

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

NATIONAL HIGHER SCHOOL FOR  
HYDRAULICS

"The MujahidAbdellah ARBAOUI"



المدرسة الوطنية العليا للري  
"المجاهد عبد الله عرباوي"

ⴰⵎⵓⵔⵉⵏ ⴰⵎⵓⵔⵉⵏ ⴰⵎⵓⵔⵉⵏ ⴰⵎⵓⵔⵉⵏ ⴰⵎⵓⵔⵉⵏ

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

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

**Option : CONCEPTION DES OUVRAGES HYDROTECHNIQUES**

**THEME :**

**PROTECTION DE LA VILLE DE OUED RIHANE COMMUNE  
KHEMIS MILIANA DANS LA WILAYA D'AIN DEFLA  
CONTRE LES INNONDATIONS**

**Présenté par :**  
**LABDI Amar**

**Devant les membres du jury**

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

**Session : Juin 2024**

# *Dédicace*

Du plus profond de mon cœur, je dédie ce travail en témoignage d'amour, de respect et de gratitude :

**À mes chers parents :**

**Abd el Kader et Hafida**, pour leur soutien, leur patience et leurs sacrifices tout au long de mes études et pendant ce projet. Je vous dois ce que je suis aujourd'hui et ce que je deviendrai demain. Je m'efforcerai toujours de rester votre fierté et de ne jamais vous décevoir. Que Dieu, le Tout-Puissant, vous préserve, vous accorde santé, bonheur et vous protège de tout mal.

**À mes chers frères et sœur :**

Zhor, Ahmed, Aziza, Hamou, Fatima, Omar

**À mes nièces et neveux :**

Nourhane, Abd EL Rahim, Nadjwa, Abd El ilah, Hafida, Anes

**A mes chers amis :**

Abd El Hakim, Mohamed El Amine, Alae Eeddin, Ilyas, Osman, Abd El Rahman, Nadir

**À tous ceux qui m'ont apporté leur aide :**

Ikhlef Roumaissa

# Remerciements

Tout d'abord, je souhaite remercier le Dieu tout puissant de m'avoir donné le courage et la volonté nécessaires pour accomplir ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers mon encadrant, **Mr. Bensalah Mohamed Draïdi**, pour son rôle crucial dans la réalisation de ce mémoire. Sa contribution, son expertise, ses conseils et son aide ont été inestimables.

Je souhaite exprimer ma sincère reconnaissance envers mes professeurs et enseignants, qui ont joué un rôle essentiel tout au long de mon parcours académique. Mes profonds remerciements vont également aux responsables et au personnel de l'École Nationale Supérieure de l'Hydraulique (ENSH) de Blida.

J'adresse mes remerciements et mon profond respect aux membres du jury, qui auront l'honneur d'évaluer ce travail.

À mes amis, qui ont partagé les hauts et les bas de ce voyage académique, je vous remercie du fond du cœur pour votre présence et votre amitié inestimable.

Je tiens également à exprimer ma profonde reconnaissance envers **moi-même**. Traverser des défis particulièrement complexes a nécessité une force intérieure et une détermination qui ont dépassé mes 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 à affronter avec confiance les défis futurs.

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

## الملخص :

يهدف هذا العمل إلى تطوير نظام لحماية مدينة واد الريحان غرب مدينة خميس مليانة ومصنع المواد المتفجرة من الفيضانات، وذلك من خلال تحديد الارتفاعات القصوى لمياه الفيضانات لضمان سلامة الموارد المادية والبشرية. شملت الدراسة عدة مراحل أساسية، بدأت بوصف خصائص منطقة الدراسة، تلتها دراسة جيولوجية وجيوتقنية لتحديد خصائص التربة. ثم تم إجراء دراسة هيدرولوجية مفصلة لتحليل تساقط الأمطار وتحديد معدل التدفق الأقصى لمياه الفيضانات. باستخدام برنامج HECRAS، تم إجراء نمذجة هيدروليكية لتحديد المناطق المهددة بالفيضانات وتقييم مخاطرها. بناءً على نتائج المحاكاة، تم اقتراح خيارات متنوعة للحماية وتم اختيار الخيار الأنسب من الناحية التقنية والاقتصادية لدراسته بالتفصيل.

**الكلمات المفتاحية :** تطوير نظام ، واد الريحان ، مصنع المواد المتفجرة ، الفيضانات ، نمذجة هيدروليكية ، المناطق المهددة بالفيضانات .

