faire, il est indispensable de disposer d'une série pluviométrique contenant les données des précipitations maximales annuelles sur la période la plus longue possible. Cependant, dans notre zone d'étude, nous ne disposons pas d'une station hydrométrique dont nous avons pris la station de Fermatou située dans le bassin versant N°15, Sous bassin N°6 de l'Oued Bou-Sellam.
- Le bassin versant du Bou Sellam est fermé, au nord, à partir du confluent de la rivière avec l'oued Sahel, par le mont Gueldamane. L'oued Bou Sellam descend des versants sud du mont Megris ; il est formé de cinq ruisseaux, l'oued Mahouan, l'oued Mohammed el Hannach, oued Ouricia, l'oued Goussimet et l'oued Fermatou, qui se réunissent au nord de Sétif. La rivière prend alors le nom d'oued Bou Sellam ; elle court d'abord au sud-ouest, passe à trois kilomètres à l'ouest de Sétif, et vient franchir la chaîne dans laquelle elle prend sa source entre djebel Tafat et le Guergour.

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

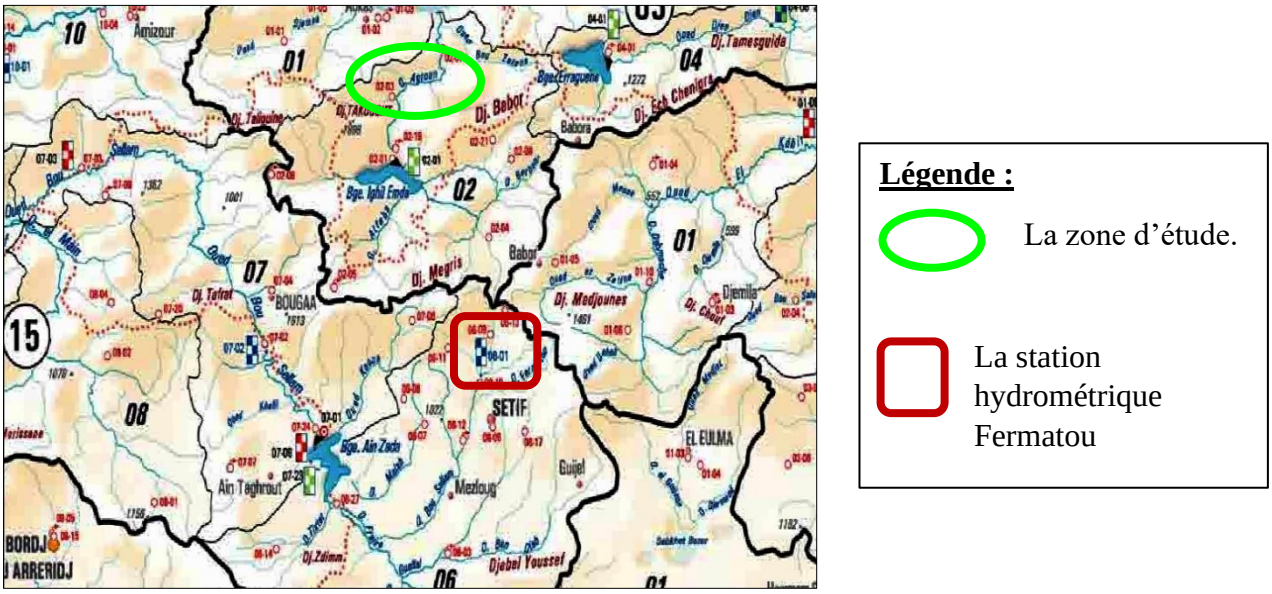


Figure III.8 : Situation de la station hydrométrique de Fermatou (Source : ANRH-Blida).

•La station hydrométrique Fermatou dispose d'une série d'observations de trente-trois (33) années, allant de 1970/1971 à 2002/2003 et elle n'enregistre aucune lacune. Les débits instantanés maxima du sous bassin d'oued Bou-Sellam à la station varient de 0.95 à 236 m^3/s.

➢Les caractéristiques de la station sont montrées dans le Tableau n° III.23 :

Tableau n°III.23 : Les caractéristiques de la station hydrométrique « Fermatou »

Station	Code	Coordonnées			N° d'années
		X(m)	Y (m)	Z(m)	
Fermatou	150601	742	328.6	1030	33

➢ Le Tableau n° III.24 représente la répartition des débits maximales annuels de la station prise :

Tableau n°III.24 : Série des débits maximales annuels prise de la station 150601 (Source : ANRH Alger).

N°	Année	$Q_{max}(m^3/s)$	N°	Année	$Q_{max}(m^3/s)$	N°	Année	$Q_{max}(m^3/s)$
1	1970	5.91	12	1981	68.3	23	1992	5.3
2	1971	19.7	13	1982	36	24	1993	3.25
3	1972	64	14	1983	64	25	1994	14.8
4	1973	84	15	1984	71.5	26	1995	61.8
5	1974	14.8	16	1985	19.7	27	1996	6.12
6	1975	86.5	17	1986	66.1	28	1997	37.9
7	1976	20.7	18	1987	**0.95**	29	1998	68.3
8	1977	13.9	19	1988	56.2	30	1999	5.51
9	1978	33.5	20	1989	2.76	31	2000	4.67
10	1979	50.9	21	1990	**236**	32	2001	37.9
11	1980	4.85	22	1991	29.8	33	2002	120

➢Les caractéristiques de la série pluviométrique sont déterminées à l'aide de logiciel HYFRAN PLUS, représentées dans le Tableau n° III.25 :

Tableau n°III.25 : Caractéristiques de la série des débits de la station 150601.

Caractéristiques	Valeurs
Moyenne des Qmax en (m^3/s)	42.90
Écart type « σ_x » ; Pour n >30 ans	46.33
Coefficient de variation « Cv »	1.08

III.2.1.2 Choix du modèle fréquentiel :

•La validité des résultats d'une analyse fréquentielle dépend du choix du modèle fréquentiel et plus particulièrement de son type. Diverses pistes peuvent contribuer à faciliter ce choix, mais il n'existe malheureusement pas de méthode universelle et infaillible**.**

•À partir de l'échantillon de n observations, l'histogramme de fréquence d'apparition, la courbe de fréquence cumulée de non dépassement sont construits. Si le nombre n devient grand, on cherche la loi de distribution de la population. La fréquence devient densité de probabilité**.**

• Parmi les lois d'ajustement on a :

❁Loi normale : est un modèle fréquentiel où les valeurs observées pour une population donnée tournent autour de la moyenne de l'échantillon. Par conséquent, les valeurs s'écartant de cette

dernière sont très peu fréquentes, dépend des variables suivantes : Précipitations annuelles, Débits, Volume de stockage des réservoirs.

❁ Log normale : La loi log-normale est un cas particulier de la loi normale. Les conditions de formation de la loi log-normale sont identiques à celles de la loi normale, à la différence que les facteurs agissent de manière multiplicative et non additive, dépend des variables suivantes : Débits maximum annuels, Précipitations journalières, Précipitations annuelles, Volume du ruissellement mensuel, Volume du ruissellement annuel.

❁Loi de Gumbel : Appelée aussi loi double exponentielle, Cette loi est asymétrique et sert à l'estimation des valeurs extrêmes des variables hydrologiques. Elle est très appréciée vu sa simplicité, dépend du débit maximum annuel.

❁ Pearson type III (Gamma) : elle dépend des variables suivantes : Débits maxima annuels, Précipitations journalières, Précipitations annuelles, Volume du ruissellement mensuel, Volume du ruissellement annuel.

❁ Loi de Goodrich : elle dépend des Valeurs moyennes annuelles (débits, précipitations...).

• Les lois d'ajustement choisies sont :

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

• Dans notre étude on suit les étapes suivantes :

▪ Classer la série des précipitations par ordre croissant ;

▪ Calcule de la fréquence expérimentale ;

▪ Calcule des caractéristiques empiriques de la série de donnée ;

▪Ajuster graphiquement la loi choisie ;

▪ Calculer le quantile et son intervalle de confiance ;

▪ La loi de log-normale (droite de Galton).

a. Ajustement de la série par la loi de Gumbel :

C'est une loi à décroissance exponentielle, elle s'ajuste, pour des durées de 1 heure à quelques jours, sur les maximas de 10 ou 15 jours, maxima mensuels, maximas saisonniers ou maxima annuels. Son avantage est d'étirer l'échelle de distribution au-delà de la probabilité 0,90. C'est une fonction double exponentielle (Layan et al., 2007) :

$$F(x) = exp^{-\exp\left(-\frac{(x-x_0)}{a}\right)} \qquad \text{(III.31)}$$

Avec :

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

x_0 : est le paramètre de position (le mode) ;

a et x_0 ont la même dimension que la variable ;

$$U = -\ln\left(-\ln\left(F(x)\right)\right) = \frac{x-x_0}{a} \qquad \text{(III.32)}$$

U : est appelée variable réduite de Gumbel.

➢L'ajustement de la série à la loi de Gumbel a été établi par le logiciel Hyfran, les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau n°III.26 : Résultats d'ajustement à la loi de Gumbel de la station 150601.

Période de retour (ans)	Probabilité de fréquence (q)	Q_{maxj} (m^3/s)	Écart-type	Intervalle de confiance
5	0.8	76.2	12.5	51.8 - 101
10	0.9	103	16.8	70.3 - 136
20	0.95	129	21.3	87.6 - 171
50	0.98	163	27.2	110 - 216
100	0.99	188	31.6	126 - 250
500	0.998	247	42.1	164 – 329
1000	0.999	272	46.6	180 - 363

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

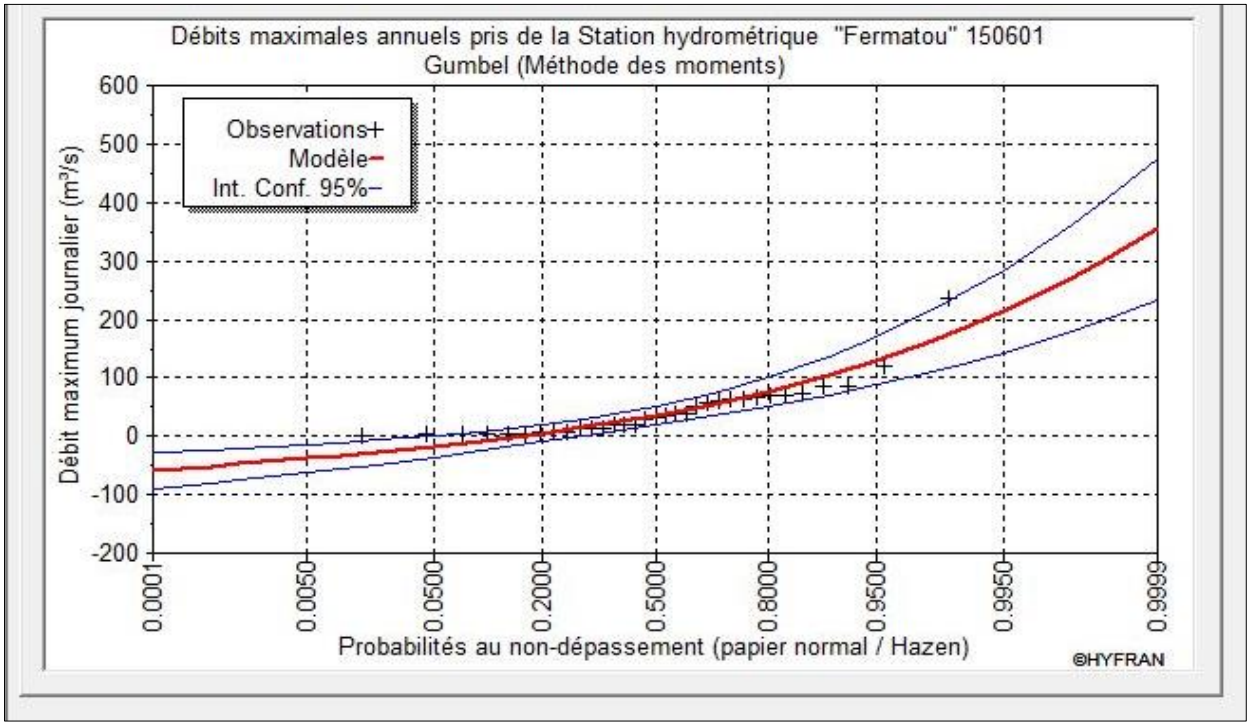


Figure III.9 : Représentation graphique de la loi de Gumbel de la station Fermatou (150601).

➢ Les résultats de la comparaison des caractéristiques de la loi de Gumbel et de l'échantillon, sont montrés dans le tableau suivant :

Tableau n°III.27 : Comparaison des caractéristiques de la loi de Gumbel et de l'échantillon.

Paramètres	Caractéristiques de la loi	Caractéristiques de l'échantillon
Minimum	Aucun	0.950
Maximum	Aucun	236
Moyen	42.9	42.9
Écart type	46.3	46.3
Médiane	35.3	33.5
Coefficient de variation C_v	1.08	1.08
Coefficient d'asymétrie C_s	1.14	2.44
Coefficient d'aplatissement C_k	2.40	9.59

b. Ajustement de la série par la loi log normale « loi de Galton » :

On dit qu'une Variable aléatoire x a une distribution log normal lorsque : v = ln x est normal. La loi de Galton résulte de la loi normale mais rendue dissymétrique par un changement de variable.

➢L'ajustement de la série à la loi de Log-Normal a été également établi par le logiciel Hyfran, les résultats obtenus sont résumés dans le Tableau n° III.28 :

Tableau n°III.28 : Résultats d'ajustement à la loi log normale de la station 150601.

Période de retour (ans)	Probabilité de fréquence (q)	Q_{maxj} (m^3/s)	Écart-type	Intervalle de confiance
5	0.8	68.4	18	33.1 - 104
10	0.9	121	37.1	48.3 - 194
20	0.95	194	67.6	61.1 - 326
50	0.98	329	132	110 - 216
100	0.99	**464**	206	N/D
500	0.998	957	491	N/D
1000	0.999	1260	691	N/D

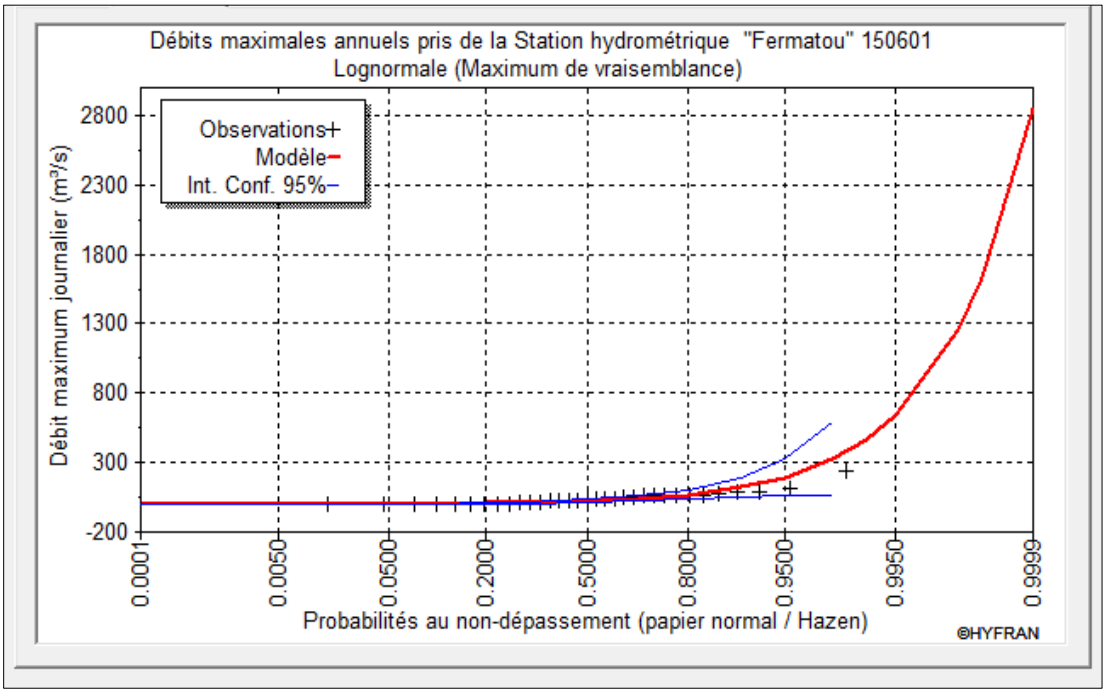


Figure III.10 : Représentation graphique de la loi log normale de la station Fermatou (150601).

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

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

Tableau n°III.29 : Comparaison des caractéristiques de la loi log normale et de l'échantillon.

Paramètres	Caractéristiques de la loi	Caractéristiques de l'échantillon
Minimum	0.00	0.950
Maximum	Aucun	236
Moyen	53.2	42.9
Écart type	111	46.3
Médiane	23.0	33.5
Coefficient de variation C_v	2.09	1.08
Coefficient d'asymétrie C_s	15.4	2.44
Coefficient d'aplatissement C_k	1210	9.59

c. Choix de la loi d'ajustement :

▪Il existe toujours des écarts entre les fréquences expérimentales des valeurs observées et les fréquences des mêmes valeurs calculées à partir d'une fonction de répartition quelconque. L'ajustement graphique est la première étape mais reste insuffisante pour le choix définitif de la loi théorique. Le test statistique d'adéquation consiste à comparer l'adéquation de plusieurs lois afin d'adopter le moins mauvais ajustement(Touaibia, 2015).

▪Le test le plus utilisé c'est le test de χ^2.

⊛Ajustement graphique visuelle (la méthode visuelle) :

•Les figures III.9 et III.10, montrent les graphiques des résultats obtenus. Ils représentent les probabilités empiriques et théoriques des distributions Gumbel et Log Normale à l'aide du logiciel Hyfran-Plus.

•Visuellement, on ne peut pas choisir l'ajustement le plus adéquat c'est pour cela on procède à l'analyse statistique.

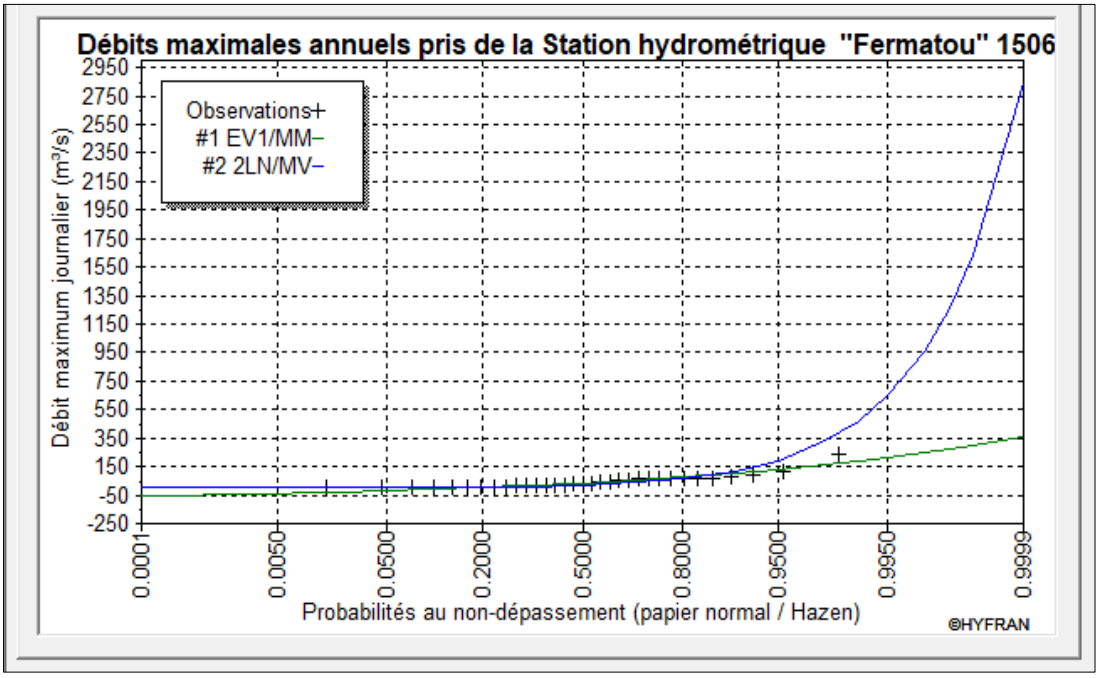


Figure III.11: Graphe comparatif des résultats d'ajustement par la méthode de Gumbel et Log normale pour la station 150601.

❁ Le test d'adéquation de χ^2 :

•Le but d'un test d'adéquation (d'ajustement) est de vérifier que le modèle choisi est cohérent avec les données, plus exactement nous allons construire une procédure de test afin de vérifier si l'hypothèse que les observations sont issues d'une loi donnée est valide. Le test le plus usuel est celui du khi carré (χ^2) (Touaibia, 2015).

•Le test de Khi carré ($\chi 2$) est utilisé pour un seuil de signification α imposé en général à 5%, et un degré de liberté « γ » : $\gamma = k - m - 1$: tel que k c'est le nombre de classe et m c'est le nombre de paramètre de la loi**.**

•La variable aléatoire χ^2, dont la répartition a été étudiée par Person, est définie par l'expression suivante :

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{k} \frac{(n_i - \mu_i)^2}{\mu_i} \qquad \text{(III.33)}$$

Avec :

n_i : Nombre d'observation contenue dans la classe i ;

μ_i : Nombre d'observation théorique calculée dans la classe i.

• Ce test n'est significatif que si $\mu_i > 5$.

• On compare $\chi^2_{calculé}$ avec la valeur tabulée (théorique), $\chi^2_{tabulé}$ fonction du nombre de degré de liberté et du seuil de signification α et γ représentée dans l'annexe n° 03 :

$$\begin{cases} \text{Si } \chi^2_{calculé} > \chi^2_{tabulé,\,\mu} : \text{on rejette l'hypothèse nulle.} \\ \text{Si } \chi^2_{calculé} \leq \chi^2_{tabulé,\,\mu} : \text{la loi d'ajustement sera retenue.} \end{cases}$$

➢ Les résultats obtenus par le test de khi carré ont été faits par logiciel Hyfran-plus et sont représentés dans le tableau ci-dessus :

Tableau n°III.30 : Résultats du test de $\chi 2$ de la station Hydrométrique 150601.

Loi de distribution	Degré de liberté γ	Nombre de classe	$\chi^2_{calculé}$	$\chi^2_{théorique}$
Gumbel	5	8	14.27	11.07
Log Normale	5	8	11.01	11.07

•Selon les résultats obtenus du test khi carré et d'ajustement, la série des débits maximums annuels présente un ajustement adéquat à **la loi Log Normale.**

III.2.2 Détermination des débits maximums fréquentiels par la méthode du Gradex :

III.2.2.1 Description de la méthode :

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

Elle s'applique à des bassins versants de quelques dizaines à plusieurs milliers de km^2 (jusqu'à 5000 km^2), recevant des pluies relativement homogènes du point de vue spatial.

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

III.2.2.2 Principe de la méthode :

La méthode part du principe que lorsque le débit dépasse une certaine valeur, le sol est saturé. Cette valeur, nommée débit seuil (ou point pivot), peut varier du débit décennal au débit cinquantennal, selon les sols et les caractéristiques du bassin versant. Ainsi, pendant le temps de base de ruissellement D (assimilé à la durée caractéristique), tout accroissement de pluie induit le même accroissement en débit (Egis Eau, 2013).

Le principe de cette méthode, qui s'appuie sur les observations climatologiques historiques, est de déduire le comportement asymptotique de la loi de probabilité des volumes de crues rares de la loi de probabilité des cumuls des pluies extrêmes. En effet la valeur moyenne de la capacité de rétention du bassin tend à devenir constante pour les crues du période de retour décennal (Lang et al., 2009).

La méthode du Gradex fournit un support de calcul cohérent et vraisemblable en s'appuyant sur une approche fréquentielle des précipitations locales ou régionales intenses, Cette approche se fait essentiellement par l'intermédiaire d'un paramètre proportionnel à l'écart type des fortes précipitations (P_{jmax}). On nomme ce paramètre fondamental le Gradex (gradient des valeurs extrêmes). Le Gradex est invariant climatologique local dépendant de la situation géographique.

III.2.2.3 Hypothèses de la méthode :

Le postulat de base de la méthode est l'existence d'une relation entre la distribution des débits et celle des pluies génératrices. Cette méthode repose sur trois hypothèses suivantes (Garavaglia, 2011) :

- **Hypothèse 1 :** La fonction de répartition des précipitations tombant sur le bassin est asymptotiquement, décrite par une loi de Gumbel ou par une loi exponentielle selon le type d'échantillonnage utilisé. Le Gradex correspond à la pente de la fonction de répartition sur un graphique représentant la pluie en fonction du logarithme de la période de retour.

- **Hypothèse 02 :** 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 pendant un pas de temps équivalent, n'augmentent plus, en valeur moyenne, au-delà d'une certaine valeur de pluie. En d'autres termes, nous pouvons dire que, à partir d'un certain état de saturation du bassin versant, la distribution du déficit d'écoulement ne dépend plus de la valeur de pluie ou de débit. Cette hypothèse se traduit graphiquement par un parallélisme entre la fonction de répartition des précipitations et celle des écoulements au pas de temps équivalent point de départ de cette extrapolation, nommé point pivot, est fixé à une période de retour Tp comprise, le plus souvent, entre 10 et 50 ans selon le bassin versant considérer.

- **Hypothèse 03 :** Quelle que soit sa fréquence ou durée de retour, le débit de pointe de crue (valeur maximale observée) peut être calculé à partir du volume écoulé (sur le pas de temps considéré) en utilisant un coefficient multiplicatif moyen caractéristique du bassin versant. Ce coefficient, nommé coefficient de forme ou coefficient d'affinité, peut être estimé à partir des hydrogrammes de crues enregistrées sur le bassin versant.

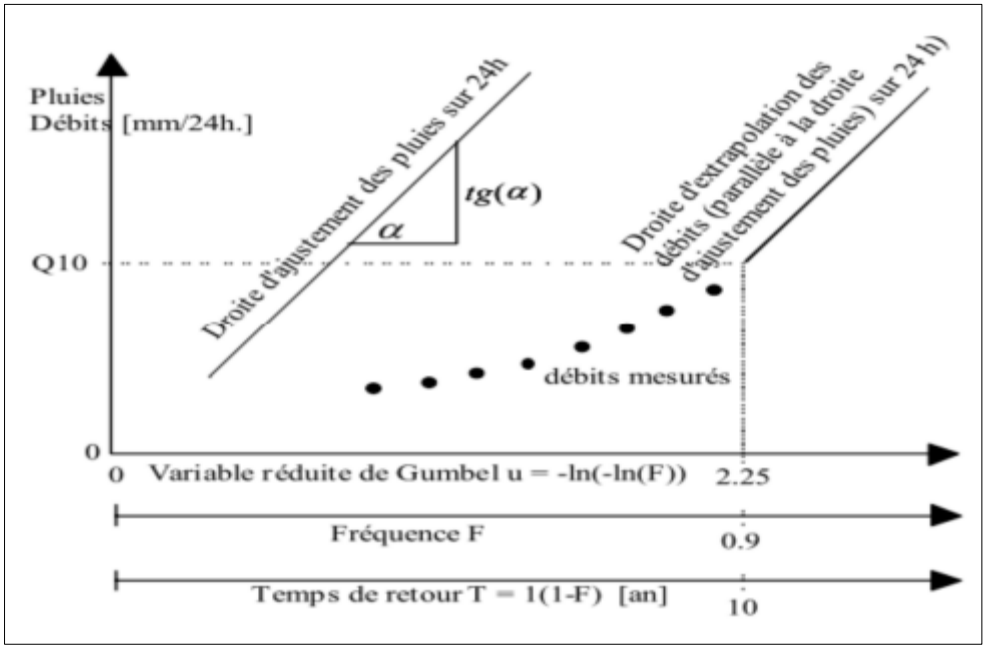


Figure III.12 : Graphe représente ajustement graphique pour les pluies et droite d'extrapolation pour les débits (Laborde, 2000).

III.2.2.4 Les étapes de la méthode :

- Choisir le pas de temps n heures (généralement égale à la moyenne des temps de base des hydrogrammes de crues disponibles, Pour la commodité des calculs on retiendra une valeur très arrondie, par exemple 2, 4, 6 ... 48 heures.).
- Ajuster par la loi de Gumbel des pluies maximales journalières.
- Calculer le Gradex des précipitations « a » (pente de la droite de Gumbel).

$$p(mm) = a\mu + b \qquad \text{(III.33)}$$

Avec :

μ: Variable réduite de Gumbel.

- Ajustement de la série des débits observés à la loi de Gumbel et déterminer le débit décennal (point pivot de l'extrapolation des débits).

Exprimer le débit décennal en lame d'eau équivalente par la formule :

$$R(mm) = \frac{Q(^{m^3}/_{s}) \times 3.6 \times n(heures)}{S(Km^2)} \qquad \text{(III.34)}$$

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

$$Q_{(\mu\%)} = a * \mu + b' \quad \text{(III.35)}$$

Avec :

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

$$\mu = -\ln(-\ln(F)) \quad \text{(III.36)}$$

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

▪Pour T=10 ans :

$$b' = Q_{10ans} - a\mu \quad \text{(IIII.38)}$$

▪Tracer la droite de l'équation $Q_{(\mu\%)} = a * \mu + b'$ sur le même graphe que l'ajustement de P_{jmax}.

▪Ensuite tirer les Q pour chaque période de retour (en mm). Puis Exprimer ces débits en m^3/s par la formule :

$$Q_{(m^3/s)} = \frac{S(Km^2)\times Q(mm)}{3.6\times n(h)} \quad \text{(III.39)}$$

- Calcul de débit de pointe :

▪Calculer sur les hydrogrammes des crues observées le rapport « C_P » « coefficient de pointe » :

Donc :

$$\begin{cases} C_p = \dfrac{Q_{max}}{Q_{moy}} \\ Q_{P(m^3/s)} = C_p * Q_{(m^3/s)} \end{cases} \quad \text{(III.40)}$$

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

III.2.2.5 Application de la méthode :

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

▪Les caractéristiques des stations sont montrées dans le Tableau n° III.31 :

Tableau n°III.31 : Caractéristique des stations pluviométriques (Source : ANRH Alger).

Station	Code	Coordonnées			N° d'années
		X(m)	Y (m)	Z(m)	
Fermatou	150601	742	328.6	1030	32
Ain roua	030205	722.9	399.95	1100	36
Souk El Ténine	030207	736.5	369.25	60	36

Tableau n°III.32 : Répartition des précipitations maximales journalières prise de la station Fermatou.

Code	Année	P_{jmax} (mm)	Année	P_{jmax} (mm)	Année	P_{jmax} (mm)
150601	1978	24.6	1989	41.5	2000	25.3
	1979	101	1990	31.1	2001	71.6
	1980	34.4	1991	45.7	2002	38.7
	1981	39.4	1992	28.1	2003	61.1
	1982	24.5	1993	22.7	2004	28.9
	1983	28	1994	43.5	2005	33.4
	1984	20.7	1995	18.2	2006	18.4
	1985	28.1	1996	31.2	2007	38
	1986	29.6	1997	50.3	2008	22.5
	1987	31.1	1998	30.2	2009	27.3
	1988	29.9	1999	26.3		

Tableau n°III.33 : Répartition des précipitations maximales journalières prise de la station Souk El Ténine.

Code	Année	P_{jmax} (mm)	Année	P_{jmax} (mm)	Année	P_{jmax} (mm)
030207	1974	74.7	1986	101.2	1999	67.6
	1975	98.2	1987	39.2	2000	55.3
	1976	125.8	1988	69.5	2001	79.5
	1977	67.2	1989	69	2002	54.8
	1978	74	1990	160.6	2003	97.2
	1979	57.1	1991	95.9	2004	47.5
	1980	96	1992	56.2	2005	80.3
	1981	64	1994	55.9	2006	58
	1982	116	1995	55.9	2007	81
	1983	64.7	1996	93.5	2009	98.9
	1984	101.8	1997	55	2010	77.4
	1985	96.5	1998	149.8	2011	68.8

Tableau n°III.34 : Répartition des précipitations maximales journalières prise de la station Ain Roua.

Code	Année	P_{jmax} (mm)	Année	P_{jmax} (mm)	Année	P_{jmax} (mm)
030205	1969	36.1	1981	40	1993	32.5
	1970	42.3	1982	48	1994	80
	1971	46.9	1983	70.5	1995	43.5
	1972	42.6	1984	60	1996	23
	1973	60.6	1985	54	1997	42
	1974	76.6	1986	37.5	1998	46
	1975	22	1987	27.5	1999	45
	1976	40.8	1988	80	2000	35
	1977	32	1989	33.5	2001	21
	1978	29.5	1990	45	2002	82.5
	1979	47.5	1991	56	2003	43.2
	1980	54.5	1992	46	2004	69.5

a. Ajustement de la série à la loi du Gumbel :

Les équations de la droite de Gumbel pour chaque station pluviométrique en utilisant le logiciel Hyfran-Plus sont données ci-dessous :

- **La station de Fermatou :**

$$p(mm) = 13.07\,\mu + 27.62$$

Donc le Gradex a=13.07.

- **La station de Ain Roua :**

$$p(mm) = 12.94\,\mu + 39.56$$

Donc le Gradex a= 12.94.

- **La station de Souk El Ténine :**

$$p(mm) = 21.33\mu + 68.36$$

Donc le Gradex a=21.33.

b. Choix du pas de temps :

Après l'examen des enregistrements de la crue des stations Fermatou (150601), Souk El Ténine **(**030207) et celle de Ain Roua **(**030205), on a estimé le temps de base à **n=24h.**

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

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

$\begin{cases} Q'_{10}\text{ ans} = 121 m^3/s \text{ ;} \\ Q'_{100}\text{ ans} = 464 m^3/s \text{ ;} \\ S' = 105\ km^2. \end{cases}$

$$\frac{Q}{65.95} = \frac{121}{105}$$

Donc : $\begin{cases} \mathbf{Q_{10\ ans} = 76\ m^3/s.} \\ \mathbf{Q_{100\ ans} = 291.45\ m^3/s} \end{cases}$

d. On exprimer le débit décennal en lame d'eau équivalente :

Par la formule :

$$R(mm) = \frac{Q(^{m^3}/_s) \times 3.6 \times n(heures)}{S(Km^2)}$$

On n'avait pas d'enregistrements des crues dans le bassin étudié, alors on estime par analogie avec le bassin versant d'Oued Bou Sellam, de même grandeur le temps de base et le débit décennal, tel que :

$$R(mm) = \frac{76(^{m^3}/_s) \times 3.6 \times 24h}{65.95\ (Km^2)}$$

$$\boldsymbol{R(mm) = 99.57mm/24h}$$

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

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

$$\mu_{10} = -\ln(-\ln(F)) = -\ln(-\ln(0.9)) = 2.25 \quad \Longrightarrow \quad \mu_{10\,ans} = 2.25$$

Variable réduite de Gumbel :

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

On calcule maintenant les b' :

Tableau n°III.35 : Résultats de calcul de b' pour les trois stations prises.

Stations	Variable réduite de Gumbel "μ"	R_{10}ans	a	b'
150601	2.25	99.57	13.07	70.16
030207			21.33	51.58
030205			12.94	70.46

- *La station de Fermatou* : $Q_{\mu\%} = 13.07 * \mu_{\%} + 70.16.$
- *La station de Ain Roua* : $Q_{\mu\%} = 12.94 * \mu_{\%} + 70.46.$
- *La station de Souk El Ténine* : $Q_{\mu\%} = 21.33 * \mu_{\%} + 51.58.$

f. On trace cette équation sur même graphe que celui de l'ajustement des P_{jmax}, Pour chaque période de retour, on tire on tire le débit en (mm) et on les exprime en (m^3/s).

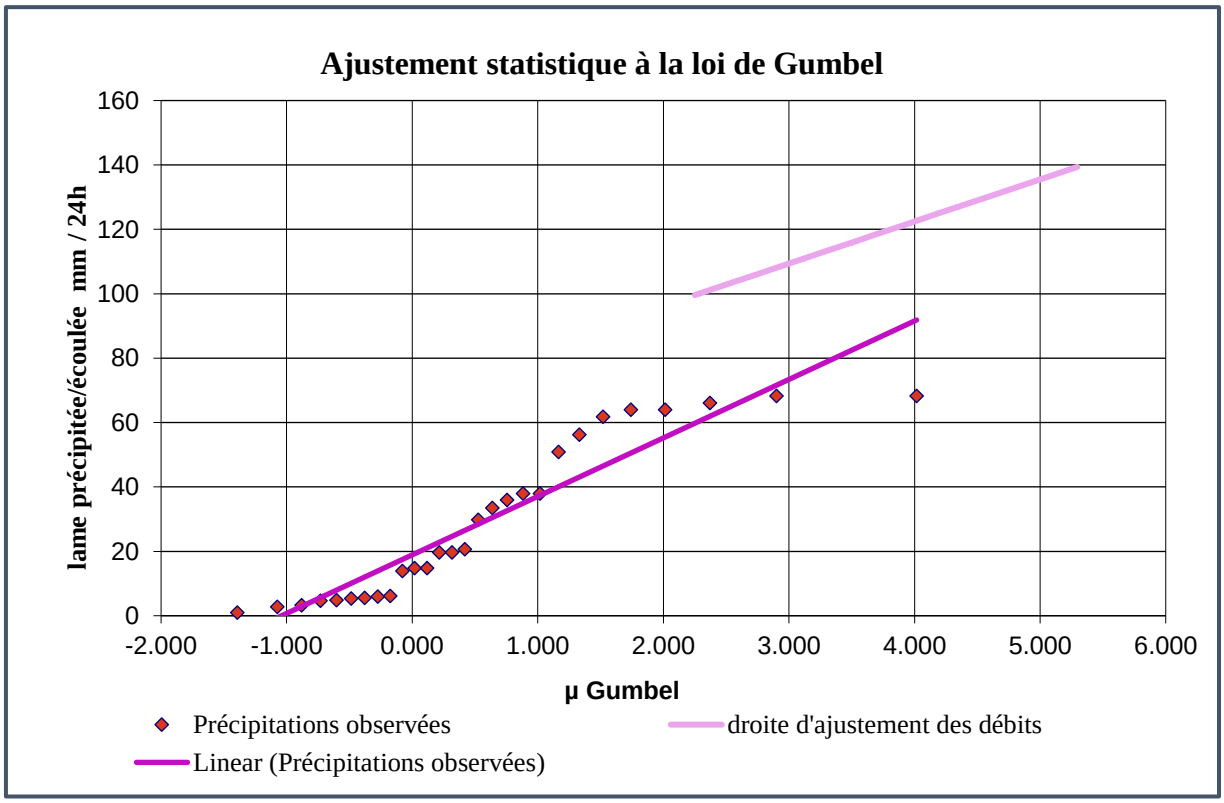


Figure III.13 : Graphe de l'ajustement des pluies et la droite d'extrapolation des débits

g. Calcul des débits de pointe :

▪On prend le coefficient de pointe Cp=1, car on a utilisé les débits maximums pour calculer le débit décennal. Les résultats sont regroupés dans le Tableau n° III.37.

▪ Les résultats de l'ajustement pour les déférentes périodes de retours sont résumés dans le Tableau n°III.36.

Tableau n°III.36 : Résultats de l'ajustement pour déférentes périodes de retours pour les stations prises.

Période de retour « T »	Variable réduite de Gumbel	Fermatou			Souk El Ténine			Ain Roua		
		P (mm/24 h)	Q (mm/24 h)	Q_{max} (m^3/s)	P (mm/24 h)	Q (mm/24 h)	Q_{max} (m^3/s)	P (mm/24 h)	Q (mm/24 h)	Q_{max} (m^3/s)
10	2.25	57.02	99.567	76	116.35	99.57	76.01	68.68	99.58	76.01
20	2.97	66.43	108.97	83.18	131.71	114.93	87.72	77.99	108.89	83.12
50	3.9	78.59	121.13	92.46	151.55	134.77	102.9	90.03	120.93	92.30
100	4.6	87.74	130.28	**99.44**	166.48	149.7	**114.3**	99.08	129.98	**99.22**
1000	6.91	117.93	160.47	122.5	215.75	198.97	151.9	128.98	159.88	122.04

Tableau n°III.37 : Résultats de l'ajustement des stations prises.

Période de retour « T »	Station hydrométrique « Fermatou »	Stations pluviométriques		
		Fermatou	Souk El Ténine	Ain Roua
10	121	76	76	76
20	194	83.18	87.73	83.12
50	329	92.46	102.87	92.304
100	**464**	**99.44**	**114.27**	**99.22**
1000	1260	122.49	151.88	122.04

▪On constate que le débit donné par la station hydrométrique est plus grand que les débits des autres stations pluviométriques, donc on opte à prendre ce débit $\mathbf{Q_{Projet} = 464 m^3/s}$

III.2.3 L'hydrogramme de crue :

▪C'est une courbe représentant l'évolution des débits en fonction du temps pendant la crue, il permet d'estimer quelques caractéristiques relatives à la crue telle que, la forme, le volume, temps de montée et temps de base, pour le tracé de l'hydrogramme, on utilise la méthode de SOKOLOVSKY (Touaibia, 2015).

▪Cette méthode qui consiste à tracer la courbe à partir de deux équations paraboliques l'une pour la montée de la crue et l'autre pour la décrue :

- **Branche de crue (montée) :**

$$Q(t) = Q_{max}(\frac{t}{T_c})^n \qquad \text{(III.41)}$$

$T_m = T_c$ (pour les petits bassins versants) ;

Avec :

T_c qui est le temps de concentration du bassin versant (heures) ;
Q_m : Débit instantané de montée (m^3/s).

- **Branche de décrue (descente) :**

$$Q(t) = Q_{max}(\frac{(T_b - t)}{T_d})^m \qquad \text{(III.42)}$$

$$T_b = T_m + T_d$$

Avec :

Qt : Débit à l'instant t (m^3/s) ;
Qmax : Débit maximal de la crues (m^3/s) ;
Tm : Temps de montée de la crue (h) ;
Td : Temps de décrue (h) ;
Tb : Temps de base (h) ;
m, n : puissance des paraboles (m=3, n=2).

▪Pour les crues d'averses, c'est à dire les crues engendrées par la pluie, cette méthode prend :

$$T_m = T_c,\ ou\ T_c : temps\ de\ concentration.$$

$T_d = \delta\ .T_m, ou\ \delta\ c'est$ le coefficient de forme de l'hydrogramme de crue

Tableau n°III.38 : Coefficient de forme de l'hydrogramme de crue "δ".

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

On prend : $\delta = 2.5$

➢Les valeurs sont montrées dans le tableau suivant :

Tableau n°III.39 : les valeurs du temps de base, montée et décrue.

Sous bassins versants	Temps de montée (h)	Temps de décrue (h)	Temps de base (h)
La zone d'étude	3.3	8.25	11.55
Bordj Mira	1.41	3.53	4.94
Ait Smail	1.62	4.05	5.67

➢Les valeurs du débits centennales en fonction du temps pour les différentes station prises sont montrées dans les tableaux ci-dessous :

Tableau n°III.40 : Valeurs du débits centennales en fonction du temps pour la zone d'étude.

Temps (h)	Q_{max} (m^3/s) pour période de retour 100 ans			
	Stations pluviométriques			Station hydrométrique « Fermatou »
	Ain Roua « 030205 »	Souk El Ténine « 030207 »	Fermatou « 150601 »	
0	0.00	0.00	0.00	0.00
0.5	2.28	2.62	2.28	10.65
1	9.11	10.49	9.13	42.61
1.5	20.50	23.61	20.55	95.87
2	36.44	41.97	36.53	170.43
2.5	56.94	65.58	57.07	266.30
3	82.00	94.44	82.18	383.47
3.3	99.22	114.27	99.44	464.00
3.5	92.18	106.16	92.38	431.07
4	76.05	87.58	76.21	355.63
4.5	61.92	71.31	62.05	289.55
5	49.65	57.19	49.76	232.21
5.5	39.13	45.06	39.22	182.99
6	30.21	34.79	30.27	141.27
6.5	22.76	26.21	22.81	106.42
7	16.64	19.17	16.68	77.84
7.5	11.74	13.52	11.76	54.89
8	7.91	9.10	7.92	36.97
8.5	5.01	5.77	5.02	23.45
9	2.93	3.37	2.94	13.70
9.5	1.52	1.75	1.53	7.12
10	0.66	0.76	0.66	3.08
10.5	0.20	0.24	0.21	0.96
11	0.03	0.03	0.03	0.14
11.55	0.00	0.00	0.00	0.00

Tableau n°III.41 : Valeurs du débits centennales en fonction du temps pour le sous bassin « Bordj Mira ».

Temps (h)	Q_{max} (m^3/s) pour période de retour 100 ans			
	Stations pluviométriques			Station hydrométrique « Fermatou »
	Ain Roua « 030205 »	Souk El Ténine « 030207 »	Fermatou « 150601 »	
0	0.00	0.00	0.00	0.00
0.25	3.12	3.59	3.13	5.47
0.5	12.48	14.37	12.50	21.88
0.75	28.07	32.33	28.13	49.23
1	49.91	57.48	50.02	87.52
1.25	77.98	89.81	78.15	136.75
1.41	99.22	114.27	99.44	174.00
1.5	91.82	105.75	92.03	161.03
1.75	73.22	84.33	73.39	128.41
2	57.32	66.02	57.45	100.52
2.25	43.91	50.57	44.00	77.00
2.5	32.77	37.74	32.84	57.46
2.75	23.69	27.29	23.74	41.55
3	16.47	18.97	16.51	28.88
3.25	10.89	12.54	10.91	19.09
3.5	6.74	7.76	6.75	11.81
3.75	3.80	4.38	3.81	6.67
4	1.87	2.16	1.88	3.29
4.25	0.74	0.85	0.74	1.30
4.5	0.19	0.22	0.19	0.34
4.75	0.02	0.02	0.02	0.03
4.94	0.00	0.00	0.00	0.00

Tableau n°III.42 : Valeurs du débits centennales en fonction du temps pour le sous bassin « Ait Smail ».

Temps (h)	Q_{max} (m^3/s) pour période de retour 100 ans			
	Stations pluviométriques			Station hydrométrique « Frematou »
	Ain Roua « 030205 »	Souk El Ténine « 030207 »	Frematou « 150601 »	
0	0.00	0.00	0.00	0.00
0.25	2.36	2.72	2.37	6.91
0.5	9.45	10.89	9.47	27.63
0.75	21.27	24.49	21.31	62.16
1	37.81	43.54	37.89	110.50
1.25	59.07	68.03	59.20	172.66
1.5	85.07	97.97	85.25	248.63
1.62	99.22	114.27	99.44	290.00
1.75	89.97	103.62	90.17	262.96
2	73.83	85.03	73.99	215.79
2.25	59.75	68.81	59.88	174.63
2.5	47.58	54.80	47.68	139.06
2.75	37.19	42.83	37.27	108.69
3	28.43	32.74	28.49	83.09
3.25	21.17	24.38	21.21	61.87
3.5	15.26	17.58	15.30	44.61
3.75	10.57	12.18	10.59	30.90
4	6.96	8.01	6.97	20.33
4.25	4.28	4.93	4.29	12.50
4.5	2.39	2.76	2.40	6.99
4.75	1.16	1.34	1.17	3.40
5	0.45	0.52	0.45	1.31
5.25	0.11	0.13	0.11	0.32
5.5	0.01	0.01	0.01	0.02
5.67	0.00	0.00	0.00	0.00

➢Les hydrogrammes de crue sont représentés dans les figures suivantes :

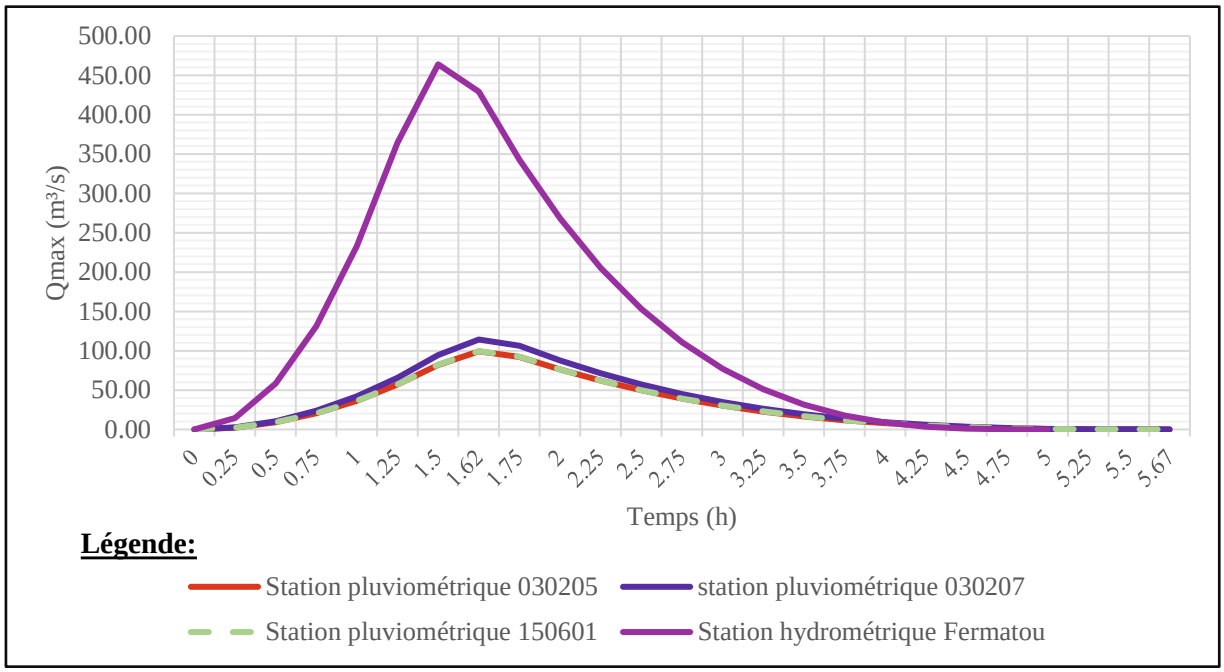


Figure III.14 : Hydrogramme de crue de la zone d'étude par la méthode Skolovsky.

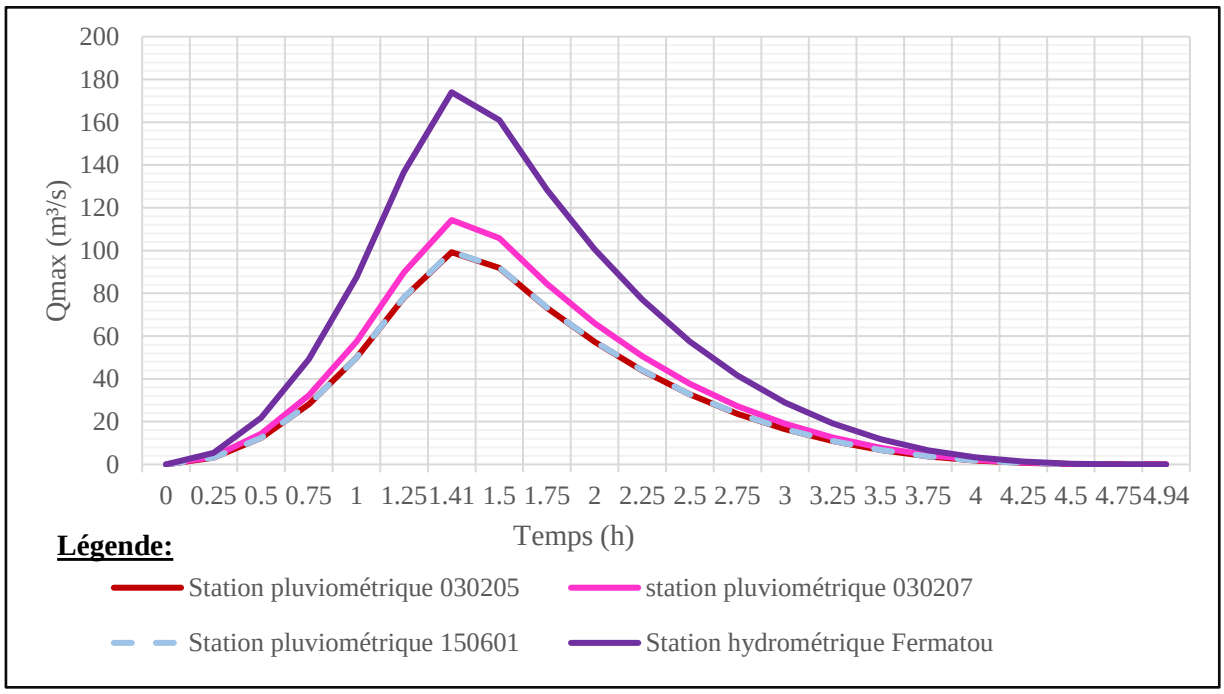


Figure III.15 : Hydrogramme du Bordj Mira par la méthode Skolovsky.

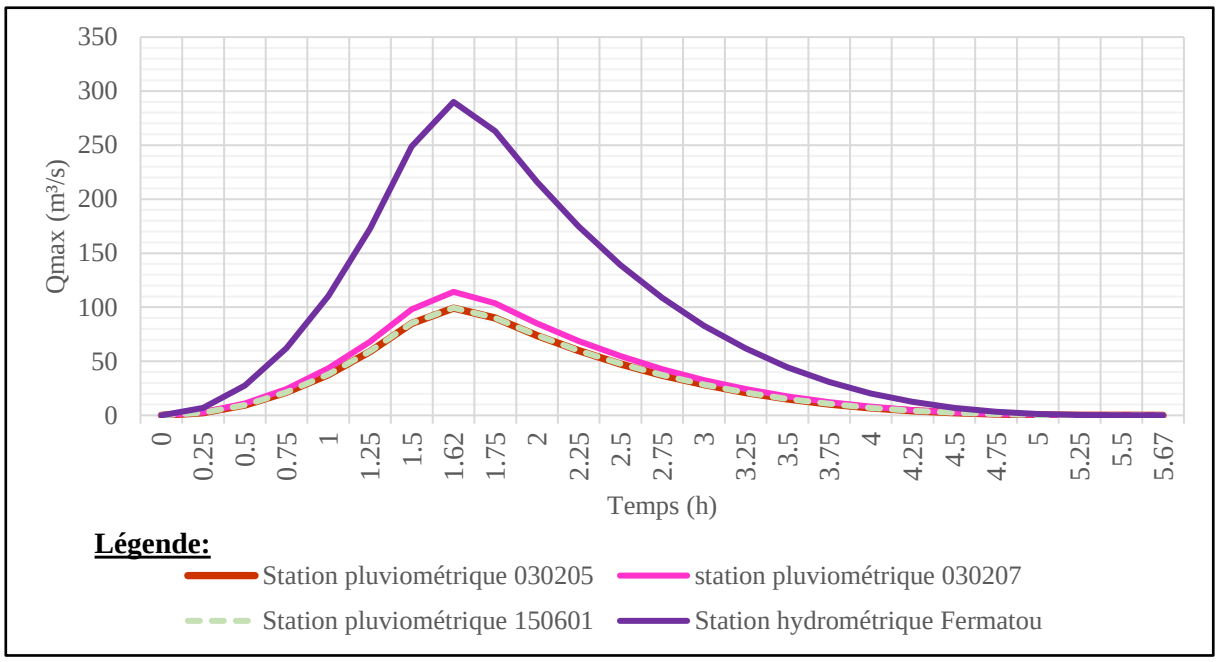


Figure III.16 : Hydrogramme de crue d'Ait Smail par la méthode Skolovsky.

III.2.4 Choix de la crue de projet :

La crue de projet désigne le niveau de crue maximal que la structure doit être capable à l'évacuer pour une probabilité donnée. Le choix de la crue dépend principalement de l'importance de la construction à réaliser, des éventuelles conséquences en aval et des considérations technico-économiques liées à l'aménagement et à l'environnement.

Tableau n°III.43 : crue de projet recommandée selon la classification du comité national australien des grands barrages (CNAGB).

Catégories des dommages	Crue de projet recommandé de probabilité de dépassement annuelle
Élevés : Perte de vie, dommage considérable.	1/100000 à 1/10000
Importants : Pas de perte de vie, dommages importants.	1/10000 à 1/1000
Faibles : Pas de perte de vie, dommages légers.	1/1000 à 1/100

•Comme on a une étude de protection contre les inondations on prend la période de retour 100ans.