## Résumé :

Ce travail vise à développer d'un système d'aménagement hydraulique pour la protection de la ville d'Oued Rihane ouest Khemis Miliana et l'usine de matériaux explosifs Onex, en déterminant les hauteurs maximales des eaux de crue pour assurer la sécurité des ressources matérielles et humaines. L'étude comprend plusieurs étapes essentielles : la description des caractéristiques de la zone d'étude, suivie d'une étude géologique et géotechnique pour déterminer les propriétés du sol. Ensuite, une étude hydrologique détaillée a été réalisée pour analyser les précipitations et déterminer le débit maximal des eaux de crue. En utilisant le logiciel HECRAS, une modélisation hydraulique a permis d'identifier les zones menacées par les inondations et d'évaluer leurs risques. Sur la base des résultats de la simulation, diverses options de protection ont été proposées, et l'option la plus appropriée sur les plans technique et économique a été choisie pour une étude approfondie.

**Mots clés :** aménagement hydraulique, protection, inondations, crue, Oued Rihane, usine de matériaux explosifs Onex, Khemis Miliana.

## Abstract:

The aim of this work is to develop a hydraulic system for the protection of the town of Oued Rihane west of Khemis Miliana and the explosives factory Onex, by determining the maximum heights of floodwater to ensure the safety of material and human resources. The study comprises several essential stages: a description of the characteristics of the study area, followed by a geological and geotechnical study to determine the properties of the soil. Next, a detailed hydrological study was carried out to analyse rainfall and determine the maximum flow of floodwater. Using HECRAS software, hydraulic modelling was used to identify the areas at risk of flooding and to assess the risks. Based on the results of the simulation, various protection options were proposed, and the most technically and economically appropriate option was selected for further study.

**Keywords:** hydraulic system, protection, floodwater, Oued Rihane, explosives factory Onex, Khemis Miliana.

# Sommaire

<b>Chapitre I : Présentation de la zone d'étude</b> .....	3
I.1 Présentation de la zone étude .....	4
I.1.1 situation l'usine des matières explosives (Onex) .....	5
I.2 Climatologie .....	6
I.2.1 Températures .....	6
I.2.2 Vent .....	7
I.2.3 Les précipitations .....	8
I.2.4 La sismicité .....	9
<b>Chapitre II : Etude Géologique et Géotechnique</b> .....	11
II.1 Etude géologique .....	12
II.1.1 Géologie régionale .....	12
II.1.2 Stratigraphie .....	12
II.1.3 Les terrains constitutifs de la plaine du Haut-Chélif (Khemis Miliana) .....	13
II.1.4 Evolution paléogéographique et structurale .....	13
II.1.6 Aperçu tectonique et structural .....	15
II.1.7 Description lithologique des différentes fouilles .....	15
<b>II.2 Etude géotechnique</b> .....	15
II.2.1 Travaux de reconnaissanc .....	15
II.2.2 Essais de laboratoire .....	16
III.2.3 Résultats des essais de laboratoire .....	16
<b>Chapitre III : Etude hydrologique</b> .....	19
III.1 Bassin versant .....	20
III.1.1 Caractéristiques principales du bassin versant .....	20
III.1.2 Le relief .....	24
III.1.3 Etude du réseau hydrographique .....	32
III.2 Etude des crues .....	39
III.2.1 La série d'observation de la station hydrométrique .....	39
III.2.2 Détermination des débits maximums fréquentiels en utilisant la méthode de GRADEX ..	47
III.2.3 L'hydrogramme de crue .....	53
III.2.4 Choix de la crue du projet .....	56
<b>Chapitre IV : Diagnostic et modélisation du cours d'eau</b> .....	58
IV.1 Rappel de quelques notions .....	59
IV.1.1 Paramètres Hydraulique .....	59

IV.1.2 Paramètres géométriques .....	61
IV.2 Type d'écoulement .....	62
IV.2.1 Variable dans le temps .....	62
IV.2.2 Variabilité dans l'espace .....	63
IV.3 Régime d'écoulement .....	63
IV.4 Cours d'eau .....	65
IV.4.1 Les canaux naturels .....	65
IV.4.2 Les canaux artificiels .....	66
IV.5. Diagnostic et modélisation du cours d'eau non Aménagé .....	66
IV.5.1 Modélisation de l'écoulement .....	66
IV.5.2 Application d'HEC-RAS sur Oued Rihane .....	68
IV.6 La cartographie du risque d'inondation .....	77
IV.6.1 Carte des profondeurs .....	78
IV.6.2 Carte des vitesses .....	79
IV.6.3 Classes d'aléa .....	79
IV.6.4 Cartographie de la vulnérabilité .....	81
IV.6.5 Cartographie du risque .....	81
<b>Chapitre V : Études des variantes d'aménagement.</b> .....	<b>83</b>
V.1 Présentation des grandes orientations .....	84
V.1.1 La protection contre les crues .....	84
V.1.2 La protection contre l'érosion .....	85
V.2 Calcul hydraulique des canaux .....	86
V.2.1 Conditions de l'écoulement uniforme .....	86
V.2.2 Formules de calcul .....	86
V.2.3 Sélection des paramètres de dimensionnement .....	89
V.3 Étude des variantes .....	91
V.3.1 Canal en béton armé .....	91
V.3.2 Canal en gabions .....	98
V.3.3 Canal en enrochement .....	104
V.4 Choix de la variante d'aménagement .....	110
V.4.1 Recommandation .....	110
V.4.2 Résultat des cartes d'oued Rihane après l'aménagement .....	111
<b>Chapitre VI : Etude génie civil.</b> .....	<b>114</b>
VI.1 action et sollicitation .....	115
VI.1.1 Actions .....	115
VI.1.2 Sollicitations .....	117

VI.2 caractéristiques des matériaux .....	117
VI.2.1 Béton .....	117
VI.2.2 Les armatures .....	118
VI.3 Contraintes de calcul .....	118
VI.3.1 Béton .....	118
VI.3.2 Acier .....	118
VI.4 Etude des voiles .....	119
VI.4.1 Fonctionnement d'un voile .....	119
VI.4.2 Conception des voiles et des dalles massives .....	119
VI.4.3 Recommandations selon le RPA99 .....	119
VI.5 Etude de stabilité d'un canal .....	121
VI.5.1 Calcul des forces .....	121
VI.6 Le ferrailage du canal .....	129
VI.6.1 Rôle du Ferrailage .....	129
VI.6.2 Ferrailage des voiles .....	129
<b>Chapitre VII : Organisation de chantier.</b> .....	<b>132</b>
VII.1 Généralités .....	133
VII.1.1 Rôles et responsabilités des intervenants sur un chantier .....	133
VII.2 Devis quantitatif et estimatif du projet .....	134
VII.3 La Planification .....	135
VII.3.1 Définition .....	135
VII.3.2 Étapes de la planification .....	135
VII.3.3 Plannings des travaux .....	136
VII.3.4 Techniques de la planification .....	136
VII.3.5 Différentes méthodes basées sur le réseau .....	138
VII.3.6 Méthode de calcul PERT .....	139
VII.3.7 Diagramme de Gantt .....	140

# Liste des tableaux

## Chapitre I : Présentation de la zone d'études.

**Tableau I.1 :** Températures mensuelles minimales, moyennes et maximales enregistrées à la station choisie en (°C) (1986 / 2022). (Source : ONM).

**Tableau I.2 :** Moyennes mensuelles de la vitesse du vent à la station de Barrage Herraça (km/h) (1986/2022).

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

## Chapitre II : Etude Géologique et Géotechnique.

**Tableau II.1 :** Quantité des Travaux.

**Tableau II.2 :** Résultats d'essai granulométrique (Source : CTTTP).

**Tableau II.3 :** Résultats d'essai Limites d'Atterberg (Source : CTTTP).

**Tableau II.4 :** Résultats essai de cisaillement rectiligne (Source : CTTTP).

## Chapitre III : Etude hydrologique.

**Tableau III.1 :** Les paramètres hydro morpho métriques du bassin versant d'Oued Rihane.

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

**Tableau III.3 :** caractéristiques altimétriques du bassin versant d'Oued Rihane.

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

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

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

**Tableau III.7 :** Résultats des calculs des pentes et du dénivelé spécifique du bassin versant de l'Oued Rihane.

**Tableau III.8:** Résultats de calculs de temps de concentration.

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

**Tableau III.10:** Paramètres hydrographiques d'Oued Rihane.

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

**Tableau III.12:** Caractéristique de la station hydrométrique « El Ababsa » (Source : ANRH).

**Tableau III.13:** Caractéristiques dès les station Pluviométrique (Source : ANRH).

**Tableau III.14:** Série des débits maximales annuels prise de la station 011715 (Source : ANRH).

**Tableau III.15:** modèles fréquentiels et leurs validités.

**Tableau III.16:** Résultats d'ajustement à la loi de Gumbel.

**Tableau III.17:** Comparaison des caractéristiques entre la loi de GUMBEL et l'échantillon.



**Tableau III.18:** Résultats d'ajustement à la loi de Log normal.

**Tableau III.19:** Comparaison des caractéristiques de la loi de Log normal et de l'échantillon.

**Tableau III.20 :** Résultats du test de  $\chi^2$ .

**Tableau III.21:** Caractéristique des stations pluviométriques (Source : ANRH).

**Tableau III.22:** Précipitations maximales journalières de la station pluviométrique de la station de Herraiza 011718 (Source : ANRH).