•D'après les résultats du calcul on remarque que la station hydrométrique donne le plus grand débit par rapport à les autres stations pluviométriques trouvés par la méthode du Gradex donc le débit de projet :

Q_{projet} = 464m^3/s, tel que : **$Q_{Bordj\ Mira}$= 174 m^3/s** et **$Q_{Ait\ Smail}$=290 m^3/s.**

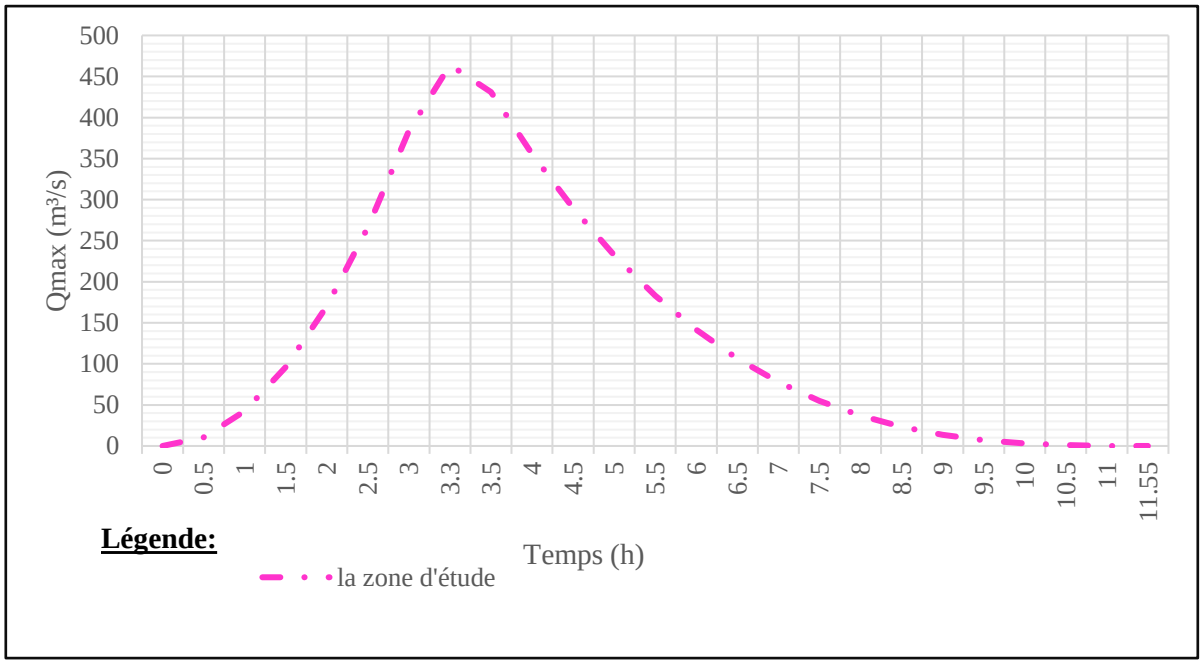


Figure III.17 : Hydrogramme de la crue du projet.

III.3 Étude de transport solide :

•Le transport des matières solides en suspension est un phénomène qui a suscité d'énormes efforts de la part des nations, en matière de lutte contre la dégradation des terres arables, l'envasement des barrages et l'effet dévastateur des cycles d'inondation et de désertification, qu'il est capable de générer (De Ploey et al., 1991) in (Bouguerra et al., 2016).

•En Algérie le transport solide dans les cours d'eau est très élevé. Cependant, il est mal quantifié dans certains oueds à cause de l'absence et du manque de données concernant surtout la concentration en particules fines et même l'indisponibilité des stations de jaugeage(Bouchelkia & Remini, 2003), donc l'estimation du transport solide a été réalisée sur la base des formules empiriques les plus utilisées à savoir :

▪La formule de Tixéront (1960) ;

▪ La formule de Fournier (1960) ;

▪Formule de Sogreah (1969) ;

▪La formule de Gavrilovich (1992) ;

▪ Formule de Kasoul et al. (1997) ;

▪ Formule de Touaïbia et Achite (2003) ;

▪Formules de Meddi (2015).

III.3.1 Méthode de Tixeront (1960) :

Elle s'exprime par la formule suivante :

$$T_a = \alpha L_e^{0.15} \qquad \text{(III.43)}$$

Avec :

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

Tableau n°III.44 : Estimation du coefficient de perméabilité.

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

- « L_e » se calcule par les formules empiriques :

  ⌘ **La formule de Samie :**

$$L_e = P^2(293 - 2.2 \times \sqrt{S}) \qquad \text{(III.44)}$$

Avec :

P : Pluie moyenne annuelle (m),
S : Surface du bassin versant (Km^2) ;
L_e : Lamme d'eau écoulée (mm).

- **La formule de Mallet et Gauthier :**

$$L_e = 600P(1 - 10^{-0.36P^2}) \quad \text{(III.45)}$$

- **La formule de Turc :**

$$L_e = P - \frac{P}{\sqrt{\frac{P^2}{L^2}+0.9}} \quad \text{(III.46)}$$

Avec :

L : coefficient de la température, tel que L = 300+25T+0.05T³
T : Température moyenne annuelle.

➢Les résultats de calcul se résument dans le tableau suivant :

Tableau n°III.45 : Résultats de calcul de la lame d'eau écoulée.

L_e (mm)	Pmoy annuelle(mm)	Formule		
		Samie	Mallet et Gauthier	Turc
Bordj Mira	672.3	127.48	**125.95**	99.94
Ait Smail	733.1	**149.87**	158.12	97.42

Tableau n°III.46 : Résultats de calcul de la dégradation spécifique.

	L_e (mm)	α	T_a (T /Km^2/an).
Bordj Mira	125.95	8.5	17.55
Ait Smail	149.87	8.5	18.02

III.3.2 Méthode d'estimation au nord Algérien :

$$D_s = 328.624Q^{-0.234}S^{-0.197} \quad \text{(III.47)}$$

Avec :

D_s : le transport solide en (T/Km^2/an) ;
Q: Débit maximum (m^2/s);
S : Surface du bassin versant (Km²) ;

➢ Les résultats des apports solides sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau n°III.47 : Résultats de calcul des apports solides.

	$Q(m^3/s)$	$S(km^2)$	D_s $(T/Km^2/an)$
Bordj Mira	174	24.73	**52.23**
Ait Smail	290	41..22	**41.91**

Conclusion :

L'étude hydrologique représente une phase primordiale la plus délicate dans une étude de protection contre les inondations. Le choix du débit de pointe est l'essentiel dans toute la modélisation hydraulique du cours d'eau ce qui permet de prédire les inondations et de déterminer le type d'aménagement nécessaire pour assurer la protection, ainsi que les coûts associés à leur mise en œuvre. D'après ce chapitre, on peut conclure que :

- L'étude hydromorphologique de la zone d'étude montre que le sous bassin de Bordj Mira est d'une forme allongée et pour Ait Smail c'est moins compact, ce sont caractérisés par un relief très fort et un temps de concentration très faible, ce qui favorise plus les crues.

- Le réseau hydrographique des deux sous bassins est développé en termes de densité et de ramification ce qui explique le caractère intrinsèque fragile des reliefs vis à vis des forçages externes et un régime hydrologique turbulent.

- Le débit de crue a été établi par application de la méthode de Gradex à la station hydrométrique « Fermatou » située au bassin versant d'Oued Bousselam sur une surface de $105km^2$, qui s'ajuste à loi de Galton avec un débit décennale de 121 m^3/s, par analogie de notre bassin avec ce dernier on a pu calculer la lame d'eau équivalente qui est de 99.57 mm, puis on a ajusté 3 séries pluviométrique prises de 02 stations différentes situées sur le bassin 03, sous bassin 02 et une station sur le bassin 15 ,sous bassin 06, ce qui nous a permis de calculer les débit max de différentes périodes de retour, et donc établir l'hydrogramme de crue du projet pour la période de retour 100 ans car il s'agit d'une étude d'aménagement.

- Le transport solide est estimé à 52.23 $T/Km^2/an$ pour le sous bassin versant de Bordj Mira et 41.91 $T/Km^2/an$ pour celui d'Ait Smail.

CHAPITRE IV :

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

IV. CHAPITRE IV :

SIMULATION DES ECOULEMENTS HYDRAULIQUES ET CARTOGRAPHIE DES ZONES INONDABLES A RISQUE

Introduction :

Avant chaque projet d'aménagement, l'étude hydraulique est une étape fondamentale. Celle-ci consiste à analyser les écoulements dans les canaux artificiels et naturels, qu'ils soient à surface libre ou en charge.

La prévention des inondations pose un défi lorsque les niveaux d'eau sont élevés et que les vitesses d'écoulement sont importantes en fonction des circonstances. Habituellement, la conception des infrastructures de protection contre les crues se focalise sur la hauteur d'eau que sur les problématiques liées à l'érosion.

La modélisation hydraulique vise à prédire numériquement l'évolution spatio-temporelle des caractéristiques hydrauliques au cours d'une crue : débits, vitesses, hauteurs d'eau dans la plaine. Cela permet en particulier de connaître les surfaces inondées, les durées de submersion et la vitesse de montée des eaux au cours de la crue. Un modèle est une représentation schéma6tique, et donc simplifiée, d'un système réel.

IV.1 Généralités :

IV.1.1 La physique d'un modèle hydraulique :

Les modèles hydrauliques utilisés pour l'étude des inondations de plaine sont pour la plupart basés sur la résolution des équations de Barré de Saint-Venant (équations tridimensionnelles de Navier-Stokes intégrées sur la verticale) (Roux, 2004).

- Équation de conservation de la masse :

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_L \qquad \text{(IV.1)}$$

- Équation de conservation de la quantité de mouvement :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{Q^2}{S}\right) + gS\left(\frac{\partial Z}{\partial x} + J\right) = K_L . q_L . V \qquad \text{(IV.2)}$$

Avec :
S : la surface mouillée, c'est-à-dire l'aire de la section transversale occupée par le fluide (m^2) ;
Q : le débit (m^3/s) ;
q_L : le débit par unité de longueur (m^2/s) d'apport ($q_L \geq 0$) ou de fuite ($qL < 0$) ;
g : l'accélération de la pesanteur (m/s^2) ;
Z : la cote de la surface libre (m) ;
J : la pente de la ligne d'énergie (m/m), également appelée perte de charge linéaire ;
k_L : un coefficient tel que :

$$K_L = \begin{cases} 1 \text{ si } q_L < 0 ; \\ 0 \text{ si } q_L \geq 0 \end{cases} \qquad \text{(IV.3)}$$

V : la vitesse moyenne dans une section transversale (m/s) ;
x : l'abscisse curviligne (m) ;
t : le temps (s). La figure (IV.1) schématise ces différents paramètres.

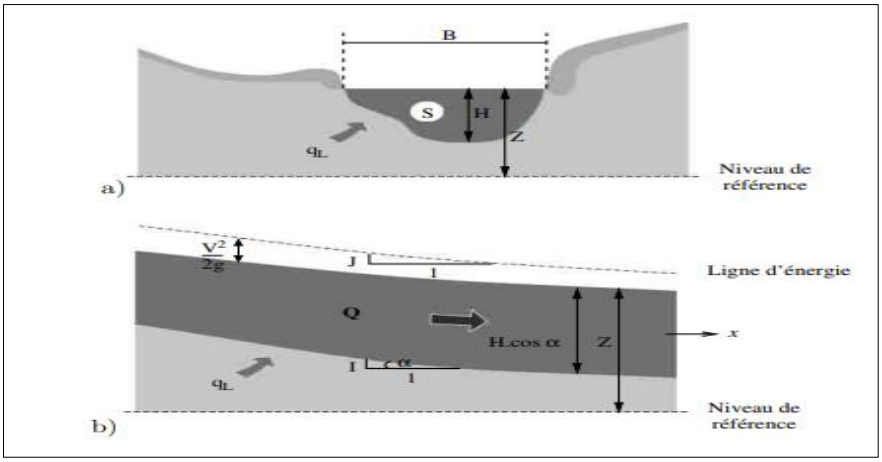


Figure IV.1 : Définition des variables hydrauliques intervenant dans les équations de Saint-Venant, d'après (Langendoen, 2000) :
a) profil en travers, b) profil en long (Roux, 2004).

IV.1.2 Définition de l'écoulement à surface libre :

Un écoulement à surface libre est un écoulement dont la surface libre est soumise à la pression atmosphérique.

IV.1.3 Définition de l'écoulement stationnaire (permanent) :

L'écoulement est dit permanent si les caractéristiques d'écoulement, en tout point, sont invariantes dans le temps ($\partial v/\partial t = 0$; $\partial h/\partial t = 0$, etc.).

IV.1.4 Définition de l'écoulement non stationnaire (non permanent) :

L'écoulement est dit non stationnaire si les caractéristiques d'écoulement, en tout point, sont en fonction du temps ($\partial v/\partial t \neq 0$; $\partial h/\partial t \neq 0$, etc.).

IV.2 Dimensionnement des canaux :

Pour l'écoulement à surface libre et dans le cas du régime uniforme la vitesse moyenne d'écoulement est donnée par la formule IV.4 appelée formule de Chézy :

$$V = C\sqrt{R_H.I} \qquad \text{(IV.4)}$$

On a : Q=V.S

Donc on obtient : $$Q = C.S.\sqrt{R_H.I} \qquad \text{(IV.5)}$$

Avec :

C : Le coefficient de Chézy, il a comme unité le ($m^{0,5}/s$) ;

R_H : Le rayon hydraulique (m) ;

I : Le gradient hydraulique ou la perte de charge par unité de longueur ; dans le cas de l'écoulement uniforme I est égale à la pente du radier (du fond) du canal.

IV.2.1 Détermination du coefficient de Chézy :

Pour le calcul du coefficient de Chézy il existe une panoplie de formules, parmi ces formules nous mentionnerons dans ce qui suit celles les plus souvent utilisées.

IV.2.1.1 Formule de Manning (1891) :

Manning donne la formule suivante :

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

Où n est le coefficient de rugosité et RH est le rayon hydraulique. Blench (1939) considère le coefficient C comme une variable qui dépend non seulement de n mais aussi de R_H et dont l'exposant dépend à son tour de n et de R_H. C'est la formule dite de Pavlovski.

IV.2.1.2 Formule de Pavlovski (1940) :

$$C = \frac{1}{n} R_H{}^y \qquad \text{(IV.7)}$$

Avec :

n : est le coefficient de rugosité

R_H : est le rayon hydraulique.

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

$$y = 2.5\sqrt{n} - 0.13 - 0.75\sqrt{R_H}(n - 0.1) \qquad \text{(IV.8)}$$

IV.2.1.3 Formule d'Agroskine :

La formule d'Agroskine qui calcule le coefficient de Chézy est la suivante :

$$C = 4\sqrt{2.\, g(K + log R_H)} \qquad \text{(IV.9)}$$

Où k : est le paramètre de Poli.

▪Étant donné que la formule d'Agroskine est semi empirique et que les grandeurs incluses dans le deuxième terme sont exprimées uniquement en unité de longueur, à savoir le mètre, on recommande l'utilisation de la formule suivante :

$$C = \frac{1}{n} + 17.72.\, log R_H \qquad \text{(IV.10)}$$

IV.2.1.4 Formule de Bazin (1897) :

Bazin considère que la valeur du coefficient C de Chézy dépend du rayon hydraulique R_H mais ne dépend pas de la pente I du canal.

Le coefficient C peut alors être déterminé par l'expression :

$$C = \frac{87}{1 + \frac{m}{\sqrt{R_H}}} \qquad \text{(IV.11)}$$

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

IV.3 Diagnostique et simulation du cours d'eau sans Aménagement :

IV.3.1 Étendue de la zone d'étude :

▪La zone d'étude comprend la modélisation de deux affluents : l'oued Aït Smaïl qui conflue avec l'Agrioune à Bordj Mira.

▪L'oued Agrioune présente de fortes pentes dans son cours moyen à Bordj Mira.

IV.3.2 Descriptif du réseau :

Une inspection approfondie du linéaire a été effectuée. Un rapport détaillant la situation hydraulique a été rédigé lors de cette visite, dont nous présentons une partie ci-dessous :

⌘ **En Amont de la ville :**

✓ **Débouché des gorges de Kherrata :**

▪La source d'approvisionnement en eau potable de la ville de Béjaïa est située à la sortie des gorges de Kherrata, en amont de Bordj Mira. La station de pompage se trouve sur la rive gauche de l'oued. Cette source assure l'approvisionnement en eau des villes de Béjaïa et Kherrata. En conséquence, la station est équipée de deux conduites distinctes : une conduite en acier d'un diamètre de 300 mm pour approvisionner Kherrata et une autre conduite en acier de 700 mm de diamètre pour l'approvisionnement de Béjaïa.

▪ La première conduite traverse l'oued pour la première fois à la sortie de la station de pompage, puis elle le traverse une deuxième fois, juste en amont du pont de service, pour rejoindre la rive gauche où se trouve la station de refoulement. De là, la conduite traverse de nouveau l'oued pour monter en rive droite jusqu'à atteindre le tunnel de la RN 9, qu'elle suit jusqu'à arriver à Kherrata.



Figure IV.2 : Vue générale vers l'amont prise du viaduc de la RN 09 (2019).

⌘ **Secteur de Bordj Mira :**

▪L'oued Aït Smaïl, également connu sous le nom d'oued Béni Smaïl, rejoint la rive gauche de l'oued Agrioune à Bordj Mira. Son lit est clairement encaissé au sein des terrasses alluviales situées au fond de la vallée. Ces terrasses sont principalement composées de graviers grossiers, et on observe la présence fréquente de blocs rocheux dans le lit mineur de la rivière.

▪ Environ 200 mètres en aval du seuil, on trouve une structure remarquablement imposante et assez singulière. Il s'agit d'un seuil surmonté de deux ponts construits avec plusieurs buses métalliques. Le pont initial a été emporté par la crue de 1957-1958.



Vue en amont du pont rive gauche. Vue en aval du pont.

Figure IV.3 : Différentes vues du pont.

▪En amont du point de la confluence avec l'oued Aït Smaïl, le cours de l'oued Agrioune est traversé par deux infrastructures : le viaduc de la RN 9 et un pont cadre.

▪Le viaduc de la RN 9, qui a été ouvert à la circulation en 1989, s'étend sur une longueur d'environ 800 mètres et est soutenu par de nombreuses piles construites dans le lit mineur de l'oued.

▪Quant au pont cadre, il est constitué de 13 cadres en béton armé et assure l'accès à une entreprise de travaux publics située sur la rive droite de l'oued. Six des cadres centraux ont été emportés lors de la crue de 2003, mais ont été reconstruits depuis.

▪Lorsque l'oued Agrioune se joint avec l'oued Aït Smaïl, le lit est couvert de matériaux tels que des graviers grossiers et des blocs rocheux. Ces matériaux sont similaires à ceux que l'on trouve dans le lit de l'Aït Smaïl, alors que le lit de l'oued Agrioune ne présente pas ces mêmes caractéristiques en amont de leur confluence.

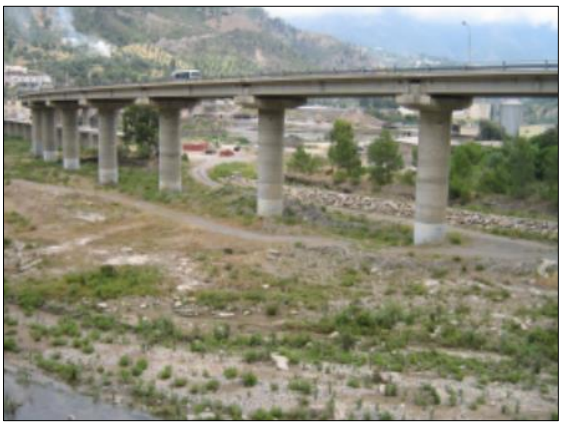


Figure IV.4 : vue du viaduc et de l'Agrioune en amont de la confluence.

⌘ **En Avale de la ville :**

▪En aval de Bordj Mira, l'oued Agrioune entame une courbe vers la droite. Dans cette section, la RN 9 longe la rive de l'oued, et des gabions ont été installés pour soutenir le remblai de la route du côté gauche de l'oued. Lors des inspections, un talus composé de matériaux provenant du lit de la rivière a été construit pour maintenir l'oued du côté droit en prévision de travaux sur la rive gauche.

▪Mis à part ces renforcements des berges, le cours de l'oued ne présente que peu de caractéristiques distinctives entre Bordj Mira et le hameau d'Amridj. Il serpente doucement dans la vallée, avec des matériaux similaires à ceux apportés par l'oued Aït Smaïl composant son lit. La végétation est rare dans le lit.



Figure IV.5 : Emplacement de l'exutoire sur l'oued Agrioune à la sortie de la ville Bordj Mira.

▪Au niveau du hameau d'Amridj, le lit de la rivière s'élargit considérablement, formant une île dans la moitié droite du cours. Cette île est couverte de végétation.

IV.4 Simulation de l'écoulement du cours d'eau :

IV.4.1 Choix du type de modèle hydraulique :

Pour la simulation de l'écoulement dans les cours d'eau, le logiciel de calcul HEC–RAS (version 6.4.1) a été choisi pour cette étude en raison des multiples que présente à savoir :

♦ L'accès gratuit et téléchargement en ligne.

♦Étude de l'impact de la construction d'ouvrages (ponts, seuils, épis).

♦ Études d'inondation.

♦Possibilité de réaliser des modélisations 1D ou 2D de la rivière et des plaines d'inondation.

♦La simulation de différents types de régimes d'écoulement (subcritique, de transition et supercritique) en prenant en compte les effets des ouvrages hydrauliques comme les ponts et les seuils.

♦ L'exploitation des résultats cartographiques (la détection des zones à risque).

IV.4.2 Présentation du logiciel HEC-RAS :

Développé et distribué gratuitement par l'*Hydrologic Engineering Center de L'Us Army Corps of Engineers*, HEC-RAS est un logiciel de simulation d'écoulements dans les cours d'eau et les canaux. Le modèle utilisé jusqu'à la version 5.0 était unidimensionnel, ce qui signifie qu'il n'existait pas de modélisation directe des variations hydrauliques dues aux changements de forme de la section transversale, à la présence de coudes ou autres aspects d'un écoulement 2D ou 3D. Depuis la version 5.0, il est possible de réaliser des modélisations 1D ou 2D de la rivière et des plaines d'inondation (Cheloufi & Foual, 2018).

Ce logiciel englobe plusieurs aspects hydrologiques et hydrauliques : analyse du ruissellement des précipitations, hydraulique fluviale, analyse des dommages d'inondation, simulation des écoulements permanents et non permanents, le transport de sédiments, analyse de la qualité d'eau et certaines fonctions facilitant la conception d'ouvrages hydrauliques (Cheloufi & Foual, 2018) .

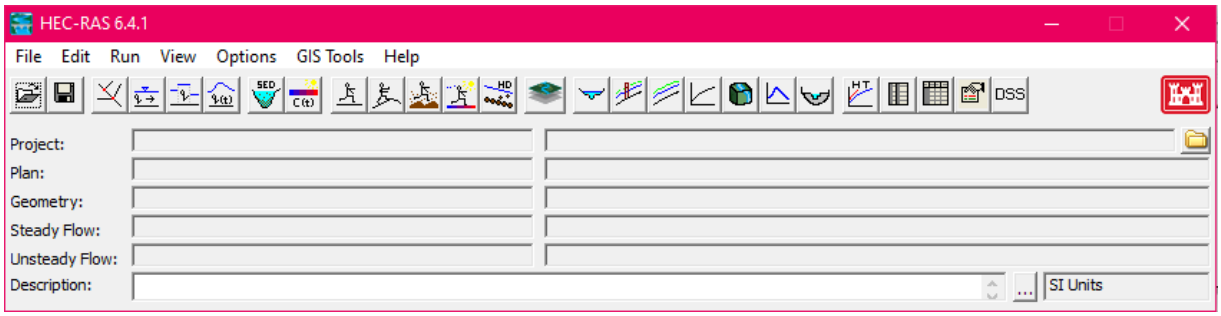


Figure IV.6 : Interface du logiciel HEC-RAS (version 6.4.1).

IV.4.2.1 Objectif du logiciel :

L'objectif principal de ce programme est tout à fait simple, il est conçu pour exécuter le calcul hydraulique unidimensionnel pour tous les réseaux de canaux naturels et artificiels par le calcul des hauteurs de la surface de l'eau en toute section d'intérêt pour un ensemble de données d'écoulement en régime permanent et par des hydrogrammes de propagation des crues pour la simulation de l'écoulement en régime non permanent.

HEC-RAS est un logiciel basé sur le modèle 1D de Saint Venant permanent ou non-permanent de calcul de la ligne d'eau en graduellement varié. Il résout « l'équation de L'énergie unidimensionnelle », les pertes étant évaluées par la formule de frottement au fond de Manning Strickler et par des formules de contraction/expansion de l'écoulement. Pour les situations rapidement variées telles que les ressauts hydrauliques, les écoulements à proximité des ponts, et les confluences de rivière, l'équation de l'énergie est remplacée par l'équation de quantité de mouvement (Cheloufi & Foual, 2018).

IV.4.2.2 Fonctionnement de HEC-RAS :

HEC-RAS est capable de modéliser avec une extrême finesse un large éventail de conditions d'écoulement. Le centre de contrôle, pièce maîtresse d'HEC-RAS permet de gérer et de combiner les différents types de données :

- Géométrie ;
- Débits et conditions aux limites ;
- Conditions de calcul ;
- Résultats (Idrici, 2017).

IV.4.3 Application d'HEC-RAS sur l'Oued :

IV.4.3.1 Banque de données nécessaires à l'application du modèle HEC-RAS :

▪ Pour appliquer le modèle HEC-RAS il est nécessaire d'avoir une banque de données concernant la zone d'étude :

♦ Une série de couples distance-altitude pour l'ensemble des sections en travers ;

♦ La distance entre deux sections successives (rives et l'axe du canal) ;

♦ Les coefficients de contraction et d'expansion ;

♦ Les données de l'écoulement et les conditions aux limites (Jabbour, 2006).

IV.4.3.2 Les données géométriques :

Les données géométriques nécessaires, consiste l'établissement de la connectivité de l'information pour le système de rivière (schéma de système de rivière), les données des sections transversales, et les données d'ouvrage hydraulique existants ou projets (ponts, levées, structures latérales, déversoirs, etc.) (Idrici, 2017).

1. Construction du TIN « Terrain Irregular Network » :

▪Le relief peut également être représenté au moyen d'un échantillonnage semi-dirigé irrégulier qui intègre les caractéristiques structurales du terrain. Cette représentation adopte la forme d'un réseau irrégulier triangulaire, appelé TIN (Triangular Irregular Network).

Nous utilisons le logiciel ArcGIS pour générer un Triangular Irregular Network (TIN) dans le but de visualiser l'écoulement sur RAS MAPPER, établir des cartes de profondeur, de vitesse, etc. La figure IV.7 représente le TIN établie :

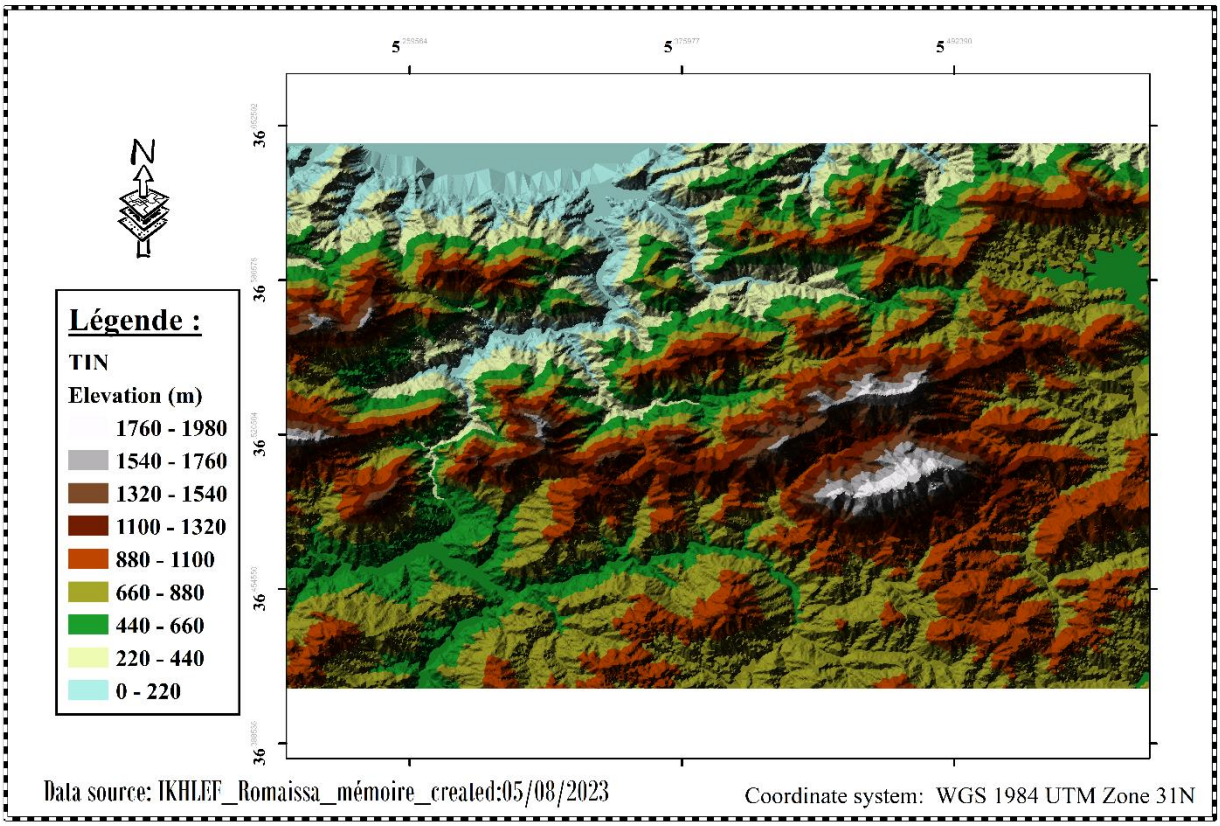


Figure IV.7 : TIN (réseau irrégulier triangulé) de la zone d'étude.

• Après que le TIN est construit, nous exportons avec le fichier de projection ESRI (extension file.Prj) qui contient les informations concernant un système de coordonnées spécifique adapté à notre zone d'étude, que nous avons téléchargées depuis le site web « 'Spatial Reference' » vers le logiciel HEC-RAS pour que RAS-MAPPER puisse le simuler.

▪ L'importation du TIN en image vers RAS MAPPER est montrée dans les figures IV.8 et IV.9:

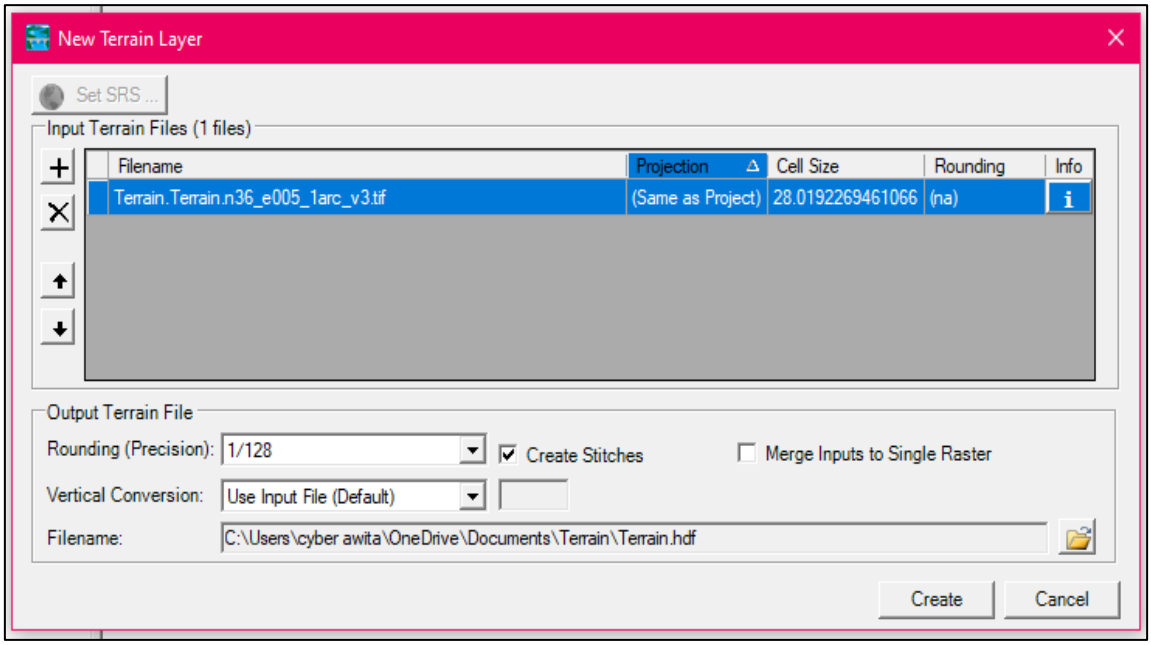


Figure IV.9 : Insertion des données du terrain.

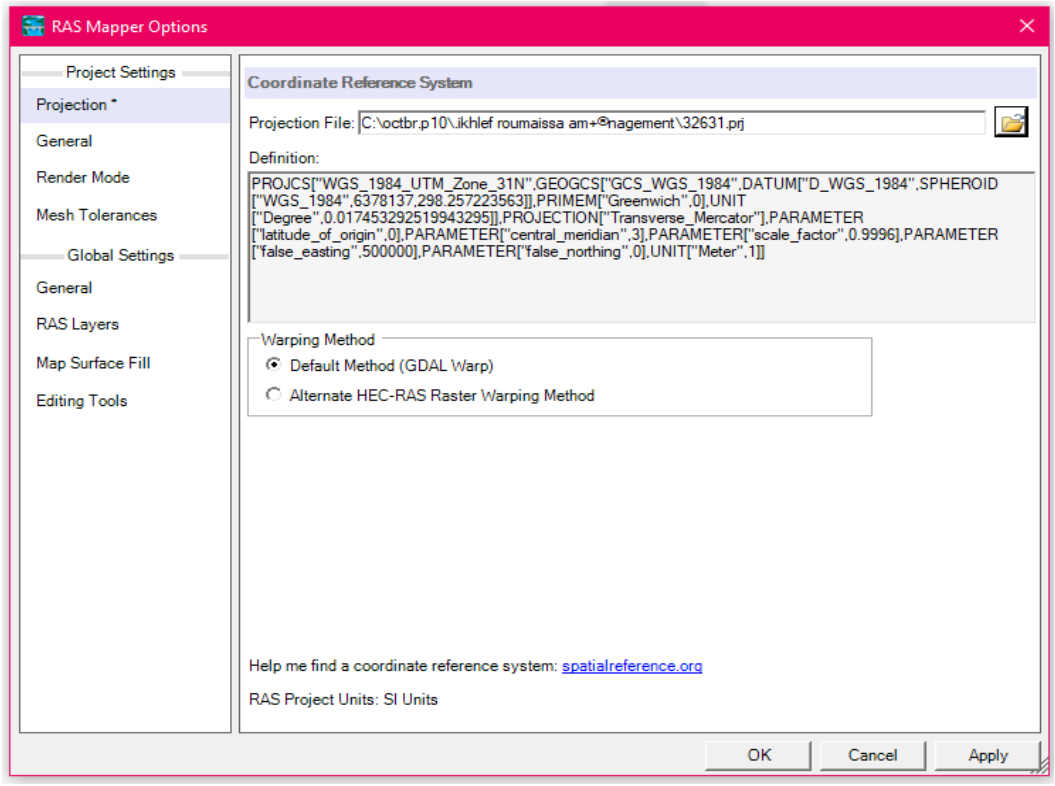


Figure IV.8 : Insertion fichier de projection.

•Dans RAS-MAPPER on trace l'axe des oueds, le lit mineur, lit majeur et les sections transversales.

•Nous obtenons des profils sans profondeur, ce qui nous oblige à rectifier leur géométrie pour obtenir des sections présentant une géométrie appropriée.

▪ La différence entre les deux géométries est représentée dans la figure suivante :

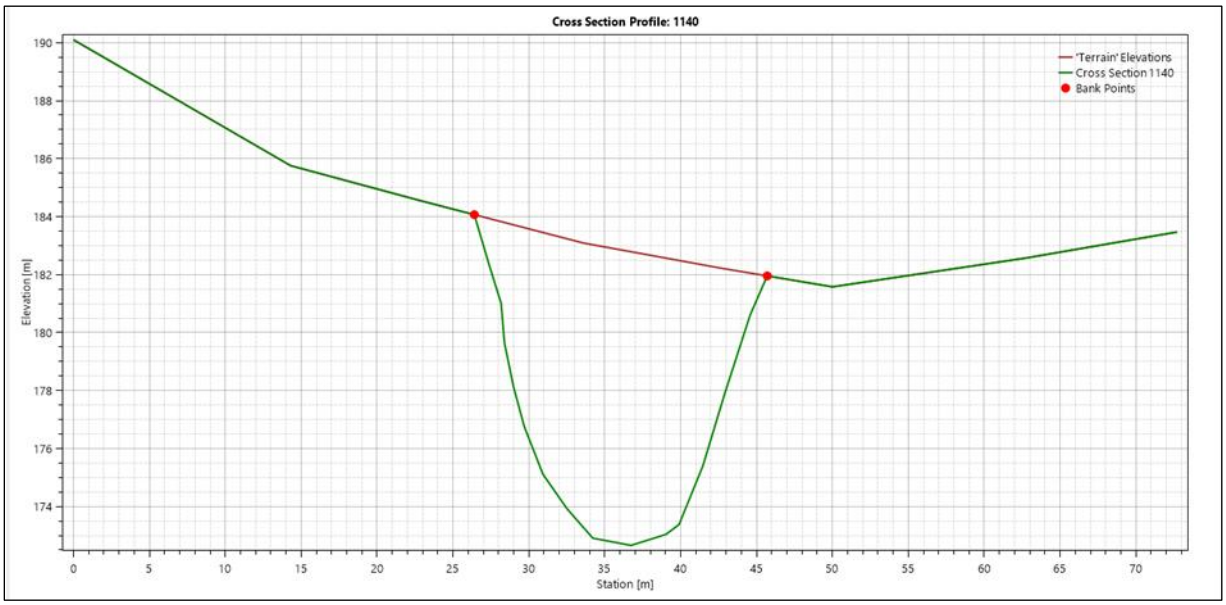
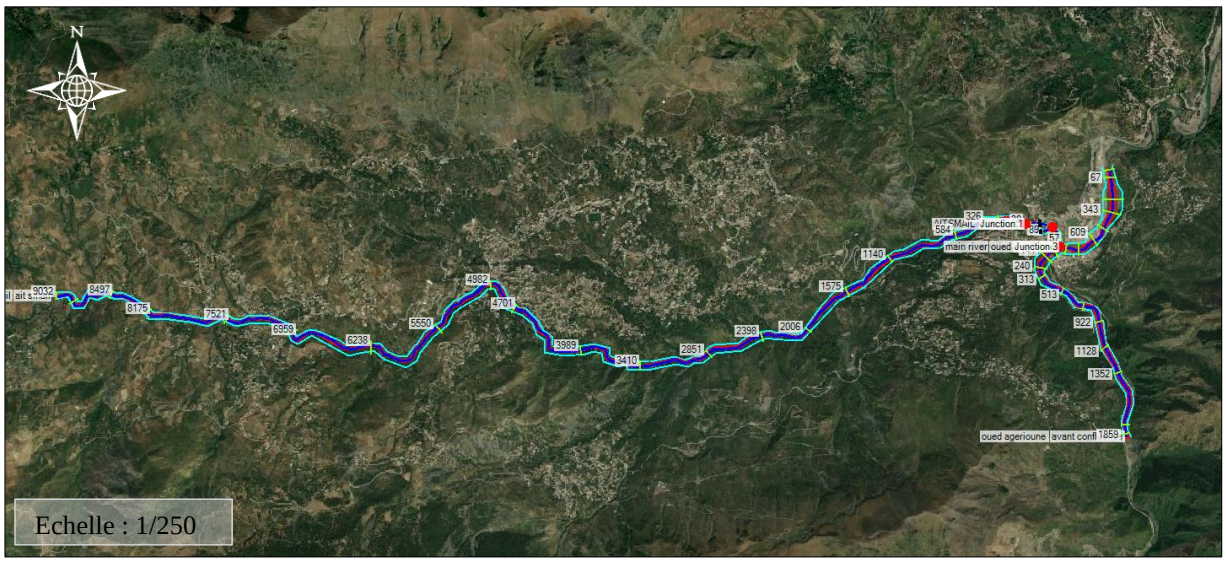


Figure IV.10 : Profil de terrain de la section en travers N° 1140 de l'oued Ait Smail avant et après correction de la géométrie.



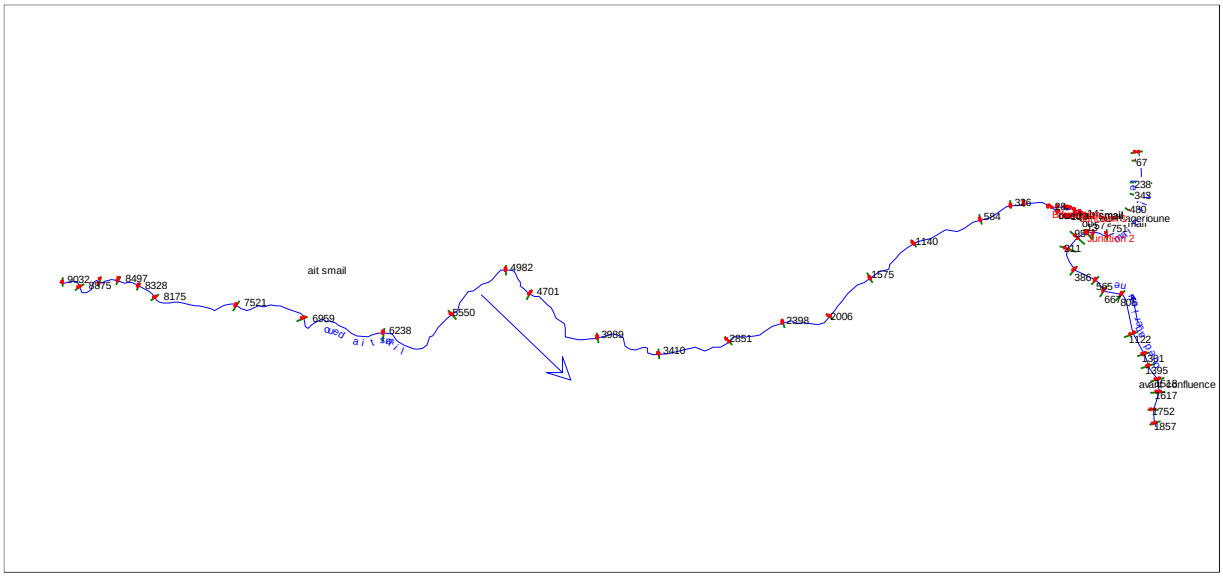


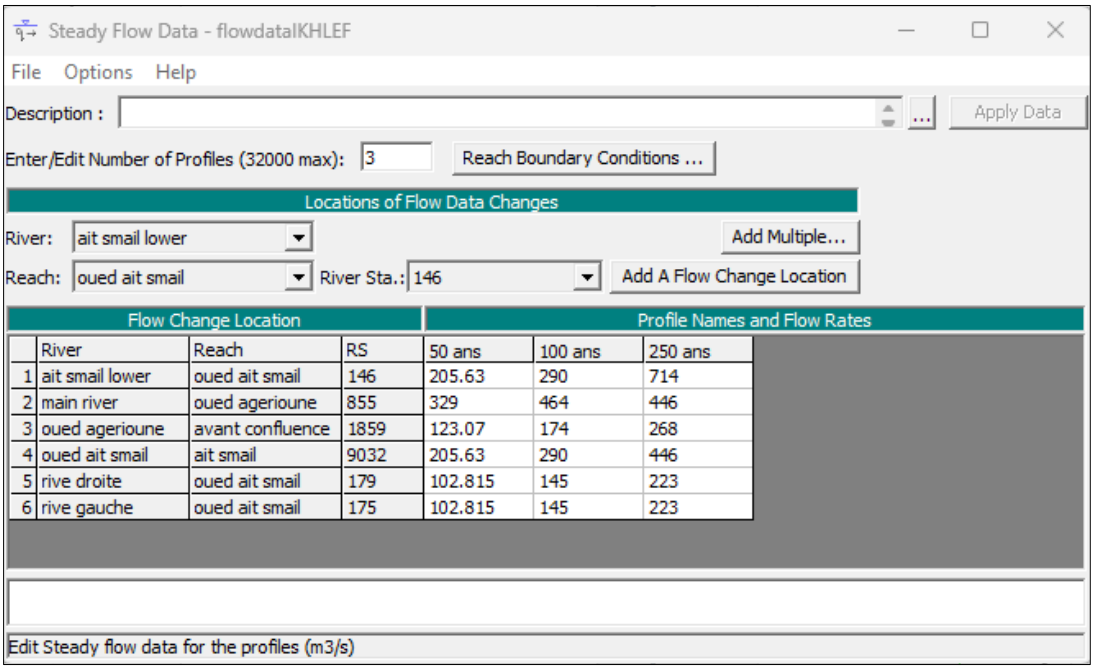
Figure IV.11 : Définition du tracé des oueds Agrioune et Ait Smail et ces sections en travers.

2. Les données hydrométriques et les conditions aux limites :

▪Après avoir enregistré les données géométriques de chaque section, la prochaine étape dans la modélisation hydraulique avec HEC-RAS consiste à définir les débits d'entrée et à déterminer toutes les conditions limites requises afin de permettre le calcul des profils de la surface de l'eau pour chaque section du réseau fluvial.

▪Les conditions aux limites sont très importantes dans la modélisation hydraulique. En effet, pour simuler un écoulement permanent, il est essentiel d'établir des conditions limites amont, aval, ou les deux, afin de déterminer l'élévation de la surface de l'eau aux extrémités de chaque segment de cours d'eau. C'est à partir de là que HEC-RAS peut entamer les calculs hydrauliques.

▪Dans notre étude, étant donné que l'écoulement est en régime mixte des calculs sont effectués pour cela, ce qui nécessite l'introduction de conditions aux limites aux extrémités amont et aval. Nous avons opté pour la profondeur normale en tant que condition, ce qui implique l'introduction d'une pente d'énergie. HEC-RAS utilisera cette valeur pour déterminer la profondeur en utilisant l'équation de Manning. Pour estimer cette pente d'énergie, nous mesurons la pente du tronçon en aval de notre tronçon modélisé.



	River	Reach	RS	50 ans	100 ans	250 ans
1	ait smail lower	oued ait smail	146	205.63	290	714
2	main river	oued agerioune	855	329	464	446
3	oued agerioune	avant confluence	1859	123.07	174	268
4	oued ait smail	ait smail	9032	205.63	290	446
5	rive droite	oued ait smail	179	102.815	145	223
6	rive gauche	oued ait smail	175	102.815	145	223

Figure IV.12 : Introduction des données hydrauliques des oueds.

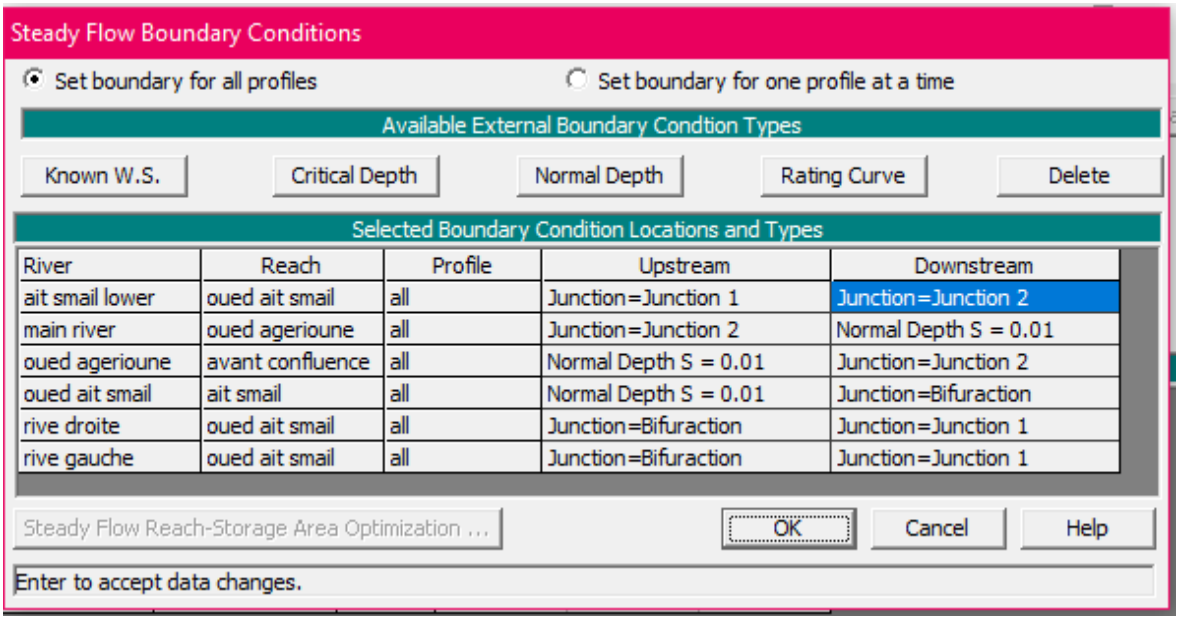


Figure IV.13 : Définition des conditions aux limites.

3. Simulation et interprétations des résultats :

▪Une fois que nous avons entré les données géométriques, hydrométriques et défini les conditions aux limites, il est nécessaire de sélectionner un régime fluvial parmi les options disponibles, à savoir un régime fluvial, torrentiel ou mixte, pour procéder aux calculs.

▪Dans notre situation, nous optons pour un régime mixte et procédons au lancement de la simulation.

•Le débit centennal calculé dans la partie hydrologique qui est de 174 m^3/s pour oued Agrioune partie Bordj Mira et 290 m^3/s pour oued Ait Smail.

★Le choix du coefficient de frottement (coefficient de Manning-Strickler) :

▪Le frottement au fond du lit est caractérisé par un coefficient de rugosité n (coefficient de Manning inverse du coefficient de Strickler k = 1/n).

▪ Suivant la nature du fond du lit on peut définir la valeur du coefficient de Manning en lit mineur et qui est déterminée à partir du tableau en (Annexe N°4).

Tableau n° IV.1 : Coefficients de Manning en lit Mineur appliqué à l'Oued Agrioune et oued Ait Smail.

Oued	Cas	Description	Valeur
Oued Agrioune	Sans végétation	Aval des gorges : lit pierreux avec méandres avec quelques blocs rocheux,	0.04
Oued Ait Smail		Présence de blocs rocheux en lit mineur.	0.04
Oued Agrioune	Avec végétation	Fond propre, broussailles sur les bords.	0.07
Oued Ait Smail		Présence de bancs végétaux sur les berges.	0.07

4. Résultat de la simulation :

L'entrée des données géométriques relatives aux profils des sections transversales, aux débits de crue pour différentes périodes de retour, ainsi qu'aux conditions aux limites dans le logiciel HEC-RAS a permis d'effectuer les calculs requis et d'extraire divers résultats. Ces résultats incluent une représentation en coupe du tronçon simulé, les niveaux d'eau correspondant à chaque période de retour le long des profils, une visualisation tridimensionnelle des niveaux d'eau dans la section d'étude grâce à des tableaux descriptifs, ainsi que la courbe de tarage.

- **Le profil en long :**

La ligne d'eau offre une représentation en coupe du tronçon d'étude, affichant à la fois le niveau et la surface de l'Oued, ainsi que le niveau d'eau correspondant à une période de retour centennale.

★Oued Agrioune avant la confluence :

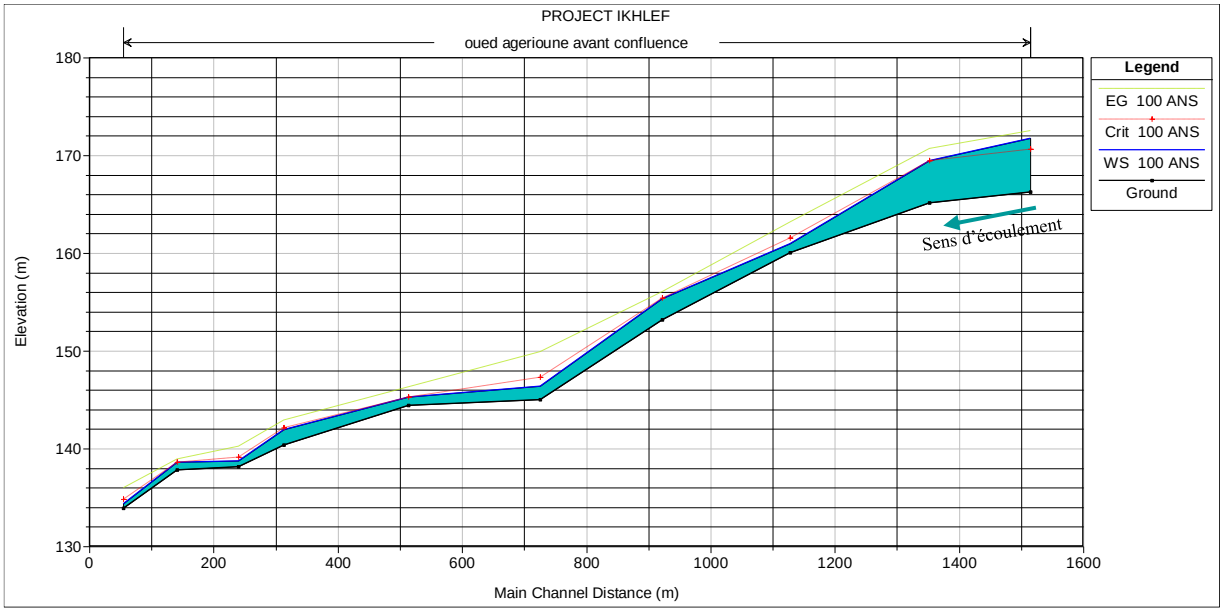


Figure IV.14 : Profil en long de l'oued Agrioune avant la confluence à l'état naturel pour une crue centennale.

★Oued Ait Smail :

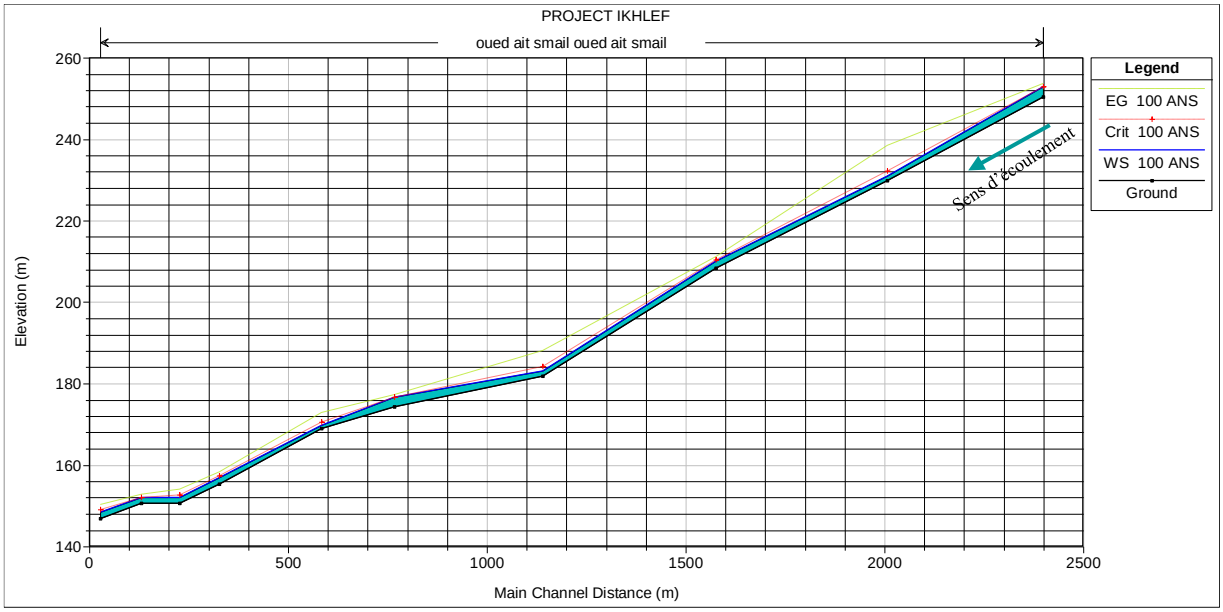


Figure IV.15 : Profil en long de l'oued Ait Smail à l'état naturel pour une crue centennale.

★Oued Agrioune après la confluence :

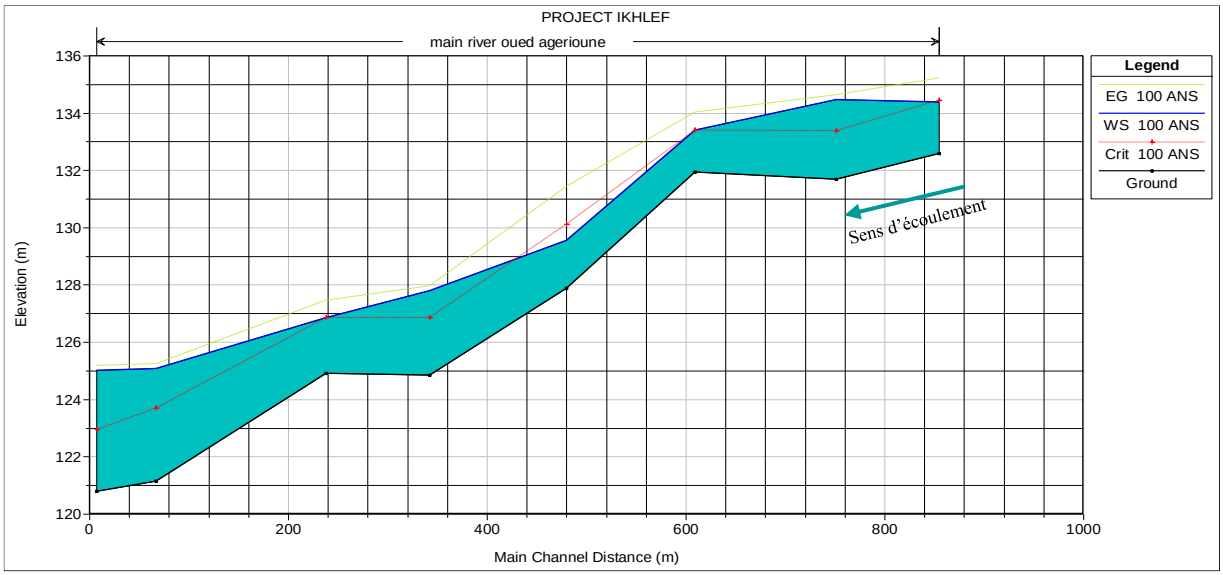


Figure IV.16 : Profil en long de l'oued Agrioune après la confluence à l'état naturel pour une crue centennale.