**Tableau III.23:** Résultats d'ajustement par la loi de Gumbel des pluies maximales journalières de la station pluviométrique de la station de Herraiza 011718

**Tableau III.24:** Résultat de calcul pour la station de Herraiza pour les différentes périodes de retour.

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

**Tableau III.26:** Coefficient de forme de l'hydrogramme de crue " $\delta$ ".

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

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

#### **Chapitre IV : Diagnostic et modélisation du cours d'eau.**

**Tableau IV.1** Principaux éléments hydrauliques pour toutes les stations (Source : Logiciel HEC-RAS)

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

#### **Chapitre V : Études des variantes d'aménagement.**

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

**Tableau V.2 :** Revanches utilisées (Degoutte, 2012).

**Tableau V.3 :** Valeurs de vitesse moyenne limite d'érosion pour les lits consolidés (Degoutte, 2012).

**Tableau V.4 :** Dimensions de l'aménagement en béton de l'Oued Rihane (Amont).

**Tableau V.5 :** Dimensions de l'aménagement en béton de l'Oued Rihane (Aval).

**Tableau V.6 :** Résultats de la simulation d'écoulement d'un canal en béton d'Oued Rihane (Source : HECRAS).

**Tableau V.7 :** Devis de la variante canal en béton armé en amont d'oued Rihane.

**Tableau V.8 :** Devis de la variante canal en béton armé en aval d'oued Rihane.

**Tableau V.9 :** Devis de la variante canal trapézoïdale en béton armé Totale d'oued Rihane.

**Tableau V.10 :** Les résultats de calcul des nombres de caisses pour le canal en gabion en amont d'oued Rihane.

**Tableau V.11 :** Résultats de calcul des nombres de caisses pour le canal en gabion en aval d'oued Rihane.

**Tableau V.12 :** Résultats de la simulation d'écoulement d'un canal gabionné d'Oued Rihane (Source : HECRAS).

**Tableau V.13 :** Devis de la variante canal en gabion en amont d'oued Rihane.

**Tableau V.14** : Devis de la variante canal en gabion en aval d'oued Rihane.

**Tableau V.15** : Devis de la variante canal en gabion Totale d'oued Rihane.

**Tableau V.16** : Dimensions de l'aménagement en enrochement de l'Oued Rihane (Amont).

**Tableau V.17** : Dimensions de l'aménagement en enrochement de l'Oued Rihane (Aval).

**Tableau V.18** : Résultats de la simulation d'écoulement d'un canal en enrochement d'Oued Rihane (Source : HECRAS).

**Tableau V.19** : Sections d'enrochement.

**Tableau V.20** : Volumes d'enrochement.

**Tableau V.21** : Sections du géotextile.

**Tableau V.22** : Devis de la variante canal en enrochement Totale d'oued Rihane.

### **Chapitre VI : Etude génie civil.**

**Tableau VI.1** : Caractéristiques mécaniques.

**Tableau VI.2** : Résultat des calcul les charges et les surcharges.

### **Chapitre VII : Organisation de chantier.**

**Tableau VII.1** : Devis de la variante canal trapézoïdale en béton armé Totale d'oued Rihane.

**Tableaux VII.2** : Liste des opérations avec leurs durées.

# List des figures

## Chapitre I : Présentation de la zone d'études

**Figure I.1** : Localisation de la commune de Khemis Miliana.

**Figure I.2** : Localisation de l'usine des matières explosives (Onex).

**Figure I.3** : Présentation du tracé d'oued Rihane.

**Figure I.4** : Températures mensuelles moyennes, minimales et maximales à la station choisie (1986-2022).

**Figure I.5** : Distribution des vitesses du vent en m/s (1986-2022).

**Figure I.6** : Évolution des précipitations mensuelles interannuelles.

**Figure I.7** : Classification sismique des wilayas d'Algérie (Addenda, 2003).

## Chapitre II : Etude Géologique et Géotechnique

**Figure II.1** : extrait de carte géologique de Miliana n° 84 au 1/50.000°.

## Chapitre III : Etude hydrologique

**Figure III.1** : Présentation du bassin versant d'étude.

**Figure III.2** : Différents types des BV selon le coefficient de Gravelius KG.

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

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

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

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

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

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

**Figure III.9** : Graphique d'ajustement à la loi de Gumbel de la station 011715.

**Figure III.10** : Graphique d'ajustement à la loi de Log normal de la station 011715.

**Figure III.11** : Comparaison entre les deux lois d'ajustement de la station 011715.

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

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

**Figure III.14** : Hydrogramme de crue du projet pour les deux stations pluviométriques Khemis 011717 et Sidi Lakhdar 011711.