✵ Vue en trois dimensions des tronçons modélisés :

HEC-RAS offre une visualisation tridimensionnelle qui simplifie la surveillance du comportement des eaux de crue pour différentes périodes de retour.

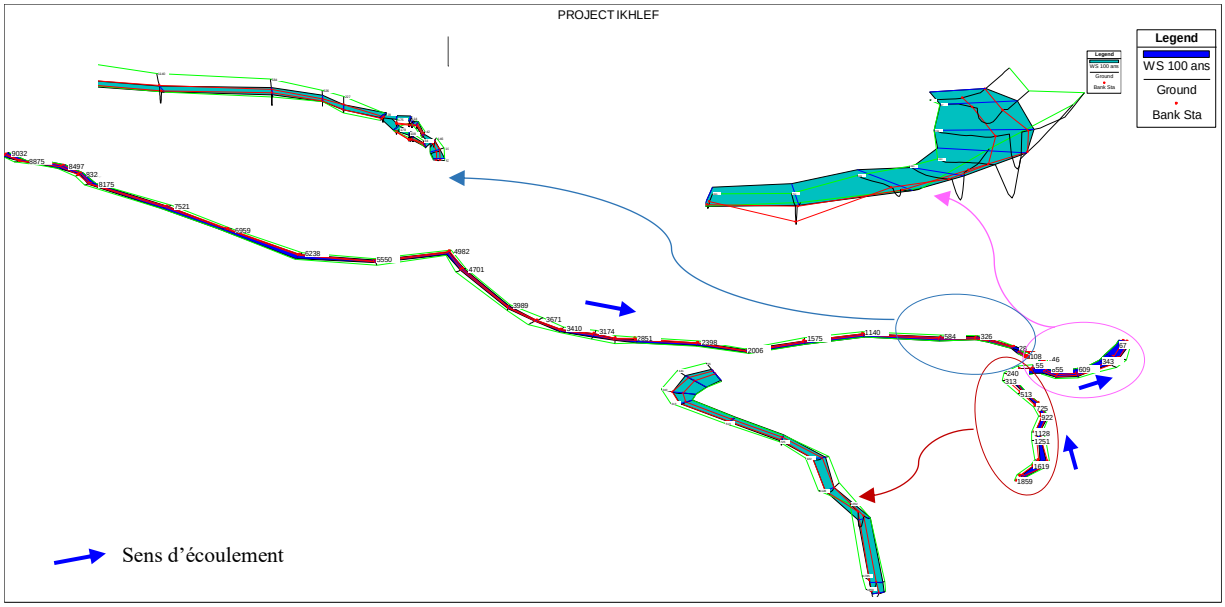


Figure IV.17 : Vue en Plan en 3D des Oueds.

❋ **Restitution de la courbe de tarage :**

HEC-RAS a permis de générer une représentation de l'évolution de la hauteur d'eau (m) en fonction du débit (m^3/s).

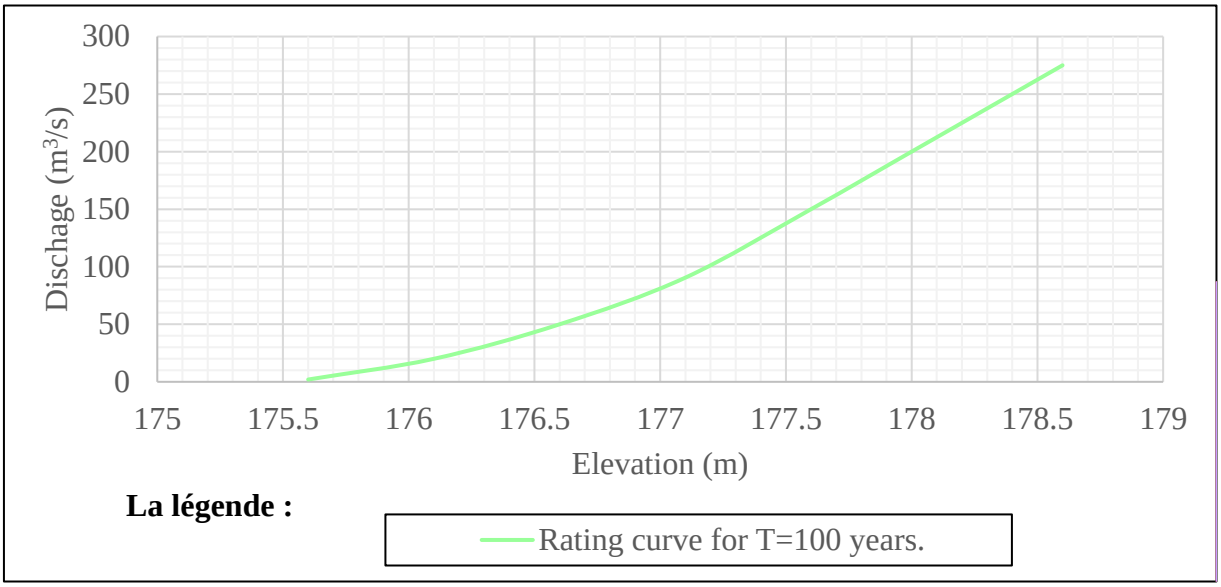


Figure IV.18 : Courbe de tarage du tronçon modélisé d'Oued Agrioune avant la confluence.

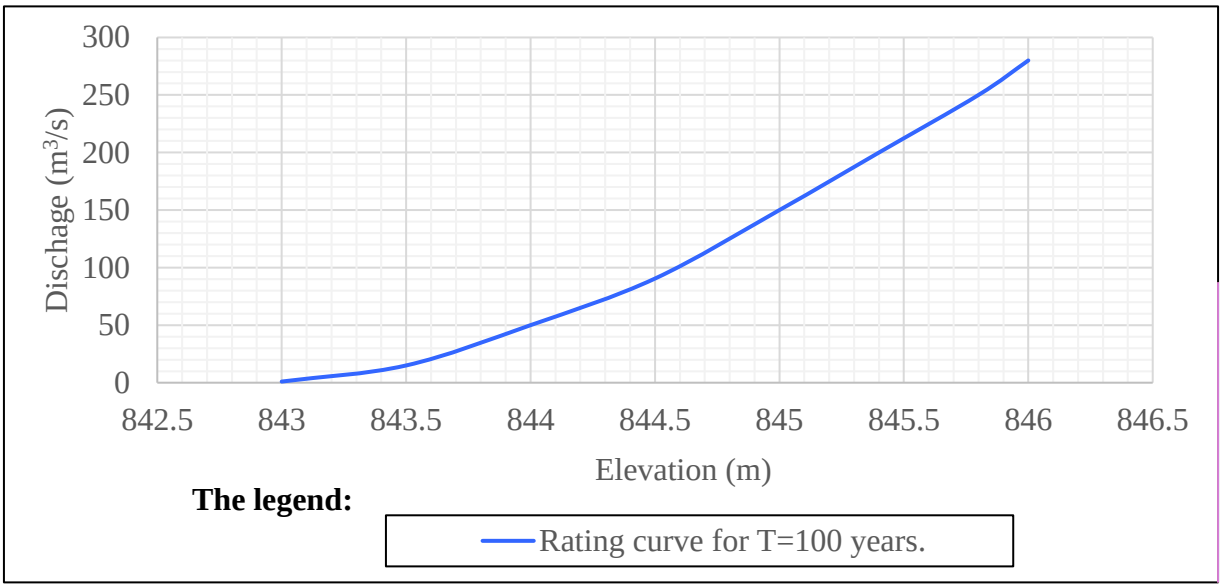


Figure IV.19 : Courbe de tarage du tronçon simulé d'Oued Ait Smail.

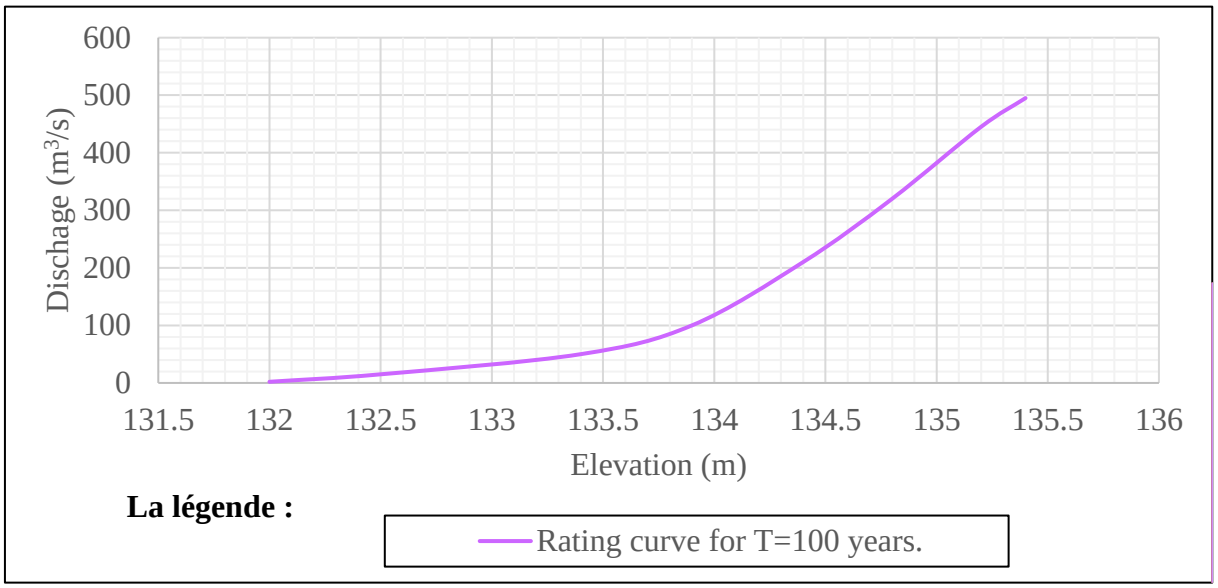
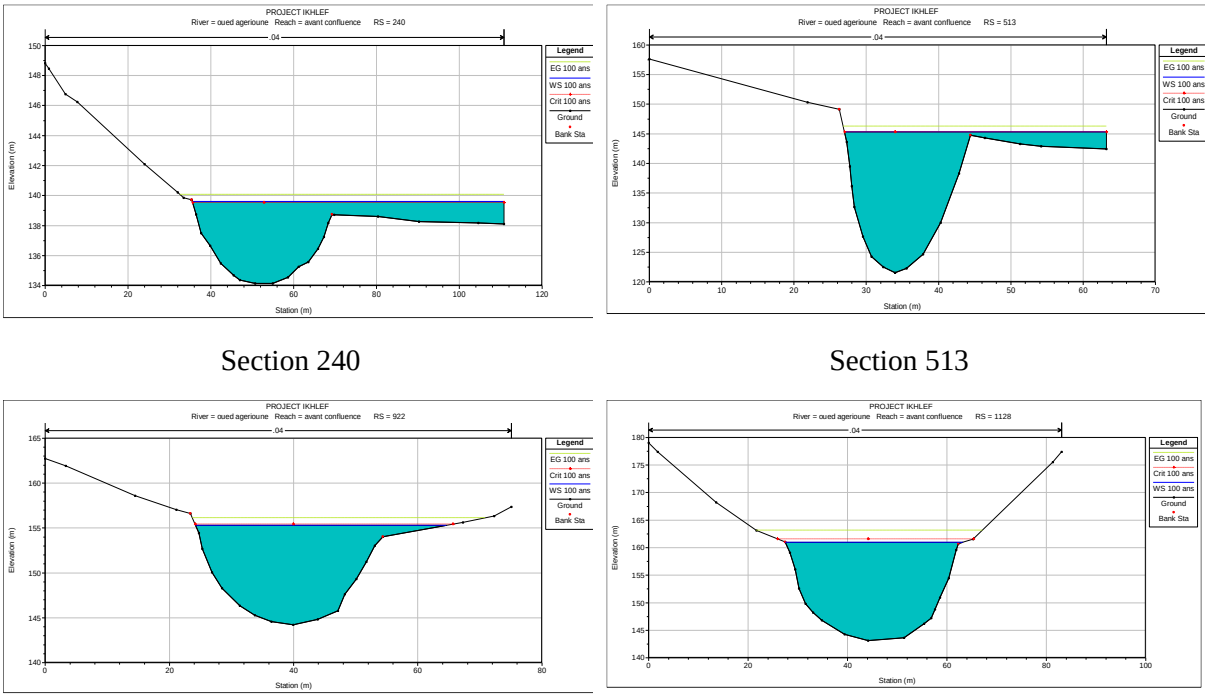


Figure IV.20 : Courbe de tarage du tronçon modélisé d'Oued Agrioune après la confluence.

- **Les profils en travers :**

L'option d'affichage des résultats par profil transversal permet de recueillir le maximum de détails à chaque emplacement sélectionné le long du tracé du cours d'eau, mettant en évidence que pratiquement toutes les sections sont susceptibles d'être submergées sauf celles d'oued Agrioune avant la confluence à cause de la grande largeur et profondeur du fond de l'oued.

❋L’oued Agrioune avant la confluence :

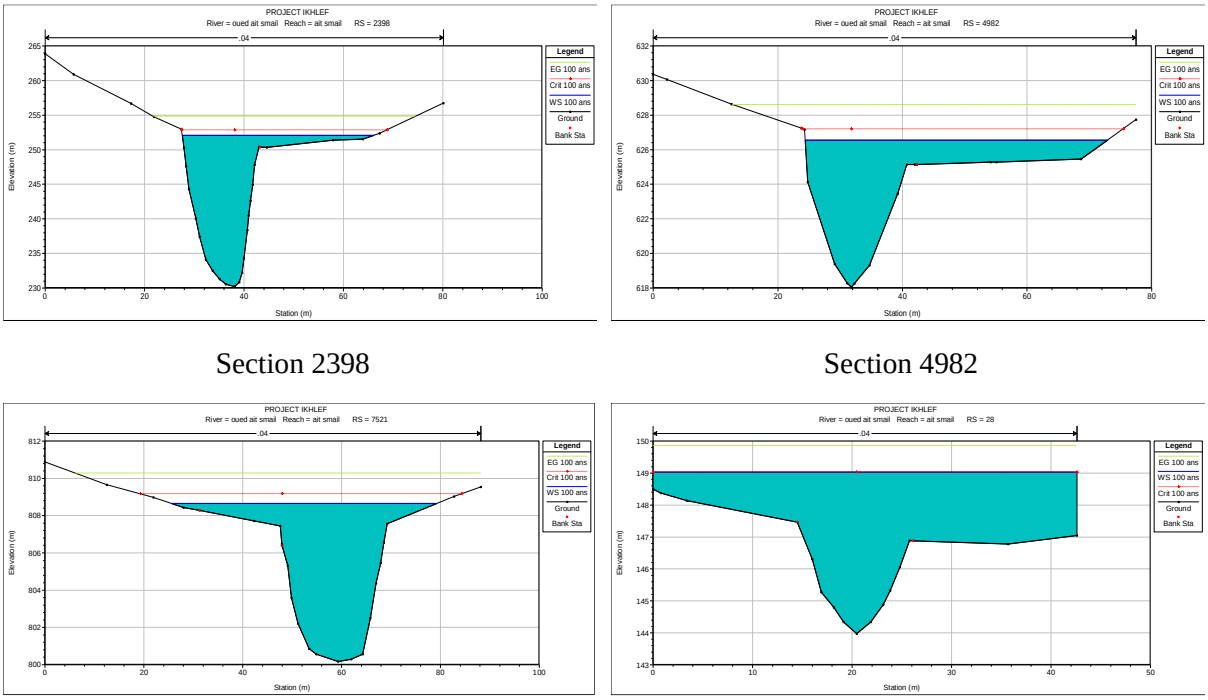


Section 240 Section 513

Section 922 Section 1128

Figure IV.21 : Les profils en travers de quatre sections choisies de l’oued Agrioune avant la confluence.

❋ L'oued Ait Smail :

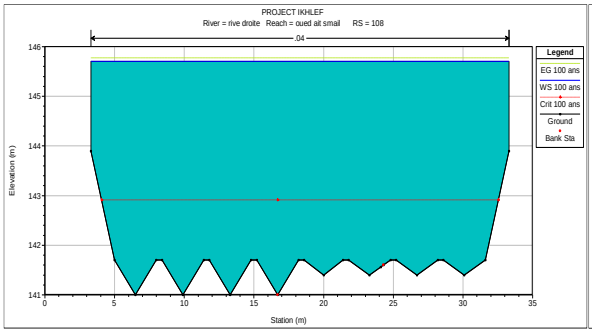


Section 2398 Section 4982

Section 7521 Section 28

Figure IV.22 : Les profils en travers de quatre sections choisies de l'oued Ait Smail.

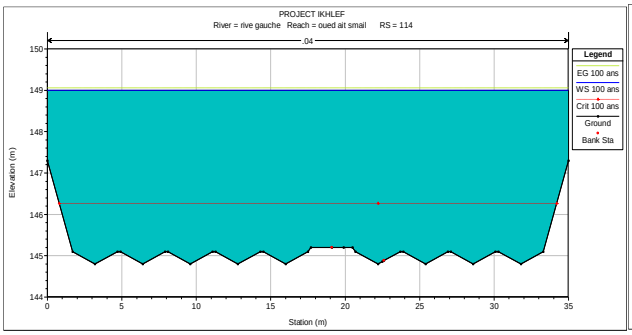
❃La partie du pont :



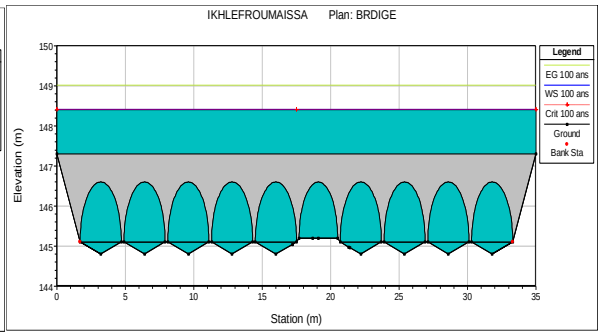
Section en amont du pont en rive gauche



Le détail du pont en rive



Section en amont du pont en rive droite



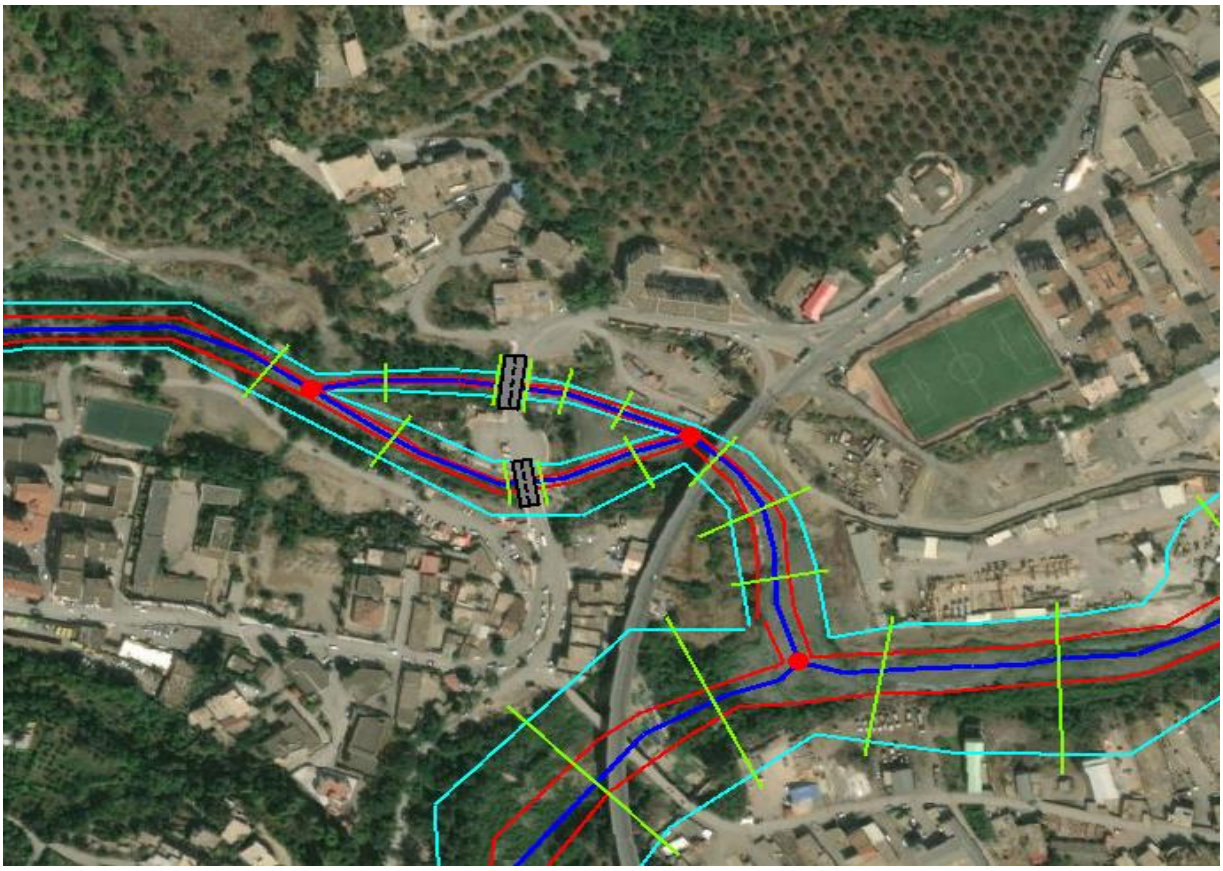
Le détail du pont en rive droite

Figure IV.23 : Le Pont qui Enjambe l'oued Ait Smail

•Le tableau suivant résume les paramètres relatifs aux deux rives du pont :

Tableau n° IV.2 : Récupératif des détails du pont existant sur l'oued Ait Smail.

	Buses			Largeur (m)	Longueur (m)	Hauteur (m)
	Forme	Nombre	Diamètre (m)			
Rive droite du pont	Demi-circulaire	10	Entre 2.8 et 3	10	35	4
Rive gauche du pont		8		10	30	3



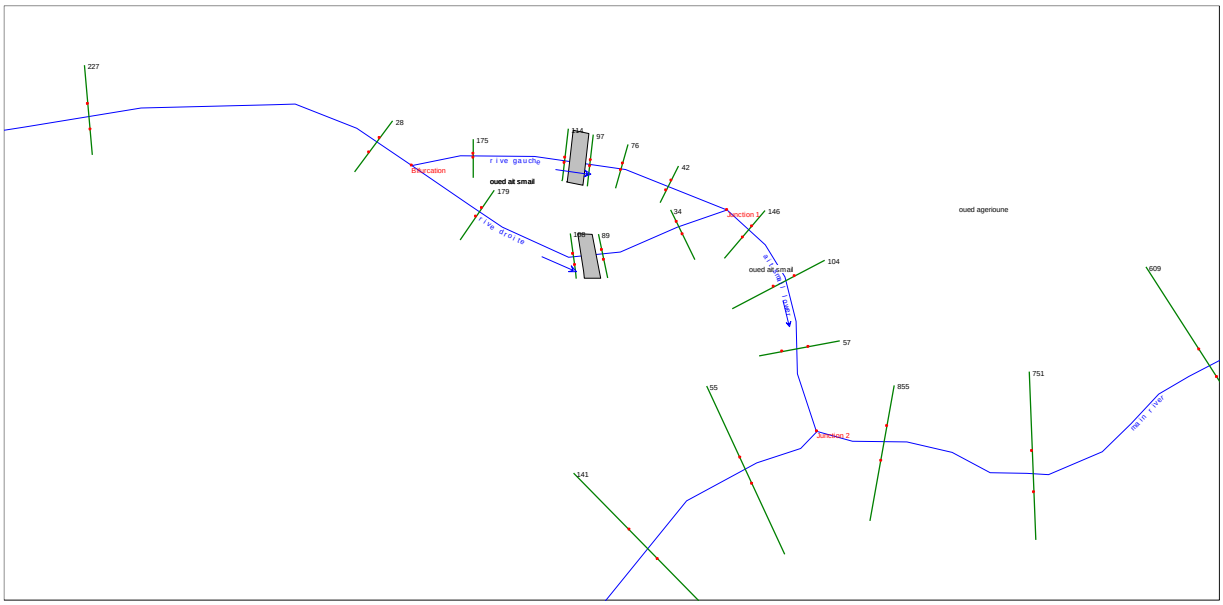
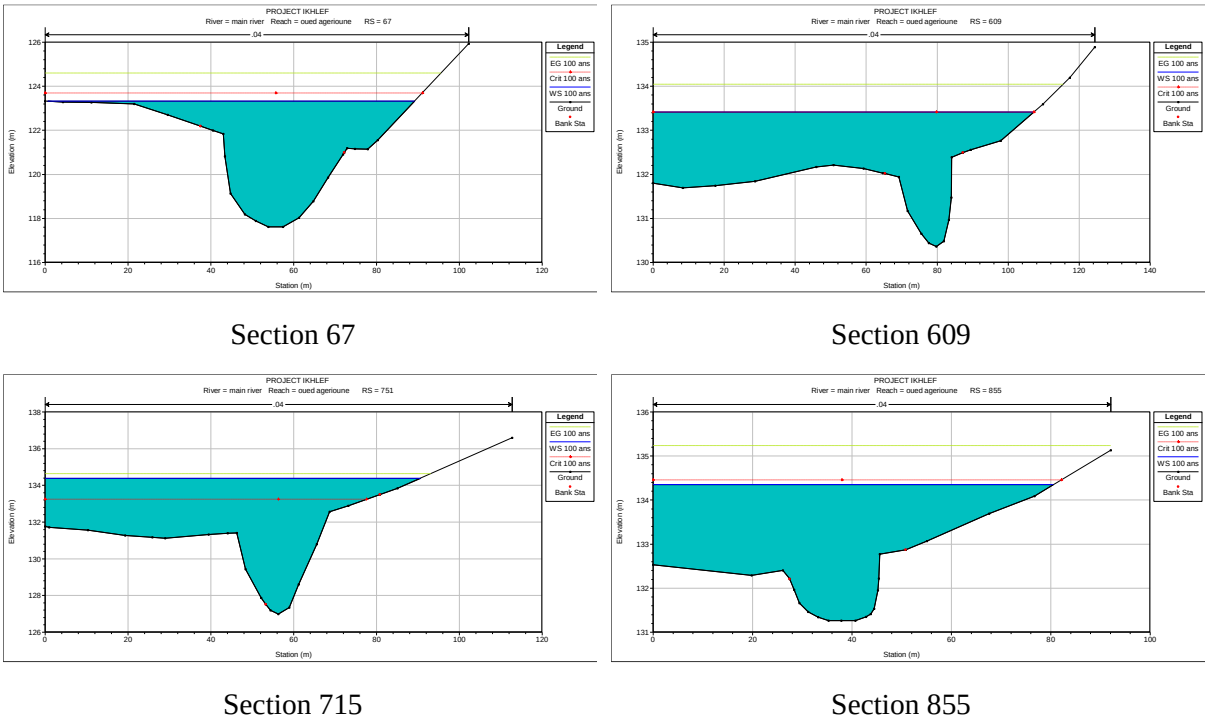


Figure IV.24 : L'emplacement du pont sur les deux rives de l'oued Ait Smail.

❋ L'oued Agrioune après la confluence :



Section 67 Section 609

Section 715 Section 855

Figure IV.25 : Les profils en travers de quatre sections choisies de l'oued Agrioune après la confluence.

- **Variation de la vitesse d'écoulement :**

La variation de la vitesse d'écoulement des eaux en fonction de la distance à partir de l'exutoire pour chaque période de retour 50,100 et 250 ans pour chaque tronçon est représentée dans les figures suivantes :

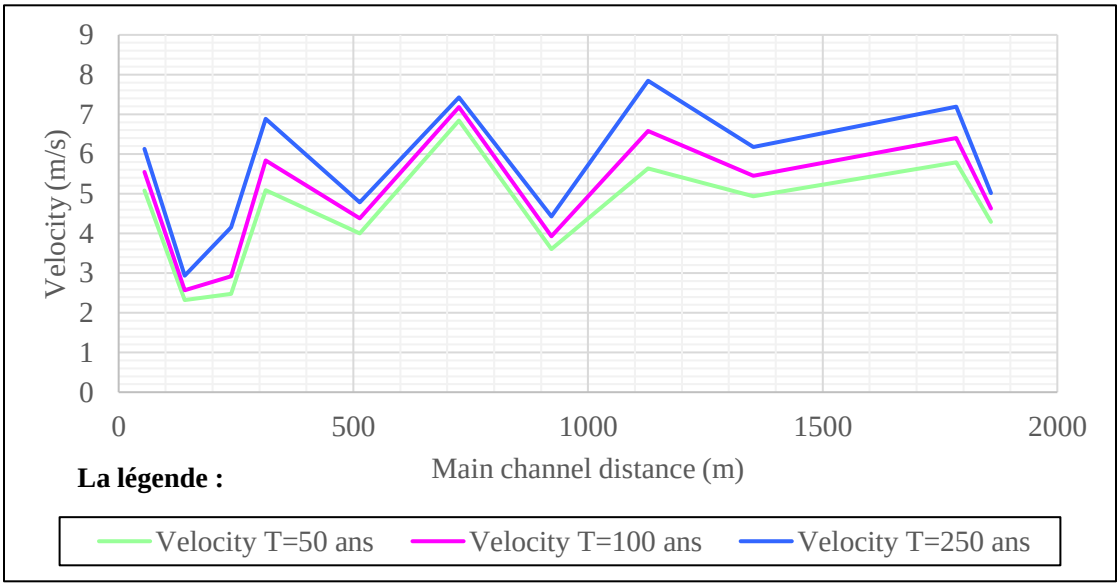


Figure IV.26 : Variation de la vitesse d'écoulement en fonction de la distance dans l'oued Agrioune avant la confluence.

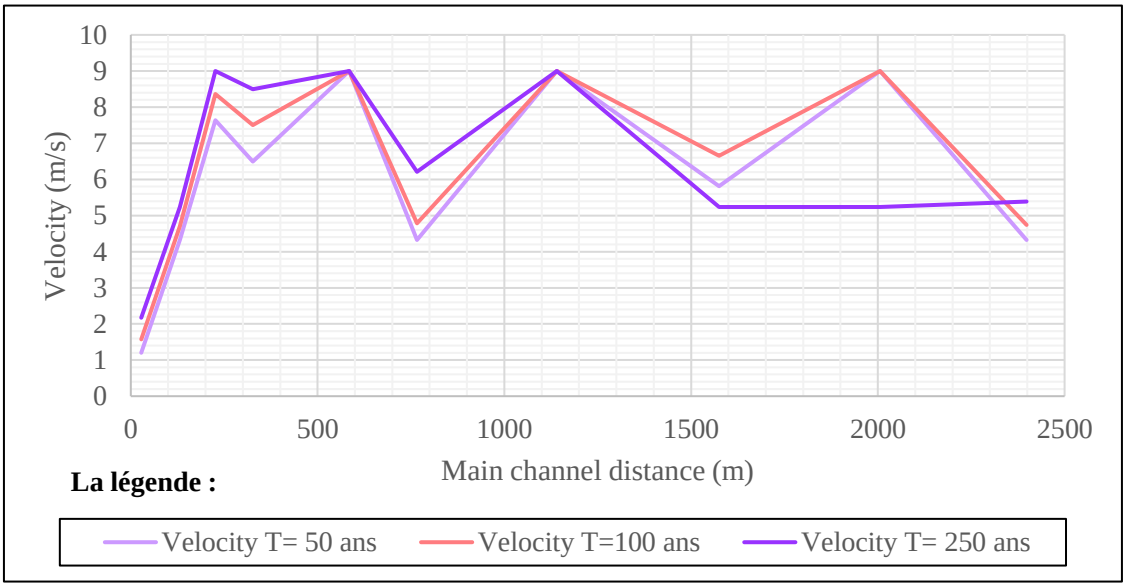


Figure IV.27 : Variation de la vitesse d'écoulement en fonction de la distance dans l'oued Ait Smail.

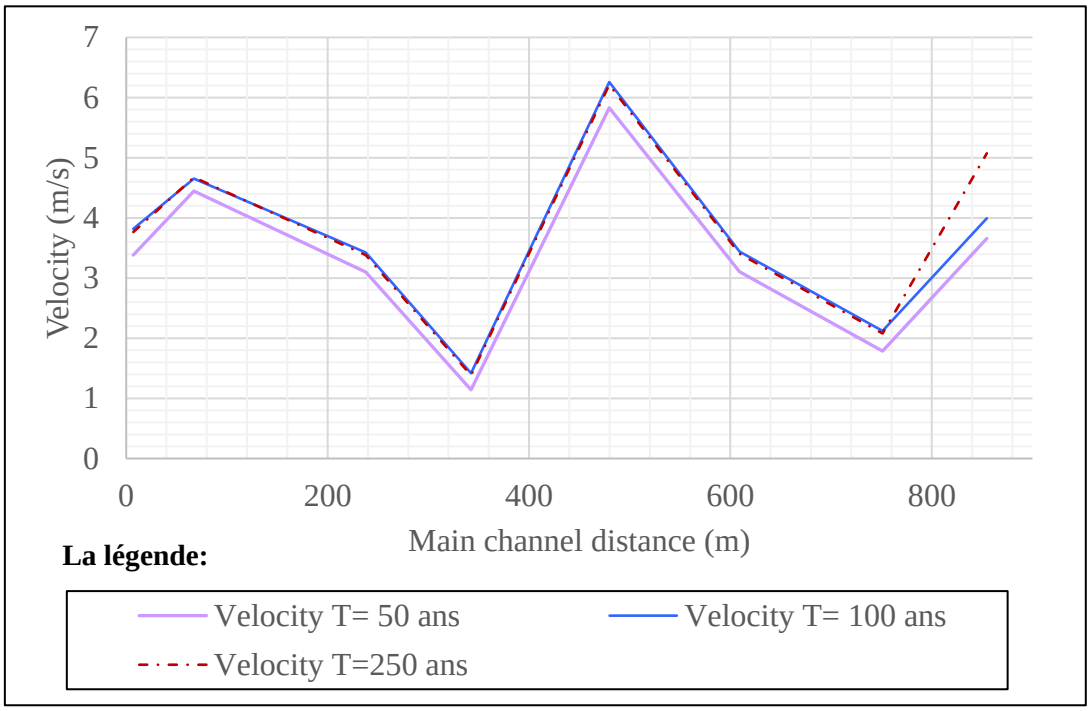


Figure IV.28 : Variation de la vitesse d'écoulement en fonction de la distance dans l'oued Agrioune après la confluence.

✵ **Evolution du nombre de Froude :**

▪La variation du nombre de Froude est représentée en fonction de la distance pour chaque période de retour 50, 100 et 250 ans.

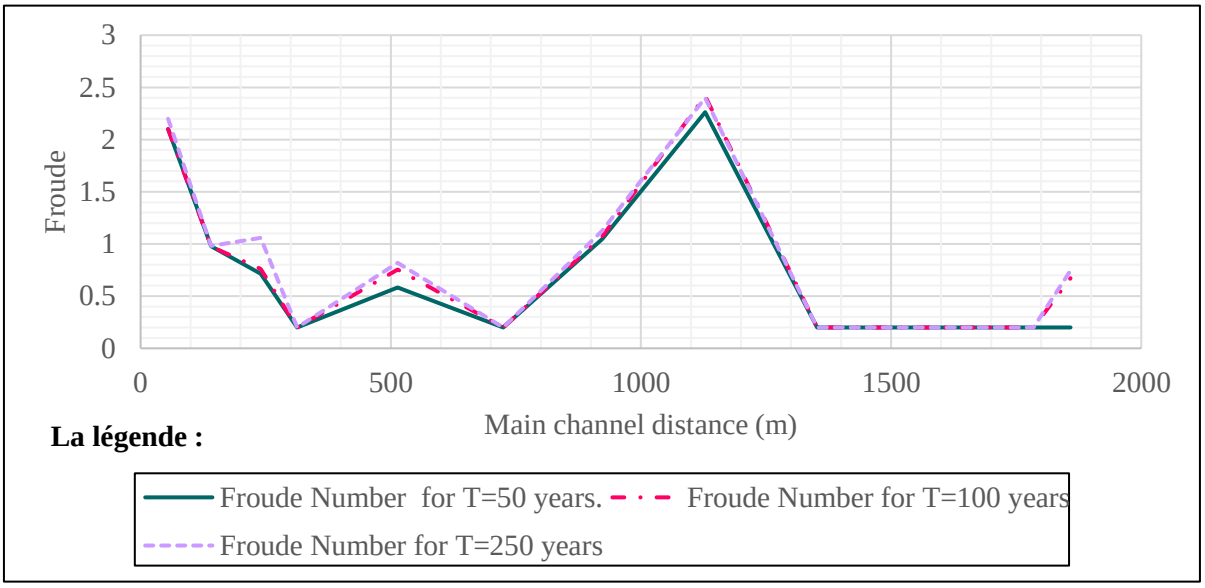


Figure IV.29 : Evolution du nombre de Froude en fonction de la distance d'oued Agrioune avant la confluence.

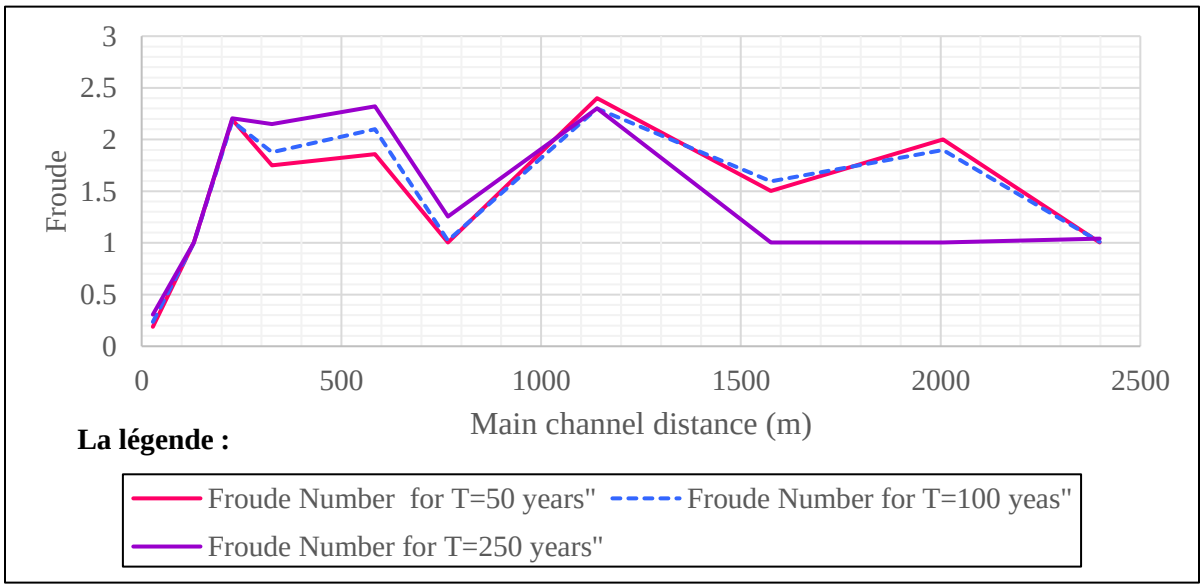


Figure IV.30 : Evolution du nombre de Froude en fonction de la distance d'oued Ait Smail.

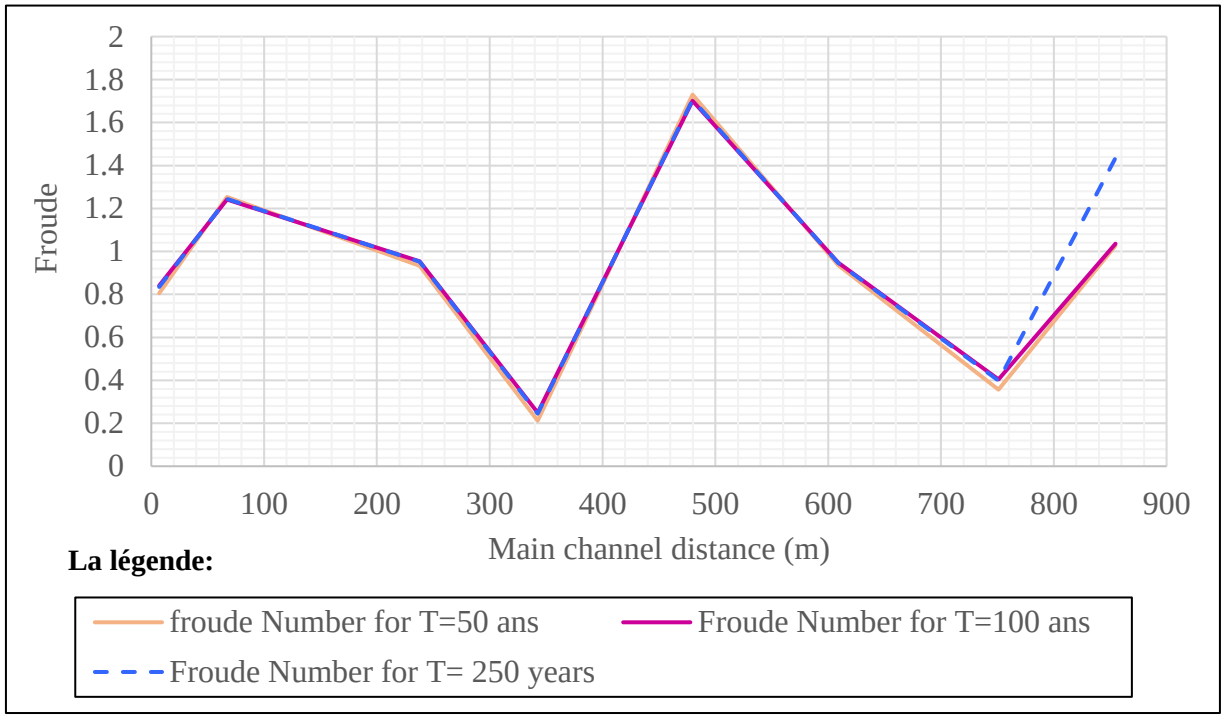


Figure IV.31 : Evolution du nombre de Froude en fonction de la distance d'oued Agrioune après la confluence.

✵ **Paramètres hydrauliques pour l'ensemble des stations :**

▪Le Tableau n° IV.3 récapitule l'ensemble des paramètres hydrauliques pour l'ensemble des stations à la fois.

Tableau n° IV.3 : Récupératif des résultats de la simulation de l'écoulement pour la période de retour T=100ans (Source : Logiciel HEC-RAS).

Reach	River Sta	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl	Obs
		(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m^2)	(m)	/	
Oued Ait Smail	6021	707.02	709.66	709.66	710.58	0.013151	4.24	68.35	37.39	1	Non inondables
	5508	652.9	655.6	656.81	659.4	0.063585	8.64	33.57	20.02	2.13	
	4915	575.29	578.45	580	583.43	0.066956	9.89	29.33	13.29	2.13	
	4670	555.05	556.9	558.07	561.46	0.124388	9.46	30.68	28.16	2.85	
	4388	513.45	516.51	518.56	524.85	0.133026	12.79	22.67	11.71	2.94	
	3873	399.71	402.85	404.9	411.25	0.137501	12.83	22.6	11.83	2.96	
	3469	302.93	307.3	307.3	308.93	0.014305	5.64	51.39	15.91	1	
	2962	270.12	273.03	273.48	274.69	0.024388	5.71	50.81	28	1.35	
	2482	223.47	226.47	227.63	230.26	0.049869	8.62	33.64	15.71	1.88	
	2257	223.1	225.87	225.87	226.68	0.013536	3.99	72.62	44.76	1	
	1960	205.21	208.49	209.99	216.92	0.118481	12.98	24.11	21.88	2.55	
	1847	196.95	199.43	200.75	205.5	0.077899	11.89	32	31.2	2.48	
	1623	180.89	184.12	186	189.19	0.066056	9.98	29.06	12.32	2.07	
	1482	173.31	177.78	178.92	181.6	0.040669	8.66	33.5	10.13	1.52	
	1205	172.33	176.78	176.78	177.54	0.006064	4.52	93.15	61.23	0.72	
	1066	166.82	171.22	172.61	175.5	0.036968	9.52	35.7	21.43	1.58	
	821	163.01	165.12	165.54	166.57	0.030217	6.81	61.31	59.33	1.54	
	584	152.43	154.94	156.34	162.47	0.143525	12.15	23.92	18.62	3.12	Inondables
	326	152.16	153.64	154.03	155.14	0.025723	4.9	53.9	33.35	1.34	
	227	148.24	151.09	150.21	151.39	0.003107	2.69	129.99	72.9	0.52	
	131	147.49	150.11	150.11	150.94	0.013465	4.55	72.7	43.58	0.95	
	28	144.41	146.38	147.19	149.12	0.065007	8.37	40.83	35.97	2.1	
Oued Agrioune	6265	411.57	413.7	413.7	414.43	0.014406	3.79	45.94	31.94	1.01	Non inondables
	5817	361.88	379.56	363.69	379.56	0.000002	0.18	959.18	80.81	0.02	
	4771	375.62	378.63	378.63	379.48	0.013866	4.08	42.6	25.23	1	
	4361	306.2	308.16	308.16	308.84	0.014446	3.65	47.66	35.24	1	
	4011	279.5	281.36	281.36	282.09	0.014126	3.79	45.95	31.44	1	
	3742	256.2	257.78	257.78	258.29	0.015701	3.16	55.14	54.36	1	
	2814	247.85	249.59	249.59	250.15	0.015165	3.33	52.3	46.35	1	
	1414	166.31	171.76	170.68	172.55	0.007395	4.14	44.97	12.41	0.74	
	1352	165.19	169.49	169.49	170.73	0.01661	4.93	35.29	14.4	1.01	
	1128	160.04	160.98	161.6	163.19	0.102724	6.34	26.5	35.62	2.41	
	922	153.17	155.36	155.41	156.09	0.014712	3.21	47.06	35.4	0.98	

	725	145.06	146.39	147.33	149.91	0.113585	8.31	20.94	19.94	2.59	
	460	144.43	145.32	145.32	146.31	0.013605	1.67	40.15	21.16	0.8	Inondables
	313	140.42	140.13	140.69	141.96	0.04462		29.04	22.13	0	
	240	138.93	139.59	139.54	140.06	0.012795	0.95	59.28	65.59	0.69	
	141	137.83	138.63	138.63	138.98	0.016762	2.64	67.78	97.92	0.98	
	55	133.92	134.41	134.82	136.01	0.149364	5.67	31.65	77.23	2.7	
Oued Agrioune (main river)	855	132.59	134.38	134.46	135.22	0.01386	3.08	118.92	80.96	0.95	Inondables
	822	131.42	134.41	133.23	134.65	0.002132	1.7	220.49	90.87	0.41	
	751	131.94	133.41	133.41	134.04	0.013128	3.17	134.86	107.21	0.94	
	609	127.88	129.55	130.13	131.44	0.045869	6.26	76.38	63.14	1.77	
	480	123.85	127.59	125.56	127.7	0.00071	1.3	327.13	102.92	0.25	
	343	124.91	126.86	126.86	127.47	0.014386	3.17	135.5	113.16	0.97	
	238	121.14	125.08	123.7	125.26	0.00119	2.02	264.31	98.04	0.34	
	67	120.79	125.02	122.95	125.19	0.001	1.9	256.71	75.36	0.31	
	7	132.59	134.38	134.46	135.22	0.01386	3.08	118.92	80.96	0.95	

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

▪ En observant les variations du niveau d'eau le long des diverses sections transversales de l'oued, nous avons constaté que l'oued Agrioune, après la confluence, était le tronçon le plus sujet aux inondations, tandis que les autres tronçons connaissent des inondations dans des zones où la profondeur est petite, selon les paramètres suivants :

♦La vitesse d'écoulement varie 0.23m/s et 12.79 m/s : Les fortes vitesses d'écoulement observées au niveau de l'oued Ait Smail sont liées à la topographie de cet affluent. D'autre part, les faibles vitesses sont observées au niveau de l'oued Agrioune après la confluence, ce qui est attribuable à la faible pente de ce tronçon avec un exaucement du tirant d'eau jusqu'à 8 m.

♦Les valeurs du nombre de Froude varient de 0.1 à 3, indiquant une diversité dans le régime d'écoulement le long des tronçons de l'oued Ait Smail et de l'oued Agrioune avant la confluence. Cependant, on observe un nombre de Froude (Fr) < 1 dans le tronçon de l'oued Agrioune.

IV.5 La cartographie du risque d'inondation :

♦Après avoir établi les profils d'inondation à l'aide du logiciel HEC-RAS, notre prochaine étape consiste à délimiter et cartographier les zones inondables à risque. Pour ce faire, nous avons besoin de connaître les hauteurs d'eau dans différentes parties des oueds.

♦ Afin d'identifier les points de débordement et les zones inondables à risque, nous avons simulé l'état du cours d'eau en cas de crue centennale à l'aide du de l'outil RAS-MAPPER dans le logiciel HEC-RAS. Cela nous a permis d'obtenir les cartes qui seront présentées dans la suite de cette étape.

♦ La cartographie des risques consiste à situer les risques majeurs en fonction de divers paramètres, tels que l'impact potentiel, la probabilité d'occurrence ou le niveau actuel de maîtrise des risques. L'établissement d'une cartographie des risques peut être motivé par les objectifs suivants :

★Mettre en place un contrôle interne ou un processus de maîtrise des risques adéquat ;

★Aider le management dans l'élaboration de son plan stratégique et sa prise de décisions ;

★Orienter le plan d'audit interne en mettant en lumière les processus/activités où se concentrent les risques majeurs ;

♦La gestion du risque peut se définir comme étant une conjonction entre l'organisation et les moyens qui permettent de se préparer et de faire face à la survenue d'une crise et facilitent la prise de décision. Cette démarche comprend trois étapes :

★La prévision : il s'agit des mesures mises en place en vue d'anticiper un aléa de manière à améliorer sa gestion ;

★ La protection- prévention : un risque peut se définir à la manière d'une espérance probabiliste, en effectuant le produit de sa gravité par sa probabilité. La protection a vocation à réduire la gravité tandis que les mesures de prévention agissent sur la fréquence (ou probabilité) d'un risque franchissant le seuil d'acceptabilité fixé par l'autorité territoriale ;

★L'information à destination de tous les acteurs de la gestion des risques, du particulier au Préfet.

IV.5.1 La carte de l'aléa inondation :

▪La carte de l'aléa d'inondation est l'outil de référence qui permet d'évaluer le risque auquel pourrait être exposé un bien implanté dans une zone donnée et de pouvoir prendre des mesures tant de prévention que de protection de biens, des personnes et de l'environnement. La carte renseigne deux types d'aléa d'inondation :

♦ L'inondation par débordement de cours d'eau (on parle alors de zone d'aléa d'inondation) ;

♦ L'inondation par ruissellement dans un vallon sec (on parle alors d'axe d'aléa d'inondation).

▪La valeur de l'aléa d'inondation peut être : très faible, faible, moyenne ou élevée. Elle résulte de la combinaison de deux facteurs :

♦ La récurrence (période de retour ou occurrence) de l'inondation ou de la pluie à l'origine du ruissellement ;

♦ Son importance (profondeur de submersion ou débit de pointe) (SPW, 2021).

IV.5.1.1 Carte des profondeurs :

▪La submersion d'une inondation est caractérisée principalement par son étendue et sa profondeur. Sa détermination nécessite l'utilisation de modèles hydrauliques ou la topographie des lits mineurs et majeurs des cours d'eau est reproduite numériquement (Graguid, 2011).

▪ De ce fait, on distingue trois catégories de submersion en fonction de leurs profondeurs :

- ♦ Submersion faible : dont la profondeur est inférieure à 0.5 mètre ;
- ♦ Submersion moyenne : dont la profondeur se situe entre 0.5 et 1 mètre ;
- ♦ Submersion élevée : dont la profondeur dépasse 1 mètre (Graguid, 2011).

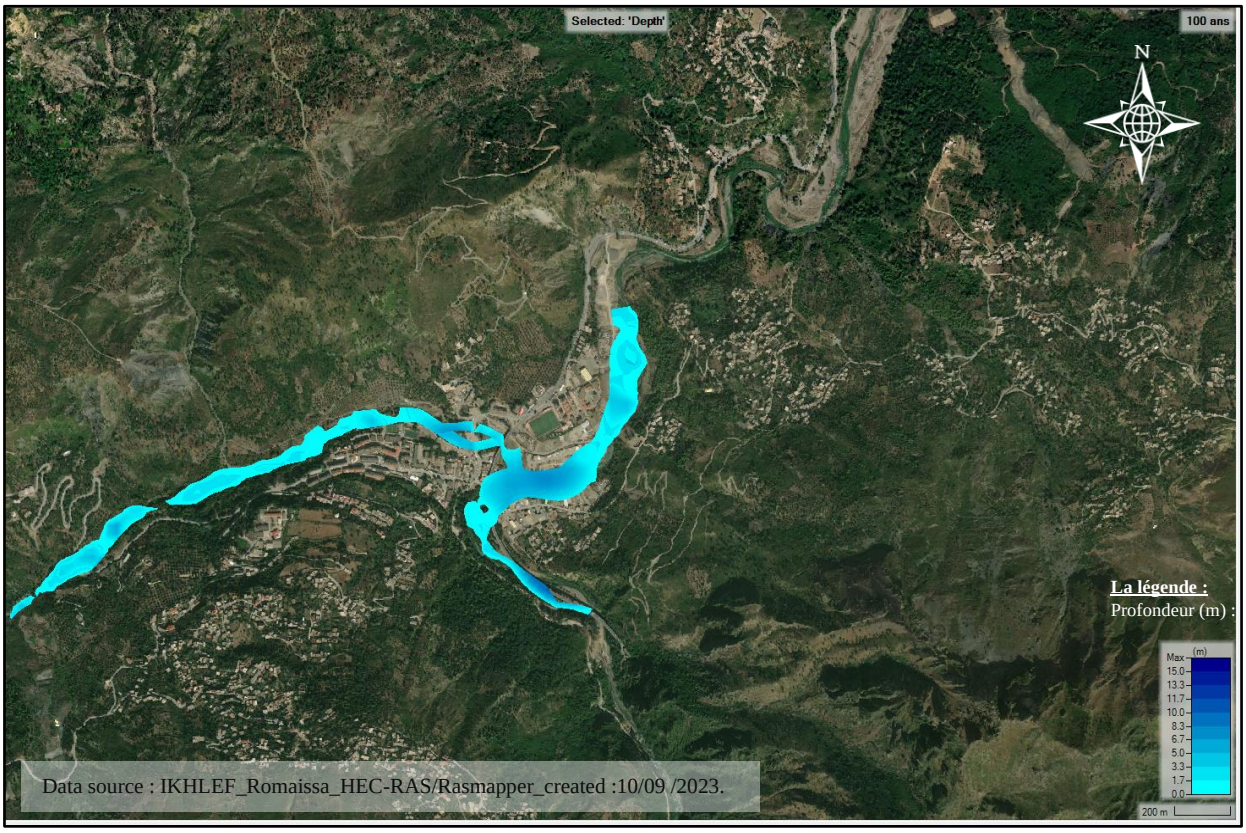


Figure IV.32 : Carte de profondeur d'eau pour la période de retour 100 ans.

♦D'après la carte de profondeur d'eau obtenue, on remarque que la hauteur d'eau varie entre 0.6 à 8 m. Les zones à risque fort de submersion sont auprès de la confluence oued Ait Smail et oued Agrioune au centre-ville Bordj Mira. La concentration des zones à risque près de la confluence met en évidence la nécessité d'une planification urbaine résiliente et de stratégies d'adaptation pour minimiser les impacts potentiels de la submersion Ce qui est essentielle pour élaborer des politiques publiques visant à assurer la sécurité des communautés riveraines et à favoriser un développement durable dans la région.

IV.5.1.2 Carte des vitesses :

♦Les vitesses d'écoulement de l'eau sont classées en trois classes :

- ★ Vitesse faible : dont la vitesse est inférieure à 0.2 m/s ;
- ★ Vitesse modérée : dont la vitesse se situe entre 0.2 m/s et 0.5 m/s ;
- ★ Vitesse forte : dont la vitesse dépasse 0.5 m/s.

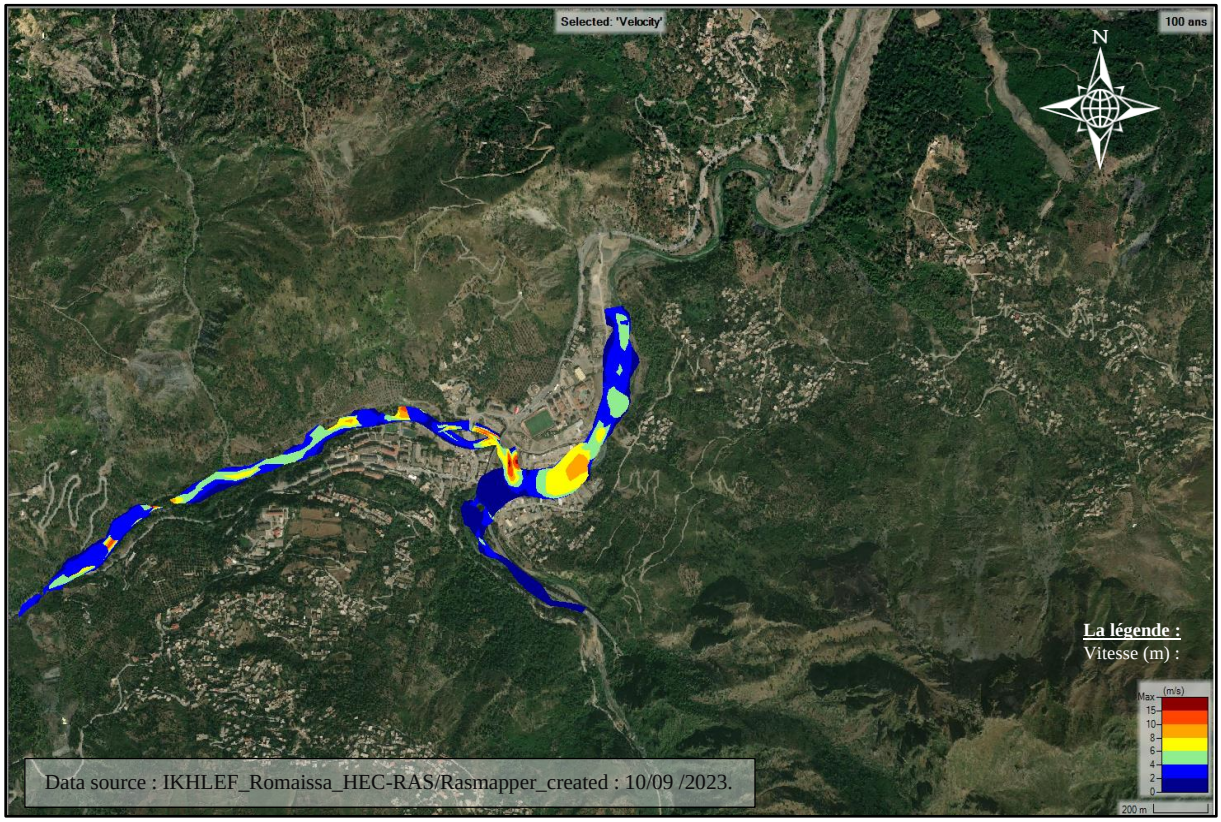


Figure IV.33 : Carte de vitesse d'eau pour la période de retour 100 ans.

•La carte de vitesses d'eau fournit des informations essentielles sur les caractéristiques de l'écoulement dans notre région. Les zones à haute vitesse d'écoulement, identifiées principalement le long de l'oued Ait Smail, sont cohérentes avec la topographie de cet affluent, caractérisée par des pentes abruptes et des sections resserrées du cours d'eau. Ces conditions favorisent des vitesses élevées, soulignant ainsi la corrélation directe entre la topographie et le régime d'écoulement.

•En revanche, les zones à faible vitesse, observées après la confluence avec l'oued Agrioune, peuvent être attribuées à la faible pente de ce tronçon. Le lit du cours d'eau s'élargit après la confluence, créant des conditions d'écoulement plus calmes. Cette observation est cruciale pour

5la gestion des risques d'inondation dans la mesure où des vitesses d'écoulement plus faibles réduisent le potentiel érosif et les risques d'inondation en aval.

IV.5.1.3 Classes d'aléa :

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

Tableau n° IV.4 : Critères d'évaluation de l'intensité d'aléa inondation (DDT, 2012).

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

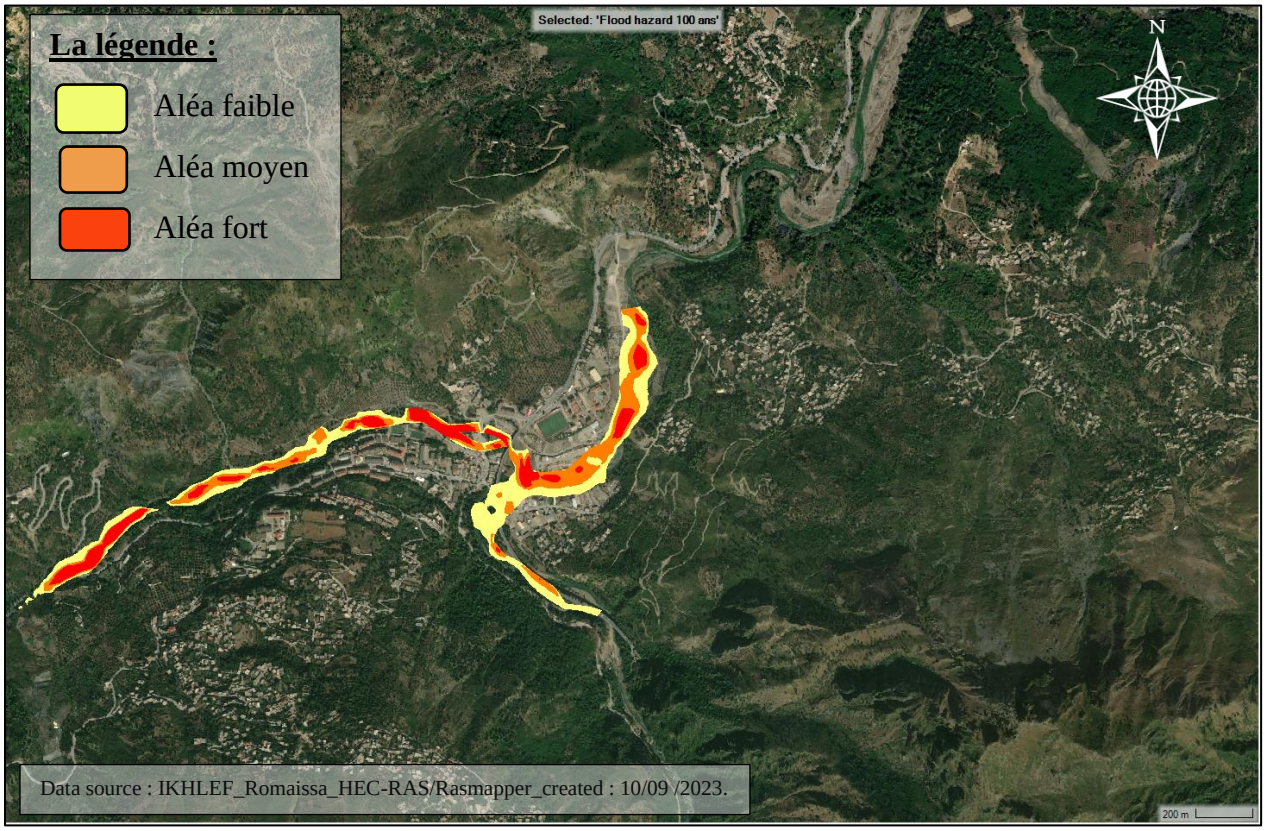


Figure IV.34 : Carte de l'aléa pour la crue centennale.

Les zones de risque élevé sont principalement localisées le long des cours d'eau, en particulier près de la confluence de l'oued Ait Smail et de l'oued Agrioune, corroborant ainsi les observations faites dans la carte de profondeur d'eau. Ces zones à haut risque sont également associées à des sections du lit du cours d'eau caractérisées par des pentes plus prononcées, augmentant la probabilité d'inondations lors de crues importantes.

La corrélation entre la carte d'aléas d'inondations et la carte de vitesses d'eau est également notable. Les zones à risque élevé correspondent souvent aux secteurs où les vitesses d'écoulement sont les plus élevées. Cela suggère une convergence d'aléas hydrologiques et de dynamiques d'écoulement, soulignant des zones critiques nécessitant une attention particulière en termes de prévention des inondations.

IV.5.2 Cartographie de la vulnérabilité :

▪La gestion de l'espace dans les zones soumises à des risques d'inondation a pour but d'intégrer 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).

▪ On peut affecter une valeur de référence à chaque type d'occupation du sol selon une échelle allant de 1 pour la vulnérabilité la plus faible à 6 pour la vulnérabilité la plus forte.

Tableau n° IV.5 : Les valeurs de référence de type d'occupation pour la vulnérabilité (Guigo et al., 2002).

Occupation du sol	Vulnérabilité agricole	Vulnérabilité urbano-industrielle
Friches	1	-
Agriculture à ciel ouvert	2	-
Agriculture sous serres	3	-
Infrastructures de loisirs	-	1
Habitat collectif	-	2
Habitat mixte	-	3
Habitat individuel	-	4
Commerces et administrations	-	5
Aéroport	-	5
Industries	2	6

•On a élaboré une cartographie de l'occupation des sols dans le bassin versant de l'oued Agrioune, ce qui nous permettra de créer prochainement une carte de vulnérabilité.

➢La carte est représentée dans la figure IV.35 :

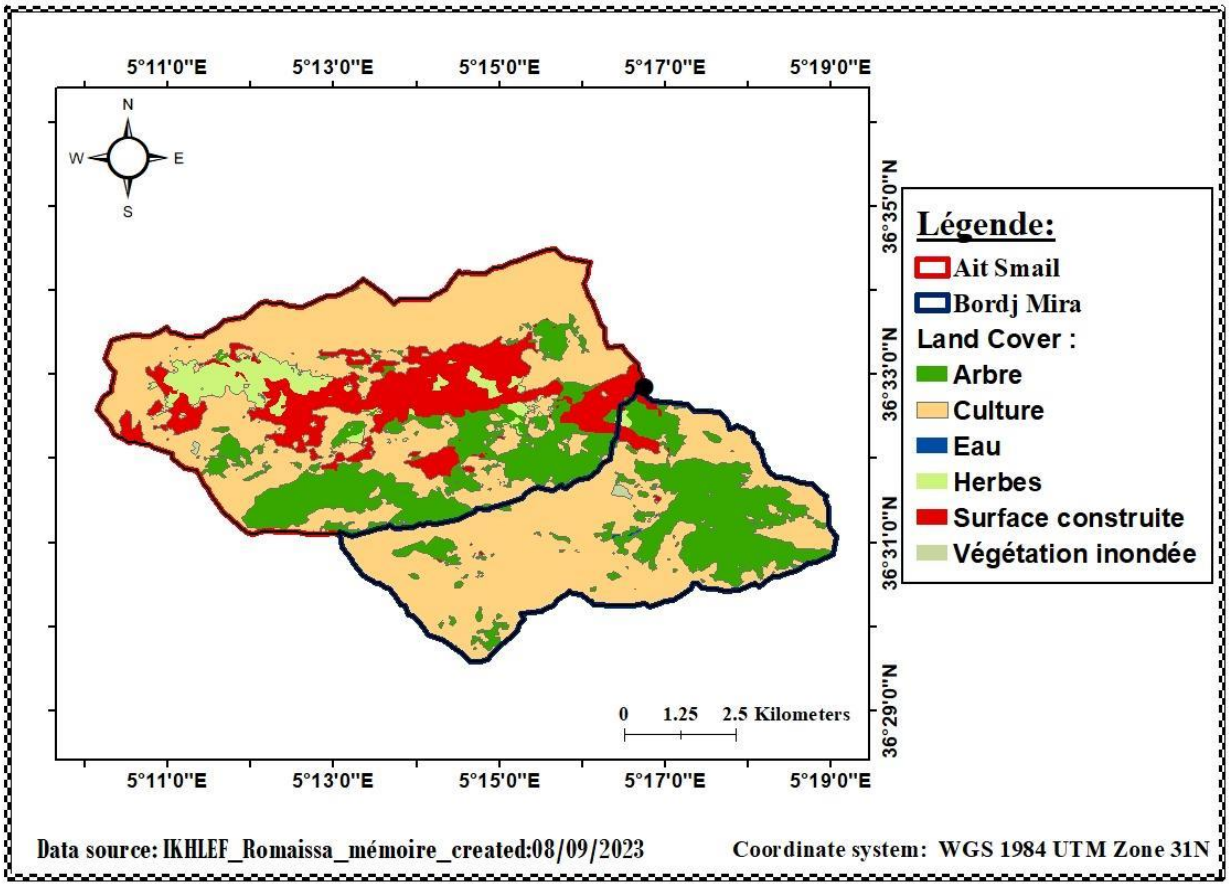


Figure IV.35 : Carte d'occupation du sol de la zone d'étude.

➢ La carte de la vulnérabilité est représentée dans la figure IV.36 :

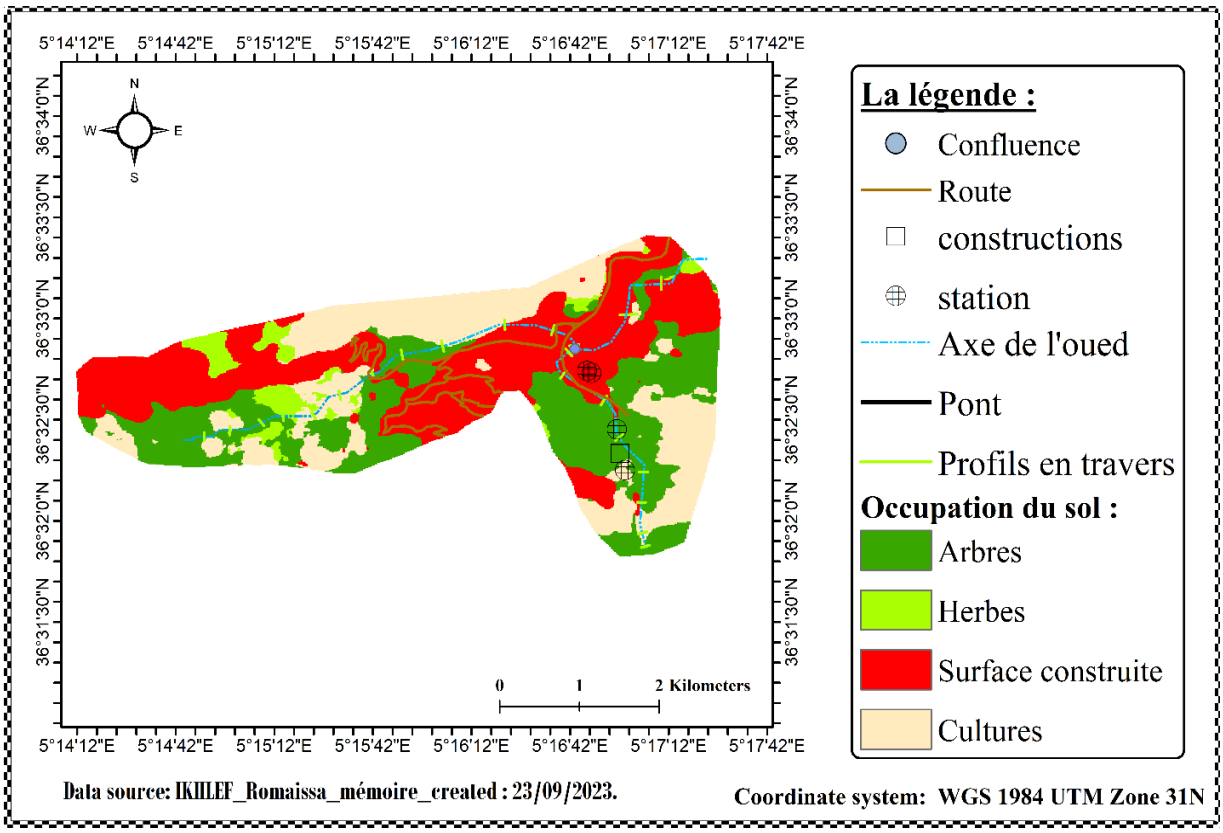


Figure IV.36 : Carte de vulnérabilité de la zone d'étude.

IV.5.3 Cartographie du risque :

▪Afin de cartographier le risque, il est essentiel de croiser la répartition spatiale de la vulnérabilité avec celle de l'aléa. Pour accomplir cette fusion et élaborer une carte du risque, on utilise une requête dans le système d'information géographique (SIG) qui permet de superposer les deux plans d'information nécessaires. Cela implique la création des niveaux de risque en se basant sur les niveaux de vulnérabilité agricole et urbaine ainsi que sur ceux de l'aléa.

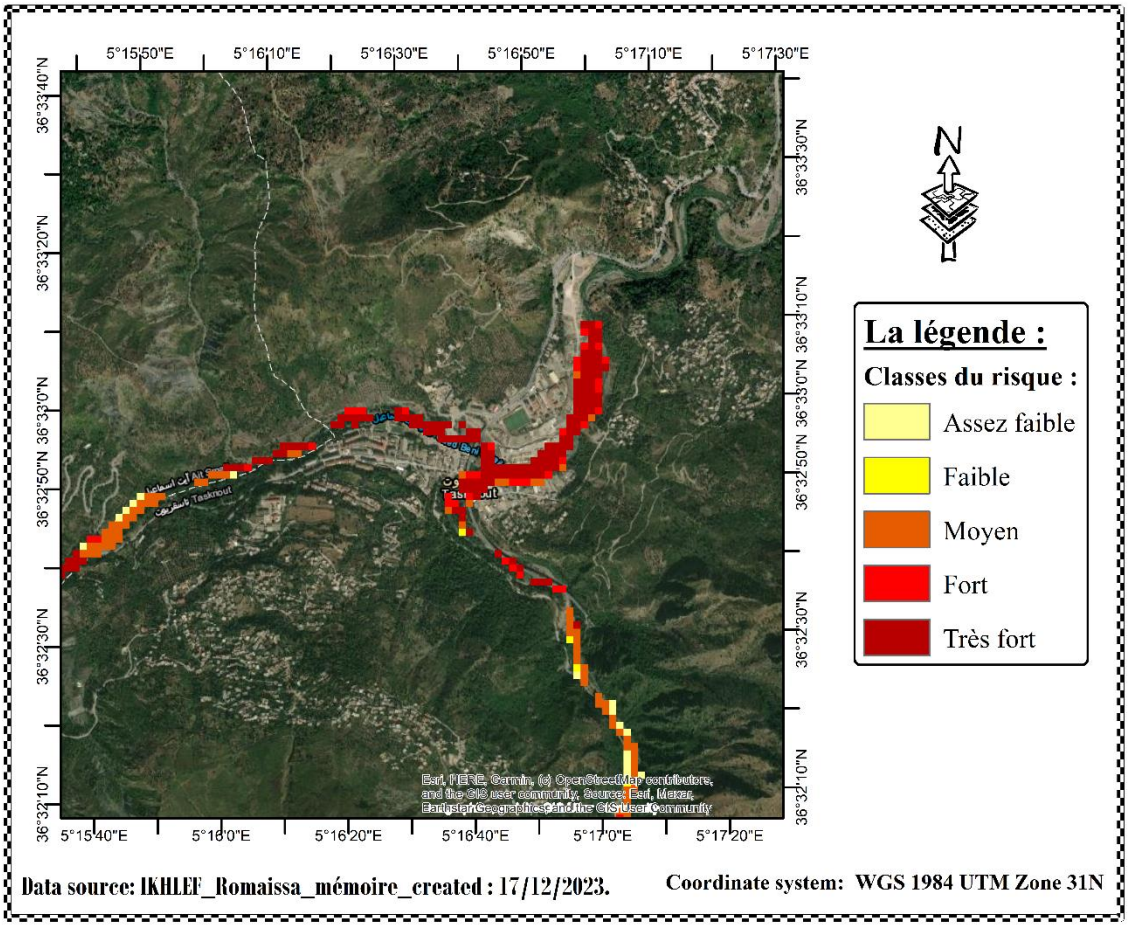


Figure IV.37 : Carte de risque d'inondation de la zone d'étude.

La carte du risque d'inondation présente une évaluation holistique des zones exposées à des niveaux élevés de vulnérabilité dans la région étudiée. Les résultats de cette carte offrent des insights cruciaux pour la gestion des risques et la planification urbaine, facilitant une approche proactive face aux défis potentiels liés aux inondations.

Identification des Zones Critiques :

La carte met en évidence des zones critiques où le risque d'inondation est particulièrement élevé. Ces zones, en grande partie concentrées le long des confluences de l'oued Ait Smail et de l'oued Agrioune, ainsi qu'au centre-ville de Bordj Mira, nécessitent une attention particulière en raison de leur vulnérabilité potentielle.

IV.5.4 Maîtrise de l'urbanisation :

▪L'urbanisation constitue un défi majeur dans l'ensemble de la zone d'étude. Les zones à risque englobent toutes les agglomérations traversées par l'Oued Agrioune dans la ville de Bordj Mira.

▪ Les risques sont d'autant plus élevés du fait que l'urbanisation s'est étendue jusqu'au lit de l'Agrioune.

▪ La carte de zonage est un atlas cartographique qui établit une répartition territoriale en fonction des niveaux de risque. Le risque découle de la combinaison de l'aléa et de l'occupation des sols. Trois zones ont été définies :

♦La zone bleue : secteur urbain exposé à un aléa élevé (avec une hauteur d'eau supérieure à 1 m lors d'une crue centennale) ;

♦ La zone jaune : secteur urbain exposé à un aléa modéré à faible (avec une hauteur d'eau inférieure à 1 m lors d'une crue centennale) ;

♦ La zone rouge : secteur urbain inondable en cas de crue centennale.

▪Le tableau ci-dessous illustre le croisement aléas / enjeux :

Tableau n° IV.6 : Croisement et zonage de l'aléas et enjeux (Smith et al., 2014).

Vulnérabilité / Aléas	Espace Urbanisé	Espace naturel ou Agricole
Fort	Rouge	Rouge
Moyen	Rouge	Jaune
Faible	Jaune	Bleue

▪ La carte de zonage réglementaire, résultant de la combinaison de la carte des aléas et de celle des enjeux, également connue sous le nom de plan de prévention des risques, est illustrée dans la figure IV.38 :

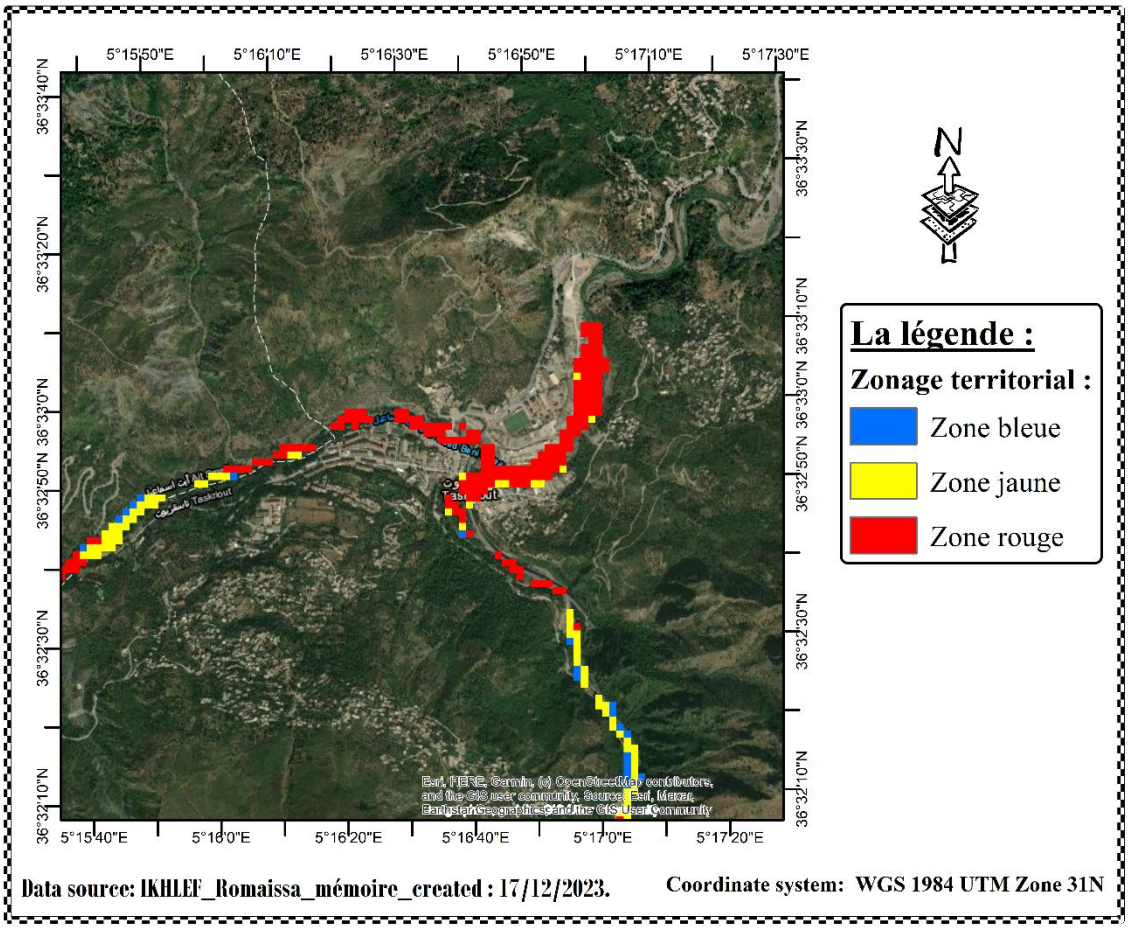


Figure IV.38 : Carte de zonage réglementaire pour une crue de 100 ans.

Conclusion :

Cette étude approfondie sur la prévention des inondations dans notre zone d'étude a abouti à des conclusions significatives, basées sur les simulations hydrauliques de l'écoulement dans les différents cours d'eau.

Les simulations hydrauliques, en prenant en compte les cartographies de l'aléa, les sections en travers des affluents, les tirants d'eau, le nombre de Froude, les vitesses, ainsi que la nature du fond et des rives, ont permis de localiser les points noirs :

•Au niveau de l'oued Ait Smail : la principale problématique du secteur concerne l'inondation de l'îlot central (gare routière de Bordj Mira) et les débordements en rive droite.

• Au niveau de l'oued Agrioune : le problème essentiel réside dans l'instabilité des talus en rive droite et gauche. Plus précisément, en rive droite, une forte érosion par effritement pourrait mettre en danger la plate-forme de l'entreprise de Travaux Publics. Concernant la rive gauche, le talus nouvellement créé dans le cadre d'un remblaiement destiné au développement urbain est en danger d'érodabilité.

•Au niveau du centre-ville de Bordj Mira : la station de pompage et la station de refoulement vers Kherrata.

•L'urbanisation sur la rive gauche de l'oued Agrioune et en aval immédiat de la confluence avec l'oued Ait Smail, ainsi que quelques habitations situées en contrebas de la route, ont subi des dommages en 2003.

Cette cartographie détaillée des zones sensibles constitue une base solide pour la planification de mesures de prévention ciblées.

Ces résultats nous orientent vers le prochain chapitre, où nous étudierons en détail différentes variantes de notre projet. L'objectif sera d'explorer des solutions innovantes et durables pour renforcer la protection contre les inondations, en prenant en compte les caractéristiques spécifiques des points critiques identifiés.

CHAPITRE V :

Étude des variantes
d'aménagement

V. CHAPITRE V :

ÉTUDE DES VARIANTES D'AMENAGEMENT

Introduction :

L'objectif de cette étude est d'assurer une protection adéquate contre les inondations pour les villes bordant l'Oued Agrioune. Cette protection implique la sélection des solutions d'aménagement les plus appropriées, en se basant sur les différentes options proposées à la base des résultats obtenus dans les chapitres précédents, tout en prenant en considération les caractéristiques naturelles de notre zone d'étude.

Les différentes options seront choisies dans le but de garantir la protection de toute la ville le long de l'Oued Agrioune contre les inondations. Cela se fera en évacuant les eaux de crue vers l'exutoire, en tenant compte de toutes les exigences relatives au débit, à la stabilité des berges, et en prenant en considération l'impact environnemental de ces aménagements. Ainsi, le processus de sélection des options se fondera sur plusieurs étapes distinctes.

V.1 Présentation des grandes orientations :

V.1.1 La protection contre l'érosion :

Deux types d'érosion sont considérés :

▪ L'érosion des berges ;

▪ L'érosion du fond du lit.

Tout comme pour le risque d'inondation, le risque d'érosion résulte de la combinaison de l'aléa érosion et des enjeux. Cela se produit dans les zones non construites et en dehors de la section où le bord de la route coïncide avec la rive de la rivière.

V.1.1.1 Érosion des berges :

▪L'érosion des berges est l'enlèvement de grains de matériaux constitutifs de la berge par l'eau de la rivière. Cet enlèvement de particules est possible lorsque la vitesse du courant et sa turbulence sont capables de vaincre le poids des particules et leur cohésion éventuelle. En fait le phénomène est analogue à un choc qui arrache des grains à la berge et les entraîne plus en aval où ils peuvent se déposer. Il est plus brutal lorsque la direction du courant fait un angle avec la berge.

▪ 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 aussi de l'érosion, mais on utilise ce vocable lorsque l'érosion se produit à la base d'une berge ou d'un ouvrage. Nous considérons que l'affouillement n'est qu'un cas particulier de l'érosion des berges (GIP, 2015).

▪ Les aménagements visant à protéger les berges peuvent être abordés selon deux conceptions distinctes :

♦ La protection linéaire (revêtement) ;

♦ La protection par épis.

▪ Les revêtements représentent la méthode la plus fréquemment employée en matière d'aménagement des berges fluviales. Ils consistent en une couche de matériau résistant à l'érosion qui recouvre le matériau facilement érodable des berges. Divers matériaux sont utilisés à cet effet, notamment des enduits, des géotextiles, des enrochements, etc.

▪ Les épis sont utilisés pour réduire la largeur d'un bras de rivière en période de faible débit afin d'améliorer la navigabilité. De plus, les épis représentent une méthode indirecte pour atténuer l'érosion en déviant les courants à grande vitesse loin des berges sujettes à l'érosion.

V.1.1.2 Érosion du lit :

▪ L'érosion du lit peut être attribuée à plusieurs facteurs :

★**Une cause naturelle :** le lit diminue sa pente pour s'ajuster à de nouvelles conditions hydrologiques et de transport de sédiments ;

★**Des extractions dans le lit :** un effet direct qui se propage vers l'amont (érosion régressive) et parfois vers l'aval (érosion progressive) ;

★La mise en œuvre d'aménagements réduisant l'étendue des zones inondables de la rivière (comme les digues ou les remblais).

V.1.2 La protection contre les crues :

▪Les solutions visant à réduire le risque d'inondations dans les zones à enjeux actuellement inondables peuvent être classées en deux catégories :

V.1.2.1 Protection directe (Rapprochée) :

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

- **Curage :** Permet une nette amélioration des conditions d'écoulement suite à l'élimination de tous les obstacles et les dépôts entravant l'écoulement des eaux dans le cours d'eau. Le débroussaillage est également nécessaire à la traversée des

agglomérations pour des raisons sanitaires et en sections courantes pour diminuer la rugosité et accroître la débitante ;

- **Recalibrage** : Permet d'élargir et d'approfondir les sections des cours d'eau pour augmenter leur capacité d'évacuation des eaux et assurer une section mouillée répondant aux critères de protections désirées.
- **Réalisation des canaux :** Permettant de régénérer le couloir initial de l'oued. Cette solution est indispensable dans le cas où le lit de l'oued et son domaine hydraulique ont été complètement occupés par des bâtiments ou par la voirie.
- **Protection des berges :** Comprend tout ouvrage visant à maintenir la stabilité des terres en dépit de l'action de l'eau. Les berges sont en effet attaquées par des courants perturbateurs générés par les crues. De même, les terres glissent par suite de l'infiltration de l'eau après le retrait de la crue. La protection des berges est également nécessaire au voisinage de certains ouvrages tels que les ponts.
- **Endiguement des oueds :** Par la réalisation de digues qui longent le cours d'eau sur ses deux berges. Cette opération est aisément réalisable par les ressources locales en main d'œuvre et en matériaux. Par ailleurs, ce type de protection permet en outre de réaliser une protection sélective. Il peut en effet être établi graduellement en commençant par mettre à l'abri, de la plupart des crues, la partie la plus riche et la plus peuplée des zones exposées. En contrepartie on notera que ce procédé de protection présente l'inconvénient de provoquer une surélévation souvent notable du niveau des eaux et rend en outre plus difficile le drainage des terrains bas (Nedelec et al., 2004).

V.1.2.2 Protection indirecte (Éloignée) :

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

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

V.2 Étude des variantes :

▪Afin de préserver les zones sujettes aux inondations dans la ville de Bordj Mira, nous préconisons quatre catégories de solutions visant à diminuer le risque d'inondations :

1. La réalisation d'un canal en béton de forme trapézoïdale ;
2. La conception d'un canal en gabion ;
3. La réalisation d'un canal en enrochement ;
4. Réajuster les dimensions du pont situé dans l'oued Ait Smail pour garantir une meilleure gestion des inondations.

▪ Nous réalisons un calcul hydraulique pour chaque variante en utilisant une simulation avec HEC-RAS sur chaque segment de la rivière. De plus, nous fournirons une description détaillée des différentes propositions d'aménagement, ce qui nous permettra de choisir la variante la plus adaptée du point de vue technique et économique.

▪ Une initiative visant à faciliter les interventions de sécurité civile en cas d'inondation et à minimiser la vulnérabilité des résidents lors de ces événements : elle inclut la planification des actions, l'alerte à la population et la mise en place de scénarios de gestion de crise.

▪ Une mesure technique essentielle consiste à contrôler la phase d'immersion de la digue afin de prévenir la formation d'une "vague" lors de cette phase.

V.2.1 Canal en béton armé :

▪La proposition consiste à construire un canal en béton armé de forme trapézoïdale. Cette forme offre plusieurs avantages, notamment une durée de vie plus longue, une forme étroite adaptée à l'environnement urbain, de meilleures propriétés hydrauliques, une construction rapide, et une protection accrue. Nous optons pour un coefficient de m = 1 pour la pente du talus, ce choix simplifiant la réalisation d'un angle de 45° sur le terrain d'un point de vue technique.

▪La simulation de ces canaux est effectuée à l'aide du logiciel FLOW-MASTER, à travers lequel nous déterminons les caractéristiques de notre canal, puis nous effectuons une simulation avec HEC-RAS.

V.2.2 Canal en gabions :

▪Les gabions sont principalement employés pour construire des revêtements et des protections anti-affouillement. Ils sont disponibles en différentes dimensions, parmi lesquelles les plus courantes sont 2,0 x 1,0 x 0,5 et 2,0 x 1,0 x 1,0 mètre. Les canaux réalisés avec des gabions sont conçus de manière particulière, avec les sacs disposés de manière à former un escalier qui assure la stabilité des berges.

★Avantages des structures en gabion :

♦ Les gabions offrent une flexibilité structurelle, leur souplesse permet aux ouvrages de s'adapter aux déformations du terrain, notamment celles qui peuvent survenir aux abords des dispositifs de dissipation d'énergie, des culées, et des protections contre l'érosion.

♦Leur facilité de mise en œuvre est un avantage notable, certains types de barrages ou de seuils en gabions pouvant être construits sur une période de deux ans, sans risque majeur de destruction pendant la saison des pluies intermédiaire. De plus, il est relativement simple d'envisager une surélévation éventuelle de l'ouvrage. En outre, les formes géométriques des gabions sont naturellement simples.

♦ Les gabions permettent la création d'ouvrages totalement déversant, qui sont bien moins coûteux que leurs équivalents en béton.

•La FigureV.1 illustre une coupe transversale d'un canal en gabion :

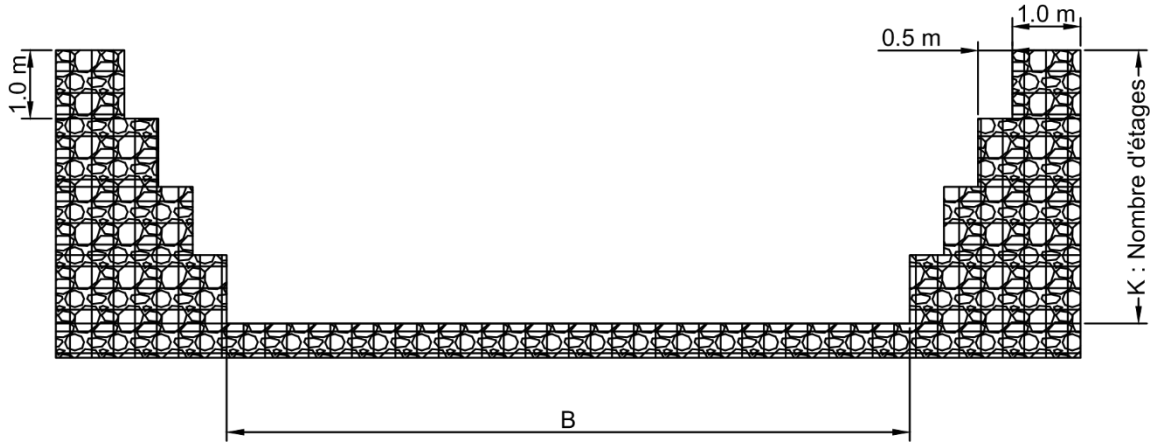


Figure V.1 : Coupe en travers d'un canal en gabion.
(Data source : IKHLEF_Roumaissa_Autodesk_AutoCAD).

▪Nous déterminons d'abord la largeur de la base, puis nous calculons le nombre d'étages nécessaires pour évacuer le débit de crue.

V.2.3 Choix des Digues pour la Protection Contre une Crue de Référence :

Une digue est un ouvrage construit dans le lit majeur de la rivière en vue d'assurer une certaine protection contre les inondations (empêche l'eau de venir quelque part). Une digue est un ouvrage en élévation par rapport au niveau du terrain naturel. Les simples ouvrages de protection des talus de berge (murs maçonnés, revêtement en enrochements ou par dalles) qui ne dépassent pas le sommet de la berge naturelle ne sont pas des digues (Begic, 2015).

★Typologie des endiguements par mode de réalisation :

♦Digues en terre (en remblai) ;

♦Digues type poids (en maçonnerie ou béton) ;

♦ Digues en gabions (partie remblai, partie poids ou rigide) (Begic, 2015).

V.2.4 Canal en enrochement :

Un canal en enrochement est un type de canal ou de cours d'eau aménagé en utilisant des matériaux d'enrochement, tels que des pierres, des cailloux ou des blocs de roche. Les enrochements sont utilisés pour renforcer les berges du canal, stabiliser le lit de la rivière et contrôler l'érosion due à l'écoulement de l'eau. Les enrochements fournissent une structure solide et durable pour le canal, tout en permettant un écoulement contrôlé de l'eau. Les canaux en enrochement sont conçus pour résister aux forces de l'eau tout en maintenant leur intégrité structurelle sur le long terme. Ils sont également adaptés pour des situations où l'esthétique et l'intégration dans l'environnement naturel sont des considérations importantes.

V.2.5 Redimensionnement du pont sur l'oued Ait Smail :

▪La route peut constituer un obstacle préjudiciable à l'écoulement naturel et réciproquement, celui-ci peut générer des dommages à la route.

▪Les ouvrages hydrauliques de rétablissement des écoulements naturels devront donc être correctement dimensionnés pour limiter les risques :

♦Inondation et de submersion ou de dégradation de la route dans des seuils admissibles ;

♦ Rupture de l'ouvrage routier.

▪ On distingue généralement deux familles d'ouvrages :

♦Les buses (circulaires, Ovales) ;

♦Les dalots (El Harti & Ait Ichou, 2017).

V.3 Critères d'évaluation de la variante d'aménagement :

Le choix de la variante sera basé sur plusieurs critères :

- ✓ **Efficacité hydraulique :** cette mesure évalue le potentiel d'amélioration de la capacité hydraulique apportée par les différentes options ;
- ✓ **Difficultés de réalisation :** évalue le degré de complexité technique de la mise en œuvre ;
- ✓ **Impacts environnementaux :** cette évaluation tient compte de l'utilisation des terrains environnants (zone urbaine, agricole, etc.) ainsi que des implications environnementales, qu'elles soient positives ou négatives ;
- ✓ **Durabilité :** cette mesure concerne la durée de vie prévue de l'aménagement ;
- ✓ **Entretien :** elle évalue l'ampleur et la fréquence des travaux d'entretien nécessaires ;
- ✓ **Coût :** évalue l'estimation des dépenses de construction.

V.4 Aménagement proposé sur le tronçon de l'oued Agrioune :

Les problèmes concernent la stabilité des talus rives droite et gauche de l'oued Agrioune :

•En rive droite érosion par effritement pouvant mettre en danger la plate-forme de l'entreprise de Travaux Publics,

• En rive gauche, talus nouvellement créé dans le cadre d'un remblaiement destiné au développement urbain.

V.4.1 Première variante : Canal en béton armé :

V.4.1.1 Le tronçon de l'oued Agrioune avant la confluence :

▪La première proposition envisage la création d'un canal en béton armé de forme trapézoïdale.
▪À partir de Ras mapper, nous obtenons une profondeur normale de 6.141 m pour ce tronçon qui s'étend sur une longueur de 1272.89 m.

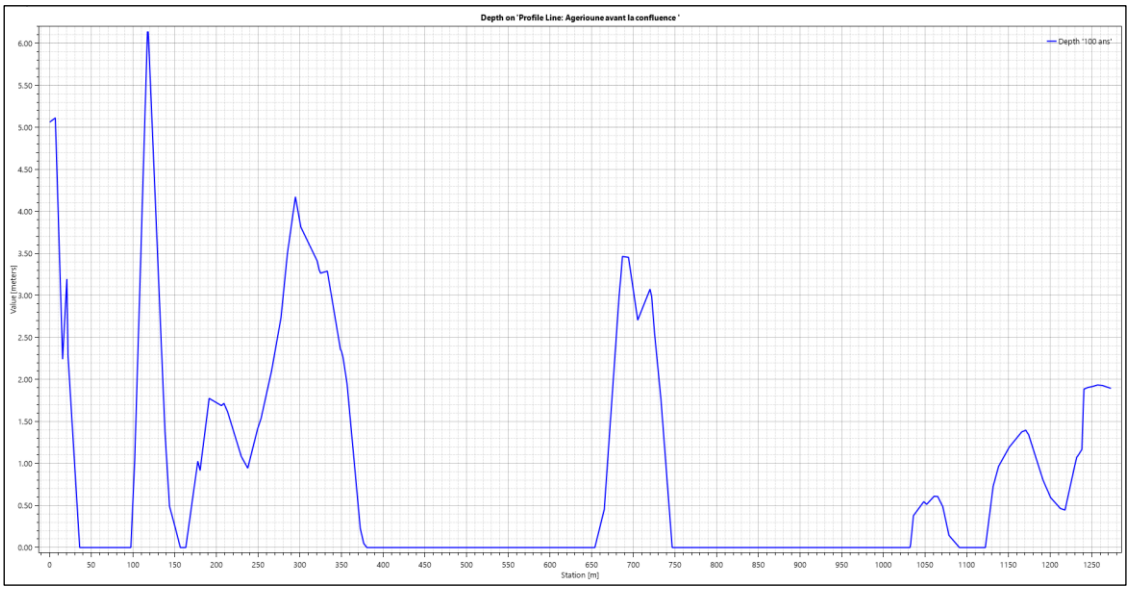


Figure V.2 : La profondeur normal du tronçon de l'oued Agrioune avant la confluence, (Source : Ras-mapper).

V.4.1.1.1 Dimensionnement :

▪Les caractéristiques du canal sont déterminées en utilisant le logiciel Flow-Master ;

Ci-dessous sont présentés les résultats du calcul hydraulique pour le canal trapézoïdal :

Tableau n° V.1 : Dimensions de l'aménagement en béton armé du tronçon de l'oued Agrioune avant la confluence (canal en béton armé).

Tronçon	Section de départ	Section d' arrivé	Longueur (m)	Pente du projet (m/m)	Fruit de talus	Largeur du fond (m)	La largeur au miroir (m)	Hauteur du canal (m)
Amont de la confluence	418	13	405	0.001	1	19	23.45	2.2

▪Les dimensions du canal sont représentées par la figure V.3 :

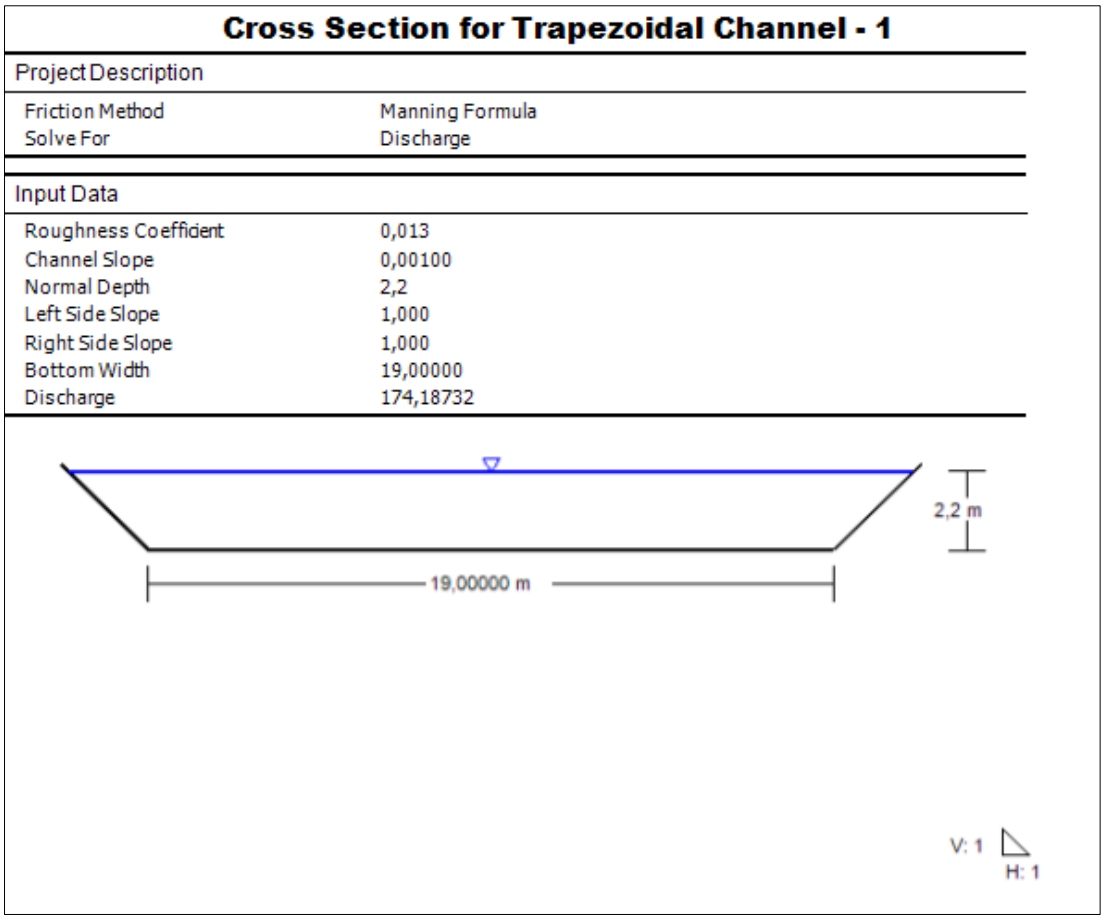


Figure V.3 : Les dimensions du canal trapézoïdale en béton armé du tronçon à aménager de l'oued Agrioune avant la confluence, (Source : logiciel Flow-master).

V.4.1.1.2 Paramètres d'écoulement :

▪Les résultats de la simulation sont représentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau n° V.2 : Résultats de la simulation d'écoulement d'un canal trapézoïdale en béton armé du tronçon de l'oued Agrioune avant la confluence, (Source : HEC-RAS).

River Sta	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m^2)	(m)	
418	133.33	135.03	135.61	137	0.038354	6.22	28.32	18.39	1.6
386	130	131.66	132.28	133.73	0.041432	6.38	27.61	18.31	1.66
211	153.31	154.9	155.59	157.18	0.047944	6.69	26.32	18.17	1.77
95	159.97	161.54	162.25	163.89	0.050196	6.79	25.92	18.13	1.81
13	166.63	168.19	168.91	170.56	0.051053	6.83	25.78	18.11	1.83

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

▪En se basant sur les résultats du tableau, on peut remarquer que :

- ✓ Selon les valeurs du nombre de Froude, il est notable que le régime d'écoulement est torrentiel lorsque Fr > 1.
- ✓ La vitesse d'écoulement ne dépasse pas 6.83 m/s, ce qui élimine tout risque d'érosion du béton.

▪Sur le plan technique, le canal en béton armé de forme trapézoïdale offre une protection satisfaisante.

V.4.1.1.3 Les sections en travers :

▪ Les sections en travers de l'oued aménagé après la simulation sont représentées dans la figure suivante :

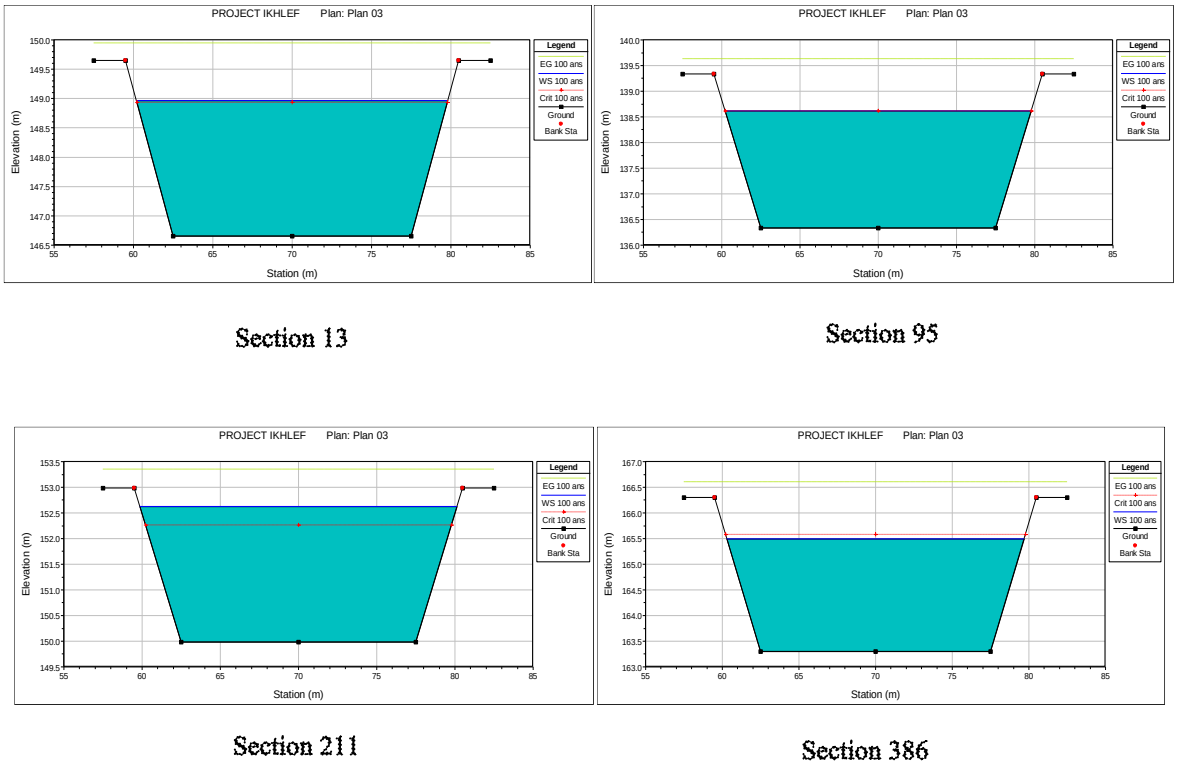


Figure V.4 : Sections en travers d'un canal trapézoïdale en béton armé pour une crue centennale pour le tronçon de l'oued Agrioune avant la confluence.

▪Lors d'une crue centennale de 174 m^3/s, on constate que notre canal trapézoïdal en béton assure une protection adéquate, empêchant le débordement de l'eau.

V.4.1.1.4 Estimation du coût de la variante :

▪Le devis de la variante du canal en béton armé est établi en se basant sur les quantités de terrassements, de volumes de remblai et de déblai calculées par HEC-RAS. Une épaisseur de 15 cm est considérée pour le béton armé, tandis que pour le béton de propreté, une épaisseur de 5 cm est utilisée.

Tableau n° V.3 : Devis de la variante canal en béton armé pour le tronçon de l'oued Agrioune avant la confluence.

Désignations des travaux		Unité	Quantité	Prix unitaire (DA)	Montant (DA/mL)
Terrassement	Déblais	m^3	49748	250	12437000
	Remblais	m^3	0	700	0
Béton de propreté		m^3	384.75	13000	5001750
Béton dosé à 350 Kg/m^3		m^3	1411.99	40000	56479617
Montant total					**73,918,367.00 DA**

▪Bien que cette variante assure une protection efficace et présente des avantages hydrauliques considérables, sa construction s'avère coûteuse en termes de matériaux et de main-d'œuvre. De plus, elle a un impact négatif sur l'environnement en modifiant le cours naturel de l'eau et en affectant les écosystèmes locaux. En outre, elle exige la démolition de bâtiments, de routes et d'autres infrastructures existantes au bord de l'oued.

V.4.1.2 Le tronçon de l'oued Agrioune après la confluence :

▪Cette proposition envisage la création d'un canal en béton armé de forme trapézoïdale.

▪À partir de Ras mapper, nous obtenons une profondeur normale de 3.926 m pour ce tronçon qui s'étend sur une longueur de 901.43 m.

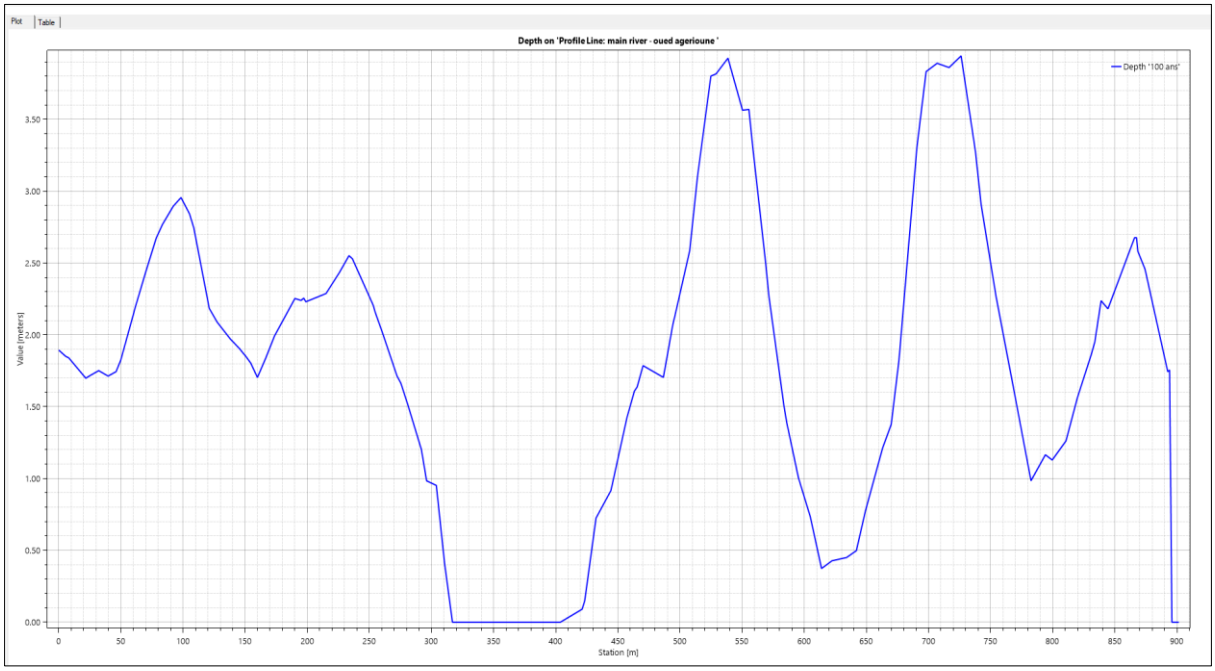


Figure V.5 : La profondeur normal du tronçon de l'oued Agrioune après la confluence, (Source : Ras-mapper).

V.4.1.3 Dimensionnement :

▪Les caractéristiques du canal sont déterminées en utilisant le logiciel Flow-Master ;
Ci-dessous sont présentés les résultats du calcul hydraulique pour le canal trapézoïdal :

Tableau n° V.4 : Dimensions de l'aménagement du tronçon de l'oued Agrioune après la confluence (canal en béton armé).