## Chapitre IV : Diagnostic et modélisation du cours d'eau.

**Figure IV.1 :** Schéma représente la dimensionnalité et directionnalisé de l'écoulement (Source : Roland O. YONABA - 2015).

**Figure IV.2 :** Schéma représente la pente.

**Figure IV.3 :** Coupe transversale d'un canal naturel.

**Figure IV.4 :** Écoulement permanent.

**Figure IV.5 :** Écoulement non permanent.

**Figure IV.6 :** Schéma illustrant les différents types d'écoulements.

**Figure IV.7:** Diagramme illustrant les divers types de régimes d'écoulement.

**Figure IV.8 :** Cours d'eau dans son environnement (Source : Dr Habibi Brahim - 2013).

**Figure IV.9 :** Canaux artificiels (Source : TOUMI Abdelouaheb - 2016).

**Figure IV.10 :** Interface utilisateur du logiciel HEC-RAS (version 6.5).

**Figure IV.11 :** TIN (réseau irrégulier triangulé) de la zone d'étude.

**Figure IV.12 :** Insertion fichier de projection.

**Figure IV.13 :** Définition du tracé de l'oued Rihane et des sections en travers de l'oued.

**Figure IV.14 :** Introduction des valeurs de Manning (terrain naturel).

**Figure IV.15 :** Introduction des données hydrauliques d'Oued Rihane.

**Figure IV.16 :** Définition des conditions aux limites.

**Figure IV.17 :** Le profil en long du cours d'eau lors d'une crue centennale à l'état naturel.

**Figure IV.18 :** Représentation en trois dimensions de l'oued Rihane.

**Figure IV.19 :** Courbe de tarage du tronçon modélisé d'Oued Rihane.

**Figure IV.20 :** Les profils en travers de quatre sections choisies de l'oued Rihane.

**Figure IV.21 :** Réseau des profondeurs d'eau pour une crue centennale..

**Figure IV.22 :** Carte de vitesse d'eau pour la période de retour 100 ans.

**Figure IV.23 :** Carte de l'aléa pour la crue centennale.

**Figure IV.24 :** Cartes des risques d'inondation de la zone d'étude.

## **Chapitre V : Études des variantes d'aménagement.**

**Figure V.1 :** Éléments géométriques pour des sections ouvertes diverses (Graf, 2000).

**Figure V.2 :** Canal trapézoïdale en béton.

**Figure V.3 :** La profondeur normal du tronçon d'Oued Rihane.

**Figure V.4 :** Les dimensions du canal trapézoïdale en amont d'Oued Rihane.

**Figure V.5 :** Les dimensions du canal trapézoïdale en aval d'Oued Rihane.

**Figure V.6 :** Profils en travers d'un canal trapézoïdale pour une crue de 100 ans pour le tronçon amont d'Oued Rihane.

**Figure V.7 :** Profils en travers d'un canal trapézoïdale pour une crue de 100 ans pour le tronçon aval d'Oued Rihane.

**Figure V.8 :** Coupe en travers d'un canal en gabion (Source : IKHLEF Roumaïssa).

**Figure V.9 :** Profils en travers d'un canal en gabion pour une crue centennale pour le tronçon amont d'Oued Rihane.

**Figure V.10 :** Profils en travers d'un canal en gabion pour une crue centennale pour le tronçon aval d'Oued Rihane.

**Figure V.11 :** Dimensions du canal trapézoïdale en amont d'Oued Rihane.

**Figure V.12 :** Les dimensions du canal trapézoïdale en aval d'Oued Rihane.

**Figure V.13 :** Profils en travers d'un canal enrochement pour une crue centennale pour le tronçon amont d'Oued Rihane.