Tronçon	Section de départ	Section d'arrivé	Longueur (m)	Pente du projet (%)	Fruit de talus	Largeur du fond (m)	La largeur au miroir (m)	Hauteur du canal (m)
Aval de la confluence	855	238	600	0.002	1	40	44.2	2.1

▪Les dimensions du canal sont représentées par la figure V.6 :

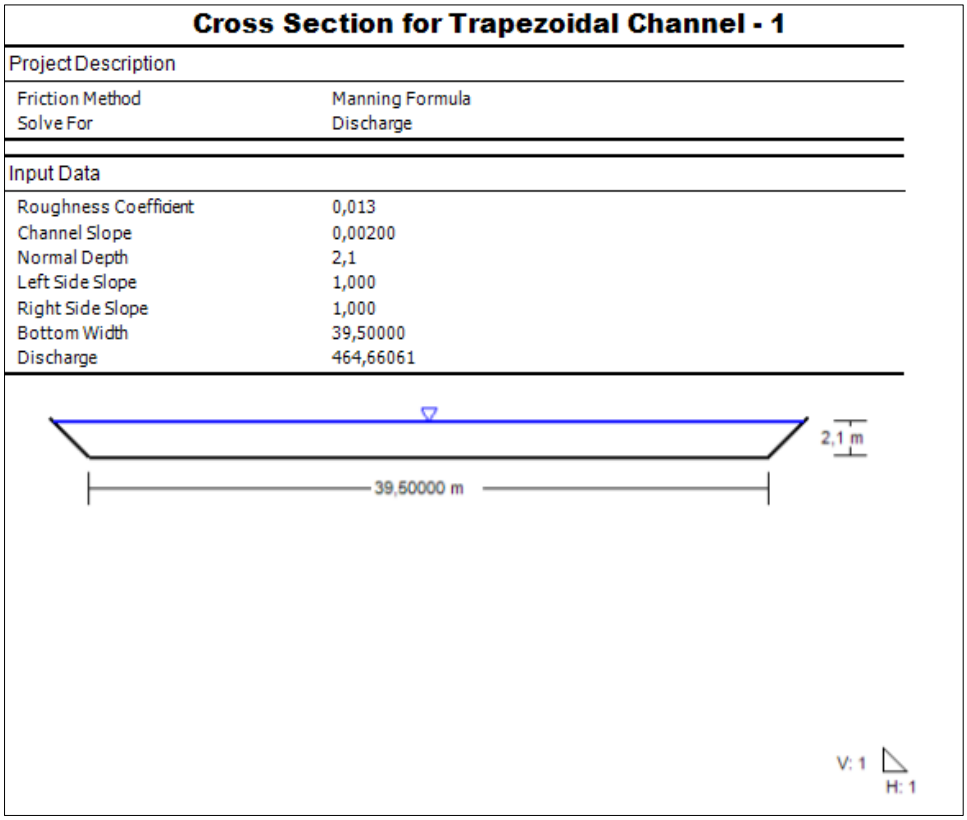


Figure V.6 : Les dimensions du canal trapézoïdale du tronçon à aménager de l'oued Agrioune après la confluence, (Source : logiciel Flow-master).

V.4.1.4 Paramètres d'écoulement :

▪Les résultats de la simulation sont représentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau n° V.5 : Résultats de la simulation d'écoulement d'un canal trapézoïdale en béton armé du tronçon de l'oued Agrioune après la confluence, (Source : HEC-RAS).

River Sta	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)	
855	132.43	134.46	134.46	135.22	0.01133	3.97	42.06	42.05	1.94
751	131.55	134.39	133.23	134.63	0.00205	1.77	59.41	42.87	1.4
609	131.94	133.41	133.41	134.04	0.01313	3.3	84.12	44.01	1.95
480	120.95	123.62	123	124.09	0.0045	2.58	43.79	42.13	1.6
343	123.85	127.59	125.56	127.7	0.00071	1.28	38.74	41.89	1.25
238	125.05	126.86	126.86	127.47	0.01384	3.14	50.29	42.44	1.95

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

- ✓ Selon les valeurs du nombre de Froude, il est notable que le régime d'écoulement est en mode torrentiel Fr > 1.
- ✓ La vitesse d'écoulement ne dépasse pas 3.87 m/s, ce qui élimine tout risque d'érosion du béton.

▪Sur le plan technique, le canal en béton armé de forme trapézoïdale offre une protection satisfaisante.

V.4.1.5 Les sections en travers :

▪ Les sections en travers de l'oued aménagé après la simulation sont représentées dans la figure suivante :

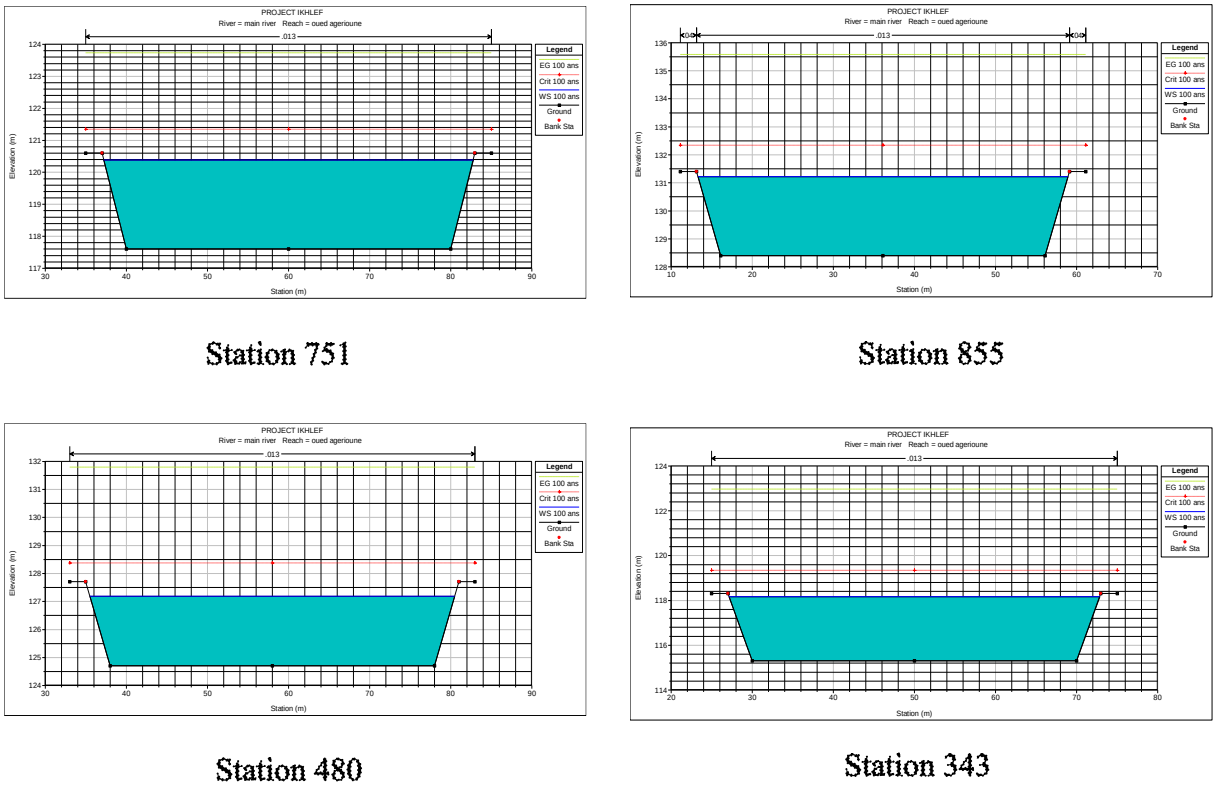


Figure V.7 : Profils en travers d'un canal trapézoïdale pour une crue centennale pour le tronçon de l'oued Agrioune après la confluence.

▪Lors d'une crue centennale de 464 m^3/s, on constate que notre canal trapézoïdal en béton assure une protection adéquate, empêchant le débordement de l'eau.

V.4.1.6 Estimation du coût de la variante :

▪Le devis de la variante du canal en béton armé est établi en se basant sur les quantités de terrassements, de volumes de remblai et de déblai calculées par HEC-RAS. Une épaisseur de 15 cm est considérée pour le béton armé, tandis que pour le béton de propreté, une épaisseur de 5 cm est utilisée.

Tableau n° V.6 : Devis de la variante canal en béton armé pour le tronçon de l'oued Agrioune après aménagement.

Désignations des travaux		Unité	Quantité	Prix unitaire (DA)	Montant (DA/mL)
Terrassement	Déblais	m^3	98268	250	24567000
	Remblais	m^3	0	700	0
Béton de propreté		m^3	1200	13000	15600000
Béton dosé à 350 Kg/m^3		m^3	3981.84	40000	159273506
Montant total					**199,440,506.00 DA**

•Bien que cette variante assure une protection efficace et présente des avantages hydrauliques considérables, sa construction s'avère coûteuse en termes de matériaux et de main-d'œuvre. De plus, elle a un impact négatif sur l'environnement en modifiant le cours naturel de l'eau et en affectant les écosystèmes locaux. En outre, elle exige la démolition de bâtiments, de routes et d'autres infrastructures existantes au bord de l'oued.

V.4.2 Deuxième variante : Canal en gabions :

V.4.2.1 Le tronçon de l'oued avant la confluence :

V.4.2.1.1 Dimensionnement :

▪Pour dimensionner ce canal, on suppose que la largeur du canal b, avec un coefficient de Manning n de 0,03 et une pente du canal I = 0,003. Ensuite, on calcule le nombre de gabions nécessaires, noté K, pour un débit centennal.

▪Le Tableau n° V.7 résume les résultats des calcules :

Tableau n° V.7 : Résultats de calcul des nombres de caisses pour le canal gabionné du tronçon de l'oued Agrioune avant la confluence.

K (caisses)	Q (m^3/s)	S (m^2)	P (m)	R_h (m)
6	519.082	123	35	3.514
5	390.247	100	32	3.125
4	**275.422**	**78**	**29**	**2.690**
3	175.623	57	26	2.192
2	92.745	37	23	1.609
1	30.634	18	20	0.900
0	0.000	0	17	0.000

▪Dans ce cas, nous avons le choix entre un canal composé de 3 gabions, garantissant un débit de 174 m^3/s avec une revanche de 1 m, ou un canal constitué de 4 gabions, assurant un débit supérieur à celui prévu lors du dimensionnement.

•Donc les paramètres de cette variante sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau n° V.8 : Récupératif des paramètres de la variante du gabionnage (tronçon oued Agrioune avant la confluence).

Tronçon	B (m)	K	H (m)	n	I (m/m)	Q_{dim} (m^3/s)	$Q_{évacuer}$(m^3/s)
Après la confluence	18	4	4.5	0.03	0.003	174	275.422

V.4.2.1.2 Paramètres d'écoulement :

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

Tableau n°V.9 : Résultats de la simulation d'écoulement d'un canal en gabion du tronçon de l'oued Agrioune avant la confluence (Source : HECRAS).

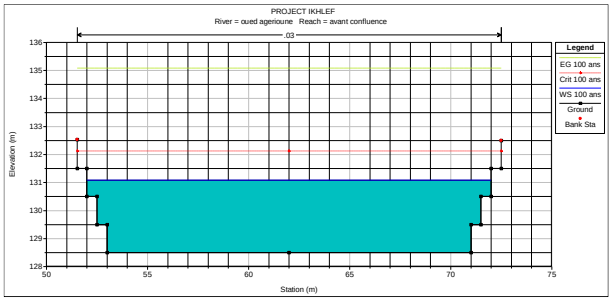
River Sta	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)	
418	168	170.93	169.9	171.31	0.00039	2.7	64.34	21	1.54
313	137.5	140.23	139.62	140.81	0.00397	3.37	51.67	20	1.67
240	131	135.19	133.13	135.42	0.00103	2.12	81.99	21	1.34
141	131	135.19	133.12	135.42	0.00103	2.12	81.99	21	1.34
13	126	131.93	128.13	132.04	0.00035	1.47	118.56	21	1.2

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

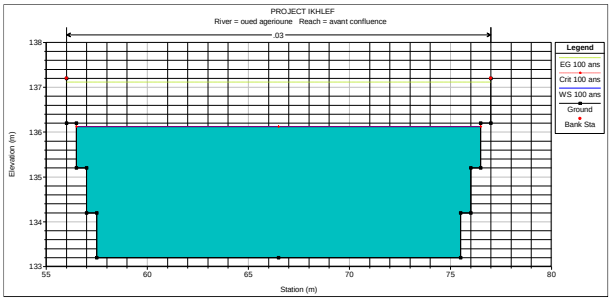
- ✓ Selon les valeurs du nombre de Froude, on observe que le régime d'écoulement est torrentiel (Fr > 1).
- ✓ La vitesse d'écoulement ne dépasse pas 3.37 m/s ce qui est admissible pour le gabion.

V.4.2.1.3 Section en travers :

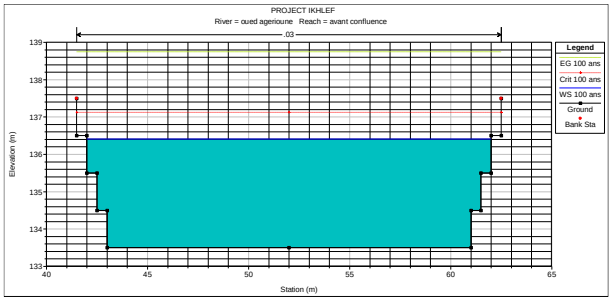
▪ Les sections en travers de l'oued aménagé après la simulation sont représentées dans la figure suivante :



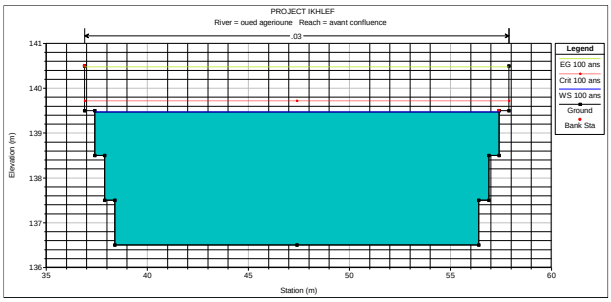
Section 418



Section 313



Section 141



Section 240

Figure V.8 : Profils en travers d'un canal en gabion pour une crue centennale pour le tronçon de l'oued Agrioune avant la confluence.

▪Lors d'une crue centennale de 174 m^3/s, il est notable que notre canal en gabions assure une protection adéquate, évitant tout débordement d'eau.

V.4.2.1.4 Estimation du coût de la variante :

▪Le Tableau n° V.10 résume le coût de réalisation d'un canal en gabion sur le tronçon de l'oued Agrioune avant la confluence.

Tableau n°V.10 : Devis de la variante canal en gabions pour le tronçon de l'oued Agrioune avant la confluence.

Désignations des travaux		Unité	Quantité	Prix unitaire (DA)	Montant (DA/mL)
Terrassement	Déblais	m³	69364	250	17341000
	Remblais	m³	1823	700	1276100
Géotextile		mL	972	2500	2430000
Gabions		m³	2970	5000	14850000
Montant total					**35,897,100.00 DA**

▪Les deux options, à savoir le gabionnage et le canal en béton, semblent capables d'évacuer le débit de crue sans provoquer de débordement. Cependant, du point de vue financier, le canal en gabions apparaît comme l'option la plus économique. Nous envisageons maintenant d'étudier une troisième variante avant de prendre une décision finale.

V.4.2.2 Le tronçon de l'oued après la confluence :

V.4.2.2.1 Dimensionnement :

▪Pour dimensionner ce canal, on suppose que la largeur du canal b, avec un coefficient de Manning n de 0,03 et une pente du canal I = 0,003. Ensuite, on calcule le nombre de gabions nécessaires, noté K, pour un débit centennal.

▪Le Tableau n° V.11 résume les résultats des calcules :

Tableau n° V.11 : Résultats de calcul des nombres de caisses pour le canal gabionné du tronçon de l'oued Agrioune après la confluence.

K (caisses)	Q (m^3/s)	S (m^2)	P (m)	R_h (m)
6	1403.545	279	61	4.574
5	1052.044	230	58	3.966
4	737.876	182	55	3.309
3	465.579	135	52	2.596
2	241.894	89	49	1.816
1	77.987	44	46	0.957
0	0.000	0	43	0.000

▪Dans notre cas, on prend un canal composé de 3 étages de gabions, garantissant un débit de 464 m^3 /s avec une revanche de 1 m.

•Donc les paramètres de cette variante sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau n° V.12 : Récupératif des paramètres de la variante du gabionnage (tronçon oued Agrioune avant la confluence).

Tronçon	B (m)	K	H (m)	n	I (m/m)	Q_{dim} (m^3/s)	$Q_{évacuer}$(m^3/s)
Après la confluence	44	4	4.5	0.03	0.003	464	737.876

V.4.2.2.2 Paramètres d'écoulement :

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

Tableau n° V.13 : Résultats de la simulation d'écoulement d'un canal gabionné du tronçon de l'oued Agrioune après la confluence (Source : HECRAS).

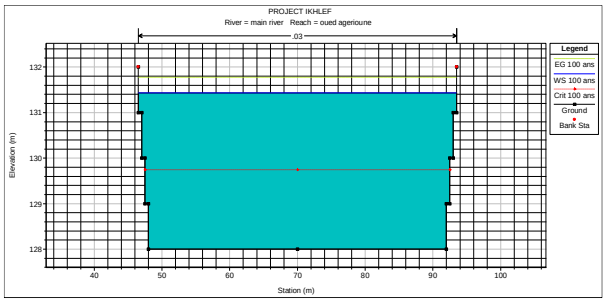
River Sta	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)	
855	126.6	131.82	128.84	132.01	0.00051	1.94	239.19	47	1.27
751	128	131.44	128.6	131.89	0.00195	2.98	155.51	47	1.52
609	128	130.25	130.24	131.34	0.00768	4.62	100.43	46	1
480	127	129.24	129.24	130.34	0.00778	4.64	100.01	46	1
343	121	125.35	123.24	125.63	0.0009	2.34	198.46	47	1.36
238	122	124.24	124.24	125.34	0.00779	4.64	100.01	46	1

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

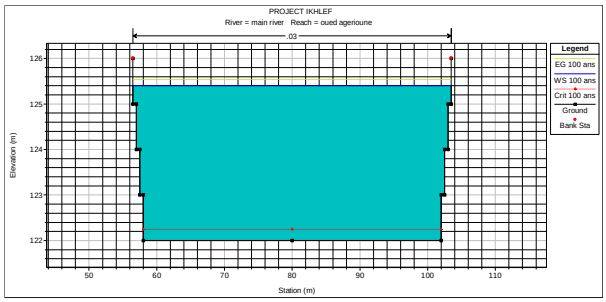
- ✓ Selon les valeurs du nombre de Froude, on observe que le régime d'écoulement est torrentiel (Fr >1).
- ✓ La vitesse d'écoulement atteint V = 4.64 m/s, ne dépassant pas 6 m/s, ce qui reste une valeur admissible pour un gabion.

V.4.2.2.3 Section en travers :

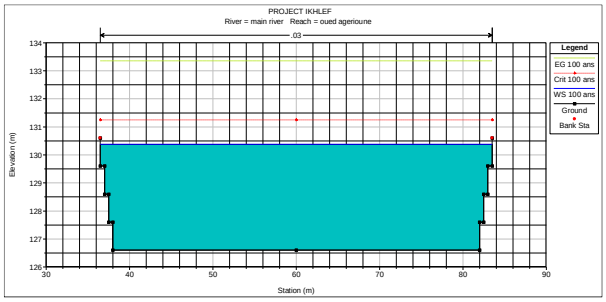
▪ Les sections en travers de l'oued aménagé après la simulation sont représentées dans la figure suivante :



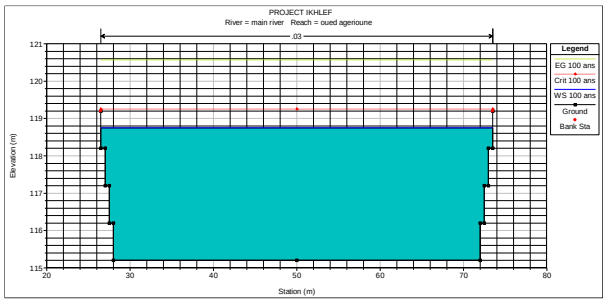
Section 751



Section 855



Section 238



Section 343

Figure V.9 : Profils en travers d'un canal gabionné pour une crue centennale pour le tronçon de l'oued Agrioune avant la confluence.

▪Lors d'une crue centennale de 464 m^3/s, il est notable que notre canal assure une protection adéquate, évitant tout débordement d'eau.

V.4.2.2.4 Estimation du coût de la variante :

▪Le Tableau n° V.14 résume le coût de réalisation d'un canal en gabion sur le tronçon de l'oued Agrioune après la confluence.

Tableau n° V.14 : Devis de la variante (canal en gabion) du tronçon de l'oued Agrioune après la confluence.

Désignations des travaux		Unité	Quantité	Prix unitaire (DA)	Montant (DA/mL)
Terrassement	Déblais	m³	103060	250	25765000
	Remblais	m³	2500	700	1750000
Géotextile		mL	1440	2500	3600000
Gabions		m³	5505	5000	27525000
Montant total					**58,640,000.00 DA**

▪Les deux options, à savoir le gabionnage et le canal en béton, semblent capables d'évacuer le débit de crue sans provoquer de débordement. Cependant, du point de vue financier, le gabionnage apparaît comme l'option la plus économique. Nous envisageons maintenant d'étudier une troisième variante avant de prendre une décision finale.

V.4.3 Troisième variante : Canal en enrochement :

▪La troisième proposition envisage la création d'un canal en enrochement de forme trapézoïdale.

V.4.3.1 Le tronçon de l'oued Avant la confluence :

V.4.3.1.1 Dimensionnement :

▪Les caractéristiques du canal sont déterminées en utilisant le logiciel Flow-Master ;
Ci-dessous sont présentés les résultats du calcul hydraulique pour le canal trapézoïdal :

Tableau n° V.15 : Dimensions de l'aménagement du tronçon de l'oued Agrioune avant la confluence (canal en enrochement).

Tronçon	Section de départ	Section d' arrivé	Longueur (m)	Pente du projet (m/m)	Fruit de talus	Largeur du fond (m)	La largeur au miroir (m)	Hauteur du canal (m)
Amont de la confluence	418	13	405	0.001	2	29.1	41.1	3

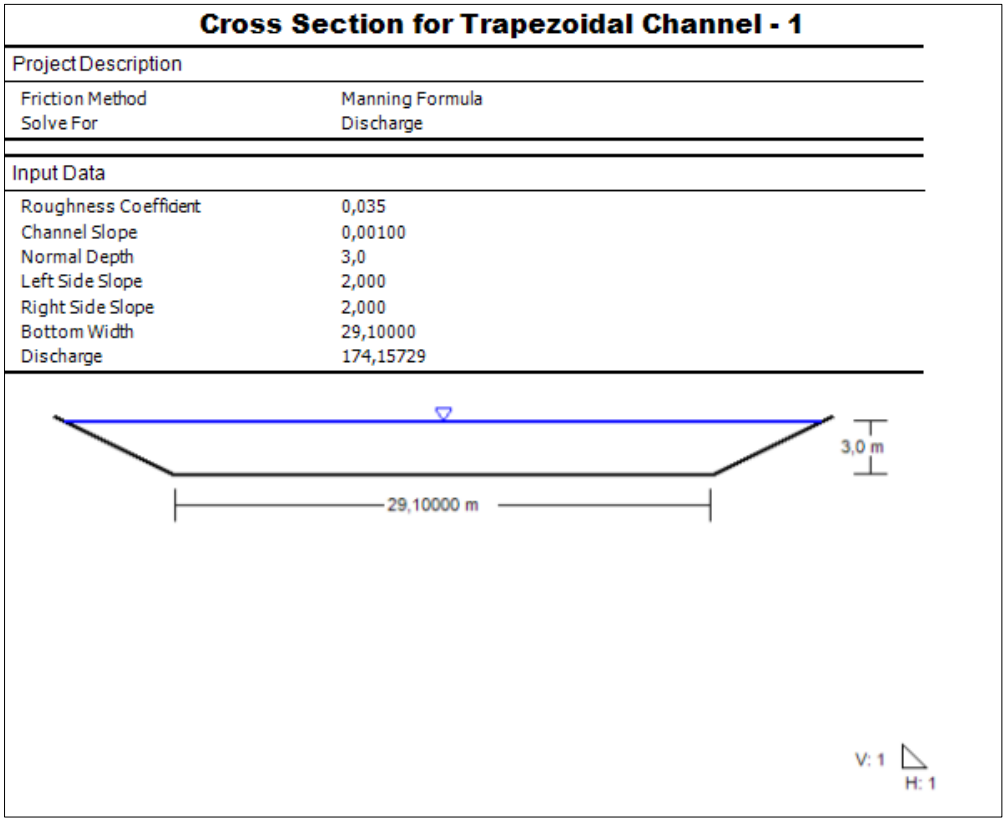


Figure V.10 : Les dimensions du canal trapézoïdale en enrochement du tronçon à aménager de l'oued Agrioune avant la confluence, (Source : logiciel Flow-master).

V.4.3.1.2 Paramètres d'écoulement :

▪Les résultats de la simulation sont représentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau n°V.16 : Résultats de la simulation d'écoulement d'un canal trapézoïdale en enrochement du tronçon de l'oued Agrioune avant la confluence, (Source : HEC-RAS).

River Sta	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m^2)	(m)	
418	142	143.48	143.48	144.17	0.00459	3.67	47.44	34.94	1.67
313	137	137.93	138.48	139.8	0.00025	1.06	28.77	32.73	1.17
240	135	136.25	136.48	137.25	0.00066	1.45	39.27	33.99	1.27
141	132.9	134.12	134.38	135.17	0.00041	1.25	38.47	33.89	1.22
13	128.2	128.99	129.68	131.62	0.000012	0.39	24.23	32.17	1.04

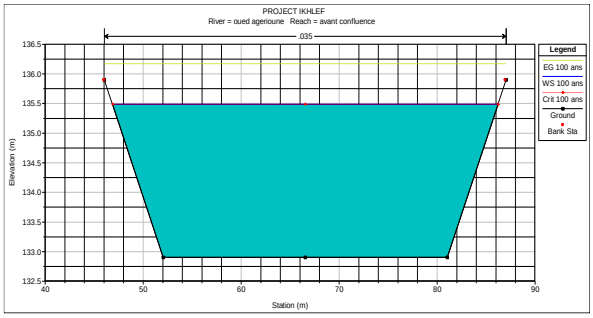
▪En se basant sur les résultats du tableau, on remarque que :

- ✓ Selon les valeurs du nombre de Froude, il est notable que le régime d'écoulement est torrentiel Fr >1.
- ✓ La vitesse d'écoulement ne dépasse pas 3.67 m/s, ce qui est admissible pour l'enrochement.

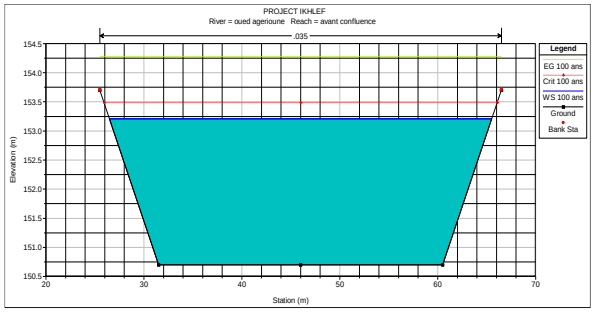
▪Sur le plan technique, le canal en enrochement de forme trapézoïdale offre une bonne protection.

V.4.3.1.3 Les sections en travers :

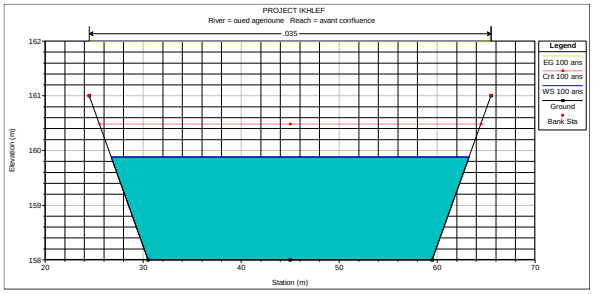
▪ Les sections en travers de l'oued aménagé après la simulation sont représentées dans la figure suivante :



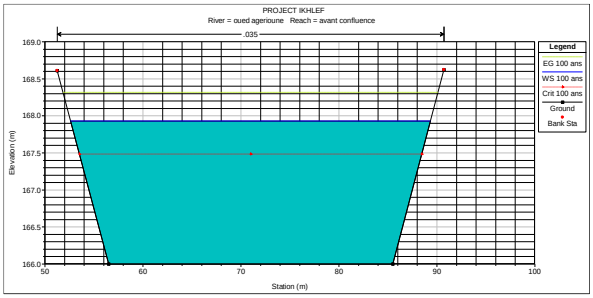
Section 13



Section 95



Section 211



Section 363

Figure V.11 : Profils en travers d'un canal trapézoïdale en enrochement pour une crue centennale pour le tronçon de l'oued Agrioune avant la confluence.

▪Lors d'une crue centennale de 174 m^3/s, on constate que notre canal trapézoïdal en enrochement assure une protection adéquate, empêchant le débordement de l'eau.

V.4.3.1.4 Estimation du coût de la variante :

▪Le Tableau n° V.17 résume le coût de réalisation d'un canal en gabion sur le tronçon de l'oued Agrioune avant la confluence.

Tableau n° V.17 : Devis de la variante canal en enrochement pour le tronçon de l'oued Agrioune avant la confluence.

Désignations des travaux		Unité	Quantité	Prix unitaire (DA)	Montant (DA/mL)
Terrassement	Déblais	m³	53901	250	13475250
	Remblais	m³	0	700	0
Géotextile		mL	2717	2500	6792500
Enrochement		m³	4351	5000	21753484
Montant total					**42,021,234.00 DA**

V.4.3.2 Le tronçon de l'oued après la confluence :

V.4.3.2.1 Dimensionnement :

▪Les caractéristiques du canal sont déterminées en utilisant le logiciel Flow-Master ;
Ci-dessous sont présentés les résultats du calcul hydraulique pour le canal trapézoïdal :

Tableau n° V.18 : Dimensions de l'aménagement du tronçon de l'oued Agrioune après la confluence (canal en enrochement).

Tronçon	Section de départ	Section d'arrivé	Longueur (m)	Pente du projet (%)	Fruit de talus	Largeur du fond (m)	La largeur au miroir (m)	Hauteur du canal (m)
Aval de la confluence	855	238	600	0.002	2	33.6	49.6	4

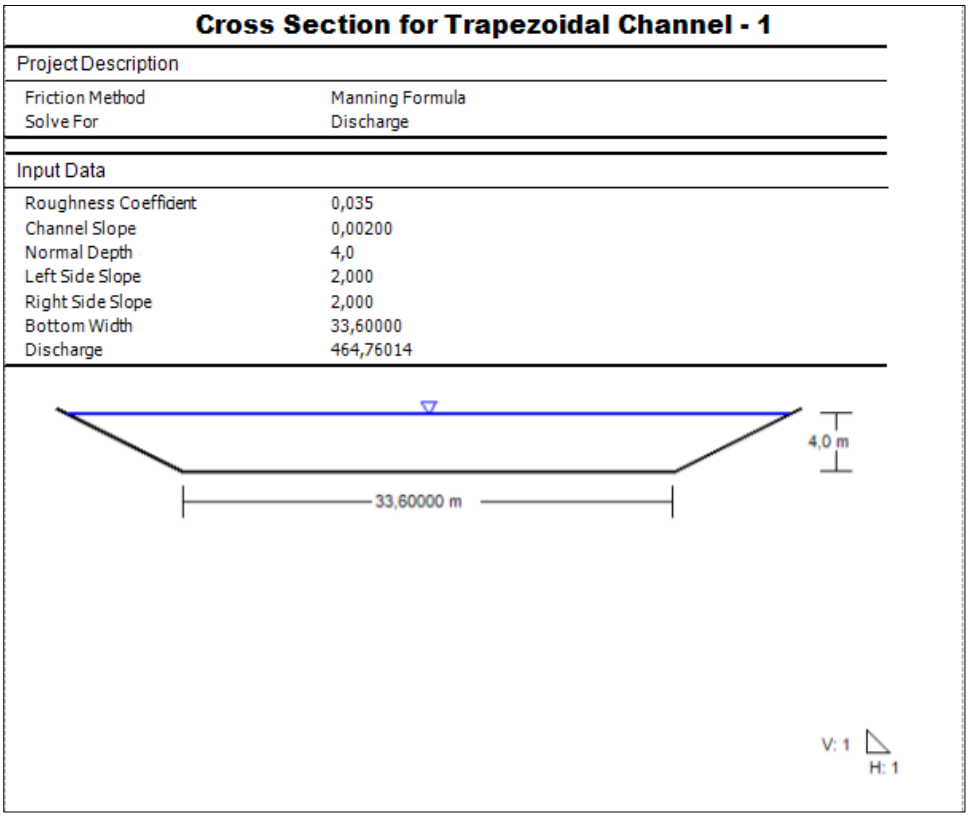


Figure V.12 : Les dimensions du canal trapézoïdale du tronçon à aménager de l'oued Agrioune après la confluence, (Source : logiciel Flow-master).

V.4.3.2.2 Paramètres d'écoulement :

▪Les résultats de la simulation sont représentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau n° V.19 : Résultats de la simulation d'écoulement d'un canal trapézoïdale en enrochement du tronçon de l'oued Agrioune après la confluence, (Source : HEC-RAS).

River Sta	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m^2)	(m)	
855	121.5	124.7	133.18	125.38	0.00436	3.65	98.56	45.55	1.7
751	119	121.54	132.47	122.81	0.00964	3.04	98.56	43.71	1.69
609	128.5	131.92	131.68	132.51	0.00348	3.38	137.24	46.67	1.63
480	128.5	131.92	129.4	132.47	0.0032	3.3	149.01	46.5	1.61
343	129.5	135.34	125.44	135.57	0.00071	2.1	220.87	38.34	1.28
238	128.5	135.34	124.68	135.49	0.00041	1.74	266.6	39.74	1.21

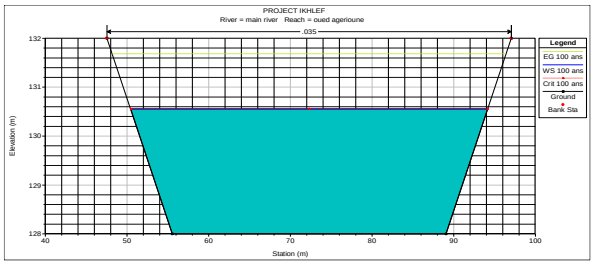
▪En se basant sur les résultats du tableau, on remarque que :

- ✓ Selon les valeurs du nombre de Froude, il est notable que le régime d'écoulement est torrentiel Fr>1.
- ✓ La vitesse d'écoulement ne dépasse pas 3.65 m/s, ce qui est admissible pour l'enrochement.

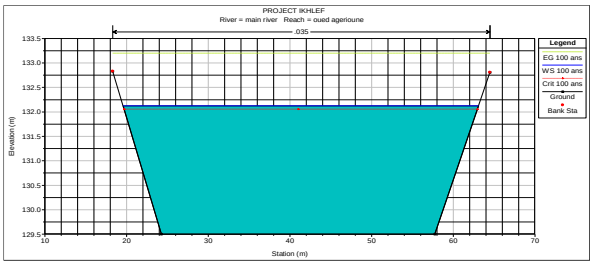
▪Sur le plan technique, le canal en enrochement de forme trapézoïdale offre une bonne protection.

V.4.3.2.3 Les sections en travers :

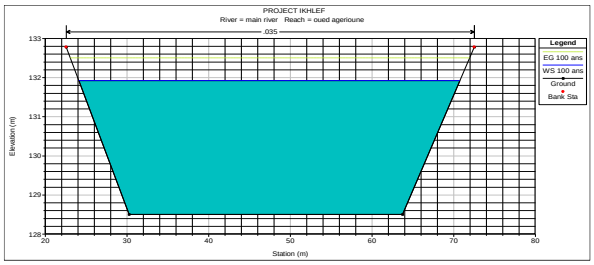
▪ Les sections en travers de l'oued aménagé après la simulation sont représentées dans la figure suivante :



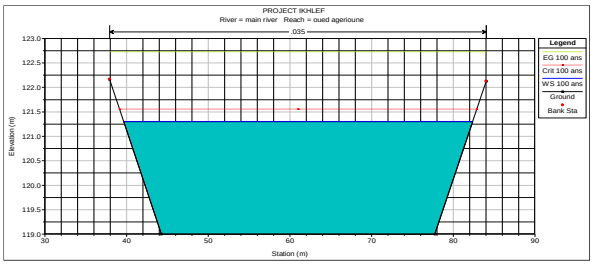
Section 855



Section 751



Section 480



Section 343

Figure V.13 : Profils en travers d'un canal trapézoïdale en enrochement pour une crue centennale pour le tronçon de l'oued Agrioune après la confluence.

▪Lors d'une crue centennale de 464 m^3/s, on constate que notre canal trapézoïdal en enrochement assure une protection adéquate, empêchant le débordement de l'eau.

V.4.3.2.4 Estimation du coût de la variante :

▪Le Tableau n° V.20 résume le coût de réalisation d'un canal en gabion sur le tronçon de l'oued Agrioune après la confluence.

Tableau n° V.20 : Devis de la variante canal en enrochement pour le tronçon de l'oued Agrioune après la confluence.

Désignations des travaux		Unité	Quantité	Prix unitaire (DA)	Montant (DA/mL)
Terrassement	Déblais	m³	88397	250	22099250
	Remblais	m³	0	700	0
Géotextile		mL	4025	2500	10062500
Enrochement		m³	8408	5000	42037384
Montant total					**74,199,134.00 DA**

•Pour le cas de l'oued Agrioune, trois options d'aménagement ont été étudiées du point de vue technique et économique afin de protéger les zones urbaines des inondations. Une étude technico-économique a ensuite été menée pour déterminer la variante la plus favorable.

V.4.4 Critères du choix de la variante adéquate :

•Pour orienter la sélection d'une option d'aménagement, nous élaborons un choix en fonction des critères d'évaluation spécifiques à chaque variante :

Tableau V.21 : Critères du choix de la variantes adéquate dans le tronçon de l'oued Agrioune avant la confluence.

Critères / Les variantes	Efficacité hydraulique	Facilité de réalisation	Durabilité	Entretien	Coût
Canal en Béton armé	3	1	2	1	1
Canal en enrochement	2	2	2	2	2
Canal en gabions	2	2	1	3	3

❋ Prenant en considération des critères énoncés précédemment, la décision finale s'est principalement portée sur la mise en place d'un canal en gabions. Cette option a été privilégiée en raison de la présence de méandres existants, ce qui a conduit à réduire l'évolution de ces méandres au fil du temps en limitant l'érosion sur les côtés extérieurs et les dépôts de sédiments sur les côtés intérieurs.

V.4.5 Résultats :

En conclusion, pour les deux tronçons de l'oued Agrioune, l'étude technico-économique a permis d'évaluer trois variantes d'aménagement visant à protéger les zones urbaines des inondations. À la suite de cette analyse approfondie, une sélection selon les critères d'évaluation a été menée pour déterminer la variante la plus favorable.

La décision finale a été orientée vers la mise en place d'un canal en gabions, choix motivé par la présence de méandres existants. Cette solution a démontré son efficacité en limitant l'érosion sur les côtés extérieurs et en minimisant les dépôts de sédiments sur les côtés intérieurs, contribuant ainsi à préserver la stabilité du cours d'eau au fil du temps.

Les avantages inhérents à l'adoption des gabions sont multiples : une fiabilité et une durabilité accrues, une mise en œuvre facilitée, une perméabilité optimale permettant un drainage naturel adéquat, une réduction significative de la vitesse de l'eau favorisant la dispersion d'énergie, et enfin, une intégration esthétique harmonieuse avec l'environnement naturel.

Ainsi, la solution du canal en gabions s'est imposée comme la plus appropriée, tant d'un point de vue technique que sur le plan environnemental, offrant une réponse équilibrée et pérenne aux enjeux liés à la protection contre les inondations dans cette zone spécifique de l'oued Agrioune.

V.5 Aménagement proposé sur le tronçon de l'oued Ait Smail :

❋Les zones à risque d'inondations sont :

La principale problématique du secteur est l'inondation de l'îlot central (gare routière de Bordj Mira) et les débordements en rive droite. Ces débordements sont causés par la capacité d'évacuation insuffisante de l'ouvrage de franchissement de la route des gorges.

V.5.1 Première variante : Canal en béton armé :

▪La première proposition envisage la création d'un canal en béton armé de forme trapézoïdale.

▪À partir de Ras mapper, nous obtenons une profondeur normale de 5.9 m pour ce tronçon qui s'étend sur une longueur de 2630.383 m.

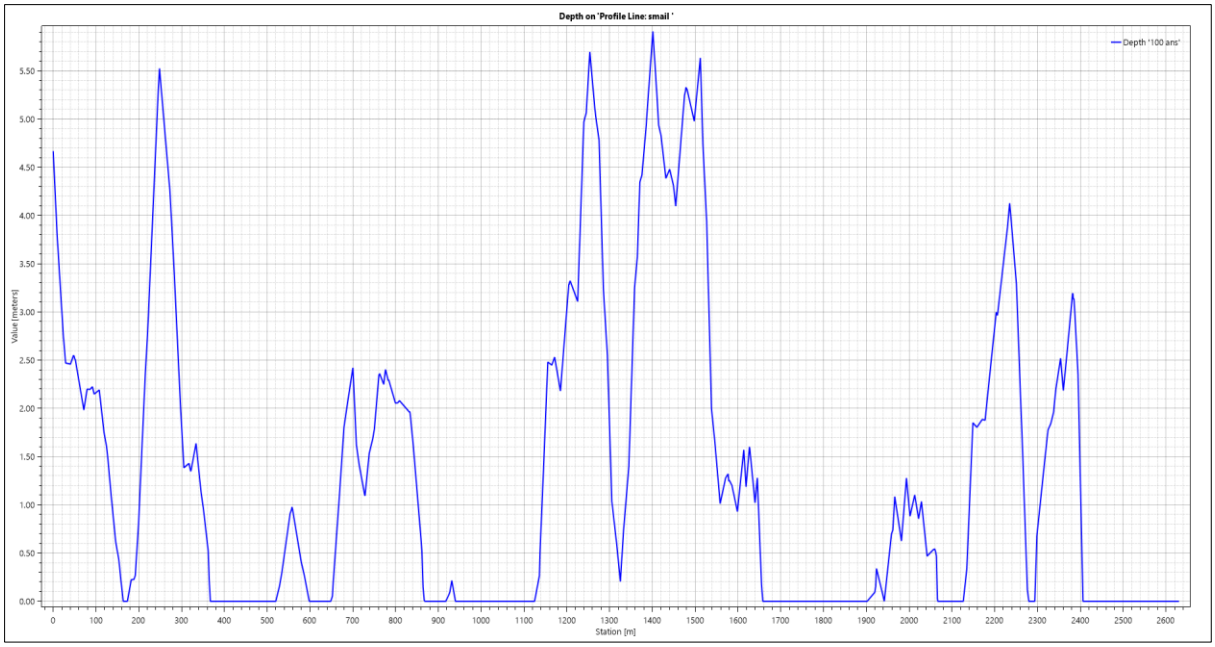


Figure V.14 : La profondeur normal du tronçon de l'oued Ait Smail (Source : Ras-mapper).

V.5.1.1 Dimensionnement :

▪Les caractéristiques du canal sont déterminées en utilisant le logiciel Flow-Master ;

Ci-dessous sont présentés les résultats du calcul hydraulique pour le canal trapézoïdal :

Tableau n° V.22 : Dimensions de l'aménagement du tronçon de l'oued Ait Smail (canal en béton armé).

Tronçon	Section de départ	Section d'arrivé	Longueur (m)	Pente du projet (%)	Fruit de talus	Largeur du fond (m)	La largeur au miroir (m)	Hauteur du canal (m)
Ait Smail	508	28	480	0.0012	1	23.8	29	2.5

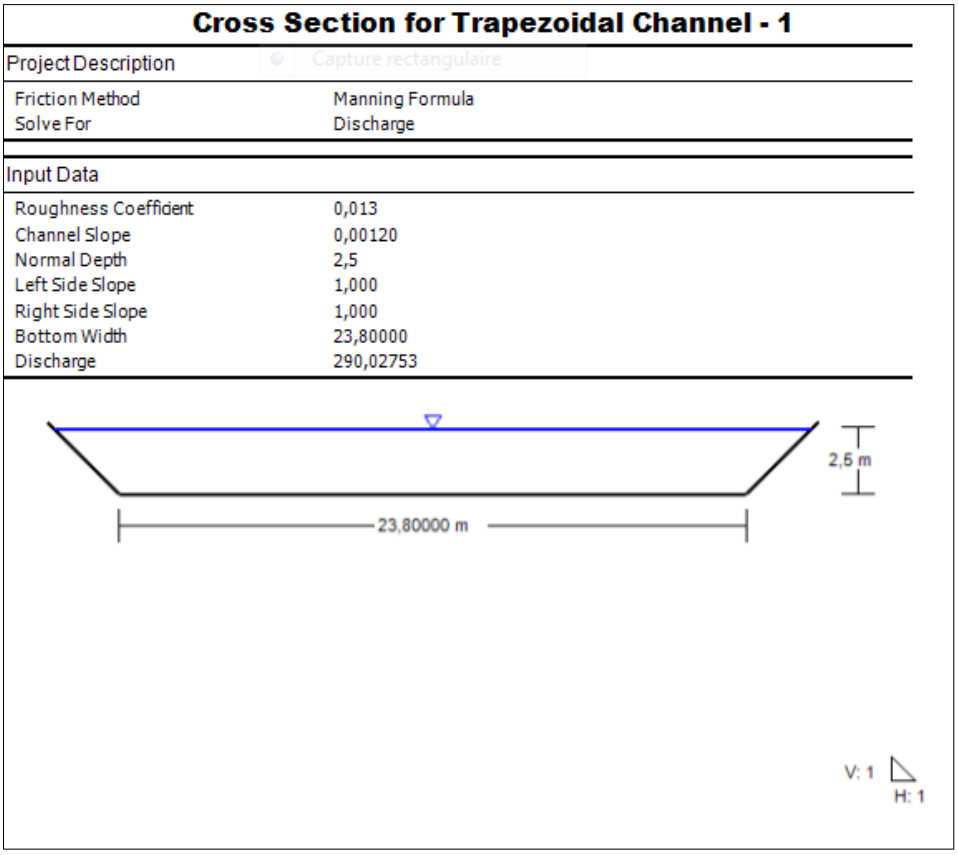


Figure V.15 : Les dimensions du canal trapézoïdale du tronçon à aménager de l'oued Ait Smail, (Source : logiciel Flow-master).

V.5.1.2 Paramètres d'écoulement :

▪Les résultats de la simulation sont représentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau n° V.23 : Résultats de la simulation d'écoulement d'un canal trapézoïdale en béton armé du tronçon de l'oued Ait Smail, (Source : HEC-RAS).

River Sta	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)	
508	166	168.38	168.38	169.47	0.00139	4.62	62.9	33.01	1
326	152	154.37	154.38	155.47	0.00141	4.64	62.5	28.74	1
227	145	150.07	147.38	150.28	0.00011	1.99	62.5	28.74	1.29
28	144	150.11	145.38	150.24	0.000048	1.61	62.5	28.74	1.21

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

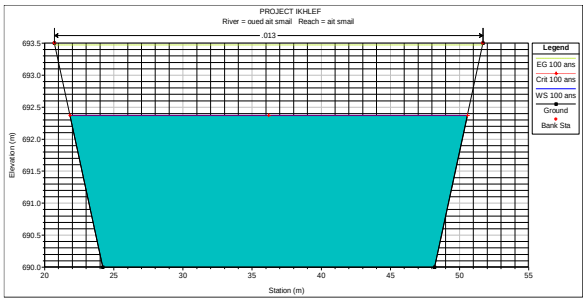
▪En se basant sur les résultats du tableau, on remarque que :

- ✓ Selon les valeurs du nombre de Froude, il est notable que le régime d'écoulement commence en mode critique à Fr = 1, pour devenir torrentiel Fr > 1.
- ✓ La vitesse d'écoulement ne dépasse pas 4.64 m/s, ce qui élimine tout risque d'érosion du béton.

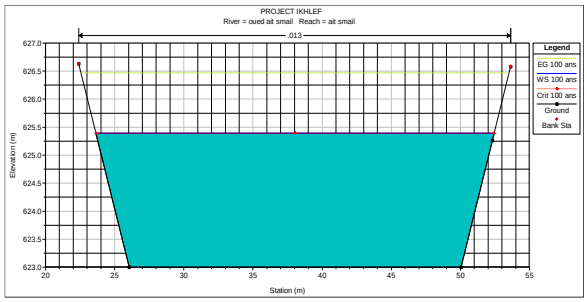
▪Sur le plan technique, le canal en béton armé de forme trapézoïdale offre une protection satisfaisante.

V.5.1.3 Les sections en travers :

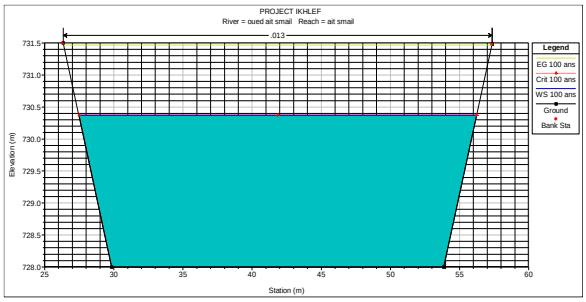
▪ Les sections en travers de l'oued aménagé après la simulation sont représentées dans la figure suivante :



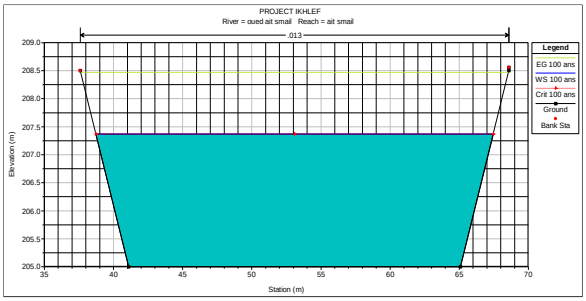
Section 508



Section 326



Section 227



Section 28

Figure V.16 : Profils en travers d'un canal trapézoïdale pour une crue centennale pour le tronçon de l'oued Ait Smail.

▪Lors d'une crue centennale de 290 m^3 /s, on constate que notre canal trapézoïdal en béton assure une protection adéquate, empêchant le débordement de l'eau.

V.5.1.4 Estimation du coût de la variante :

▪Le devis de la variante du canal en béton armé est établi en se basant sur les quantités de terrassements, de volumes de remblai et de déblai calculées par HEC-RAS. Une épaisseur de 15 cm est considérée pour le béton armé, tandis que pour le béton de propreté, une épaisseur de 5 cm est utilisée.

Tableau n° V.24 : Devis de la variante canal en béton armé pour le tronçon de l'oued Ait Smail.

Désignations des travaux		Unité	Quantité	Prix unitaire (DA)	Montant (DA/mL)
Terrassement	Déblais	m^3	338125	250	84531250
	Remblais	m^3	2683	700	1878100
Béton de propreté		m^3	780	13000	10140000
Béton dosé à 350 Kg/m^3		m^3	2340	40000	93600000
Montant total					**190,149,350.00 DA**

▪Bien que cette variante assure une protection efficace et présente des avantages hydrauliques considérables, sa construction s'avère très coûteuse en termes de matériaux et de main-d'œuvre. De plus, elle a un impact négatif sur l'environnement en modifiant le cours naturel de l'eau et en affectant les écosystèmes locaux. En outre, elle exige la démolition de bâtiments, de routes et d'autres infrastructures existantes au bord de l'oued.

V.5.2 Deuxième variante : Redimensionnement du pont :

• L'ouvrage de franchissement de la route des gorges est constitué de deux ponts, l'un en rive gauche, l'autre en rive droite. Les deux bras de l'Aït Smail sont séparés par une île sur laquelle plusieurs bâtiments ont été construits et sur laquelle la gare routière de Bordj Mira s'est installée.

•La largeur de l'oued est d'environ 110 m, dont 40 m sont occupés par l'île. Les deux bras occupent ainsi 70 m.

• Les deux ponts ne sont pas équivalents. Le pont rive gauche est un peu plus large (environ 35 m) et comporte 10 ouvertures, le pont rive droite s'étend sur environ 30 m et compte 8 ouvertures. Les ouvertures sont des demi-buses métalliques de type ARMCO de 2,8 à 3,0 m de diamètre sur radier en béton armé. Plusieurs radiers sont fortement érodés par l'abrasion des éléments charriés en crue.

• Les détails du pont ancien reliant les deux rives sont illustrés dans les figures ci-dessous :

❋La rive gauche :

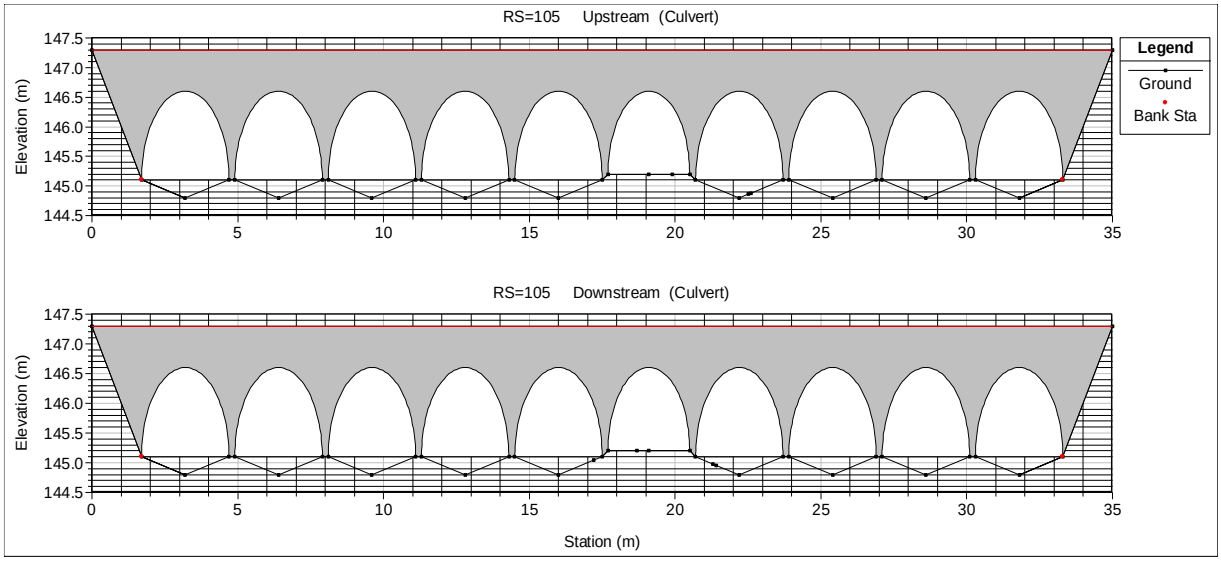


Figure V.17 : Détail du pont rive gauche.

❋**La rive droite :**

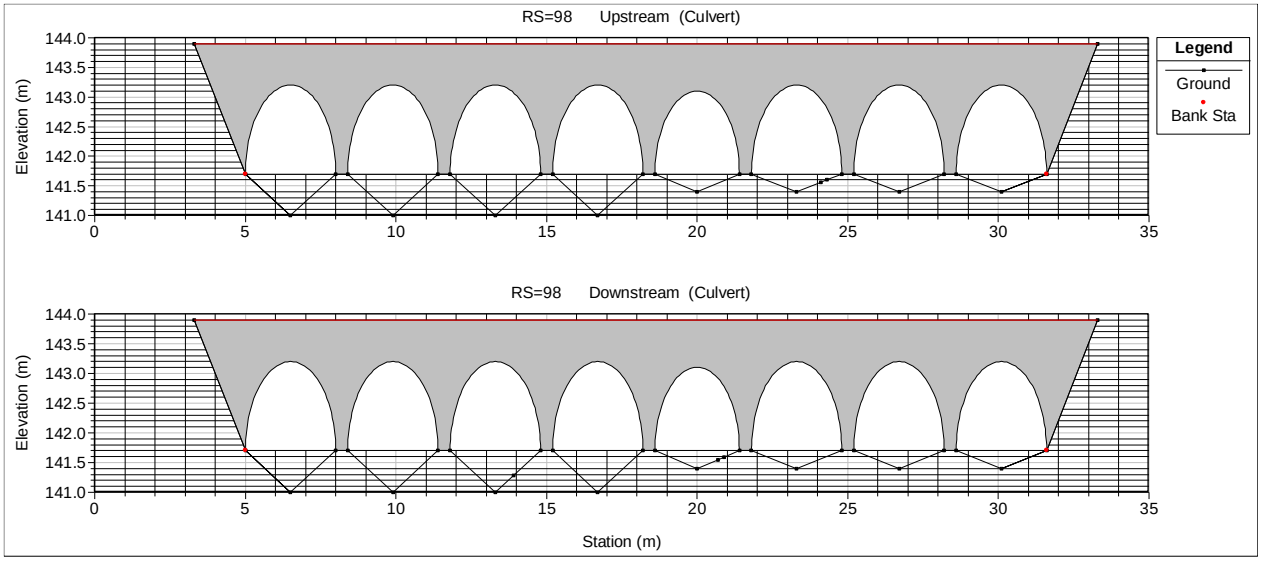
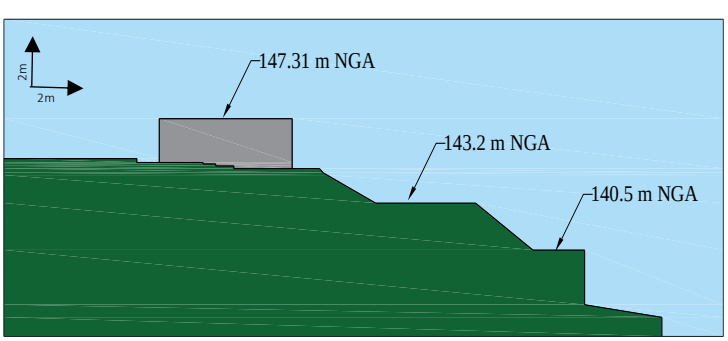
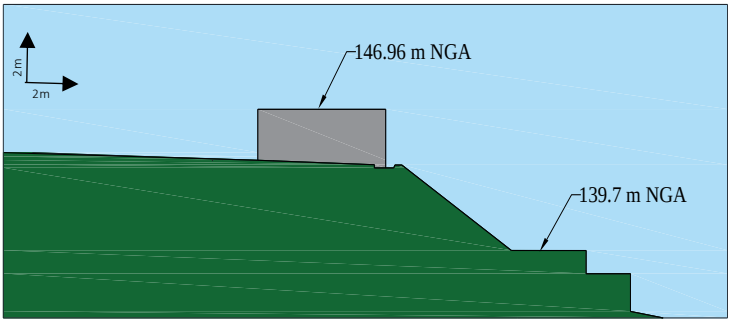


Figure V.18 : Détail du pont rive droite.





Rive gauche





Rive droite

Figure V.19 : Coupe type du pont (data source : IKHLEF_Roumaissa_Autodesk_AutoCAD).

V.5.2.1 Propositions d'aménagements :

•La principale problématique du secteur est l'inondation de l'îlot central (gare routière de Bordj Mira) et les débordements en rive droite. Ces débordements sont causés par la capacité d'évacuation insuffisante de l'ouvrage de franchissement de la route des gorges.

•Par conséquent, une augmentation de la section des deux ouvrages a été étudiée et les impacts hydrauliques ont été simulés.

V.5.2.2 Redimensionnement :

★Nous procédons au redimensionnement des ouvrages de franchissement de manière à garantir leur capacité à permettre le passage de la crue centennale. Sur HEC RAS, nous définissons les caractéristiques spécifiques des ouvrages de franchissement pour s'adapter à la nouvelle hauteur d'eau.

★La vérification de la capacité des ouvrages peut être réalisée soit par le logiciel HEC-RAS, soit en utilisant les formules de Delorme, lesquelles sont préconisées par la DRCR pour le dimensionnement hydraulique des ouvrages de franchissement (CID, 2008). Ces formules s'écrivent comme suit :

Pour les dalots : $Q_{CR} = 1.5 \times L \times H^{3/2}$ (V.1)

Pour les buses : $Q_{CR} = 2.8 \times R \times H^{(\frac{3}{2})\times 0.88}$ (V.2)

Avec :
- L : Ouverture du dalot en (m) ;
- R : Rayon de la buse en (m) ;
- H : Hauteur sous dalles pour les dalots ou le diamètre intérieur pour les buses en (m).

V.5.2.3 Choix de l'ouvrage de franchissement :

Le choix des ouvrages sera orienté par la considération du débit traversant l'ouvrage hydraulique, des charges statiques et dynamiques exercées sur l'ouvrage, du coût d'investissement et de la durée de construction.

Tableau n° V.25 : Avantages et inconvénients des différentes solutions proposées (El Harti & Ait Ichou, 2017)

<table>
<tr><td rowspan="2">Type</td><td colspan="2">Buses</td><td rowspan="2">Dalots</td></tr>
<tr><td>Rigides</td><td>Souples</td></tr>
<tr><td>Forme</td><td>Circulaire</td><td>Ovale</td><td>Rectangulaire</td></tr>
<tr><td>Matériau</td><td>BA</td><td>Acier</td><td>BA</td></tr>
<tr><td>Mise en œuvre</td><td>Préfabriquées</td><td>Tôles préfabriquées et assemblés</td><td>Coulé sur place ou éléments préfabriqués</td></tr>
<tr><td>Emploi</td><td>Faible débit</td><td>Sous Remblais important</td><td>Les plus employés</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Avantages</td><td rowspan="2">Economique</td><td rowspan="2">Supporte des charges importantes</td><td>Supporte directement les charges.</td></tr>
<tr><td>A section égale et pente égale, un dalot est capable d'écouler un débit supérieur à celui d'une buse.</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Inconvénients</td><td>Petit débit (<10 m^3/s)</td><td>Corrosion</td><td rowspan="3">Plus de durée de construction.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Remblais important (>80 cm)</td><td>L'assemblage réalisé par soudure est cher</td></tr>
<tr><td>Remblais important (>80 cm)</td></tr>
</table>

★Étant donné que les débits qui doivent transiter par les ouvrages de franchissement dépassent les 15 m^3/s, la solution retenue est l'utilisation de dalots.

❄ Les principales caractéristiques sont représentées dans le Tableau n° V.26 et la figure V.20 :

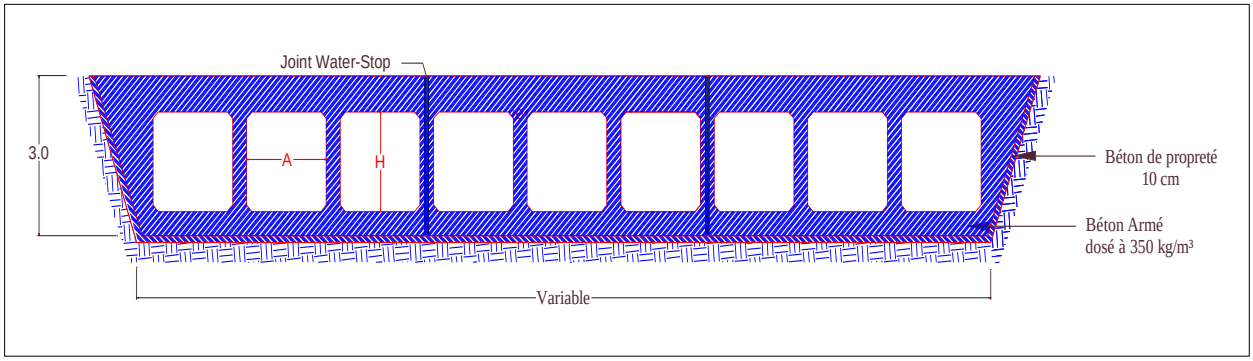


Figure V.20 : Coupe en travers type d'un dalot multiple projeté
(data source : IKHLEF_Roumaissa_Autodesk_AutoCAD).

★Les pré-dimensions calculées pour les dalots projetées sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau n° V.26 : Pré-dimensionnement des dalots projetés.

Redimensionnement des ouvrages existants dans les deux rives pour Q_{100ans} =290 m³/s.							
Localisation	Intervention	Caractéristiques de l'ouvrage complémentaire projeté					$Q_{100\ ans}$
		Ouverture (A)	Hauteur (H)	Nombre d'ouvertures	Epaisseur	Capacité	
		[m]	[m]		e (m)	[m³/s]	[m ³/s]
Rive droite	Reconstruction	2.5	2.5	9	0.5	296.6	290
Rive gauche		2.5	2.5	11	0.5		

V.5.2.4 Schéma de l'ouvrage proposé :

★Les demi-buses sont remplacées par des dalots rectangulaires d'ouverture de 2.5m, capables d'évacuer le débit du projet.

★ Les schémas de la structure redimensionnée sont présentés ci-dessous :

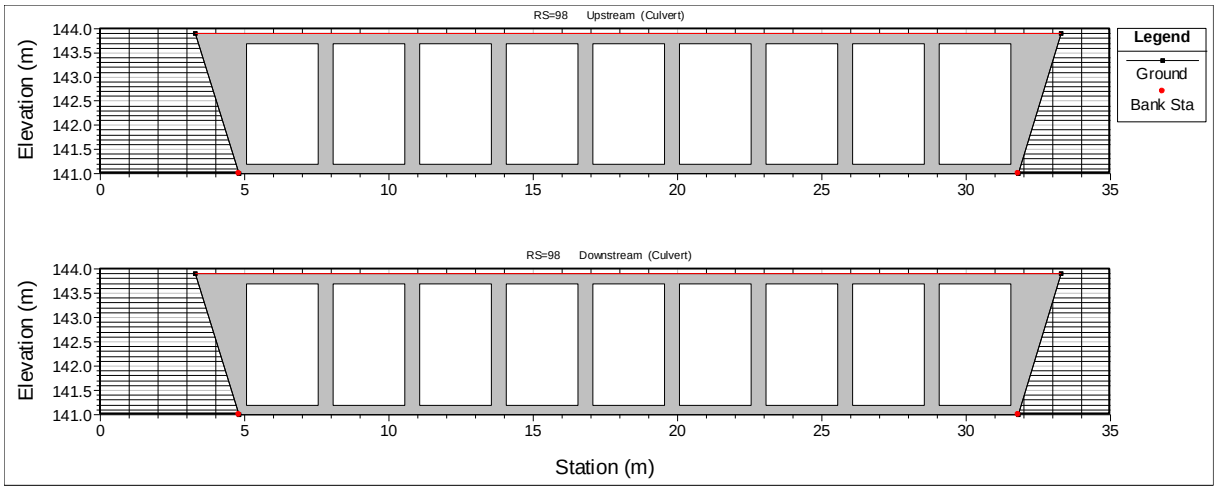


Figure V.21 : Redimensionnement de l'ouvrage rive gauche, (Source : logiciel : HEC-RAS).

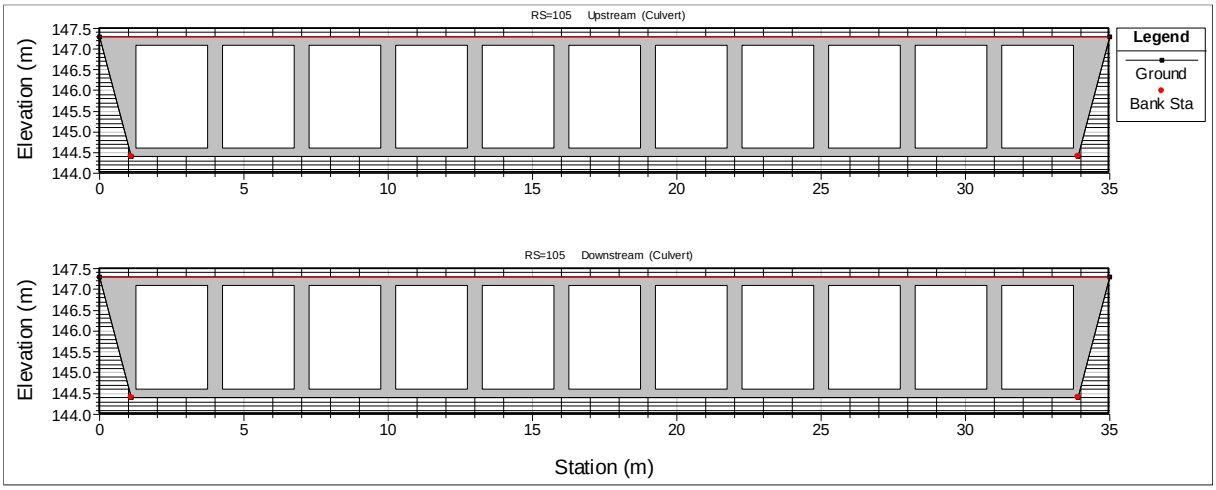


Figure V.22 : Redimensionnement de l'ouvrage rive droite (Source : logiciel : HEC-RAS).

V.5.2.5 Résultats de simulation de l'ouvrage proposé :

Les ouvrages de franchissement redimensionnés et simulés avec le logiciel HEC-RAS sont présentés ci-dessous :

★ **L'ouvrage en rive gauche :**

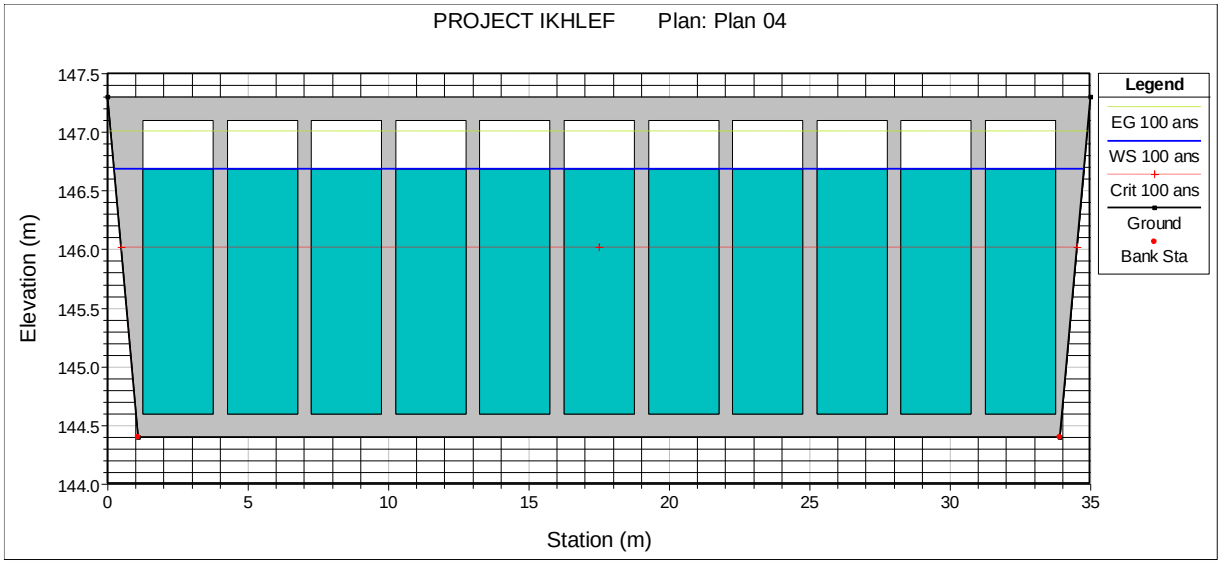


Figure V.23 : Vue en amont de l'ouvrage en rive gauche.

★ **L'ouvrage en rive droite :**

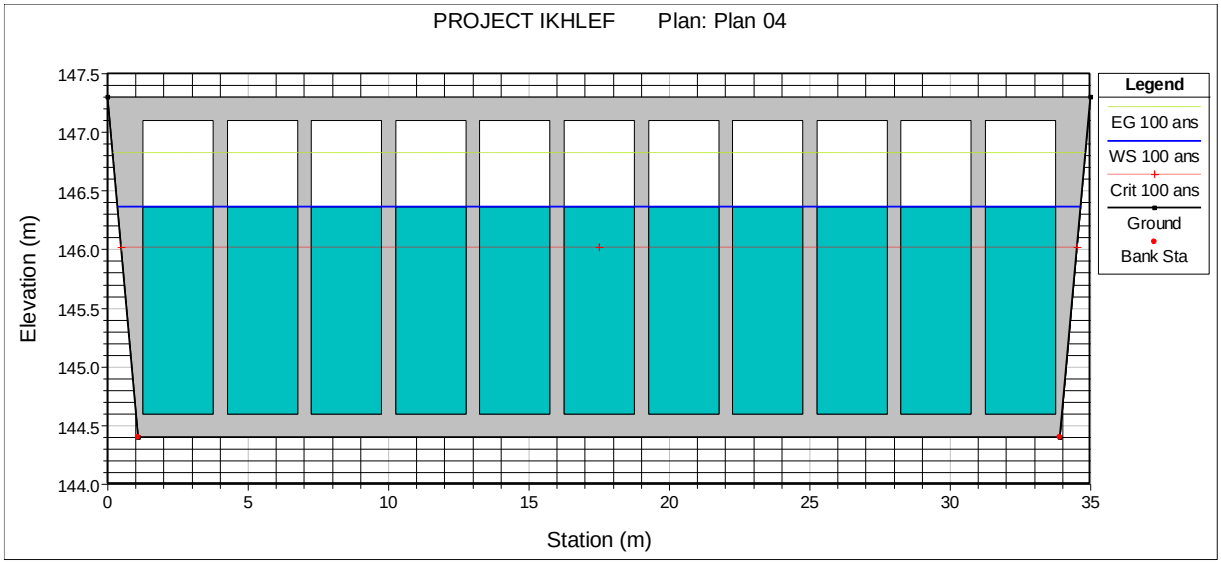


Figure V.24 : Vue en aval de l'ouvrage rive gauche.

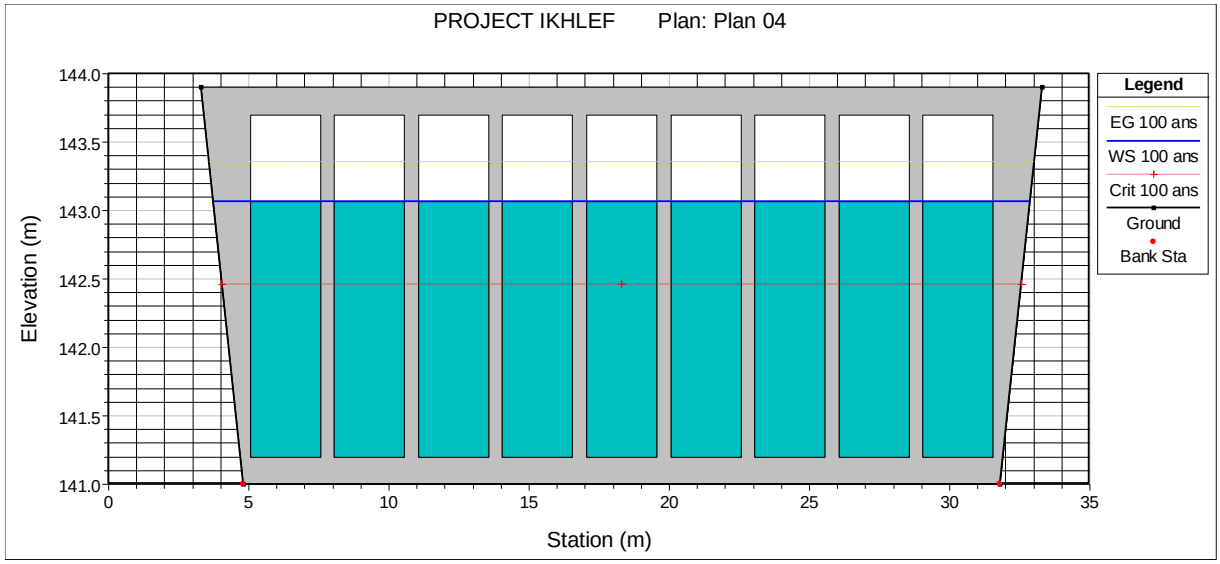


Figure V.25 : Vue en amont de l'ouvrage en rive droite.

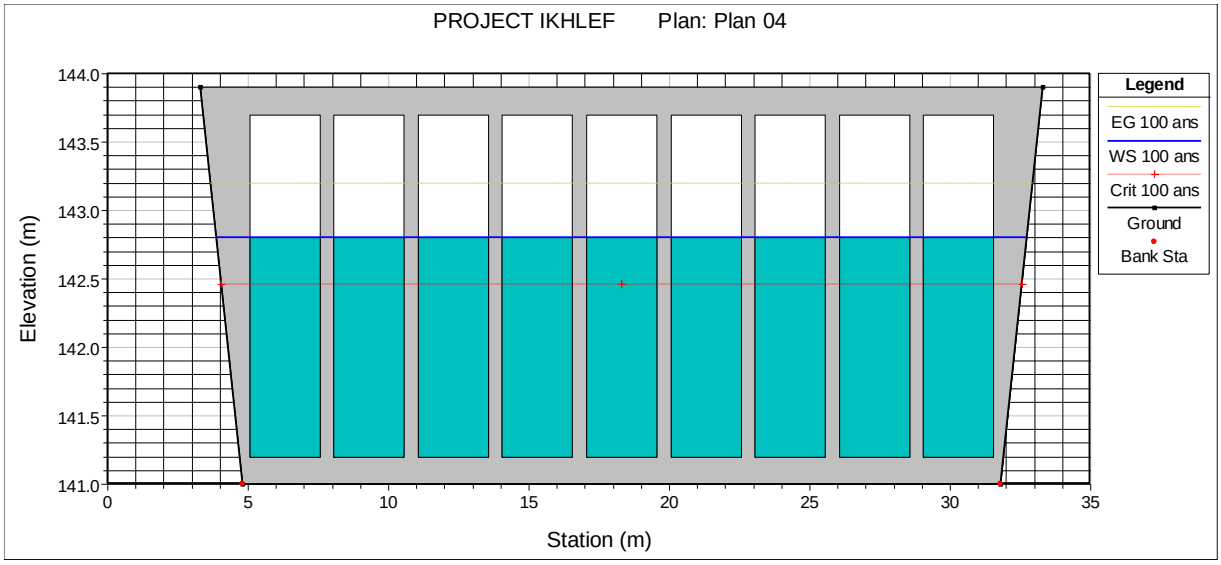


Figure V.26 : Vue en aval de l'ouvrage en rive droite.

V.5.2.6 Les paramètres d'écoulement :

•Les paramètres d'écoulement dans les deux rives du pont après la simulation sont représentés dans les tableaux ci-dessous :

Tableau n° V.27 : Résultats de la simulation d'écoulement du tronçon de l'oued Ait Smail {Pont rive gauche}, (Source : HEC-RAS).

River Sta	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m^2)	(m)	
175	143.96	147.04		147.29	0.001944	2.27	69.06	26.24	0.42
114	143.5	147.11	144.78	147.19	0.000448	1.25	120.1	34.84	0.21
105	Culvert								
97	143.5	146.76		146.85	0.000633	1.38	107.92	34.54	0.24
76	144.06	146.6		146.82	0.00216	2.16	72.02	31.7	0.43
42	143.96	145.82	145.82	146.62	0.012618	4.05	37.74	24.26	0.98

Tableau n° V.28 : Résultats de la simulation d'écoulement du tronçon de l'oued Ait Smail {Pont rive gauche}, (Source : HEC-RAS).

River Sta	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m^2)	(m)	
179	140	143.6		143.83	0.00092	1.81	103.29	29.79	0.3
108	140	143.5	141.6	143.76	0.00099	1.85	101.04	29.73	0.31
98	Culvert								
89	140	142.5		142.86	0.00337	2.67	69.15	28.78	0.54
34	140	141.6	141.6	142.49	0.01332	4.04	45.31	28.05	1

V.5.2.7 Conception des buses et dalots :

La formule de Manning conduit à une équation sous forme implicite, où la largeur au radier (b) du dalot est fixée, et le tirant d'eau (y) est calculé par itérations successives en respectant les critères suivants :

- Maintien d'une vitesse moyenne de 2 m/s, sans excéder 5 m/s ;

- Satisfaire la condition H/A < 1.25 pour garantir un écoulement dénoyé, où H et A représentent respectivement la hauteur et la largeur du dalot.

•Les aménagements visent à protéger la zone contre les inondations d'une crue centennale, cependant, ils sont considérablement importants et nécessitent le remplacement complet de la structure existante. Le coût de l'aménagement n'est pas en rapport avec les risques à encourir en d'absence de solutions curatives et préventives aux problèmes des inondations dans un contexte climatique caractérisé par les évènements extrêmes sous l'effet du changement climatique en raison de l'augmentation des gaz à effet de serre (GES).

•En effet, à l'achèvement du présent travail, il est important de souligner que la zone d'étude a été sujets des crues torrentielles en date du 23 novembre 2023. Le pont en rive gauche, récemment remplacé par une structure dont les dimensions paraissent plus petites dans le cadre de travaux de réhabilitation de la route des gorges de Kherrata, a subi une destruction totale en raison des crues torrentielles survenues dans la région. C'est pourquoi il est important revoir l'étude hydrologique de manière plus exhaustive pour réaliser des aménagements correspondants aux normes d'écoulement appuyée par des PPRI et systèmes d'alertes dans les zones à enjeux et risque important.

V.5.3 Troisième variante : Revêtement en enrochement :

▪La dernière proposition pour ce tronçon envisage la création d'un canal en enrochement de forme trapézoïdale.

V.5.3.1 Dimensionnement du canal :

▪Les caractéristiques du canal sont déterminées en utilisant le logiciel Flow-Master ;
Ci-dessous sont présentés les résultats du calcul hydraulique pour le canal trapézoïdal :

Tableau n° V.29 : Dimensions de l'aménagement du tronçon de l'oued Ait Smail (canal en enrochement).

Tronçon	Section de départ	Section d'arrivé	Longueur (m)	Pente du projet (%)	Fruit de talus	Largeur du fond (m)	La largeur au miroir (m)	Hauteur du canal (m)
Ait Smail	508	28	480	0.0012	2	16	36	5

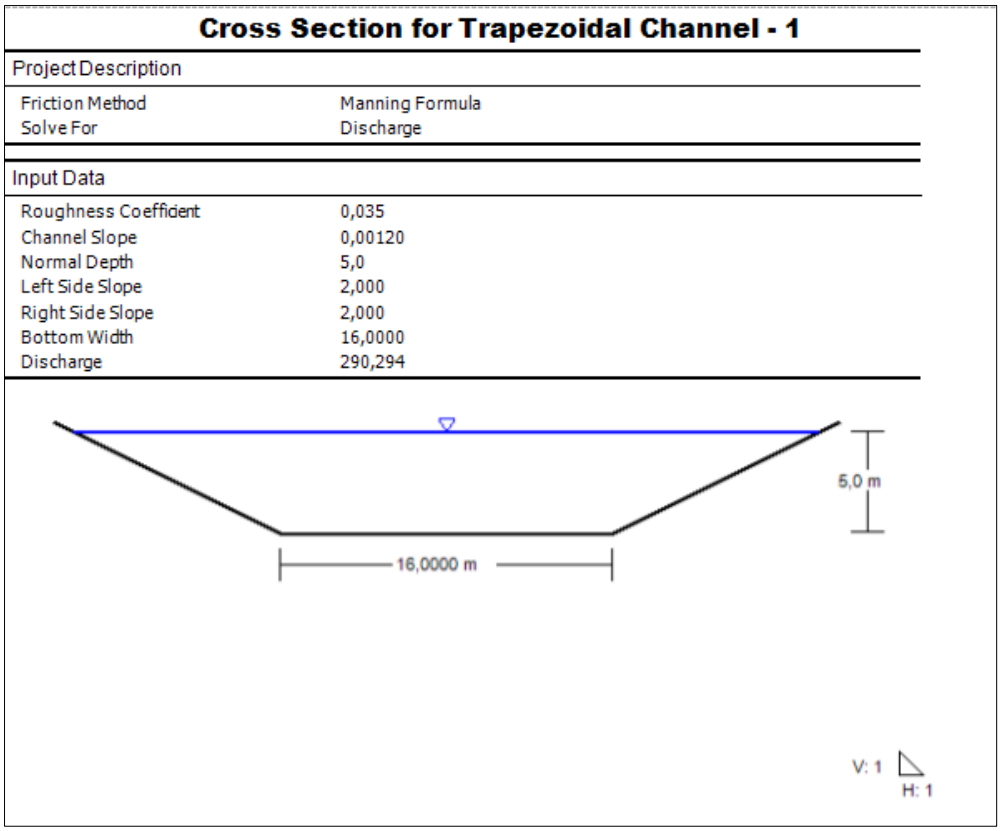


Figure V.27 : Les dimensions du canal trapézoïdale en enrochement du tronçon à aménager de l'oued Ait Smail, (Source : logiciel Flow-master).

V.5.3.2 Paramètres d'écoulement :

▪Les résultats de la simulation sont représentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau n° V.30 : Résultats de la simulation d'écoulement d'un canal trapézoïdale en enrochement du tronçon de l'oued Ait Smail, (Source : HEC-RAS).

River Sta	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m^2)	(m)	
508	150.6	152.1	152.11	152.88	0.001432	4.78	41.84	24.26	1.06
326	149.5	153.1	151.68	153.35	0.00207	5.49	13.59	19.08	1
227	148	150.8	149.56	151.02	0.00141	4.3	29.06	21.98	1
131	148	149.8	149.83	150.66	0.00139	5.4	33.28	22.81	1.42
28	144	150.2	145.82	150.26	0.0019	2.05	18.23	22.9	0.99

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

- ✓ Selon les valeurs du nombre de Froude, il est notable que le régime d'écoulement est critique Fr= 1, puis il devient fluvial Fr < 1.
- ✓ La vitesse d'écoulement ne dépasse pas 3.8 m/s, ce qui est admissible pour l'enrochement.
- ✓ Le périmètre mouillé ne dépasse pas 47.8 m.

▪Sur le plan technique, le canal en enrochement de forme trapézoïdale offre une bonne protection.

V.5.3.3 Les sections en travers :

▪ Les sections en travers de l'oued aménagé après la simulation sont représentées dans la figure suivante :

▪Lors d'une crue centennale de 290 m^3 /s, on constate que notre canal trapézoïdal en enrochement assure une protection adéquate, empêchant le débordement de l'eau.

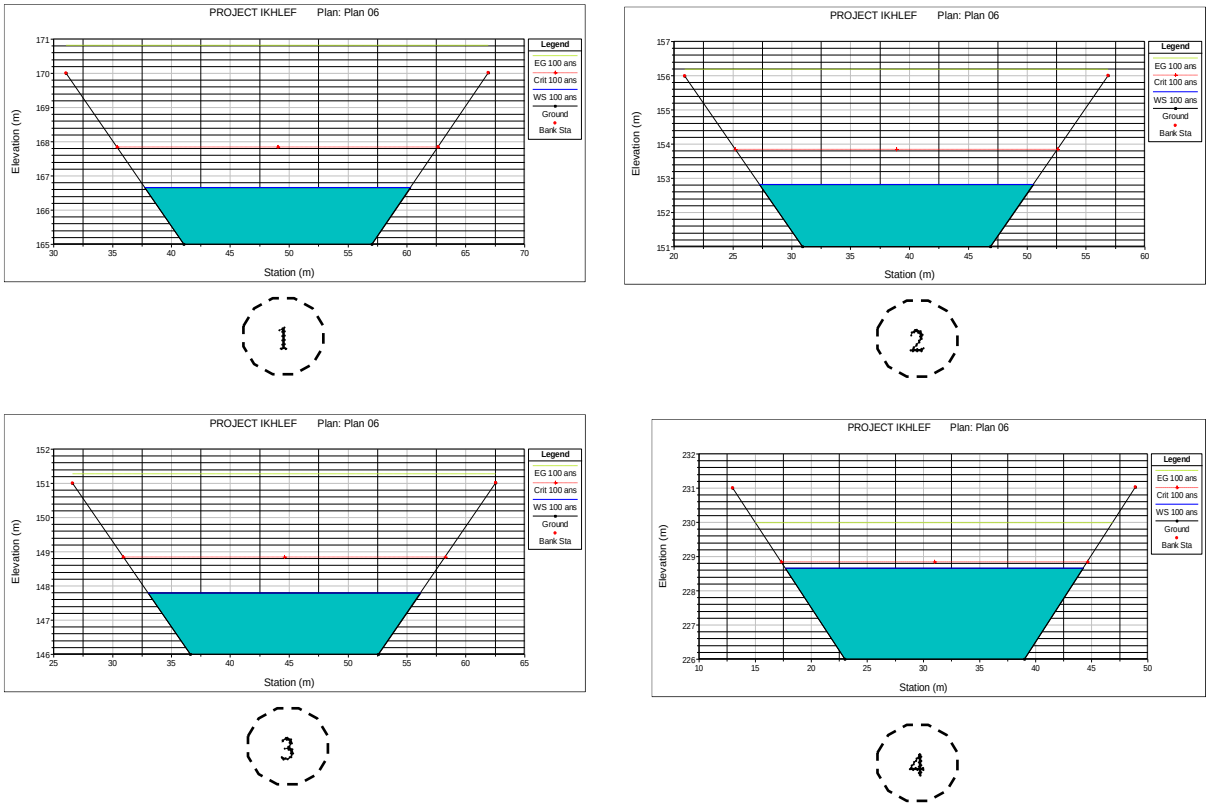


Figure V.28 : Profils en travers d'un canal trapézoïdale en enrochement pour une crue centennale pour le tronçon de l'oued Ait Smail.

V.5.3.4 Conception des mesures de protection des roches :

❋ Comme le souligne Witheridge Grant (Witheridge, 2014) *« The critical design parameter is the rock size (d). Secondary design parameters are the rock type (relating to density), color, durability, shape (angular or rounded), and grading (coefficient of uniformity, Cu = d60/d10).*

Rock size is primarily dependent on the local flow velocity, nominated safety factor, rock shape, density and grading; and to a lesser degree, bank slope. Bank slope is generally not critical unless the slope is steeper than 1:1.5 (V:H) ».

(❋Le paramètre de conception critique est la taille des roches (d). Les paramètres de conception secondaires incluent le type de roche (lié à la densité), la couleur, la durabilité, la forme (angulaire ou arrondie) et le classement (coefficient d'uniformité, $Cu = d_{60}/d_{10}$)

❋La taille des roches dépend principalement de la vitesse locale de l'écoulement, du facteur de sécurité désigné, de la forme, de la densité et du classement des roches ; et dans une moindre mesure, de la pente de la rive. La pente de la rive n'est généralement pas critique à moins que la pente ne soit plus raide que 1/1.5 (V :H) [Ma traduction]).

❋ Les problèmes qui devraient être pris en compte lors de la conception de la protection rocheuse sont mentionner par Witheridge Grant (Witheridge, 2014) :

« • *Design flow velocity adjacent to the protected bank*

• *Rock type, size and size distribution*

• *Depth at which the rocks are founded (depth below current bed level)*

• *Elevation of the top of protection*

• *Thickness of protection*

• *Type of backing material*

• *Face slope*

• *Alignment of rock beaching*

• *Establishment of vegetation on rock-lined surfaces* »

- (Vitesse d'écoulement de conception à proximité de la berge protégée
- Le type de roche, la taille et la distribution des tailles.
- La profondeur à laquelle les roches sont fondées (profondeur sous le niveau actuel du lit).
- L'élévation du sommet de la protection.

- L'épaisseur de la protection.
- Le type de matériau de support.
- La pente de la face.
- L'alignement des blocs rocheux.
- L'établissement de la végétation sur les surfaces revêtues de roches [Ma traduction]).

V.5.3.4.1 La sélection de la vitesse d'écoulement pour le dimensionnement :

Pour déterminer la vitesse de dimensionnement en l'absence de conditions locales connues ou d'autres informations pertinentes, le Département des Travaux Publics de Californie (1960) recommande d'utiliser les approximations citer par Witheridge Grant (Witheridge, 2014) :

« ▪ *Impinging velocities (e.g. on the outside of a bend or directly in line with the upstream channel) adopt a bank velocity 1.33 times the average channel velocity.*

i.e., outside of channel bends: $V_{design} = 1.33\ V_{ave}$

▪ *In straight sections of a natural (irregular) watercourse, adopt a bank velocity 0.67 times the average channel velocity.*

i.e., straight natural channels: $V_{design} = 0.67\ V_{ave}$

However, in straight sections of a constructed, uniform cross-section channel, adopt a bank velocity equal to the average channel velocity.».

Selon ce qui était mentionner, on opte pour notre cas à une vitesse de dimensionnement égale à :

$$V_{dim} = 1.33 \times V_{moy} \qquad \text{(V.3)}$$

V.5.3.4.2 Type et granulométrie des roches :

❁«*Control of the size and gradation of rock riprap placed on a bank is one of the most important aspects of riprap construction yet it can be very difficult to achieve*» (Galay et al., 1987).

❁La roche doit être durable et résistante aux intempéries, et doit être proportionnée de manière à ce que ni la largeur ni l'épaisseur d'une seule roche ne soient inférieures au tiers de sa longueur.

❁ Dans la plupart des situations, la taille nominale des roches se situe généralement entre 200 mm et 600mm.

❁La taille maximale des roches ne doit généralement pas dépasser le double de la valeur nominale (d_{50}), mais dans certains cas, il peut être nécessaire de spécifier une taille maximale de 1,5 fois la taille moyenne des roches.

V.5.3.5 Alignement et longueur des revêtements

❁ Une question clé est de savoir si le revêtement doit être placé le long de la berge existante ou à une certaine distance dans le cours d'eau.Selon the Government of British Columbia *"Often, following a large flood, bank retreat or channel shifting may cause high velocities to impinge directly on the bank or it may cause a poor flow alignment into the next bend, into a bridge crossing, or into another hydraulic structure"* (GOV.BC.CA, 2000)**,** donc dans de ce cas, il est conseillé de rétablir l'alignement du chenal précédent pour éviter d'autres dommages à proximité d'infrastructures ou de bâtiments précieux.

V.5.3.6 Profondeur à laquelle les roches sont fondées (profondeur sous le niveau actuel du lit) :

❁Pour assurer la stabilité du pied et permettre le réarrangement de la section transversale dans le cas où les variations à long terme des niveaux de lit adjacents sont probables il est nécessaire d'ajouter des roches supplémentaires à la base des berges, selon deux méthodes qui sont mentionnées par l'auteur Witheridge Grant dans son ouvrage (Witheridge, 2014):

- *"Inward or outward benching at the toe of the bank;*
- *extension of the rock protection well-below the current bed level.*

Ideally the rock protection should be founded in a toe trench dug to hard rock, or keyed into soft rock where available. If bedrock is not within reach, the toe should be carried below the expected depth of future bed scour.".

❁Selon ce qui est mentionner, dans notre cas on opte à implanter un fossé ou également appelé berm rempli de roches est placé au pied de la pente. Il s'agit essentiellement d'une variante du tablier de lancement, car le matériau de la tranchée est censé se lancer à mesure que l'érosion se développe. Cela implique moins d'empiètement de construction dans le lit de la rivière. En

général, la hauteur de la tranchée d'orteils est supérieure à deux fois l'épaisseur calculée des enrochements conformément aux directives du gouvernement de la Colombie-Britannique (GOV.BC.CA, 2000) **: «** *the height of the toe trench is greater than twice the calculated riprap thickness and is at least 1.5 times the length of the excavation.***».**

V.5.3.7 Élévation du sommet de la protection rocheuse :

En général, lorsque la rive protégée est plus élevée que la rive opposée, il est suffisant que les roches s'étendent jusqu'à la hauteur de la rive inférieure.

V.5.3.8 Epaisseur de protection :

❁Le critère de base est que toutes les pierres de la granulométrie doivent être contenues dans l'épaisseur de la couche et au moins deux couches superposées de taille nominale de roche. Les pierres surdimensionnées qui dépassent à travers la couche peuvent causer des défaillances en créant des turbulences. Selon (S. A. Brown & Clyde, 1989), il est recommandé que l'épaisseur du riprap réponde aux critères suivants :

- ✓ Pas moins de 350 mm ;
- ✓ Pas moins de 1,5 x D_{50} ;
- ✓ Pas moins de D_{100}.

❁ Les spécifications ci-dessus sont approximativement équivalentes à celles recommandées dans *le Manuel de conception d'ingénierie routière du ministère des Transports de la Colombie-Britannique,1999.*

V.5.3.9 Matériau de support ou couche filtrante :

❁ Lorsque le revêtement en pierres non végétalisés est placé sur du sable ou du gravier fin, une couche de filtration convenablement nivelées ou une toile filtrante de géotextile sont nécessaires pour éviter la perte de matériau à travers cette carapace, ce qui pourrait entraîner une défaillance de la berge.

❁Le matériau de filtration traditionnel est du gravier ou de la roche concassée.

❁Le livre de (Koerner, 1986) présente des informations détaillées sur la conception des géotextiles dans diverses applications, mais la discussion sur les applications de contrôle de l'érosion est limitée. Le tissu filtrant géotextile doit avoir certaines spécifiés, comme le mentionne Witheridge Grant (Witheridge, 2014,P.07) « *The geotextile filter cloth must have sufficient strength and must be suitably overlapped to withstand the placement of the rock.* ».

(Le tissu filtrant géotextile doit avoir une résistance suffisante et doit être suffisamment superposé pour résister à la mise en place de la roche [Ma traduction]). Et aussi mentionner par (Racin et al., 2000) in (GOV.BC.CA, 2000)« *When used as a filter, care should be taken to avoid puncture or damage during installation and rock placement, to provide adequate laps or seams, and to key in the fabric at the top and bottom of slopes, often by wrapping it around the toe rock*

».(Lorsqu'ils sont utilisés comme filtre, il est essentiel de prendre des précautions pour éviter toute perforation ou dommage pendant l'installation et la pose des pierres, assurer des chevauchements ou des coutures adéquats, et ancrer le tissu en haut et en bas des pentes, souvent en l'enroulant autour de la roche à la base.[Ma traduction]).

❁Lorsque la roche est placée sur un sol dispersif, alors avant pour placer le tissu filtrant ou la couche filtrante, la banque exposée doit être d'abord recouvert d'une couche de sol non dispersif, généralement d'une épaisseur minimale de 200 mm, mais de préférence de 300 mm (Witheridge, 2014).

V.5.3.10 La pente du talus :

La pente est généralement de 1 :2 (V : H) pour les sols non végétalisés et de 1 :2,5 (V : H) pour les sols végétalisés.

V.5.3.11 Dimensionnement des roches pour les berges :

❁L'équation V.4 peut être utilisée pour dimensionner la roche placée sur le lit des canaux de cours d'eau ou bien pour dimensionner les roches sur des pentes de berges égales ou inférieures à 1 :2 (V : H).

$$d_{50} = \frac{K_1.V^2}{2.g.K^2(S_r-1)} \qquad (V.4)$$

Avec :

d_{50} : diamètre nominale de la roche, dont 50 % des roches sont plus petites [m] ;
K : constante d'équation basée sur les conditions d'écoulement ;
K_1 : facteur de correction pour la forme de la roche ;
K_2 : facteur de correction pour la granulométrie de la roche ;
S_r : densité spécifique de la roche ;
S_0 : pente du lit = tan(θ) [m/m] ;
V : vitesse d'écoulement moyenne en profondeur à l'emplacement de la roche [m/s] (Witheridge, 2014).

❁ L'équation V.4 se réduit à l'équation V.5 couramment utilisée pour les roches angulaires avec Sr= 2 :

$$d_{50} = 0.04\,V^2 \qquad (V.5)$$

V.5.3.12 Les caractéristiques du rip rap :

Les caractéristiques calculées sont représentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau n° V.31 : Les caractéristiques calculées du riprap.

	Débit	m		H		[T]	Vmoy	Vdim	D	D_{50}	D_{max}	D_{min}
Oued Ait Smail		Berm	Talus	Berm	Talus							
	m^3/s	/	/	m	m	m	m/s	m/s	m	m	m	m
	290	1	2	2.5	5	2	3.5	4.65	0.65	0.9	1.5	0.5

V.5.3.13 Estimation du coût de la variante :

▪Le Tableau n° V.32 résume le coût de réalisation d'un revêtement en enrochement sur le tronçon de l'oued Ait Smail.

Tableau n° V.32 : Devis de la troisième variante pour le tronçon de l'oued Ait Smail.

Désignations des travaux		Unité	Quantité	Prix unitaire (DA)	Montant (DA/mL)
Terrassement	Déblais	m^3	238125	250	59531250
	Remblais	m^3	2683	700	1878100
Géotextile		mL	5280	2500	13200000
Enrochement		m^3	32233	3500	112815500
Montant total					**187,424,850.00 DA**

V.5.4 Choix de la variante adéquate :

•Afin de guider le choix d'une option d'aménagement, nous formulons une décision en tenant compte des critères d'évaluation propres à chaque variante :

Tableau n° V.33 : Critères du choix de la variantes adéquate dans le tronçon de l'oued Ait Smail.

Critères / Les variantes	Efficacité hydraulique	Facilité de réalisation	Durabilité	Entretien	Coût
Canal en Béton armé	3	1	2	1	1
Revêtement en enrochement	3	2	3	2	2

❋ En prenant en considération les critères précédemment énoncés, la décision a été prise de favoriser la construction d'un revêtement en enrochement pour le tronçon de l'oued Ait Smail. Ce choix est également justifié par l'érosion sévère observée dans cette section.

V.5.5 Résultats :

▪Pour l'oued Ait Smail, trois variantes d'aménagement ont été étudiées du point de vue technique et économique afin de protéger les zones urbaines des inondations. Une étude technico-économique a ensuite été menée pour déterminer la variante la plus favorable.

▪Le canal en béton est économiquement moins avantageux et plus difficile à mettre en œuvre (milieu humide, irrégularité des fonds). Il est par contre plus imperméable.

▪ Le revêtement en enrochement paraît cependant bien approprié compte tenu des faibles exigences sur la perméabilité.

▪ La décision finale a principalement été axée sur le recalibrage du cours d'eau et la protection des berges au moyen d'un revêtement en riprap. Cette option a été choisie en raison des dommages constatés sur les berges de ce tronçon.

Les avantages du choix d'un canal en enrochement sont les suivants :

- Une excellente stabilité hydraulique,
- Protection contre l'érosion.
- Durabilité à long terme.
- Adaptabilité aux Conditions locales.
- Besoin d'entretien moins que d'autres types de structures,
- Coût efficace, notamment avec des matériaux locaux.
- Flexibilité géométrique.
- Impact environnemental réduit.
- Réduction de la vitesse de l'eau.
- Intégration paysagère harmonieuse.

▪Il est impératif de réviser la structure du pont pour les raisons suivantes :

- ★ Les deux ponts sont susceptibles d'être submergés lors d'une crue centennale.
- ★ Le radier en béton présente des signes de dégradation.
- ★ Les berges sont érodées en raison du déversement.
- ★ Des érosions ont également affecté la base du pilier de l'ouvrage du bras droit, entraînant la formation d'une fosse d'érosion.
- ★ L'îlot central a été inondé par débordement en amont lors de la crue de 2003,2009 et 2019.
- ★ La crue torrentielle survenue le 23 novembre 2023 a entraîné la destruction complète du pont en rive gauche ainsi que d'une partie de l'îlot central.

V.5.6 Vue en 3D des oueds après l'aménagement :

•La vue en trois dimensions des oueds après l'aménagement sont représentées dans li figures ci-dessous :

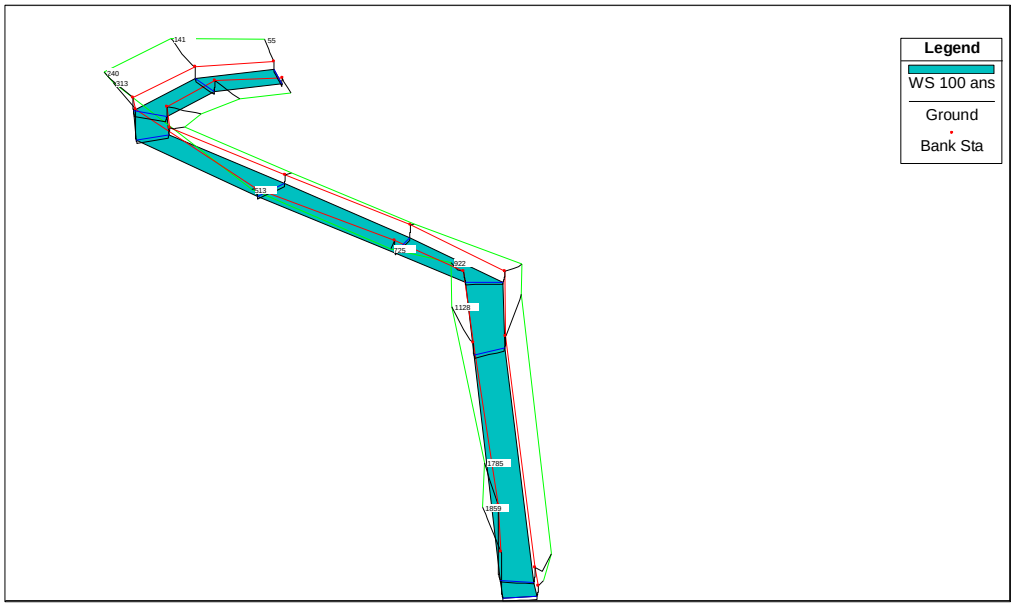


Figure V.29 : Vue en 3D du tronçon de l'oued Agrioune avant la confluence.

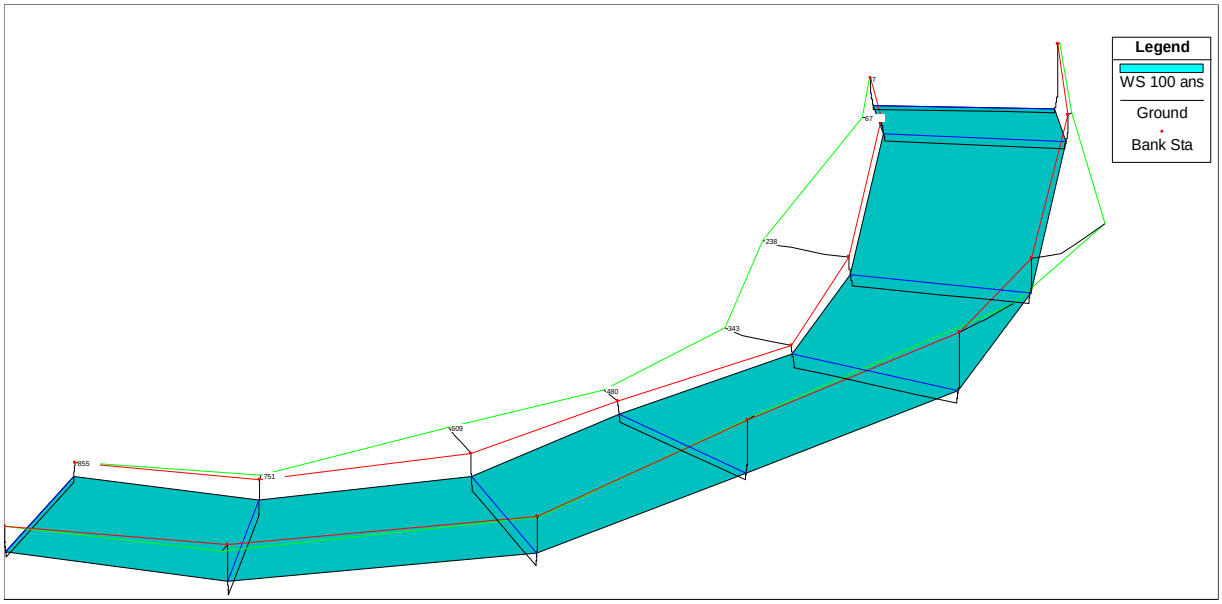


Figure V.30 : Vue en 3D du tronçon de l'oued Agrioune après la confluence.

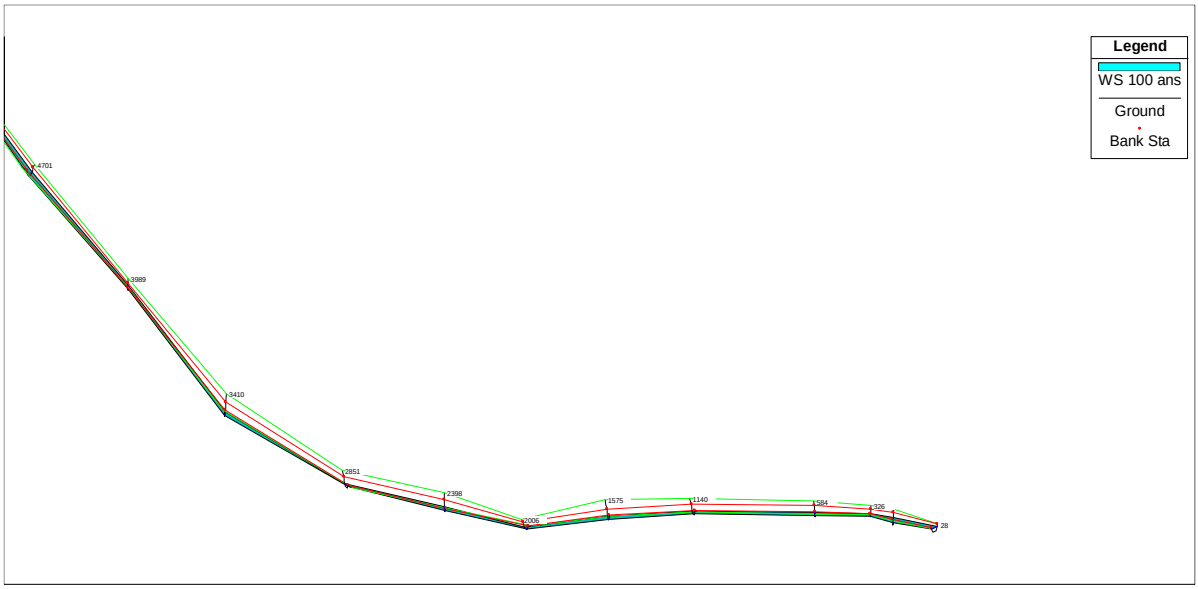


Figure V.31 : Vue en 3D de l'oued Ait Smail.

V.5.7 Les cartes de profondeur d'eau après aménagement :

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



Figure V.32 : Carte de profondeur d'eau après aménagement pour T = 100 ans.

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

V.5.8 Stratégies Proactives et Engagement Communautaire :

Dans le cadre de notre projet, la sélection des variantes d'aménagement repose sur la garantie de la protection de la zone contre les risques d'inondation. Cependant, une attention particulière a été portée aux ouvrages de franchissement, qui se révèlent être les éléments les plus exposés aux risques d'inondation. Afin de mieux appréhender cette réalité, une étude approfondie du risque d'inondation a été menée, en se concentrant particulièrement sur la période de retour T = 250 ans (voir la figure V.33).

L'analyse du risque d'inondation pour une période de retour de 250 ans revêt une importance significative, car elle permet d'évaluer la résilience et la durabilité des aménagements proposés dans des conditions extrêmes. Ce scénario à long terme offre une perspective cruciale pour anticiper les défis potentiels et élaborer des stratégies adaptatives robustes.

Il est impératif d'informer de manière transparente et complète les acteurs impliqués sur les mesures préventives et les dispositifs de gestion des risques qui seront intégrés dans le projet. Cette communication proactive contribue non seulement à renforcer la confiance des parties prenantes, mais également à favoriser une approche collaborative dans la recherche de solutions novatrices.

En outre, la communication des risques doit s'accompagner d'un plan de gestion des urgences robuste, intégrant des procédures claires et des mécanismes de réponse rapides pour atténuer les impacts potentiels en cas de survenue d'une inondation exceptionnelle. Cela permet d'assurer une préparation adéquate et de minimiser les conséquences néfastes sur la population et les infrastructures.

En outre, notre approche de communication des risques s'inscrit dans une démarche de responsabilité sociale et environnementale. Nous reconnaissons l'importance de l'engagement continu avec la communauté locale, en favorisant un dialogue ouvert et en intégrant les retours d'information des parties prenantes dans notre processus décisionnel. Ainsi, notre démarche globale en matière de communication des risques vise à établir une confiance durable, à favoriser la collaboration et à garantir la durabilité globale de notre projet d'aménagement face aux défis environnementaux complexes.

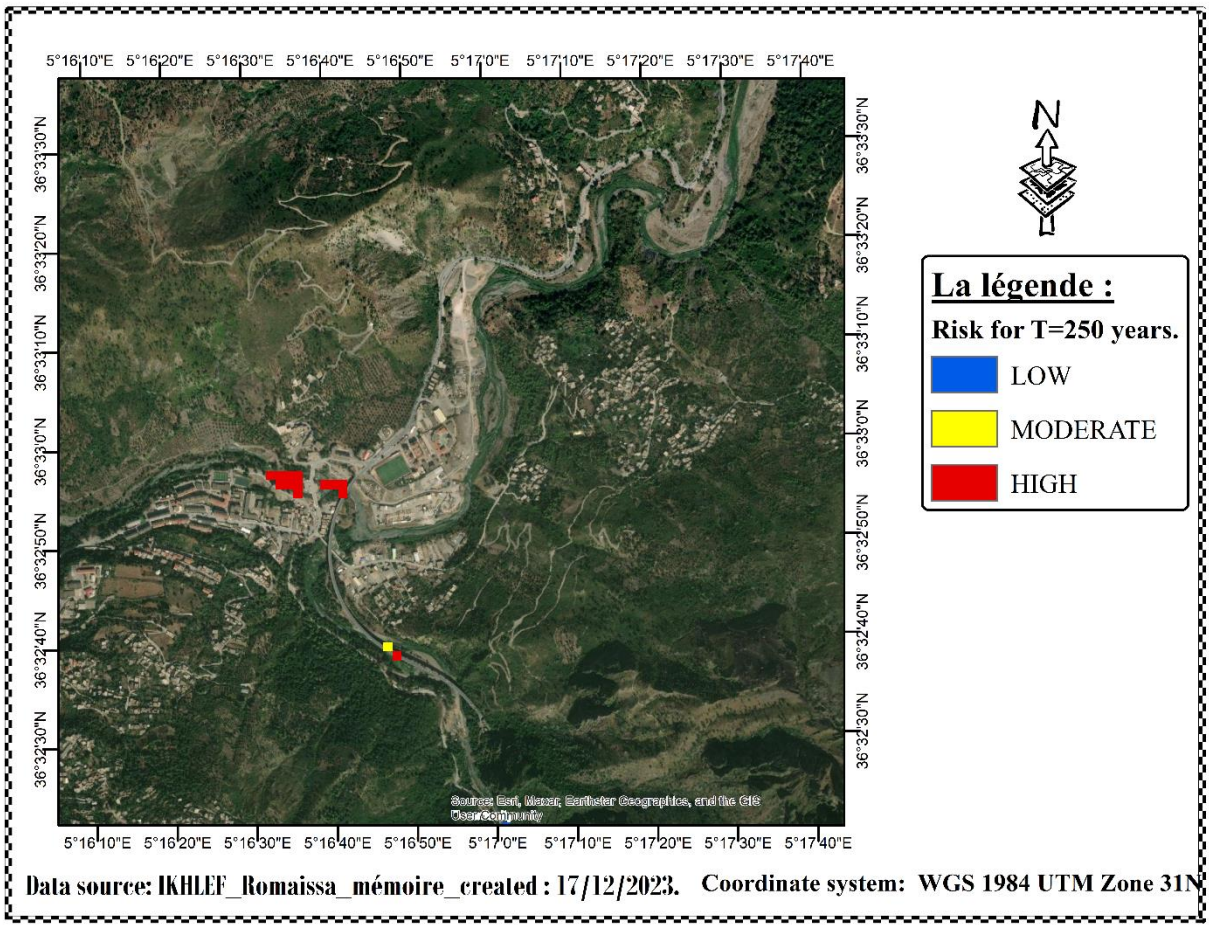


Figure V.33 : Carte du risque d'inondation lors d'une crue exceptionnelle de T =250 ans.