**Figure V.14 :** Profils en travers d'un canal enrochement pour une crue centennale pour le tronçon aval d'Oued Rihane.

**Figure V.15 :** Canal en enrochement (Source : Karim Kadi).

**Figure V.16 :** Vue en 3D en amont d'Oued Rihane.

**Figure V.17 :** Vue en 3D en aval d'Oued Rihane.

**Figure V.18:** Carte de profondeur d'eau D'oued Rihane après aménagement pour  $T = 100$  ans.

**Figure V.19 :** Carte des risques D'oued Rihane après aménagement pour  $T = 100$  ans.

## **Chapitre VI : Etude génie civil.**

**Figure VI.1 :** Schéma statique des efforts.

**Figure VI.2 :** La géométrie du canal.

**Figure VI.3 :** Schéma de coupe longitudinale du voile.

## **Chapitre VII : Organisation de chantier.**

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

**Figure VII.2 :** Schéma représentatif de la méthode de PERT.

**Figure VII.3 :** Réseau de planification des tâches par la méthode CPM.

**Figure VII.4 :** Chronogramme du projet par le logiciel GANTT Project.

## Introduction Générale

Les inondations sont parmi les catastrophes naturelles les plus dommageables. Bien qu'elles n'aient pas l'ampleur de certaines catastrophes telles que les volcans ou les ouragans tropicaux, elles constituent le risque le mieux distribué sur la planète (*White W.R., 1999*). De plus, leur grande fréquence dans certaines régions du globe, leur dépendance face aux changements climatiques, et la pression démographique de plus en plus forte sur les rives des cours d'eau en font des événements de plus en plus préoccupants et difficiles à gérer. Le problème des inondations se complexifie d'autant plus qu'il touche à un élément naturel à la base même de la culture et de l'économie de la plupart des peuples. En effet, chacun sait que les rivières et les fleuves ont été et sont encore les éléments fondamentaux du développement des civilisations. Le fait que ces éléments soient fondamentaux accentue le nombre de sphères de la société qui sont concernées par le risque ou le danger qu'ils représentent. L'inondation n'est pas seulement une question technique, c'est aussi un problème qui touche de près les domaines économiques, sociaux, légaux, environnementaux, etc. (*Pierrick Blin, 2001*).

A travers le monde, les inondations représentent plus de 50 % des catastrophes naturelles et causent en moyenne 20 000 morts par an. En Algérie, les terres sont soumises à des inondations fréquentes dont les conséquences se traduisent par la dégradation des voies de communication, l'inondation des terres agricoles et parfois même l'inondation de certaines agglomérations, entraînant parfois des pertes humaines (*Morsli, 2012*). En moyenne, on enregistre plus de 30 cas d'inondations par an (*Tabet, 2008*).

L'oued Rihane, comme toutes les grandes vallées algériennes, est considéré comme l'un des cours d'eau les plus redoutables car il traverse le centre de la ville de Wadi Rihane, à l'ouest de Khemis Miliana. Il traverse également du nord au sud l'usine de matériaux explosifs Onex, l'une des plus rares et dangereuses d'Algérie en raison de la nature des travaux impliquant des matériaux très sensibles. Une inondation dans cette usine peut avoir des conséquences catastrophiques. L'eau pourrait déclencher des explosions en entrant en contact avec des substances sensibles, causant des destructions massives et des pertes humaines. Les infrastructures de l'usine, y compris les équipements et les bâtiments, seraient gravement endommagées, interrompant la production et entraînant des réparations coûteuses. Les produits chimiques pourraient se disperser dans l'environnement, contaminant le sol et l'eau, et provoquant des problèmes de santé pour les travailleurs et les résidents. L'impact économique serait significatif. Les efforts d'évacuation et de secours seraient compliqués, augmentant les risques pour les vies humaines. Les coûts financiers liés aux réparations, à la gestion des crises et à la décontamination seraient élevés, laissant envisager des crues parmi les plus périlleuses en Algérie et peut-être même en Afrique.

Pour assurer la protection des populations et de leurs moyens de subsistance, il est essentiel d'instaurer une gestion efficace des risques d'inondation. De plus en plus, l'accent est mis sur les mesures basées sur la nature pour faire face aux risques d'inondation (*Bregje K. van et al., 2017*).

L'objectif général de ce travail est de déterminer la crue du projet, Cette étude ainsi que l'aménagement du cours d'eau ont nécessité l'utilisation du logiciel HECRAS qui permet de simuler les inondations à différentes périodes des retours de 25 ans, 50 ans et 100 ans (Yahyaoui, 2012), Cela nous mène à poser la problématique suivante : Comment les collectivités peuvent-elles améliorer leur résilience face aux risques d'inondation en intégrant des stratégies de gestion durable des eaux pluviales et d'aménagement du territoire ?

Ce projet ambitionne modestement de répondre à ces questions et à bien d'autres. Il repose sur une étude hydrologique, une simulation des flux dans leur état naturel, des calculs hydrauliques et une conception assistée par ordinateur. Le but ultime est de proposer des solutions d'aménagement tout en préservant l'environnement de la zone étudiée. Le travail est structuré en sept chapitres, organisés comme suit :

**Chapitre 01** : Présente la zone d'étude et établit les caractéristiques climatiques pertinentes pour l'aménagement du cours d'eau Oued Rihane.

**Chapitre 02** : Présente la géologie de la zone d'étude, y compris la géomorphologie et la morphologie du site, ainsi que les essais géotechniques réalisés pour obtenir les caractéristiques du sol et de la région nécessaires à la conception appropriée de l'aménagement d'Oued Rihane.