Dans le cadre de notre stratégie de gestion des risques, nous reconnaissons l'importance cruciale d'informer et de préparer les résidents des zones à risque élevé face aux inondations. Pour ce faire, nous préconisons le développement de campagnes de sensibilisation ciblées visant à accroître la conscientisation des communautés et à renforcer leur capacité à réagir de manière appropriée en cas d'événement inondant.

Ces campagnes seront soigneusement élaborées pour garantir une compréhension claire des risques spécifiques auxquels chaque communauté est confrontée. Nous utiliserons des supports visuels, des brochures informatives et des sessions de sensibilisation interactives pour diffuser des informations précises sur les mesures préventives et les protocoles d'urgence.

Le contenu de ces campagnes mettra l'accent sur la préparation individuelle et communautaire. Nous fournirons des instructions détaillées sur les étapes à suivre avant, pendant et après une inondation, soulignant l'importance de disposer de trousses d'urgence, de plans familiaux et de connaissances sur les points d'évacuation locaux.

Parallèlement, nous encouragerons la formation communautaire, en travaillant en collaboration avec les organismes de secours locaux pour organiser des exercices de simulation d'évacuation et des sessions de formation aux premiers secours. L'objectif est de garantir que chaque résident est bien informé et compétent pour réagir rapidement et efficacement en cas de menace d'inondation.

Enfin, nous établirons des canaux de communication robustes pour assurer une diffusion continue d'informations actualisées, en tenant compte des évolutions météorologiques et des changements dans les niveaux de risque. La communication régulière avec la communauté permettra de maintenir une conscience constante des risques et d'adapter les mesures de préparation en conséquence.

En adoptant une approche proactive et inclusive, notre initiative de communication des risques vise à transformer les résidents des zones à risque élevé en partenaires actifs de leur propre sécurité, renforçant ainsi la résilience globale de nos communautés face aux défis inondation.

Conclusion :

❋Le dimensionnement d'un projet d'aménagement repose sur l'évaluation des débits d'écoulement déterminés à travers des calculs hydrologiques. Cette étude a été conduite dans le but de choisir la conception appropriée des ouvrages, visant à assurer la protection des berges de l'Oued Agrioune et de l'Oued Ait Smail. Les objectifs spécifiques incluent la protection des enjeux suivants :

- La station de pompage de Bordj Mira et la station de refoulement vers Kherrata ;
- Le pont-cadre de Bordj Mira ;
- Le site de l'entreprise de travaux publics sur la rive droite de l'oued ;
- L'urbanisation sur la rive gauche de l'oued, en aval immédiat de la confluence avec l'oued Ait Smail ;
- Quelques habitations situées en contrebas de la route qui ont subi des dommages en 2003.

❋La variante d'aménagement en béton armé est à éviter en raison des vitesses d'écoulement excessives et du coût exorbitant du revêtement.

❋ Le choix final s'est orienté vers :

❁La mise en place d'un canal en gabion dans les deux tronçons de l'Oued Agrioune, principalement en raison de la présence de méandres. Cette option vise à limiter l'érosion sur les côtés extérieurs du canal et à réduire les dépôts de sédiments sur les côtés intérieurs, contribuant ainsi à stabiliser l'évolution du méandre au fil du temps.

❁ Un recalibrage de la section et la protection des berges par un revêtement en enrochement sont prévus pour le tronçon de l'Oued Ait Smail en raison de la dégradation constatée des berges dans cette zone.

❋Une revanche de 0,9 m est ajoutée au tirant d'eau pour chaque variante d'aménagement afin de prendre en compte les perturbations de la surface de l'eau et d'éviter toute submersion des berges.

❋ Il est impératif de reconstruire le pont sur le tronçon de l'Oued Ait Smail (également appelé Tassift Nbarthith), entièrement détruit en novembre 2023, en suivant les pré-dimensions que j'ai recommandées. Ces paramètres assurent une évacuation efficace du débit de crue et doivent être validés par une étude de stabilité menée par les autorités compétentes.

En conclusion, afin d'assurer la sécurité et la résilience des communautés face aux risques d'inondation, il est fortement recommandé de mettre en œuvre des campagnes de sensibilisation ciblées. Ces initiatives jouent un rôle essentiel en informant de manière proactive les résidents des zones à risque élevé sur les mesures spécifiques à prendre en cas d'inondation. Cette communication préventive renforce la préparation individuelle et communautaire, contribuant ainsi à une réaction appropriée et efficace en cas d'événement inondant.

CHAPITRE VI :

Organisation du chantier.

VI. CHAPITRE VI :

ORGANISATION DU CHANTIER

Introduction :

Les installations de chantier sont des dispositifs provisoires, implantées dans des emprises définitives ou temporaires, destinées à accueillir les hommes, les matériels, les matériaux nécessaires à la construction d'une structure.

L'installation des chantiers vise à :

- ✓ **Ordonner le chantier :**

  ◊ Gain de temps ;

  ◊Évite les pertes (matériaux) et double emplois (matériels) ;

  ◊ Améliore la sécurité : humaine + matériel et Améliore la qualité.

- ✓ **De Positionner les éléments :**

  ◊Organiser les déplacements des engins et des véhicules dans le chantier ;

  ◊ Bien positionner les livraisons ;

  ◊ Positionner les réseaux en utilisant des grillages avertisseurs et des bandes de couleurs normalisées.

La réalisation de ces constructions peut comporter d'énormes défis. Quelles que soient les difficultés rencontrées, il est impératif de disposer d'une compréhension précise de l'organisation du chantier. Pour atteindre ces objectifs, il est nécessaire de :

• Définir de manière précise les méthodes d'exécution, ainsi que les procédures permettant la mise en œuvre des techniques modernes de construction à haute efficacité.

• Répartir et coordonner les tâches en recrutant une main-d'œuvre spécialisée.

•Organiser de manière adéquate les postes de travail, en stabilisant les processus pour lesquels une mécanisation avancée est adoptée.

•Déterminer avec précision la quantité et la qualité de la main-d'œuvre à employer, car le coût de la main-d'œuvre a un impact significatif sur le prix de revient.

VI.1 Rôles et responsabilités des intervenants sur chantier :

VI.1.1 Le maître de l'ouvrage « MOA » :

On appelle maître d'ouvrage, la personne morale ou physique pour laquelle l'ouvrage est construit. Responsable principal de l'ouvrage, il remplit dans ce rôle une fonction d'intérêt général dont il ne peut se démettre. Il lui appartient, après s'être assuré de la faisabilité et de l'opportunité de l'opération envisagée, d'en déterminer la localisation, d'en définir le programme, d'en arrêter l'enveloppe financière prévisionnelle, d'en assurer le financement, de choisir le processus selon lequel l'ouvrage sera réalisé et de conclure, avec le maître d'œuvre et les entrepreneurs qu'il choisit, les contrats ayant pour objet les études et l'exécution des travaux.

A cet effet, le MOA doit s'entourer de l'ensemble des compétences nécessaires à la bonne définition, conception et exécution de son opération de travaux (Benoit & Gülseren, 2021).

Dans le contexte d'un barrage, il est courant que le maître d'ouvrage soit également responsable de l'interprétation de toutes les étapes, depuis le début de la construction jusqu'à la fin de la phase de mise en eau, y compris la gestion du processus de la première mise en eau.

VI.1.2 Le maître d'œuvre « MOE » :

Le maître d'œuvre (MOE) est la personne physique ou morale choisie par le maître d'ouvrage. A cet effet, il va concevoir la construction ou la réhabilitation d'un ouvrage de bâtiment ou d'infrastructure répondant au programme du maître d'ouvrage et s'assurera du respect de cette conception lors de l'exécution de l'ouvrage et de la bonne exécution des travaux conformément aux règles de l'art. La mission de maîtrise d'œuvre est généralement distincte de celle confiée aux titulaires des marchés de travaux (Benoit & Gülseren, 2021).

VI.1.3 L'entrepreneur :

•Une personne physique ou morale, titulaire du contrat de projet a la charge de construire l'ouvrage tel qu'il a été conçu, dessiné et décrit par le MOE. Il doit :

- Réaliser les installations et assurer la garde du chantier ;
- Réaliser successivement tout ou partie des études d'exécution ;
- Réaliser les ouvrages dans le respect des termes de leur contrat et de la réglementation applicable ;
- Demander la réception ;
- Assurer le parfait achèvement de l'ouvrage (Benoit & Gülseren, 2021).

Le lien contractuel entre les intervenants traditionnels d'un chantier peut être illustré par la figure suivante :

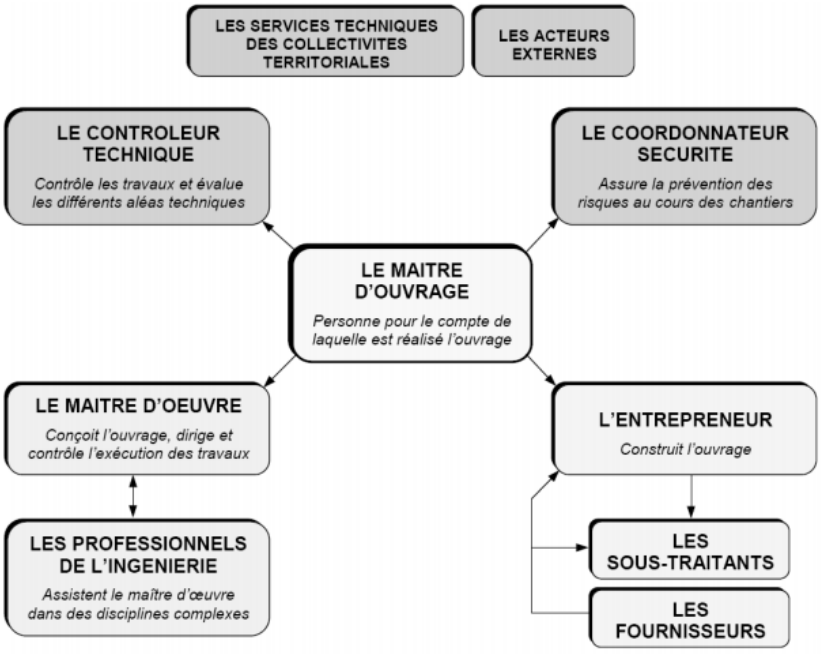


Figure VI.1 : Relation entre les personnes du chantier (Ghomari, 2013)

VI.2 Installations du chantier :

VI.2.1 Installations destinées au personnel :

Il s'agit habituellement des installations qui comprennent les dortoirs, les vestiaires, les réfectoires, les installations sanitaires et les bureaux de chantier.

VI.2.2 Installations destinées au stockage des matériaux :

VI.2.2.1 Pierres :

Les pierres utilisées dans les enrochements et le gabionnage doivent être de taille, de forme et de qualité appropriées pour résister à l'érosion et aux forces hydrauliques du cours d'eau. Elles doivent être généralement anguleuses et uniformes en taille pour assurer une bonne liaison et répartition des forces. Les pierres doivent être stockées dans un endroit sec et propre, à l'abri de la pluie et du gel. Il est important de ne pas stocker les pierres directement sur le sol, afin d'éviter qu'elles ne se contaminent avec des matériaux fins qui pourraient compromettre leur stabilité.

VI.2.2.2 La grille en acier galvanisé :

La grille en acier galvanisé constitue le cœur de la structure du gabion. Elle est composée de fils d'acier tressés et recouverts d'une couche de zinc pour résister à la corrosion. La taille des mailles de la grille varie en fonction de la taille des pierres qui seront utilisées pour remplir les gabions. Les grilles doivent être stockées dans un endroit sec et propre, à l'abri de la lumière

directe du soleil et des intempéries. Il est important de ne pas plier ou empiler les grilles les unes sur les autres pour éviter qu'elles ne se déforment.

VI.2.2.3 Le géotextile :

Un géotextile est un tissu perméable placé sous les enrochements et les gabions pour empêcher l'érosion du sol sous-jacent et assurer une séparation entre le sol et les pierres. Il permet également de drainer l'eau et de prévenir la formation de poches d'eau qui pourraient déstabiliser les enrochements et les gabions. Le géotextile doit être stocké dans un endroit frais et sec, à l'abri de la lumière directe du soleil. Il est important de ne pas plier ou déchirer le géotextile afin de préserver son intégrité.

VI.2.2.4 L'énergie électrique :

L'alimentation en énergie électrique sera assurée par un groupe électrogène, ce qui élimine la nécessité de se connecter à un réseau électrique à moyenne tension (SONELGAZ).

VI.2.2.5 L'alimentation en eau potable :

L'approvisionnement en eau potable sera assuré par un réservoir de stockage dont le volume sera réapprovisionné quotidiennement.

VI.2.2.6 L'alimentation en carburant :

L'approvisionnement sera effectué à l'aide de camions citernes, et le stockage se fera dans des réservoirs enterrés équipés de systèmes de pompage.

VI.2.3 Installations destinées à la réparation des engins :

Les réparations majeures ne sont généralement pas effectuées sur le chantier lui-même. Cependant, il est essentiel de disposer d'un atelier bien équipé pour effectuer l'entretien de routine et les réparations d'urgence des divers équipements.

VI.2.4 Installations pour la préfabrication :

Il s'agit généralement de hangars équipés du matériel nécessaire pour fabriquer les composants de l'ouvrage, tels que les poutres, les dalles, les conduites, et les murettes.

VI.3 Les moyens de chantier :

VI.3.1 Les moyens humains :

En ce qui concerne les ressources humaines nécessaires à la réalisation de l'ouvrage, il est essentiel de justifier l'emploi de personnel compétent pour la réalisation des études préliminaires et pour la construction. Il convient de fournir des informations détaillées sur leurs qualifications, titres et compétences.

VI.3.2 Les moyens matériels :

Le matériel utilisé correspond aux équipements couramment employés sur les chantiers de travaux publics. L'utilisation de gros engins mécaniques contribuera de manière significative à la réduction des coûts et des délais des travaux de terrassement.

Tableau n° VI.1 : Engins utilisés.

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

VI.4 Devis quantitatif et estimatif du projet :

Les estimations des coûts des travaux d'aménagement comprennent les éléments suivants :

- ✓ Le prix unitaire des travaux de terrassement.
- ✓ Le prix unitaire de la fourniture et de la pose de gabions et de matériaux en vrac.

★Le devis du projet est donné ci-dessous :

Tableau n° VI.2 : Le devis des différents travaux de l'aménagement du projet sur l'oued Agrioune et l'oued Ait Smail.

Désignations des travaux		Unité	Quantité	Prix unitaire (DA)	Montant (DA/mL)
Terrassement	Déblais	m^3	410549	250	102637250
	Remblais	m^3	7006	700	4904200
Géotextile		mL	7692	2500	19230000
Enrochement		m^3	32233	3500	112815500
Gabions		m^3	8475	5000	42375000
Montant total					281,961,950.00 DA
TVA (19%)					53,572,771.00 DA
Montant Total +TVA					**335,534,721.00 DA**

•Le montant total du projet s'élève à 335 534 721,00 DA, trois cent trente-cinq millions cinq cent trente-quatre mille sept cent vingt et un dinars algériens.

VI.5 La Planification :

VI.5.1 Définition :

Il s'agit de l'activité visant à identifier, ordonner et planifier les différentes tâches d'un projet, ainsi qu'à déterminer les compétences requises pour les mener à bien. En d'autres termes, il s'agit d'un outil que le responsable de projet utilise pour optimiser son efficacité opérationnelle. Les objectifs du planning comprennent :

- L'organisation des postes de travail.
- L'observation des opérations en temps réel.
- L'analyse des différentes tâches impliquées.
- La mesure du temps nécessaire à leur réalisation (chronométrage).
- La recherche de moyens pour simplifier les méthodes de travail.

VI.5.2 Étapes de la planification :

La planification est un processus qui guide la réalisation des travaux, et elle englobe les étapes suivantes :

- **Collecte d'informations :** Cette étape implique la synthèse et l'analyse des informations obtenues par des études comparatives, ce qui permet une utilisation efficace du plan de réalisation de notre projet.
- **Décomposition du projet :** Le projet est décomposé en tâches distinctes, à chacune desquelles on attribue un responsable, des besoins en équipement, et une durée de réalisation basée sur le rythme de travail de chaque engin ou équipe.
- **Relations entre les tâches :** Lors de la réalisation du projet, deux types de relations entre les tâches sont essentielles. La première est basée sur une logique séquentielle, où une tâche doit être accomplie avant que la suivante puisse commencer. La deuxième repose sur des préférences, où certaines tâches peuvent être effectuées en parallèle ou dans un ordre spécifique.
- **Choix de la méthode de calcul :** Le choix de la méthode de calcul dépend principalement du type d'ouvrage à construire. Dans les cas où les opérations se succèdent, comme dans notre situation, la méthode du CPM (Critical Path Method) est généralement préférée.

VI.5.3 Plannings des travaux :

•Il existe trois types de plan de travail :

1. **Plan de travail au plus tôt :** Dans ce cas, toutes les opérations commencent à leur date la plus précoce possible. Les entreprises optent pour ce type de planning lorsque leurs ressources sont abondantes et qu'elles travaillent sur plusieurs chantiers simultanément.

2. **Plan de travail au plus tard :** Toutes les opérations commencent à leur date la plus tardive. Les tâches ne sont pas retardées, ce qui en fait une option privilégiée par les entreprises lorsque leurs ressources sont limitées, ce qui le rend plus économique.

3. **Plan de travail intermédiaire :** Dans ce type de planning, les opérations débutent à une date intermédiaire, entre la date au plus tôt et la date au plus tard. Les entreprises choisissent ce type de plan lorsque leurs ressources sont suffisamment abondantes et qu'elles travaillent sur un seul chantier, ce qui permet d'optimiser l'utilisation de leurs moyens.

VI.5.4 Techniques de la planification :

Il y a deux principales méthodes de planification :

◊**Méthodes basées sur le réseau :** Ces méthodes de planification, telles que le CPM (Critical Path Method) et le PERT (Program Evaluation and Review Technique), utilisent des réseaux de tâches et d'événements pour modéliser et gérer les projets. Elles se concentrent sur la détermination des séquences critiques de tâches qui affectent la durée totale du projet.

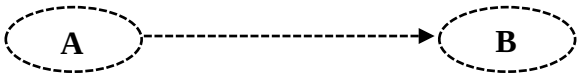
◊ **Méthodes basées sur le graphique :** Ces méthodes, comme le diagramme de Gantt, utilisent des graphiques pour représenter visuellement les tâches et leur chronologie. Les diagrammes de Gantt sont plus adaptés pour suivre la progression du projet au fil du temps, mais ils offrent moins d'informations sur les interdépendances entre les tâches que les méthodes basées sur le réseau.

VI.5.4.1 Méthodes basées sur le réseau :

Le réseau est une représentation graphique d'un projet qui permet de visualiser les relations entre les différentes opérations, qu'elles soient successives, simultanées ou convergentes, ainsi que les durées de réalisation. On distingue principalement deux types de réseaux :

1) **Réseau à nœuds :**

Dans un réseau à nœuds, chaque nœud représente une opération ou une étape dans le processus, tandis que les flèches (ou arêtes) indiquent la séquence ou le flux d'information entre ces opérations. Les flèches peuvent avoir des directions pour montrer l'ordre dans lequel les opérations sont effectuées. Cela permet de visualiser et de comprendre la manière dont les différentes étapes d'un processus interagissent les unes avec les autres.



•L'opération (B) ne peut démarrer que lorsque l'opération (A) est entièrement terminée.

2) **Réseau à flèches :**

Dans un réseau à flèches, l'opération est représentée par une flèche, et la succession des opérations est symbolisée par des nœuds.



•L'opération A est antérieure à l'opération B.

Il est essentiel de souligner que le graphique ne peut être créé sans utiliser le réseau, car le réseau est simplement un outil de calcul qui nous permet d'obtenir des résultats en réponse à des questions spécifiques. Le graphique représente une forme d'interprétation des données issues du réseau et de ses résultats, rendant ces informations plus lisibles et compréhensibles pour nous.

◊ **Construction du réseau :**

Pour élaborer le réseau, il est nécessaire de réaliser les six étapes fondamentales suivantes :

1. **Établissement d'une liste des tâches :** Cette étape consiste à créer une liste détaillée de toutes les tâches nécessaires pour accomplir le projet. Chaque tâche doit être décrite de manière spécifique et inclure des informations telles que la durée estimée, les ressources requises, les dépendances et les responsabilités.
2. **Détermination des tâches antérieures :** Une fois la liste des tâches établie, il est essentiel de procéder à l'identification des dépendances entre ces tâches. Certaines d'entre elles doivent être achevées avant que les autres puissent commencer, établissant ainsi un ordre logique pour leur exécution.
3. **Construction des graphes partiels :** Cette étape consiste à créer des graphes partiels, également appelés diagrammes de réseau, pour représenter visuellement les relations entre les tâches. Les deux types de graphes les plus couramment utilisés sont les graphes PERT et les diagrammes de Gantt.
4. **Regroupement des graphes partiels :** Si le projet comporte plusieurs sous-projets ou domaines de travail distincts, vous pouvez regrouper les graphes partiels pour former un plan global du projet. Cela permet de mieux visualiser la structure d'ensemble.
5. **Détermination des tâches de début et de fin de l'ouvrage :** Identifiez les tâches qui marquent le début et la fin du projet. La tâche de début est généralement appelée "tâche de début du projet", tandis que la tâche de fin est la "tâche de fin du projet". Ces tâches sont souvent des jalons importants pour suivre la progression du projet.
6. **Construction du réseau :** À ce stade, on rassemble tous les éléments précédents pour constituer un réseau de projet complet. Ce réseau met en lumière les liaisons entre les tâches, les échéances, les ressources requises et les jalons. Il représente généralement un outil visuel puissant pour la planification, le suivi et la gestion du projet.

VI.5.5 Différentes méthodes basées sur le réseau :

VI.5.5.1 Méthode C.P.M {Critical Path Method} (Méthode française) :

Cette méthode vise à réduire les délais de réalisation d'un projet en prenant en considération trois phases distinctes :

1. **Première phase :** déterminer l'effectif requis pour accomplir la tâche en question.
2. **Deuxième phase :** analyser de manière systématique le réseau, en détaillant les activités heure par heure et jour par jour, en fonction de l'unité de temps choisie.
3. **Troisième phase :** ajuster le réseau en fonction des contraintes ou des conditions imposées par l'entreprise (Benlaoukli, 2004).

VI.5.5.2 Méthode P.E.R.T (Program Evaluation and Review Technical):

En d'autres termes, la technique d'ordonnancement des tâches et de contrôle des programmes est une méthode qui consiste à organiser un ensemble de tâches sous forme de réseau, où leur séquence et leurs interdépendances contribuent toutes à la réalisation d'un produit fini.

VI.5.5.3 Méthodes basées sur le graphique :

Méthode linéaire (Line of Balance technique) :

Cette méthode est adaptée pour la planification de projets de construction où les tâches sont répétitives, c'est-à-dire que les mêmes activités ou opérations sont réalisées de manière similaire à plusieurs reprises. Elle est particulièrement efficace pour les projets de construction à grande échelle, tels que les chantiers de construction de bâtiments identiques ou de structures linéaires comme les routes et les voies ferrées.

Méthode à barres :

Cette technique implique la création de deux réseaux et d'un diagramme à barres (plan de travail). Elle permet de visualiser les dépendances entre les tâches et de déterminer la séquence dans laquelle elles doivent être exécutées. Cela facilite la gestion du projet en fournissant une vue d'ensemble des activités et de leur chronologie.

- **Choix de la méthode de calcul :**

Le choix de la méthode de calcul dépend principalement du type d'ouvrage en cours de construction. Dans le cas où les opérations suivent une séquence spécifique, comme c'est le cas dans notre situation, il est préférable d'opter pour la méthode P.E.R.T (Program Evaluation and Review Technical) (Benlaoukli, 2004) .

VI.5.6 Méthode de calcul de P.E.R.T :

VI.5.6.1 Les paramètres de la méthode P.E.R.T :

Dans l'exécution de la méthode P.E.R.T (Program Evaluation and Review Technical), les paramètres essentiels à prendre en compte sont les suivants :

- **DCP** (Date de début au plus tôt - Early Start) : Il s'agit de la date la plus tôt à laquelle une tâche peut commencer, en tenant compte des dépendances et des contraintes du projet.
- **T_r** (Temps de réalisation) : C'est le temps estimé pour accomplir une tâche spécifique.
- **DFP** (Date de fin au plus tôt - Early Finish) : C'est la date la plus tôt à laquelle une tâche peut être achevée, basée sur les contraintes du projet.
- **DCPP** (Date de début au plus tard - Late Start) : C'est la date la plus tard à laquelle une tâche peut commencer sans affecter le calendrier global du projet.
- **DFPP** (Date de fin au plus tard - Late Finish) : C'est la date la plus tard à laquelle une tâche peut être achevée sans affecter le calendrier global du projet.
- **MT** (Marge Totale) : La marge totale représente la quantité de temps supplémentaire disponible pour une tâche sans affecter le chemin critique du projet. C'est 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).

$$DFP = DCP + T_r \; et \; DCPP = DFPP - T_r$$

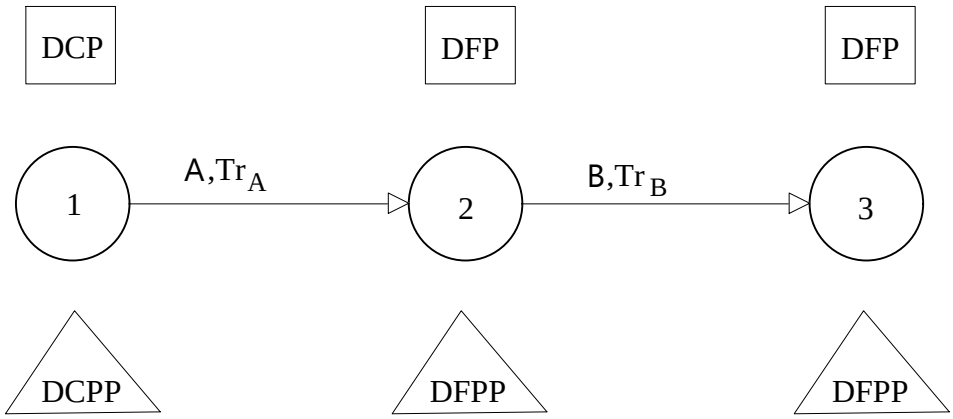


Figure VI.2 : Schéma représentatif de la méthode de PERT.

VI.5.6.2 Chemin critique (C.C) :

•Le chemin critique est la séquence d'opérations dont la durée totale du projet (DTR) est déterminée, et ces opérations sont caractérisées par une marge totale nulle (0).

•Pour identifier un chemin critique, il faut vérifier deux conditions principales :

1. La marge totale (MT) de chaque opération sur ce chemin doit être égale à zéro (MT = 0).
2. La somme des durées de ces opérations doit être égale à la durée totale du projet (DTP).

VI.5.7 Diagramme de Gantt :

Le diagramme de Gantt, largement utilisé en gestion de projet, est l'un des outils les plus efficaces pour fournir une représentation visuelle de l'état d'avancement des différentes activités ou tâches qui composent un projet. Sur le côté gauche du diagramme, vous trouverez une liste de toutes les tâches à accomplir, tandis que l'en-tête du diagramme représente les unités de temps les plus adaptées au projet, telles que les jours, les semaines ou les mois, etc. Chaque tâche est symbolisée par une barre horizontale dont la position et la longueur indiquent la date de début, la durée et la date de fin de la tâche respective. En un coup d'œil, ce diagramme permet donc de visualiser :

▪ La séquence des tâches et leur dépendance.

▪ Les dates de début et de fin prévues pour chaque tâche.

▪La durée de chaque tâche.

▪Les chevauchements ou les lacunes entre les tâches.

▪ L'état d'avancement actuel du projet, en comparant les dates planifiées aux dates réelles.

En somme, le diagramme de Gantt offre une vue globale et claire de la planification du projet, ce qui facilite la gestion et le suivi de son avancement.

La méthode du PERT est une méthode de planification, elle a pour objectif de réduire le temps et le coût de réalisation de projet et augmenter le rendement du travail. Pour la construction du réseau il faut d'abord établir les différentes tâches des travauxCalcul de la durée de réalisation des travaux :

La liste des tâches est illustrée ci-dessous :

Tableau n° VI.3: Liste des tâches pour le projet.

Tâche	Symbole
Préparation générale :	
Délimitation de la zone de travail et sécurisation du périmètre	∘
Prévision d'un accès pour les engins de chantier et les matériaux	⊖
Terrassement et compactage :	
Terrassement tronçon a (gabionnage)	⧖
Compactage tronçon a (gabionnage)	⋀
Terrassement tronçon c (enrochement)	⋿
Compactage tronçon c (enrochement)	⁖
Terrassement tronçon b (gabionnage)	⋕
Compactage tronçon b (gabionnage)	⋰
Terrassement tronçon d (enrochement)	⦶
Compactage tronçon d (enrochement)	⋌
Pose de géotextile :	
Pose de géotextile tronçon a (gabionnage)	⋐
Pose de géotextile tronçon c (enrochement)	⋔
Pose de géotextile tronçon b (gabionnage)	⋞
Pose de géotextile tronçon d (enrochement)	⊕
Assemblage des gabions et Pose de la première rangée d'enrochement :	
Assemblage des gabions tronçon a (gabionnage)	○
Pose de la première rangée d'enrochement tronçon c (enrochement)	⋇
Assemblage des gabions tronçon b (gabionnage)	⍜
Pose de la première rangée d'enrochement tronçon d (enrochement)	⋾
Mise en place des gabions et Pose des rangées suivantes d'enrochement :	
Mise en place des gabions tronçon a (gabionnage)	∅
Pose des rangées suivantes d'enrochement tronçon c (enrochement)	⁘

Mise en place des gabions tronçon b (gabionnage)	⋇
Pose des rangées suivantes d'enrochement tronçon d (enrochement)	⊙
Finition et entretien :	
Finition et entretien (gabions)	⊏
Finition et entretien (enrochement)	⧖
Clôture	⋇

• Dans le déroulement opérationnel détaillé pour la protection de la ville de Bordj Mira par gabionnage et revêtement en enrochement, le tableau ci-dessous présente l'enchaînement des différentes tâches de mise en œuvre.

Tableau n° VI.4: Succession des tâches pour le projet.

Tâche		Succède		Durée en jours
A	⊙	B	⊖	14
B	⊖	G,Ḍ	⧖,E	14
G	⧖	D,F	Λ,Ⅎ	18
D	Λ	č	⋐	10
Ḍ	E	H,E	⦶,⁝	15
E	⁝	ε	⋔	10
F	Ⅎ	K	⋈	20
K	⋈	I	⋛	12
H	⦶	Ḥ	⋌	15
Ḥ	⋌	⊕	⊕	8
č	⋐	R	○	6
ε	⋔	kh	⁚	8
I	⋛	Ṛ	⍉	6
bh	⊕	sh	⋐	8
R	○	Ṣ	⌀	15
kh	⋇	U	⁚	18
Ṛ	⍉	Ẓ	⊙	15
sh	⋐	Y	⧖	18
Ṣ	⌀	M	⊏	20
U	⁚	S	⊙	24
Ẓ	⋇	M	⊏	20
S	⊙	Y	⧖	24
M	⊏	Z	⋇	14
Y	⧖	Z	⋇	14
Z	⋇	/	/	1

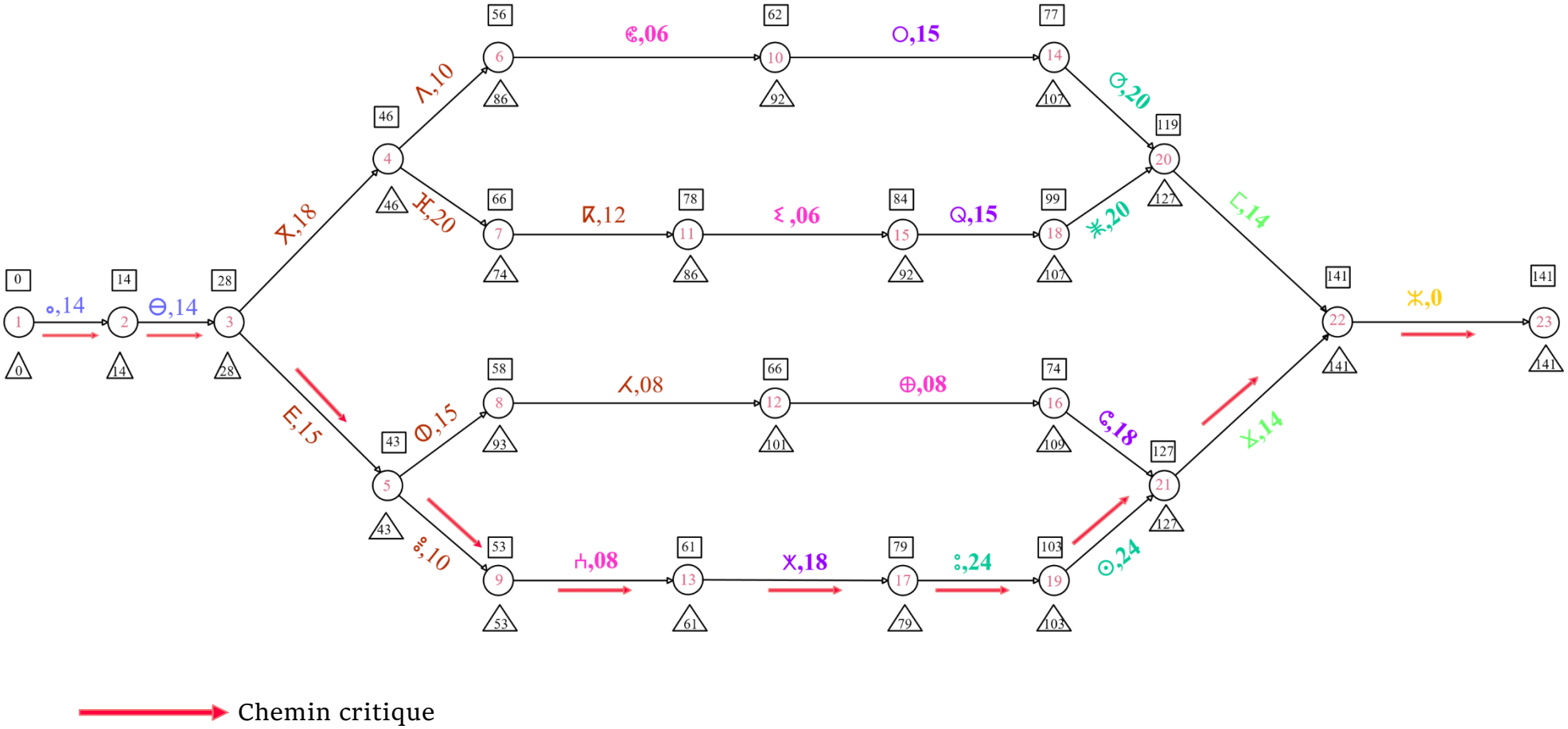
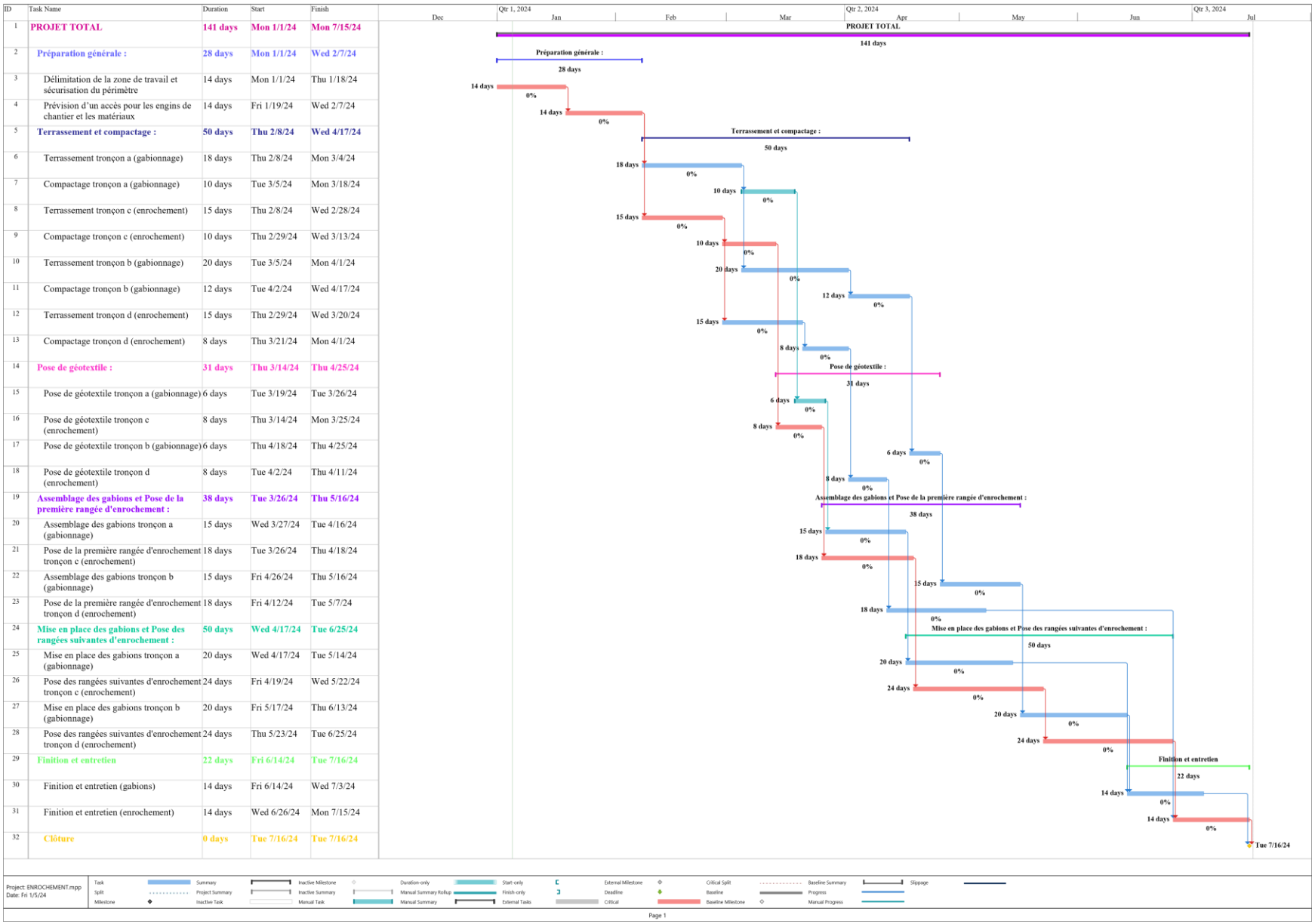


Figure VI.3 : Réseau P.E.R.T du projet.



ID	Task Name	Duration	Start	Finish
1	**PROJET TOTAL**	**141 days**	**Mon 1/1/24**	**Mon 7/15/24**
2	**Préparation générale :**	**28 days**	**Mon 1/1/24**	**Wed 2/7/24**
3	Délimitation de la zone de travail et sécurisation du périmètre	14 days	Mon 1/1/24	Thu 1/18/24
4	Prévision d'un accès pour les engins de chantier et les matériaux	14 days	Fri 1/19/24	Wed 2/7/24
5	**Terrassement et compactage :**	**50 days**	**Thu 2/8/24**	**Wed 4/17/24**
6	Terrassement tronçon a (gabionnage)	18 days	Thu 2/8/24	Mon 3/4/24
7	Compactage tronçon a (gabionnage)	10 days	Tue 3/5/24	Mon 3/18/24
8	Terrassement tronçon c (enrochement)	15 days	Thu 2/8/24	Wed 2/28/24
9	Compactage tronçon c (enrochement)	10 days	Thu 2/29/24	Wed 3/13/24
10	Terrassement tronçon b (gabionnage)	20 days	Tue 3/5/24	Mon 4/1/24
11	Compactage tronçon b (gabionnage)	12 days	Tue 4/2/24	Wed 4/17/24
12	Terrassement tronçon d (enrochement)	15 days	Thu 2/29/24	Wed 3/20/24
13	Compactage tronçon d (enrochement)	8 days	Thu 3/21/24	Mon 4/1/24
14	**Pose de géotextile :**	**31 days**	**Thu 3/14/24**	**Thu 4/25/24**
15	Pose de géotextile tronçon a (gabionnage)	6 days	Tue 3/19/24	Tue 3/26/24
16	Pose de géotextile tronçon c (enrochement)	8 days	Thu 3/14/24	Mon 3/25/24
17	Pose de géotextile tronçon b (gabionnage)	6 days	Thu 4/18/24	Thu 4/25/24
18	Pose de géotextile tronçon d (enrochement)	8 days	Tue 4/2/24	Thu 4/11/24
19	**Assemblage des gabions et Pose de la première rangée d'enrochement :**	**38 days**	**Tue 3/26/24**	**Thu 5/16/24**
20	Assemblage des gabions tronçon a (gabionnage)	15 days	Wed 3/27/24	Tue 4/16/24
21	Pose de la première rangée d'enrochement tronçon c (enrochement)	18 days	Tue 3/26/24	Thu 4/18/24
22	Assemblage des gabions tronçon b (gabionnage)	15 days	Fri 4/26/24	Thu 5/16/24
23	Pose de la première rangée d'enrochement tronçon d (enrochement)	18 days	Fri 4/12/24	Tue 5/7/24
24	**Mise en place des gabions et Pose des rangées suivantes d'enrochement :**	**50 days**	**Wed 4/17/24**	**Tue 6/25/24**
25	Mise en place des gabions tronçon a (gabionnage)	20 days	Wed 4/17/24	Tue 5/14/24
26	Pose des rangées suivantes d'enrochement tronçon c (enrochement)	24 days	Fri 4/19/24	Wed 5/22/24
27	Mise en place des gabions tronçon b (gabionnage)	20 days	Fri 5/17/24	Thu 6/13/24
28	Pose des rangées suivantes d'enrochement tronçon d (enrochement)	24 days	Thu 5/23/24	Tue 6/25/24
29	**Finition et entretien**	**22 days**	**Fri 6/14/24**	**Tue 7/16/24**
30	Finition et entretien (gabions)	14 days	Fri 6/14/24	Wed 7/3/24
31	Finition et entretien (enrochement)	14 days	Wed 6/26/24	Mon 7/15/24
32	**Clôture**	**0 days**	**Tue 7/16/24**	**Tue 7/16/24**

Figure VI.4 : Diagramme de GANTT du projet.

Conclusion :

En conclusion de ce chapitre dédié à l'organisation du chantier, il apparaît clairement que la réussite de l'exécution d'un ensemble de travaux, en respectant les délais et les coûts prévus, repose sur une gestion rationnelle du temps et la mobilisation coordonnée de ressources humaines, techniques et matérielles. Le coût global estimé du projet d'aménagement de la ville de Bordj Mira, évalué à 335,534,721.00 DA avec un délai de construction de 4 mois et 20 jours, témoigne de l'importance cruciale d'une planification minutieuse pour atteindre l'objectif ultime de livraison dans les délais impartis, sans dépasser les coûts initiaux d'investissement.

CHAPITRE VIII :

Protection et sécurité du travail

VII. CHAPITRE VIII :

PROTECTION ET SECURITE DU TRAVAIL

Introduction :

Chaque année, dans le monde, 2,78 millions de travailleurs meurent d'accidents du travail et de maladies professionnelles et 374 millions sont victimes d'accidents du travail non mortels (OIT, 2021).

Dans tous les secteurs, les accidents du travail se répartissent de manière inégale selon le type de personnel. Les travailleurs les plus exposés aux accidents du travail sont les travailleurs temporaires, les travailleurs occasionnels ou les travailleurs à temps partiel (MEN, 2022).

Les accidents du travail sont d'ampleur variable et leurs causes sont multiples, mais ils sont souvent liés à la déficience des systèmes nationaux de sécurité et de santé au travail (SST) en raison, entre autres, d'une législation insuffisante, d'un faible contrôle réglementaire et de l'absence d'une culture de sécurité et de santé au niveau national et sur le lieu de travail (MEN, 2022).

Pour assurer la sécurité et le bien-être des travailleurs, une collaboration active entre les employeurs et les salariés est essentielle. Cela implique la participation à des initiatives de santé et de sécurité englobant des domaines tels que la médecine du travail, l'hygiène industrielle, la toxicologie, la formation, la sécurité des machines, l'ergonomie et la psychologie. Ils contribuent à minimiser les accidents et déchargent les responsables du chantier de toute responsabilité, dans le cas où toutes les dispositions nécessaires n'auraient pas été prises pour assurer l'application des règles en vigueur.

VII.1 Les causes des accidents durant la phase de construction :

L'analyse des accidents du travail constitue une étape essentielle de la démarche de prévention, bien qu'elle intervienne a posteriori. Examiner un accident du travail revient à identifier les causes de son occurrence et à prendre des mesures correctives appropriées pour prévenir sa répétition**.**

VII.1.1 Facteur matériel :

Le facteur matériel concerne les conditions dangereuses susceptibles d'évoluer au cours du travail. Les causes d'accidents d'origine matériel proviennent soit :

- De la profession en général et du poste de travail en particulier.
- De la nature et de la forme des matériaux mis en œuvre.

- De l'outils et machines utilisées : implantation, entretien, etc.…
- De l'exécution du travail : Eclairage, conditions climatiques…
- Des conditions d'hygiène et de sécurité : Ventilation, protection…

VII.1.2 Facteur humain :

Contrairement aux conditions dangereuses qui peuvent être techniquement et pratiquement identifiées, les comportements à risque sur le lieu de travail sont le résultat de facteurs humains et peuvent parfois nécessiter l'intervention de psychologues expérimentés.

Certaines de ces actions à risque résultent de réponses psychologiques difficiles à anticiper, car chaque individu est unique et peut réagir de manière variable en fonction des circonstances ou de son état émotionnel personnel.

VII.2 Les mesures de prévention contre les accidents du travail :

•Le Code du travail stipule que l'employeur est tenu de mettre en œuvre les moyens de prévention suivants :

1. Actions visant à prévenir les risques professionnels.

2. Initiatives d'information et de formation.

3. Établissement d'une organisation et de moyens appropriés.

•Il incombe à l'employeur d'ajuster ces moyens de prévention en fonction de l'évolution de son entreprise. Le non-respect de ces obligations peut entraîner l'engagement de la responsabilité pénale ou civile de l'employeur.

•Les 9 principes de prévention peuvent être résumés comme suit :

1. Évitez les risques en supprimant les dangers ou en empêchant l'exposition des employés aux risques potentiels.

2. Évaluez les risques en mesurant l'importance des dangers et prenez des mesures préventives appropriées.

3. Combattez les risques à la source en anticipant et en éliminant les risques dès la conception des postes de travail, des équipements et des méthodes de production.

4. Adaptez le travail à l'individu en prenant en compte les différences individuelles pour limiter les risques pour la santé des employés.

5. Prenez en compte l'évolution de la technique en adaptant continuellement les mesures de prévention aux changements au sein de l'entreprise.

6. Remplacez ce qui est dangereux par des alternatives non dangereuses ou moins dangereuses.

7. Planifiez la prévention en intégrant les risques sociaux, environnementaux, et en considérant les conditions de travail, la technique et l'organisation du travail.

8. Favorisez les mesures de protection collective par rapport aux mesures individuelles pour une efficacité accrue.

9. Donnez les bonnes instructions en formant et informant les employés sur les risques et les mesures de prévention dès leur arrivée dans l'entreprise, encourageant ainsi une culture de prévention dès le début de leur parcours professionnel.

VII.3 Les équipements de protection :

VII.3.1 Individuel :

Le port des équipements individuels de protection constitue une mesure préventive efficace permettant d'éviter de nombreux accidents touchant la tête, les mains, les pieds, les yeux, etc.

Pour les yeux :

Dangers : projections de particules métalliques, poussières, projectiles, rayonnements...

→ Porter des lunettes de protection, des masques de soudage, des écrans faciaux, des écrans protecteurs, des visières-écrans.



Lunette de | Écran facial | Visière-écran

Figure VII.1 : Équipements de protection individuelle des yeux, (Source : SETON).

Pour la tête et le cou :

Dangers : Impact d'objets tombant ou projetés, risque de chocs à la tête et d'accrochage des cheveux dans une machine, intempéries ou températures extrêmes...

→ Utiliser des casques de sécurité, des casquettes antichocs, des filets à cheveux, des guimpes ou des foulards adaptés pendant les travaux de soudure.



Casque de sécurité | Casquette de protection | Cache-cou - Pare-

Figure VII.2 : Équipements de protection individuelle de la tête et le cou, (Source : SETON et Hansler Smith).

❁Pour les oreilles :

Dangers : Le bruit. Il s'agit d'une combinaison du bruit et d'une durée d'exposition ; néanmoins, des bruits très puissants (haut niveau sonore) présentent également un danger même si l'exposition est de courte durée.

→ Utiliser des bouchons d'oreilles, des casques de protection auditive, des embouts semi-auraux, des tampons auriculaires moulés.



Bouchons d'oreilles | Casque antibruit | Tampons auriculaires moulés

Figure VII.3 : Les protection auditives, (Source : SETON et Cotral).

❁Pour les mains et les bras :

Dangers : Eraflures, coupures et perforations, chocs, produits chimiques, chocs électriques, températures extrêmes et rayonnement, immersion prolongée dans l'eau.



Gants anti-coupures



Manchette anti-coupure et chaleur

Figure VII.4 : Équipements de protection individuelle des main et bras, (Source : SETON).

→ Porter des gants, des gants avec manchettes, des gantelets et des manchons couvrant une partie ou l'intégralité du bras.

❁Pour les pieds et les jambes :

Dangers : Conditions humides, froides ou chaudes, accumulation électrostatique, glissades, coupures et perforations, chute d'objets, charges lourdes, éclaboussures de produits chimiques, projections de particules métalliques, véhicules.

→ Opter pour des bottes et des chaussures de sécurité à bouts renforcés et résistantes à la pénétration, des bottes à semelle intermédiaire, des chaussures spéciales (bottes de fonderie, bottes de tronçonneuse).



Chaussure du chantier



Boute du chantier



Boute de sécurité (soudure, fonderie)

Figure VII.5 : Équipements de protection individuelle des pieds, (Source : SETON et Gaston MILLE).

❁Pour les poumons :

Dangers : Poussières, gaz, vapeurs, atmosphère pauvre en oxygène.

→ Utiliser un équipement de protection respiratoire :

▪ Certains respirateurs ont pour fonction de filtrer les contaminants présents dans l'air ambiant, qu'il s'agisse de simples masques et respirateurs filtrants ou de respirateurs à ventilation assistée.

▪ L'utilisateur doit s'assurer que l'équipement de protection respiratoire s'ajuste correctement, notamment s'il porte un respirateur hermétique (masque filtrant, demi-masque respiratoire et masque respiratoire complet).

▪ Il existe également des types d'appareils respiratoires qui fournissent une alimentation indépendante en air respirable (tuyaux d'air frais, air comprimé, appareils respiratoires autonomes).



Masque filtrant



Masque anti-poussière

Figure VII.6 : Equipements de protection respiratoire, (Source : Amazon et 3 M).

❁Pour l'ensemble du corps :

Dangers : Insolation, projections de particules métalliques, pulvérisations provenant de fuites de pression ou de pistolets pulvérisateurs, poussières contaminées, chocs ou pénétrations, usure excessive ou emmêlement des vêtements.

→ Utiliser des salopettes conventionnelles ou jetables, des combinaisons de chaudière, des tabliers.



Salopette du travail



Combinaison de chaudière



Tablier de soudure

Figure VII.7 : Equipements de protection corporelle,
(Source : Expondo, BK Safety Wear, Surplus D'Armée Général).

VII.3.2 L'ordre dans le chantier et aux postes de travail :

L'ordre est un facteur essentiel de sécurité, et pour assurer la sécurité sur le chantier, il est impératif de prendre les mesures suivantes :

- Maintenir les accès et les passages dégagés.
- Stocker les matériaux correctement afin d'éviter tout risque d'accident lors du passage des travailleurs.

VII.3.3 Blindage :

En ce qui concerne les blindages lors des travaux en tranchée, où l'éboulement des parois représente toujours un danger potentiel, des précautions doivent être prises pour éviter des accidents graves tels que l'écrasement ou l'asphyxie :

• Les tranchées doivent être blindées avant d'entreprendre des travaux.

• Il est strictement interdit de descendre dans une tranchée non blindée, que ce soit pour la pose des blindages ou l'exécution des travaux.

• Un espace libre suffisant doit être maintenu entre le bord de la tranchée et les matériaux, assurant ainsi une marge de sécurité adéquate.



Figure VII.8 : Système du blindage (Source : Canada-shoring)

VII.3.4 Les mesures de prévention contre les incendies :

Il est essentiel de désigner un responsable de la protection contre les incendies et de mettre en place un système de gestion et de communication d'urgence. Installer des équipements adaptés, vérifier et remplacer les extincteurs périmés, définir des signaux d'alerte, organiser des exercices d'évacuation et d'extinction, et confier les travaux de soudure à des personnes qualifiées sont des mesures cruciales. Le stockage approprié des déchets inflammables, l'éloignement des objets inflammables des zones de travail avec le feu, et la transmission rapide des signaux

d'alerte sur l'ensemble du chantier de construction sont également indispensables pour assurer la sécurité contre les incendies (JICA, 2014).

VII.4 Les travaux de terrassement :

Tout ouvrage d'art repose fondamentalement sur le sol, et il est donc essentiel d'effectuer une étude approfondie des terrains qui le supportent. Une fois cette reconnaissance effectuée, on procède à l'implantation de l'ouvrage. Cette phase nécessite la réalisation de fouilles, de tranchées et d'excavations, regroupées sous le terme de "déblais". Parallèlement, les remblais constituent l'opération inverse, consistant à remplir un espace vide en y déposant de la terre.

▪Les projets de terrassement présentent des risques particuliers, principalement concentrés dans :

❖ Circulation des machines ;

❖ Glissement de terrain ;

❖ Rupture de canalisation souterraine ;

❖ Explosifs ;

❖ Chute de matériel ou de personnel lors de l'excavation.

❖ Le travail dans un endroit plat ou en hauteur a un risque de chute des personnes à cause des sols glissants ou encombrés ;

❖ Les machines entrent accidentellement en contact avec des lignes aériennes sous tension ;

❖ Blessures causées par le mouvement d'un organe ;

❖ Blessures traumatiques causées par la conduite de machines ;

❖ Collision entre véhicules et engins de chantier ;

❖ Collisions entre machines.

Pour éviter ces risques, des mesures doivent être mises en place pendant la réalisation des travaux de terrassement.

a) Les machines et outils :

❖ Les machines destinées à manipuler divers matériaux, les équipements de soudage ou de découpe, les grues, les excavatrices, et autres équipements similaires, ne devraient être utilisés et entretenus que par des individus qualifiés ayant reçu une formation adéquate pour ces tâches.

Il est impératif de suivre scrupuleusement les instructions d'utilisation et d'entretien.

❖ Toutes les machines doivent être complètement éteintes lors de toute opération de nettoyage et d'entretien.

- ❖ Il est impératif de respecter scrupuleusement la charge maximale d'utilisation, clairement affichée sur les monte-matériaux, les grues et tous les autres dispositifs de levage.

- ❖ Terrassement pour prévenir les accidents :
  - Par heurts.
  - Par chute de matériaux.

- ❖ Après un impact ou une chute, il ne faut pas réutiliser un outil électrique portable sans qu'il ait été inspecté par une personne qualifiée.

- ❖ Ne pas utiliser les outils électriques portatifs à l'extérieur en cas de pluie.

b) Les installations électriques :

- ❖ Seule une personne qualifiée et spécifiquement désignée en tant qu'électricien est autorisée à effectuer l'installation, la modification, la réparation et l'entretien des systèmes électriques.

- ❖ Lorsque des travaux sont effectués à proximité de lignes aériennes ou de câbles souterrains, veillez à observer les distances de sécurité appropriées.

c) Les premiers soins :

Après avoir encouru personnellement un petit accident (coupure, piqûre…)

- ❖ Avertir directement le chef ;

- ❖ Consulter un professionnel de santé sans délai, même en cas de blessure légère, afin de prévenir toute complication.

- ❖ Sur le chantier, il existe une boite de premiers soins ;

- ❖ Si malgré les traitements, la plaie s'infecte, il est recommandé de consulter un médecin.

VII.5 Plan de sécurité adapte aux travaux de réalisation :

Étant donné que les travaux de terrassement constituent la majeure partie du processus de construction de la retenue, un plan de sécurité spécifique aux travaux de terrassement généraux, de soutènement et de fondations profondes a été élaboré.

Tableau n° VII.1 : Plan de sécurité au travail (Sedrati, 2018).

Objectifs visés	Mesures appropriées à envisager
1) Prévenir les risques d'accident par chutes, chutes et engins de terrassement.	Disposition concernant : ◊La réalisation du chantier de jour comme nuit. ◊Les zones interdites au public. ◊Les précautions particulières à prendre en cas de brouillard. ◊Réglementation de la circulation, signalisation interne aux chantiers, dépôts (panneaux, repérages,..).
2) Limiter les risques d'incidents lors de l'approvisionnement du chantier. Assurer la stabilité, la consolidation et la reprise des éléments stockés.	Repérage des lignes électriques.
3) Prévenir les accidents lors de l'utilisation du matériel : De renversement des engins ; De l'éboulement des terrains.	- Disposition à prendre pour le guidage des camions et des engins notamment lors des manœuvres en marche arrière.
4) Eviter les heurtes entre les engins et renversement des engins.	- Interdiction de dépassement et de stationnement.
5) Assurer la stabilité à la conservation et la reprise aisée des éléments stockés.	- Définition des lieux de stockage des divers matériaux. - Moyens de calage de chargement et de déchargement.
6) Eliminer les surcharges en bordure des fouilles.	- Mode de stockage des déblais et leur mode de déchargement.
7) Prévenir les chutes des objets.	- Examen des câbles soumis à des sollicitations particulières
8) Prévenir des ruptures des organes de levage.	Disposition et consignes particulières concernant l'entretien des matériels, des installations, les engins et les véhicules.
9) Heurts des personnes par les outils.	Les travailleurs qui utilisent la pioche ou la pelle dans leurs activités doivent être tenus à une distance suffisant les uns des autres.

VII.6 Signalisation de sécurité :

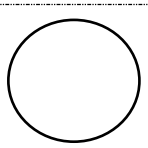
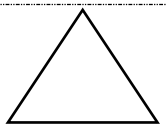
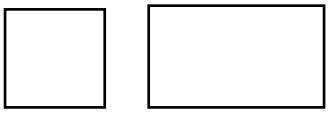
❋La signalisation relative à la santé et à la sécurité au travail garantit que les travailleurs sont correctement informés des risques auxquels ils peuvent être exposés sur le lieu de travail et qu'ils suivent les instructions à suivre. Elle informe les salariés sur des risques spécifiques liés à leur santé et sécurité, associés à des objets, activités ou situations particulières. Cette signalisation

peut revêtir différentes formes, telles qu'un panneau, une couleur, ou un signal lumineux ou acoustique, en fonction de la nature du danger (Thomas, 2007).

VII.6.1 Description des panneaux de signalisation :

La signification des signaux dépend à la fois de leur couleur et de leur forme :

Tableau n° VII.2 : Signification des couleurs de sécurité (Cartier & Sabater, 2004).

Forme / Couleur			
Rouge	Interdiction (attitudes dangereuses)	/	Matériel et équipement de lutte contre l'incendie (identification et localisation)
Jaune ou jaune orangé	/	Avertissement (attention, précaution)	/
Bleu	Obligation (comportement ou action spécifique)	/	Information ou instruction
Vert	/	/	**Signal de sauvetage ou de secours** (portes, issues, voies, matériels, postes, locaux) **Situation de sécurité** (retour à la normale)

VII.6.2 Les principes recommandés pour la conception et la mise en œuvre d'une signalisation de sécurité efficace :

★Clarté et Concision du Message ;

★Éviter l'utilisation simultanée de deux signaux lumineux susceptibles d'être confondus ;

★Éviter l'usage d'un signal lumineux à proximité d'une autre source lumineuse indistincte ;

★Ne pas recourir simultanément à deux signaux sonores ;

★Utilisation Optimale de la Couleur, des Symboles et du Texte ;

★Placement Approprié et accessible des Panneaux de Sécurité ;

★Entretien Régulier et Remplacement des Panneaux de Sécurité ;

★Formation des Employés à la Reconnaissance des Signaux de Sécurité.

VII.6.3 Implémentation de la signalisation de sécurité sur le site de construction :

• Lors de l'installation de la signalisation de sécurité sur le chantier, les éléments suivants doivent être pris en compte :

- ✓ **Aux points d'accès au chantier :**
  - Obligation de porter des bottes de sécurité ;
  - Obligation de porter un casque de protection ;
  - Obligation de porter des gants de protection ;
  - Interdiction d'entrée pour les personnes non autorisées.
- ✓ **Près des tableaux électriques :**
  - Avertissement du danger d'électrocution.
- ✓ **Dans les zones de stockage de produits inflammables :**
  - Interdiction de fumer ou d'utiliser des flammes nues.
- ✓ **Aux endroits présentant un risque de chute d'objets :**
  - Avertissement du danger de chute d'objets.
- ✓ **À travers l'ensemble du chantier :**
  - Indication de la localisation des moyens de lutte contre les incendies ;
  - Signalisation des voies et des sorties de secours ;
  - Localisation et signalisation des installations du chantier.

Conclusion :

★La prévention devrait être envisagée non comme une mesure corrective, mais plutôt comme un dispositif basé exclusivement sur des critères défensifs.

★Grâce aux progrès techniques et scientifiques, il est possible de capitaliser sur les connaissances acquises afin de transformer la prévention en une initiative proactive, visant à éliminer les risques plutôt qu'à simplement les atténuer.

★ L'orientation vers la sécurité et la protection doit être internalisée par chaque employé, ouvrier et responsable, afin de mettre un terme aux tragédies évitables. L'objectif est de garantir que la priorité ne se limite pas uniquement à la productivité au travail.

★ La mise en place d'une signalisation de sécurité devient une obligation réglementaire dès lors qu'un risque sur le lieu de travail ne peut être éliminé ou prévenu par l'existence de protections collectives ou par l'organisation du travail.

Conclusion générale :

Cette étude porte sur l'un des risques d'ordre hydrométéorologiques les plus fréquents et les plus dévastateurs dans le monde, en particulier dans la ville de Bordj Mira. À savoir les crues et les ruissellements superficiels à caractère rapide et intense, déclenchés par des configurations orageuses convectives de forte intensité et d'extension spatio-temporelle réduite (Menad, 2019). La gestion des crues suscite actuellement un intérêt croissant, attirant diverses approches. Néanmoins, la nature aléatoire et imprévisible des phénomènes météorologiques rend souvent cette tâche difficile et laborieuse. Face à cette complexité, la simulation numérique se positionne en première ligne, offrant une meilleure compréhension du phénomène des crues. L'objectif est d'apporter une contribution significative à la gestion des risques d'inondations en développant une politique plus éclairée. Cela inclut l'établissement de systèmes d'alerte adaptés et de plans de protection et d'intervention efficaces face à ce type de catastrophe.

Cette étude approfondie a fourni des aperçus significatifs sur les risques d'inondation pesant sur la ville de Bordj Mira. Les résultats détaillés des analyses hydrologiques et des modélisations hydrauliques ont mis en lumière les zones vulnérables, les facteurs contributifs, et les dynamiques complexes des inondations dans notre contexte urbain spécifique. Ils révèlent une combinaison complexe de facteurs, allant des caractéristiques géographiques aux changements climatiques, qui contribuent à la vulnérabilité de la région face aux inondations.

Cette étude est divisée en quatre parties fondamentales. En premier lieu, nous avons procédé à une description détaillée des aspects géographiques, géologiques, hydrogéologiques et météorologiques de la zone d'étude. Celle-ci est caractérisée par un climat de l'Atlas tellien, affichant une diversité entre un climat de montagne, marqué par des précipitations abondantes et des températures froides avec des chutes de neige, et un climat de plaine, plus sec et chaud, présentant d'importants écarts thermiques ainsi que des phénomènes climatologiques secondaires tels que la gelée blanche, la grêle et les orages. De plus, nous avons retracé l'historique des inondations ayant touché l'Algérie, en mettant particulièrement l'accent sur la ville de Bordj Mira.

L'étude hydromorphologique de la zone d'étude montre que le sous bassin de Bordj Mira est d'une forme allongée et pour Ait Smail c'est moins compact, ce sont caractérisés par un relief très fort et un temps de concentration très faible, ce qui favorise plus les crues. L'analyse du drainage a révélé que le réseau hydrographique de la zone d'étude peut être hiérarchisé en 05 ordres.

La méthode GRADEX a été employée pour estimer le débit de crue centennale, évalué à 290 m^3/s pour l'oued Ait Smail et 174 m^3/s pour l'oued Agrioune. Les données hydrométriques de la station de Fermatou ont été utilisées, puis ajustées à la loi de Log Normal. Cela nous a permis de déterminer le débit pour la période de retour de 100 ans, ainsi que d'autres paramètres. Tandis que le transport solide est estimé à 52.23 $T/Km^2/an$ pour Bordj Mira et 41.91 $T/Km^2/an$ pour Ait Smail.

Dans la seconde partie, pour contrer de manière efficace les risques de débordement, l'utilisation de techniques d'ingénierie, notamment la modélisation hydraulique, est essentielle. Cette approche s'impose comme une nécessité incontournable, offrant une description précise du comportement naturel des oueds. L'exploitation de ces résultats nous a permis d'évaluer l'étendue du risque

d'inondation, fournissant ainsi les dimensions appropriées pour la nconception de l'ouvrage à réaliser.

L'utilisation de l'outil RAS-Mapper du logiciel HEC-RAS nous a permis d'obtenir les niveaux de la ligne d'eau à plusieurs points dans les lits des oueds. Cela nous a permis de déterminer les hauteurs des tirants d'eau correspondantes aux débits de crue prévus et de localiser les zones envahies par les inondations dont nous avons utilisé les données du terrain comme base topographique pour construire la géométrie de notre oued, incluant le profil longitudinal, les sections en travers et les berges, tout en spécifiant les débits d'entrée et toutes les conditions aux limites nécessaires.

Après la localisation des zones à risque, dans la troisième partie, nous avons opté pour des aménagements pertinents afin de prendre en compte la diversité des enjeux présents le long des cours d'eau. L'objectif était de favoriser un aménagement du territoire mieux adapté au risque d'inondation tout en étudiant la stabilité des variantes choisies.

Le dimensionnement et l'aménagement du canal en matelas Reno. Plusieurs variantes sont proposées, une vérification des vitesses a écarté la variante du canal en béton et celle du mur de soutènement en gabions ; Enfin la variante retenue pour notre aménagement est le matelas Reno avec une correction torrentielle de la pente pour assurer sa stabilité vis-à-vis de l'érosion à la base.

Le choix des variantes s'est basé sur une analyse technico-économique, la variante adéquate doit répondre à tous les critères. Pour l'oued Agrioune nous avons opté pour un canal en gabions et pour l'oued Ait Smail nous avons choisi un revêtement en enrochement, avec un coût de 335 534 721,00 DA et une durée de réalisation de 4 mois et 20 jours.

L'absence d'entretien d'un ouvrage compromet son bon fonctionnement, réduisant ainsi son efficacité protectrice. C'est pourquoi il est crucial de sensibiliser les communautés à la nécessité d'être prêtes à réagir rapidement dès qu'un avertissement d'inondation est émis. Par ailleurs, il est recommandé d'établir un plan de gestion des urgences en cas d'inondation afin de faciliter les évacuations nécessaires. Ce plan devrait identifier les zones devant être évacuées en cas d'inondation, ainsi que les abris situés dans des zones à l'abri des risques d'inondation.

Références bibliographiques :

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

Disponible sur : https://theses.hal.science/tel-03615812/

•**Begic, I. (2015).** Les systèmes d'endiguement. Définitions. Fonctionnement. Irstea Aix-en-Pce - Unité de Recherche Recover Section « Ouvrages hydrauliques ».

Disponible sur :
https://www.arraa.org/sites/default/files/media/documents/journees_techniques/1-ivan_begic_dreal_ra_et_patrice_meriaux_irstea.pdf

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

Disponible sur : https://www.asjp.cerist.dz/en/article/85860

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

Disponible sur : http://archives.univ-biskra.dz:80/handle/123456789/14978

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

Disponible sur : http://localhost:8080/xmlui/handle/123456789/108

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

Disponible sur : https://www.gallimardmontreal.com/catalogue/livre/hydraulique-et-hydrologie-2e-edition-bennis-saad-9782760515215

•**Benoit, J., & Gülseren, E. (2021).** Guide d'exécution des marchés publics de travaux de la ville de Garges-Lès-Gonesse (p. 30).

Disponible sur :
https://www.villedegarges.fr/sites/default/files/guide_execution_marches_publics_travaux_ville_.pdf

•**Beven, K. J., & Kirkby, M. J. (1979).** A physically based, variable contributing area model of basin hydrology / Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. Hydrological Sciences Bulletin, 24(1), 43-69.

Disponible sur : https://doi.org/10.1080/02626667909491834

•**Boiffin, J. (1984).** La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies [PhD Thesis]. Institut National Agronomique Paris Grignon.

Disponible sur : https://theses.hal.science/tel-02858167/

•**Boubchir, A. (2008).** Risques d'inondation et occupation des sols dans le thore (region de Labruguière et de Mazamet)

Disponible sur : https://docplayer.fr/8918784-Risques-d-inondation-et-occupation-des-sols-dans-le-thore-region-de-labruguiere-et-de-mazamet.html

•**Bouchelkia, H., & Remini, B. (2003)**. Quantification du transport solide dans le bassin versant algérien du Chellif. Sciences Eaux & Territoires, 33 Ingénieries-EAT, Article 33 Ingénieries-EAT.

Disponible sur : https://hal.science/hal-00466014/document

•**Bouguerra, S., Bouanani, A., & Baba-Hamed, K. (2016).** Transport solide dans un cours d'eau en climat semi-aride : Cas du bassin versant de l'Oued Boumessaoud (nord-ouest de l'Algérie). Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science, 29(3), 179-195.

Disponible sur : https://doi.org/10.7202/1038923ar

•**Bourdé, A., Ronchi, L., & Amizet, L. (2022).** Catastrophes climatiques : Hier, aujourd'hui et demain. Médecine de Catastrophe - Urgences Collectives, 6(3), 186-187.

Disponible sur : https://doi.org/10.1016/j.pxur.2022.06.004

•**Bregje K. van, W., Stéphanie, Ij., Brenden, J., Simone, B., Stefanie, K., Lauren, B., Glenn-Marie, L., Niels, H.-N., Henk, N., Yusuke, T., Pradeep, K., & Imen, M. (2017).** Guide Dispositifs de protection contre les inondations fondées sur la nature Principes et recommandations pour la mise en œuvre| (p. 32).

Disponible sur :
https://www.gfdrr.org/sites/default/files/publication/Brochure%20Implementing%20nature-based%20flood%20protection_Final_FRE.pdf

•**Brown, R., & Chanson, H. (2012).** Suspended sediment properties and suspended sediment flux estimates in an inundated urban environment during a major flood event: Sediments In An Urban Environment During A Major Flood. Water Resources Research, 48(11).

Disponible sur : https://doi.org/10.1029/2012WR012381

•**Brown, S. A., & Clyde, E. S. (1989).** Design of Riprap Revetment (FHWA-IP-89-016; p. 169).

Disponible sur : https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/41174

•**Cartier, V., & Sabater, C. (2004).** La Signalisation De Sante Et De Securite Au Travail (projet Master Prévention des Risques). P.R.N.T., 30.

Disponible sur :
https://www.sante-securite-paca.org/d/YTozOntzOjQ6InJlZjAiO2k6MTtzOjQ6InJlZjEiO3M6MzoiNjAwIjtzOjQ6InJlZjIiO3M6MDoiIjt9/la-signalisation-de-sante-et-de-securite-au-travail

•**Cheloufi, N. E. Y., & Foual, I. (2018)**. Modélisation hydraulique du bassin versant de l'oued EL Hammam par HEC-RAS [mémoire de master, Badji Mokhtar Annaba].

Disponible sur : https://biblio.univ-annaba.dz/ingeniorat/wp-content/uploads/2018/10/Cheloufi-Nour-Elyakine-Foual-Imene.pdf

•**CID. (2008).** Guide de conception des routes rurales : Vol. Volume A (conseil ingénierie et développement).

Disponible sur : https://fr.slideshare.net/Haffoudiabdelhaq/guide-de-conception-des-routes-version-finale

•**Cosandey, C. (1990).** L'origine des crues dans les bassins-versants élémentaires : Du ruissellement sur les versants à l'écoulement de crue. Annales de Géographie, 99(556), 641-659.

Disponible sur : https://www.jstor.org/stable/23452703

•**Coulon, C. (2015).** Etude de la sensibilité de la densité de drainage aux hypothèses de calcul.

Disponible sur : https://www.metis.upmc.fr/~ducharne/documents/coulon2015.pdf

•**Dauphiné, André, V. (2001).** Risques et catastrophes. Observer-Spatialiser-Comprendre-Gérer. Paris, Armand Colin (Coll. « U Géographee »), 288 p. (ISBN 2-200-25042-8). Cahiers de géographie du Québec, 46(127), 106.

Disponible sur : https://doi.org/10.7202/023025ar

•**DDT. (2012).** Plan de prévention des risques naturels liés aux inondations de la Coise. Direction Départementale des Territoires de la Loire.

Disponible sur :https://www.rhone.gouv.fr/contenu/telechargement/7990/44268/file/20-2012_11_27_R_Presentation_HTV_VD_cle7e6b55.pdf

•**De Ploey, J., Imeson, A., & Oldeman, L. R. (1991)**. Soil Erosion, Soil Degradation and Climatic Change. In F. M. Brouwer, A. J. Thomas, & M. J. Chadwick (Éds.), Land Use Changes in Europe (Vol. 18, p. 275-292). Springer Netherlands.

https://doi.org/10.1007/978-94-011-3290-9_12

•**Dervaux I. (1983).** Risque et sécurité. Culture et Technique, 8-9.

Disponible sur : https://hal.science/tel-01572602/document

•**Dottori, F., Szewczyk, W., Ciscar, J.-C., Zhao, F., Alfieri, L., Hirabayashi, Y., Bianchi, A., Mongelli, I., Frieler, K., Betts, R. A., & Feyen, L. (2018).** Increased human and economic losses from river flooding with anthropogenic warming. Nature Climate Change, 8(9), 781-786.

Disponible sur : https://doi.org/10.1038/s41558-018-0257-z

•**Dunne, T., Moore, T., & Taylor, C. H. (1975).** Recognition and prediction of runoff-producing zones in humid regions. Hydrol. Sci. Bull, 20(3), 305-327.

Disponible sur : https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0022169483902093

•**Egis Eau. (2013).** Annexe 2—methode du gradex -

Disponible sur : https://docplayer.fr/51813197-Annexe-2-methode-du-gradex.html

•**El Harti, Y., & Ait Ichou, I. (2017).** Étude de protection de la ville de Marrakech contre les inondations [Université Mohammed Premier Ecole Nationale Des Sciences Appliquées D'al Hoceima].

Disponible sur : https://geniecivilpdf.com/wp-content/uploads/%C3%89tude-de-protection-de-la-ville-de-Marrakech-contre-les-inondations.pdf

•**Eleutério, J. (2012)**. Flood risk analysis: Impact of uncertainty in hazard modelling and vulnerability assessments on damage estimations.

Disponible sur : https://theses.hal.science/tel-00821011/document

•**Elfetni, khaoula. (2019).** Etude de protection contre les inondations de la ville de Doucen (Oued Tamda).

Disponible sur : http://archives.univ-biskra.dz:80/handle/123456789/14970

•**Emori, S., & Brown, S. J. (2005).** Dynamic and thermodynamic changes in mean and extreme precipitation under changed climate: MEAN AND EXTREME PRECIPITATION CHANGES. Geophysical Research Letters, 32(17).

Disponible sur : https://doi.org/10.1029/2005GL023272

•**ENAC/ISTE/HYDRAM. (2004).** Estimations du débit de pointe de temps de retour 20 et 100 ans par la méthode statistique et celle du GRADEX - Application au bassin versant de la Viège à Viège (VS, Suisse).

Disponible sur : http://hydrologie-2.org/Hydrotheque/Hydrologie_Appliquee/08_EtudedesCrues/Exercice_HA0802/HA0802_corrige.pdf

•**Faye, C. (2018).** Périmètre du bassin versant.

Disponible sur : https://www.google.com/search?q=p%C3%A9rim%C3%A8tre+du+bassin+versant&oq=p%C3%A9rimetre+du+ba&aqs=chrome.1.69i57j0i22i30l2j0i10i22i30j0i15i22i30j0i22i30l5.5553j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8

•**Galay, V., Yaremko, E., & Quazi, M. (1987, novembre 5).** River bed scour and construction of stone riprap protection.

Disponible sur : https://www.semanticscholar.org/paper/River-bed-scour-and-construction-of-stone-riprap-Galay-Yaremko/c75d00ebe6484ecf55f2cd2f0d3c8f1f1c7878d6

•**Galland J-P. (1998).** Les responsabilités des experts et le principe de précaution. Nature Sciences Sociétés, 6(1), 46-49.

Disponible sur : https://doi.org/10.1016/S1240-1307(97)89517-9

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

Disponible sur : https://theses.hal.science/tel-00579507

•**Gendreau N. (1999).** La méthode Inondabilité.

Disponible sur : http://www.cemagref.fr.

•**Giorgi, F. (2006).** Climate change hot-spots. Geophysical Research Letters, 33(8).

Disponible sur : https://doi.org/10.1029/2006GL025734

•**GIP. (2015).** Normes Et Techniques De Protection Des Berges Du NAKANBE.

Disponible sur : https://eaunakanbe.bf/wp-content/uploads/2019/06/Manuel-Normes-et-techniques-de-protection-des-berges.pdf

•**Glatron S. (2003)**. Questions de Géographie, Les Risques Ouvrages collectif coordonné par Vincent Moriniaux, Ouvrage collectif, Editions Temps, Nantes-Francia, 256p.

Disponible sur : https://side.developpement-durable.gouv.fr/PAE/doc/SYRACUSE/71968/questions-de-geographie-les-risques

•**GOV.BC.CA. (2000)**. Riprap design and construction guide. Ministry of Environment, Lands & Parks, Water Management Branch, Public Safety Section.

Disponible sur : https://a100.gov.bc.ca/pub/eirs/lookupDocument.do?fromStatic=true&repository=EPD&documentId=5230

•**GPE. (2010)**. /Guide/La Planification De Projet A L'aide Du Logiciel Ms Project.

Disponible sur : https://www.gpe-afrique.com/moodledata/filedir/b7/15/b7152b1dee2c8419ae91dfcaac80a944e4126f5d

•**Graguid, T. B. (2011)**. Système d'informations et représentations cartographiques pour la gestion des inondations à Cotonou [institut international d'Ingénierie de l'Eau et l'environnement].

Disponible sur : http://documentation.2ie-edu.org/cdi2ie/opac_css/doc_num.php?explnum_id=135

•**Griot, C., & Ayral, P. A. (2002).** Terminologie en science du risque : Recueil de définitions. (Rapport). GEM.

Disponible sur : https://theses.hal.science/tel-00009093/file/tel-00009093.pdf

•**Guigo, M., Voiron, C., Graillot, D., & Olivier, F. (2002).** Système d'aide à la décision pour la limitation des risques d'inondation dans les agglomérations urbaines méditerranéennes.

Disponible sur : https://hal.science/hal-00410038

•**Guillot, & Durand. (1969).** La Méthode du gradex pour le calcul de la probabilité des crues à partir des pluies—UNESCO Digital Library.

Disponible sur : https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000014626

•**Heyman, M. (2023, septembre 14).** Les images des inondations meurtrières en Libye. Le Point.

Disponible sur : https://www.lepoint.fr/monde/les-images-des-inondations-meurtrieres-en-libye-14-09-2023-2535420_24.php

•**Hirabayashi, Y., Mahendran, R., Koirala, S., Konoshima, L., Yamazaki, D., Watanabe, S., Kim, H., & Kanae, S. (2013).** Global flood risk under climate change. Nature Climate Change, 3(9), 816-821.

Disponible sur : https://doi.org/10.1038/nclimate1911

•**Hmidi, N. (2019).** Inondation dévastatrice dans la ville de Soliman (Tunisie) : cas de sa zone industrielle lors de l'événement pluviométrique du 22 septembre 2018.

Disponible sur : https://www.researchgate.net/profile/Nesrine-Hmidi/publication/335928801_INONDATION_DEVASTATRICE_DANS_LA_VILLE_DE_SOLIMAN_TUNISIE_CAS_DE_SA_ZONE_INDUSTRIELLE_LORS_DE_L'EVENEMENT_PLUVIOMETRIQUE_DU_22_SEPTEMBRE_2018/links/5d84ad9192851ceb791cc8a5/INONDATION-DEVASTATRICE-DANS-LA-VILLE-DE-SOLIMAN-TUNISIE-CAS-DE-SA-ZONE-INDUSTRIELLE-LORS-DE-LEVENEMENT-PLUVIOMETRIQUE-DU-22-SEPTEMBRE-2018.pdf#page=152

Hồng Nga, N. (2017, novembre 18). Inondations meurtrières en Grèce : Après le deuil, l'évaluation des dégâts. lecourrier.vn.

Disponible sur : https://lecourrier.vn/inondations-meurtrieres-en-grece-apres-le-deuil-levaluation-des-degats/449798.html

•**Horton, R. E. (1945).** Erosional development of streams and their drainage basins; hydro physical approach to quantitative morphology. Geological Society of America Bulletin, 56(3), 275.

Disponible sur : https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.0.CO;2

•**Houbib, H. (2012).** Analyse Multicritères des composantes du Milieu à l'aide des techniques de la géomatique pour un aménagement intégré de la vallée d'Oued Mellagou- Bouhmama W. KHENCHELA [Université El Hadj Lakhdar -Batna].

Disponible sur : http://eprints.univ-batna2.dz/574/1/sce%20HOUBIB%20hanane.pdf

•**Humbert, J. (1982).** Cinq années de bilans hydrologiques mensuels sur un petit bassin-versant des Hautes-Vosges (1976-1980) : Le bassin du Ringelbach. Cinq années de bilans hydrologiques mensuels sur un petit bassin-versant des Hautes-Vosges (1976-1980): le bassin du Ringenbach, 19-20-21, 105-122.

Disponible sur : https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/39728/1/SOBEG%201990.pdf

•**Idrici, A. (2017).** Modélisation et simulation numérique d'écoulement d'eau à surface libre avec HEC-ras cas d'oued de Saida.

Disponible sur : Disponible sur : https://butec.univ-saida.dz/admin/opac_css/doc_num.php?explnum_id=523

•**Isabelle, L. (1953, février).** Catastrophe naturelle dans des pays longeant la mer du Nord | Evenements | Perspective Monde.

Disponible sur : https://perspective.usherbrooke.ca/bilan/servlet/BMEve/2020

•**Isabelle, L. (2005, août).** Déferlement de l'ouragan Katrina sur le sud des États-Unis | Evenements | Perspective Monde.

Disponible sur : https://perspective.usherbrooke.ca/bilan/servlet/BMEve/937

•**Jabbour, D. (2006).** Etude expérimentale et modélisation de la dispersion en champ lointain suite à un rejet accidentel d'un polluant miscible dans un cours d'eau. Application à la gestion de crise.

Disponible sur : https://theses.hal.science/tel-00218245/document

•**JICA. (2014).** Consignes pour la gestion de la sécurité des travaux de construction de l'APD japonaise (Institution administrative indépendante Agence japonaise de coopération internationale (JICA)).

Disponible sur : https://www.jica.go.jp/Resource/english/our_work/types_of_assistance/c8h0vm00008zx0m8-att/guidance_fr.pdf

•**Kaada, D. E. (2004).** Correspondant au 29 décembre 2004. J.O.R.A. (Journal Officiel de la République Algérienne démocratique et populaire), Alger.

Disponible sur : https://www.joradp.dz/FTP/jo-francais/2004/F2004084.PDF

•**Ketrouci, K. (2014).** Application de modèles hydrologiques dans l'estimation des crues extrêmes en Algérie.

Disponible sur : https://docplayer.fr/55738944-Application-de-modeles-hydrologiques-dans-l-estimation-des-crues-extremes-en-algerie.html

•**Khandekar, M. L. (2010).** 2010 Pakistan Floods: Climate Change or Natural Variability? CMOS Bulletin SCMO Vol.38, No.5.

Disponible sur :
https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=f83ef94976a575011813a34da3e66575b047d6cd

•**Koerner, M. R. (1986).** Designing with Geosynthetics (Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.).

Disponible sur : https://www.semanticscholar.org/paper/Designing-with-Geosynthetics-Koerner/3467bd85470778986613f4b5d9f1c64aee4c9ee2

•**La croix. (2020, juillet 14).** En Chine, la crue du Yangzi Jiang menace la métropole de Wuhan. La Croix.

Disponible sur : https://www.la-croix.com/Monde/Asie-et-Oceanie/En-Chine-crue-Yangzi-Jiang-menace-metropole-Wuhan-2020-07-14-1201104937

•**Lang, M., Chastan, B., & Grelot, F. (2009).** La méthode Inondabilité : Appropriation par les hydrologues de la vulnérabilité dans le diagnostic sur le risque d'inondation. HAL, Post-Print.

Disponible sur : https://hal.science/hal-00493184

•**Layan, B., Dridri, A., Benaabidate, L., & Zemzami, M. (2007).** Détermination des crues de projet par les aspects du débit de pointe et de l'hydrogramme de crue au niveau de la commune Ain Boukellal, bassin versant de l'oued Larbaa, Maroc.

Disponible sur : https://doi.org/10.1051/lhb:200403008

•**Le CRSTRA. (2004, décembre).** Des journées techniques : risques naturels : inondation, prévision, protection.

Disponible sur : https://crstra.dz/telechargement/seminaires/les-actes-des-journees-techniques-risque-naturels-iniondatio.pdf

•**Ledoux, B. (2006).** La gestion du risque inondation.

Disponible sur : https://complements.lavoisier.net/9782743008291_la-gestion-du-risque-inondation_Sommaire.pdf

•**Mekaouche, N. (2017).** Contribution à l'étude hydro sédimentaire dans l'oued Agrioune a l'aval du barrage de Kharrat.

Disponible sur : http://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/handle/123456789/14085

•**MEN. (2022).** Document de synthèse : Informations générales pour l'examen des instruments relatifs aux accidents du travail et aux maladies professionnelles (Mécanisme d'examen des normes ; p. 13).

Disponible sur : https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed_norm/---normes/documents/genericdocument/wcms_852784.pdf

•**Menad, W. (2012).** Risques de crue et de ruissellement superficiel en métropole méditerranéenne : Cas de la partie ouest du Grand Alger. Université Paris-Diderot - Paris.

https://theses.hal.science/tel-00787142/file/thA_se_Wahiba.pdf

•**Menad, W. (2019).** Approche modèle pour une prise en charge globale des risques hydrologiques dans le bassin méditerranéen. Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège, 88, 21.

Disponible sur : https://doi.org/10.25518/0037-9565.8402

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

Disponible sur : https://hal.science/hal-00471236

•**Nouri, M., Ozer, A., & Ozer, P. (2016)**. Etude préliminaire sur le risque d'inondation en milieu urbain (Algérie). Geo-Eco-Trop : Revue Internationale de Géologie, de Géographie et d'Écologie Tropicales, 40(3).

Disponible sur : https://orbi.uliege.be/handle/2268/204062

•**OIT. (2021).** Améliorer la sécurité et la santé au travail dans les petites et moyennes entreprises [manuel du participant]. 84.

Disponible sur : https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed_dialogue/---lab_admin/documents/publication/wcms_792225.pdf

•**OMM. (2008).** Guide Des Pratiques Hydrologiques—Vol1 PDF | PDF | Hydrogéologie | Hydrologie : Vol. Volume 1 Hydrologie – De la mesure à l'information hydrologique (2008e éd.).

Disponible sur : https://www.scribd.com/document/406358185/Guide-des-pratiques-hydrologiques-Vol1-pdf#

•**OMM/UNISCO. (1992).** International Glossary of Hydrology—UNESCO Digital Library.

Disponible sur : https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000221862

•**Oujbbour, B. (2015).** Annonce de crue et la mise en place d'un système d'alarme dans le bassin de Guelmim—Sécheresse info.

Disponible sur : http://www.secheresse.info/spip.php?article72096

•**Pardé, M. (1968).** Les crues de novembre 1966 en Italie. Annales de géographie, 77(420), 187-193.

Disponible sur : https://doi.org/10.3406/geo.1968.15633

•**Parvis, M. (1950).** Drainage Pattern Significance in Air photo Identification Of Soils And Bedrocks. Photogrammetric Engineering.

Disponible sur : https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1950journal/jun/1950_jun_387-409.pdf

•**Racin, J. A., Hoover, T. P., Crossett Avila, C. M., & California. Dept. of Transportation. Office of Structural Foundations. (2000).** California Bank and Shore Rock Slope Protection Design: Practitioner's Guide and Field Evaluations of Riprap Methods (FHWA-CA-TL-95-10; p. 109).

Disponible sur : https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/40832

•**Roche, M. (1963)**. Hydrologie de surface.

Disponible sur :
https://www.pseau.org/outils/ouvrages/ird_hydrologie_de_surface_marcel_roche_1963.pdf

•**Roux, H. (2004).** Estimation de paramètres en hydraulique fluviale, à partir de données caractéristiques de l'imagerie aérienne [Phd].

Disponible sur : https://oatao.univ-toulouse.fr/7360/1/roux.pdf

•**Scarwell, H.-J., & Laganier, R. (2004).** Risque d'inondation et aménagement durable des territoires. Presses Univ. Septentrion.

Disponible sur : https://books.openedition.org/septentrion/15670?lang=fr

•**Schmidt, A., Ivanova, A., & Schäfer, M. S. (2013).** Media attention for climate change around the world: A comparative analysis of newspaper coverage in 27 countries. Global Environmental Change, 23(5), 1233-1248.

Disponible sur : https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2013.07.020

•**Sedrati, C. (2018).** Étude d'une retenue collinaire sur l'oued Charchar, commune de Hadjadj (Mostaganem) [mémoire de fin d'études]. École Nationale Supérieure d'Hydraulique -Arbaoui Abdellah-.

•**Smith, G. P., Davey, E. K., & Cox, R. (2014).** Flood Hazard. E Water Research Laboratory, School of Civil and Environmental Engineering, University of New South, 59.

Disponible sur : https://knowledge.aidr.org.au/media/2334/wrl-flood-hazard-techinical-report-september-2014.pdf

•**SPW. (2021, mars 4).** Carte de l'aléa d'inondation—Inondations en Wallonie. Inondations en Wallonie.

Disponible sur :
http://inondations.wallonie.be/cms/render/live/fr/sites/inondations/home/urbanisme/cartes-inondations/carte-alea-inondation.html

•**Strahler, A. N. (1952).** HYPSOMETRIC (AREA-ALTITUDE) ANALYSIS OF EROSIONAL TOPOGRAPHY. Geological Society of America Bulletin, 63(11), 1117.

Disponible sur : https://doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63[1117:HAAOET]2.0.CO;2

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

Disponible sur : http://portail2.reseau-concept.net/Upload/ciheam/fichiers/Nal_n%C2%B048_-_Changement_climatique.pdf

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

Disponible sur : https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101297

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

Disponible sur : https://www.lepoint.fr/afrique/maroc-pluies-et-inondations-meurtrieres-dans-le-sud-25-11-2014-1884380_3826.php

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

Disponible sur : https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206293

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

Disponible sur : https://hal.science/hal-01180445

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

Disponible sur :
https://ia801004.us.archive.org/19/items/manuelpratiquedhydrologie/Manuel_pratique_d_hydrologie.pdf

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

Disponible sur : https://dspace.univ-guelma.dz/jspui/bitstream/123456789/601/1/H.S.L%28Cours%20%26%20Exercices%29-01.pdf

•**UNISDR, C. (2015).** The human cost of natural disasters 2015 : A global perspective - World | ReliefWeb (p. 57). relief web.

Disponible sur : https://reliefweb.int/report/world/human-cost-natural-disasters-2015-global-perspective

•**Verlynde, N. (2018).** De la perception du risque d'inondation aux propositions d'adaptation en territoire de côtes basses densément peuplées : Le cas de la communauté urbaine de Dunkerque.

Disponible sur :

https://theses.hal.science/tel-02085107/preview/These_VERLYNDE_Nicolas.pdf

•**Veyret, Y., BEUCHER, S., & REGHEZZA, M. (2004)**. Les risques. (Comprendre Rechercher, S'entraîner). Quercy, Bréal, 17-47.

Disponible sur : https://journals.openedition.org/rge/2423

•**Vinet, F. (2003).** Crues et inondations dans la France méditerranéenne. Les crues torrentielles des 12 et 13 novembre 1999 (Aude, Tarn, Pyrénées-Orientales et Hérault).

Disponible sur : https://hal.science/hal-01895590/document

•**Witheridge, G. (2014).** Rock sizing for bank stabilisation. Catchments & Creeks Pty Ltd, version 2, 11. PO Box 314 Ferny Hills, Qld 4055 Australia.

Disponible sur : https://www.catchmentsandcreeks.com.au/docs/Rock-Sizing-For-Bank-Stabilisation-V2.pdf

Références sitographiques :

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

https://earthexplorer.usgs.gov/

https://www.surfacewater.biz/riprap/

https://www.surfacewater.biz/hazard/

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

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

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

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

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

Annexes :

Annexe n° 01 : Cartes géologiques.

وزارة الصناعة و الطاقة
إدارة المناجم والجيولوجيا
مصلحة الخرائط الجيولوجية للجزائر

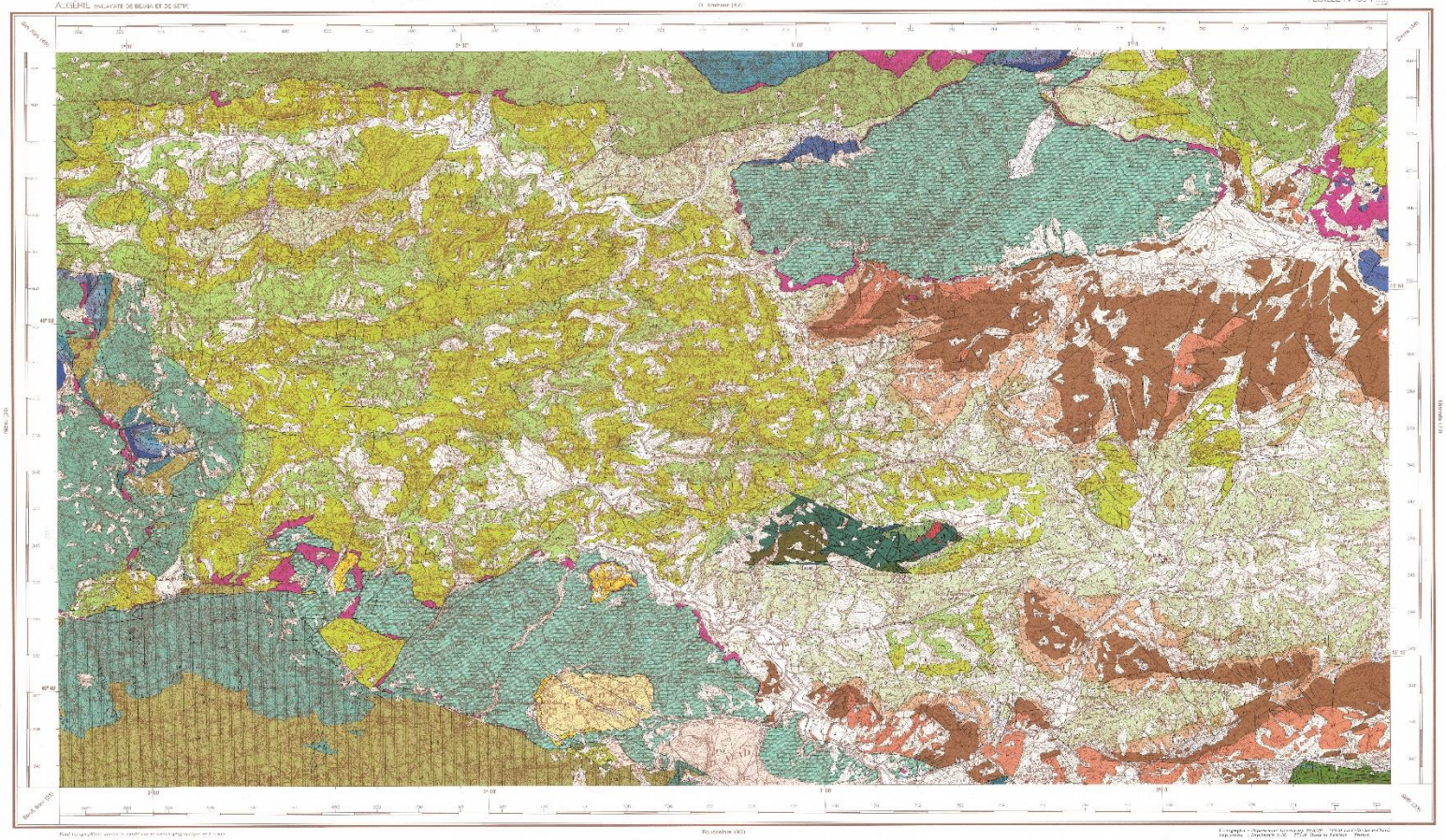
MINISTÈRE DE L'INDUSTRIE ET DE L'ÉNERGIE
DIRECTION DES MINES ET DE LA GÉOLOGIE
SERVICE DE LA CARTE GÉOLOGIQUE DE L'ALGÉRIE

خريطة الجزائر الجيولوجية
CARTE GÉOLOGIQUE DE L'ALGÉRIE

عين روة
AÏN ROUA
(province d'Alger)

سوناطراك
قسم هيدروكربورات
إدارة الاستكشاف

SONATRACH
DIVISION HYDROCARBURES
DIRECTION EXPLORATION



COUPES INTERPRÉTATIVES AU 1/50 000

Echelle 1/50 000

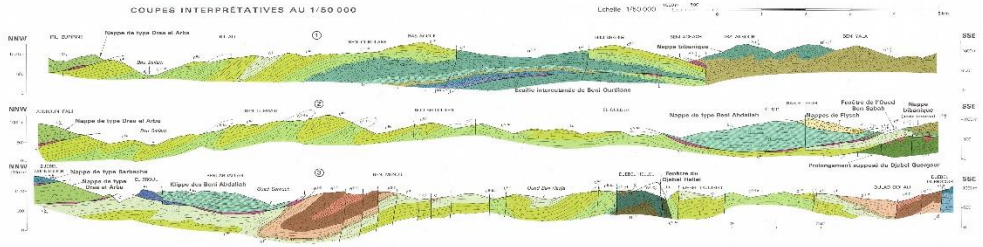
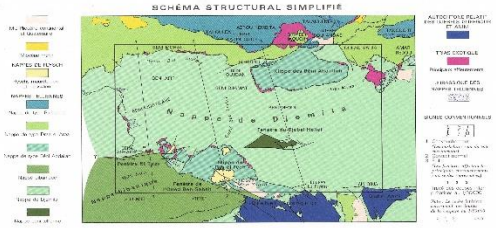
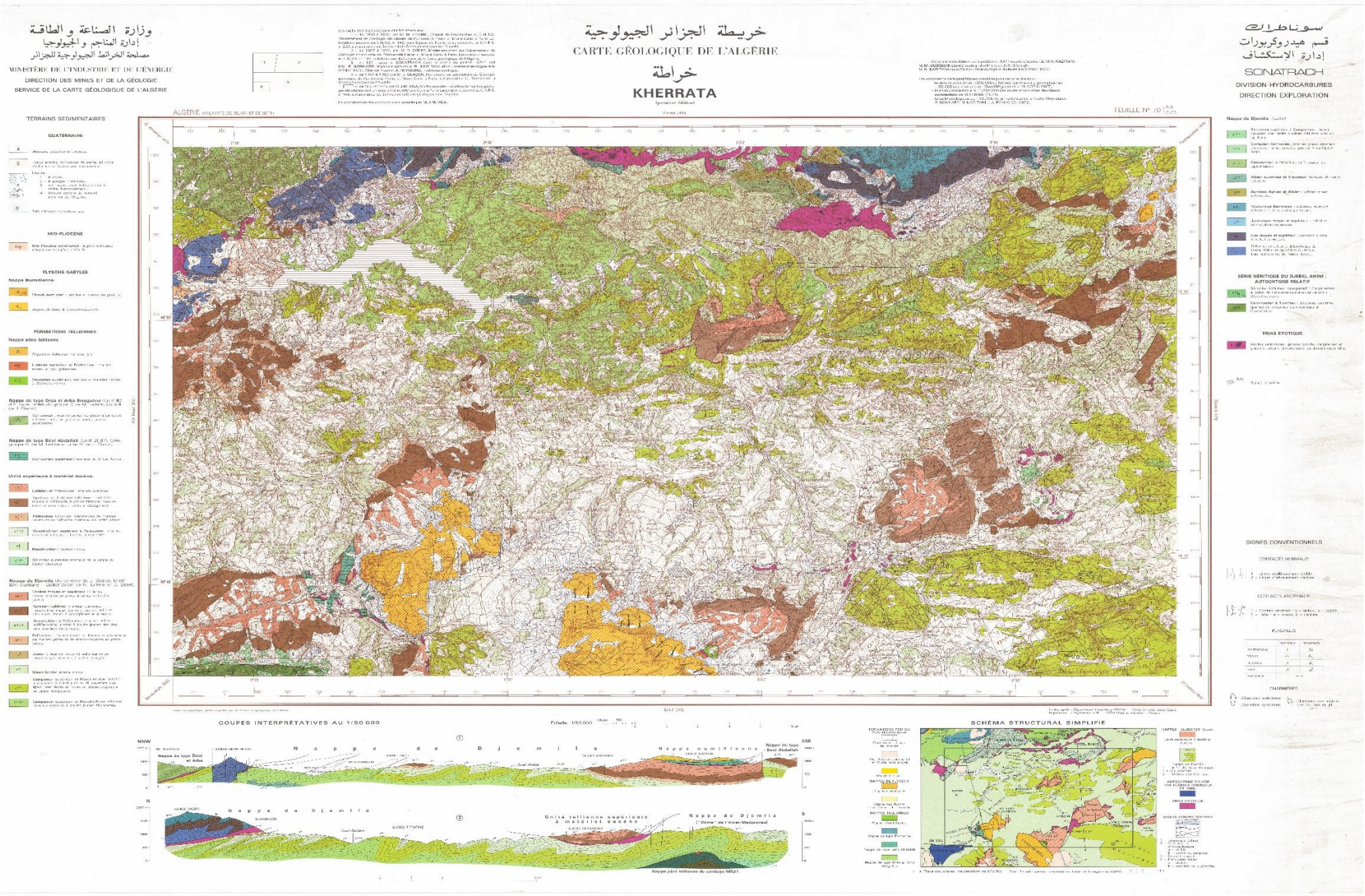


SCHÉMA STRUCTURAL SIMPLIFIÉ




وزارة الصناعة و الطاقة
إدارة المناجم و الجيولوجيا
مصلحة الخرائط الجيولوجية للجزائر
MINISTÈRE DE L'INDUSTRIE ET DE L'ÉNERGIE
DIRECTION DES MINES ET DE LA GÉOLOGIE
SERVICE DE LA CARTE GÉOLOGIQUE DE L'ALGÉRIE
خريطة الجزائر الجيولوجية
CARTE GÉOLOGIQUE DE L'ALGÉRIE
خراطة
KHERRATA
سوناطراك
قسم هيدروكربورات
إدارة الإستكشاف
SONATRACH
DIVISION HYDROCARBURES
DIRECTION EXPLORATION
TERRAINS SEDIMENTAIRES
QUATERNAIRE
MIO-PLIOCÈNE
FLYSCHS KABYLES
FORMATIONS TELLIENNES
SÉRIE NÉRITIQUE DU DJEBEL ANINI : AUTOCHTONE RELATIF
TRIAS EXOTIQUE
SIGNES CONVENTIONNELS
CONTACTS NORMAUX
CONTACTS ANORMAUX
CHARNIÈRES
COUPES INTERPRÉTATIVES AU 1/50 000
Nappe de Djemila
Nappe numidienne
Nappe de Djemila
Unité tellienne supérieure à matériel éocène
Nappe de Djemila
SCHÉMA STRUCTURAL SIMPLIFIÉ

Annexe n° 02 : Séries pluviométriques.

Table I : Série pluviométrique de la station **«** 150601 » Fermatou.

Année	P_{jmax} (mm)
1978	24.6
1979	101
1980	34.4
1981	39.4
1982	24.5
1983	28
1984	20.7
1985	28.1
1986	29.6
1987	31.1
1988	29.9
1989	41.5
1990	31.1
1991	45.7
1992	28.1
1993	22.7
1994	43.5
1995	18.2
1996	31.2
1997	50.3
1998	30.2
1999	26.3
2000	25.3
2001	71.6
2002	38.7
2003	61.1
2004	28.9
2005	33.4
2006	18.4
2007	38
2008	22.5
2009	27.3

Table II : Série pluviométrique de la station « 030207 » Souk El Ténine.

Année	P_{jmax} (mm)	Année	P_{jmax} (mm)
1974	74.7	1992	56.2
1975	98.2	1994	55.9
1976	125.8	1995	55.9
1977	67.2	1996	93.5
1978	74	1997	55
1979	57.1	1998	149.8
1980	96	1999	67.6
1981	64	2000	55.3
1982	116	2001	79.5
1983	64.7	2002	54.8
1984	101.8	2003	97.2
1985	96.5	2004	47.5
1986	101.2	2005	80.3
1987	39.2	2006	58
1988	69.5	2007	81
1989	69	2009	98.9
1990	160.6	2010	77.4
1991	95.9	2011	68.8

Table III : Série pluviométrique de la station « 030205 » Ain Roua.

Année	P_{jmax} (mm)
1969	36.1
1970	42.3
1971	46.9
1972	42.6
1973	60.6
1974	76.6
1975	22
1976	40.8
1977	32
1978	29.5
1979	47.5
1980	54.5
1981	40
1982	48
1983	70.5
1984	60
1985	54
1986	37.5
1987	27.5
1988	80
1989	33.5
1990	45
1991	56
1992	46
1993	32.5
1994	80
1995	43.5
1996	23
1997	42
1998	46
1999	45
2000	35
2001	21
2002	82.5
2003	43.2
2004	69.5

Table IV : Série hydrométrique prise de la station 150601.

Année	$Q_{max}(m^3/s)$
1970	5.91
1971	19.7
1972	64
1973	84
1974	14.8
1975	86.5
1976	20.7
1977	13.9
1978	33.5
1979	50.9
1980	4.85
1981	68.3
1982	36
1983	64
1984	71.5
1985	19.7
1986	66.1
1987	0.95
1988	56.2
1989	2.76
1990	236
1991	29.8
1992	5.3
1993	3.25
1994	14.8
1995	61.8
1996	6.12
1997	37.9
1998	68.3
1999	5.51
2000	4.67
2001	37.9
2002	120

Annexe n° 03 : Tableau des Valeurs de χ^2.

	γ										
k	0.995	0.990	0.975	0.950	0.900	0.500	0.100	0.050	0.025	0.010	0.005
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.45	2.71	3.84	5.02	6.63	7.88
2	0.01	0.02	0.05	0.10	0.21	1.39	4.61	5.99	7.38	9.21	10.60
3	0.07	0.11	0.22	0.35	0.58	2.37	6.25	7.81	9.35	11.34	12.84
4	0.21	0.30	0.48	0.71	1.06	3.36	7.78	9.94	11.14	13.28	14.86
5	0.41	0.55	0.83	1.15	1.61	4.35	9.24	11.07	12.83	15.09	16.75
6	0.68	0.87	1.24	1.64	2.20	5.35	10.65	12.59	14.45	16.81	18.55
7	0.99	1.24	1.69	2.17	2.83	6.35	12.02	14.07	16.01	18.48	20.28
8	1.34	1.65	2.18	2.73	3.49	7.34	13.36	15.51	17.53	20.09	21.96
9	1.73	2.09	2.70	3.33	4.17	8.34	14.68	16.92	19.02	21.67	23.59
10	2.16	2.56	3.25	3.94	4.87	9.34	15.99	18.31	20.48	23.21	25.19
11	2.60	3.05	3.82	4.57	5.58	10.34	17.28	19.68	21.92	24.72	26.76
12	3.07	3.57	4.40	5.23	6.30	11.34	18.55	21.03	23.34	26.22	28.30
13	3.57	4.11	5.01	5.89	7.04	12.34	19.81	22.36	24.74	27.69	29.82
14	4.07	4.66	5.63	6.57	7.79	13.34	21.06	23.68	26.12	29.14	31.32
15	4.60	5.23	6.27	7.26	8.55	14.34	22.31	25.00	27.49	30.58	32.80
16	5.14	5.81	6.91	7.96	9.31	15.34	23.54	26.30	28.85	32.00	34.27
17	5.70	6.41	7.56	8.67	10.09	16.34	24.77	27.59	30.19	33.41	35.72
18	6.26	7.01	8.23	9.39	10.87	17.34	25.99	28.87	31.53	34.81	37.16
19	6.84	7.63	8.81	10.12	11.65	18.34	27.20	30.14	32.85	36.19	38.58
20	7.43	8.26	9.59	10.85	12.44	19.34	28.41	31.41	34.17	37.57	40.00
21	8.03	8.90	10.28	11.59	13.24	20.34	29.62	32.67	35.48	38.93	41.40
22	8.64	9.54	10.98	12.34	14.04	21.34	30.81	33.92	36.78	40.29	42.80
23	9.26	10.20	11.69	13.09	14.85	22.34	32.01	35.17	38.08	41.64	44.18
24	9.89	10.86	12.40	13.85	15.66	23.34	33.20	36.42	39.36	42.98	45.56
25	10.52	11.52	13.12	14.61	16.47	24.34	34.28	37.65	40.65	44.31	46.93
26	11.16	12.20	13.84	15.38	17.29	25.34	35.56	38.89	41.92	45.64	48.29
27	11.81	12.88	14.57	16.15	18.11	26.34	36.74	40.11	43.19	46.96	49.65
28	12.46	13.57	15.31	16.93	18.94	27.34	37.92	41.34	44.46	48.28	50.99
29	13.12	14.26	16.05	17.71	19.77	28.34	39.09	42.56	45.72	49.59	52.34
30	13.79	14.95	16.79	18.49	20.60	29.34	40.26	43.77	46.98	50.89	53.67
40	20.71	22.16	24.43	26.51	29.05	39.34	51.81	55.76	59.34	63.69	66.77
50	27.99	29.71	32.36	34.76	37.69	49.33	63.17	67.50	71.42	76.15	79.49
60	35.53	37.48	40.48	43.19	46.46	59.33	74.40	79.08	83.30	88.38	91.95
70	43.28	45.44	48.76	51.74	55.33	69.33	85.53	90.53	95.02	100.42	104.22
80	51.17	53.54	57.15	60.39	64.28	79.33	96.58	101.88	106.63	112.33	116.32
90	59.20	61.75	65.65	69.13	73.29	89.33	107.57	113.14	118.14	124.12	128.30
100	67.33	70.06	74.22	77.93	82.36	99.33	118.50	124.34	129.56	135.81	140.17

Annexe n° 04 : 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
Moëllons bruts	0,017	0,02	0,025	0,03
Pierres sèches	0,025	0,03	0.033	0.035
Moëllons dressés	0.013	0.014	0.015	0.017
Aqueducs métalliques à section demi-circulaire lisse	0.011	0.012	0.013	0.015
Aqueducs métalliques à section demi-circulaire plissée	0.0225	0.025	0.0275	0.030
Canaux en terre droits et uniformes	0.017	0.020	0.0225	0.025
Canaux avec pierres, lisses et uniformes	0.025	0.030	0.033	0.035
Canaux avec pierres, rugueux et irréguliers	0.035	0.040	0.045	-
Canaux en terre à larges méandres	0.0225	0.025	0.0275	0.030
Canaux en terre dragués	0.025	0.0275	0.030	0.033
Canaux à fond en terre, côtés avec pierres	0.028	0.030	0.033	0.035
B) Cours d'eau naturels				
1) Propres, rives en ligne droite	0.025	0.0275	0.030	0.033
2) Idem 1 avec quelques herbes et pierres	0.030	0.033	0.035	0.040
3) Avec méandres, avec quelques étangs et endroits peu profonds, propres	0.035	0.040	0.045	0.050
4) Idem 3, l'eau à l'étiage, pente et sections plus faibles	0.040	0.045	0.050	0.055
5) Idem 3, avec quelques herbes et pierres	0.033	0.035	0.040	0.045
6) Idem 4, avec pierres	0.045	0.050	0.055	0.060
7) Zones à eau coulant lentement avec herbes ou fosses très profondes	0.050	0.060	0.070	0.080
8) Zones avec beaucoup de mauvaises herbes	0.075	0.100	0.125	0.150