**Chapitre 03** : Dans un premier temps, présentez les caractéristiques physiologiques et géomorphologiques des deux sous-bassins versants en utilisant des logiciels SIG tels qu'Arcmap, Global Mapper et Google Earth. Ces systèmes sont conçus pour recueillir, stocker, traiter, analyser et visualiser toutes sortes de données spatiales, géographiques et topographiques de la zone d'étude. Dans la deuxième partie, une étude hydrologique est réalisée pour prévoir les débits de crue de l'Oued Rihane 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.

**Chapitre 04** : Se consacre à l'évaluation de l'état actuel des oueds, en mesurant les hauteurs des tirants d'eau en fonction des débits prévus, basés sur les résultats précédemment obtenus. 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 approche permet de déterminer les profondeurs d'eau correspondantes et d'identifier les zones à risque d'inondation nécessitant des aménagements.

**Chapitre 05** : Élabore le dimensionnement hydraulique de la section d'écoulement appropriée en proposant plusieurs variantes d'aménagement à l'aide du logiciel FLOWMASTER. De plus, une estimation financière de l'aménagement recommandé est réalisée.

**Chapitre 06** : Présente la vérification de la stabilité de la variante choisie face aux séismes en utilisant deux méthodes (classique et celle de l'Eurocode 7) et procède le ferrailage de la variante.

**Chapitre 07** : Propose une étude d'organisation de chantier dans le but de superviser le bon déroulement du projet, offrant ainsi une estimation du coût et du délai de réalisation de l'aménagement.

# **Chapitre I : Présentation de la zone d'étude**



## Introduction :

Pour mettre en place un système de protection contre les inondations pour une ville, il est essentiel de commencer par comprendre sa situation géographique, le climat de la région, la morphologie du terrain, ainsi que la densité et l'occupation de la population. Ces informations sont cruciales pour évaluer la vulnérabilité de la zone aux inondations et choisir le type d'aménagement le plus approprié pour assurer la sécurité de la ville. Dans ce contexte, le premier chapitre présente l'étude de la partie amont de l'oued Rihane, du côté de l'usine des matières explosives (Onex), ainsi que de la partie aval située à l'ouest de Khemis Miliana, du côté de la ville et de l'oued Rihane.

### I.1 Présentation de la zone études :

La ville de l'Oued Rihane se trouve à l'ouest de Khemis Miliana, située à 30 km à l'est du chef-lieu de la wilaya d'Ain Defla. Cette région est caractérisée par des collines au relief accidenté du Djebel Zaccar, s'étendant vers la vaste plaine du Haut Cheliff. Khemis Miliana, avec ses 5800 hectares, dont 494,70 hectares sont occupés par des peuplements forestiers, est bordée au nord par la commune de Miliana, à l'ouest par celle de Sidi Lakhdar, au sud par Bir Ouled Khelifa et Ain Soltane, et à l'est par Hoceinia et Ain Soltane. Ces limites géographiques et administratives définissent le cadre de notre étude axée sur la protection contre les inondations dans cette région.

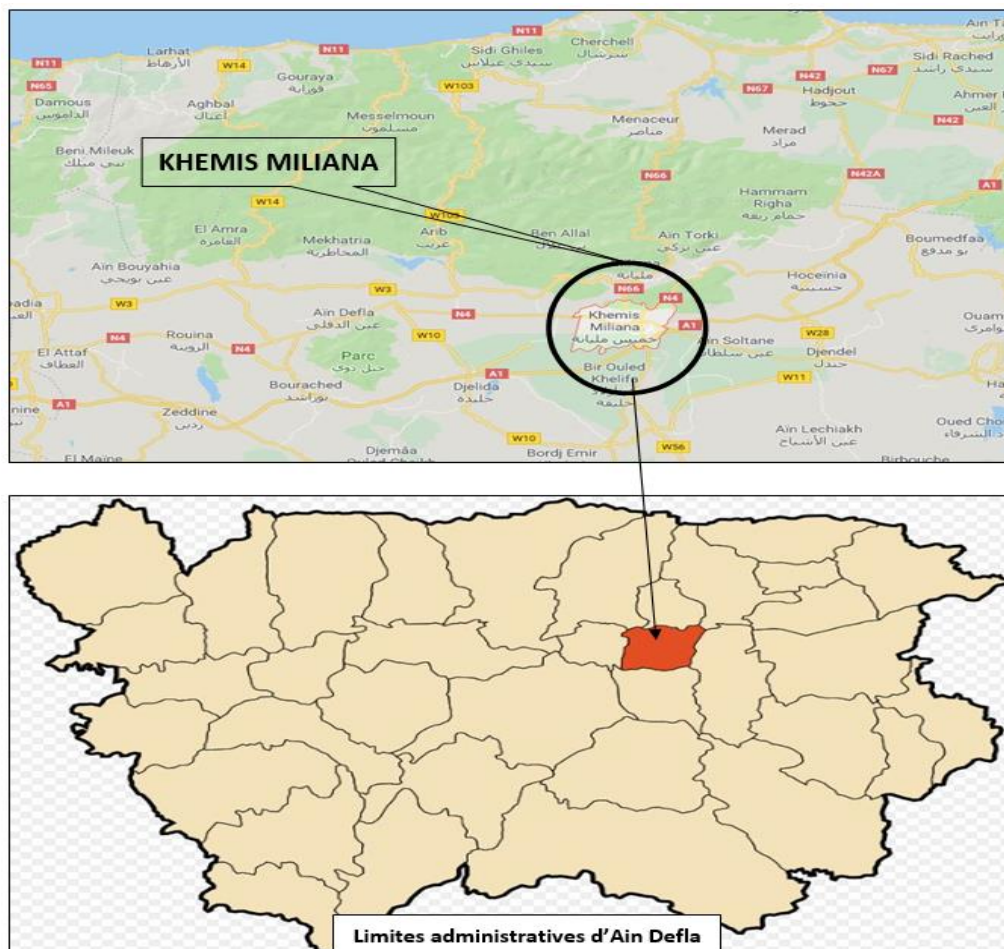
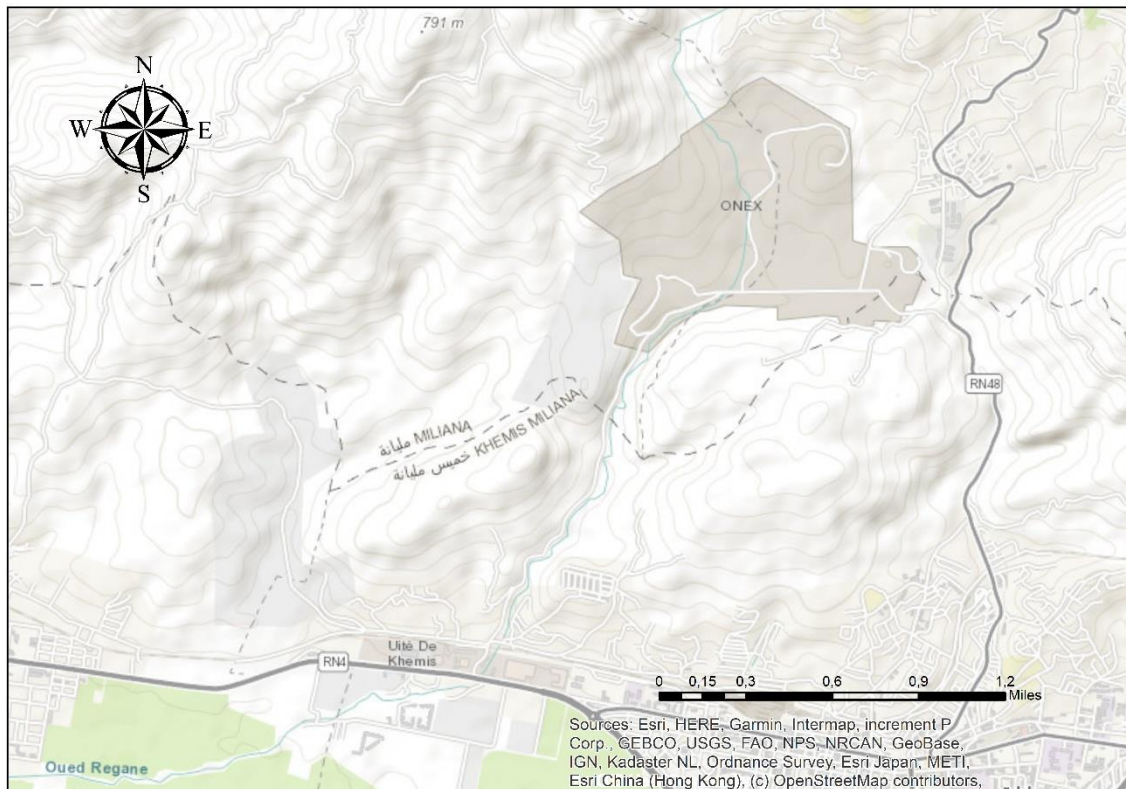


Figure I.1 : Localisation de la commune de Khemis Miliana.

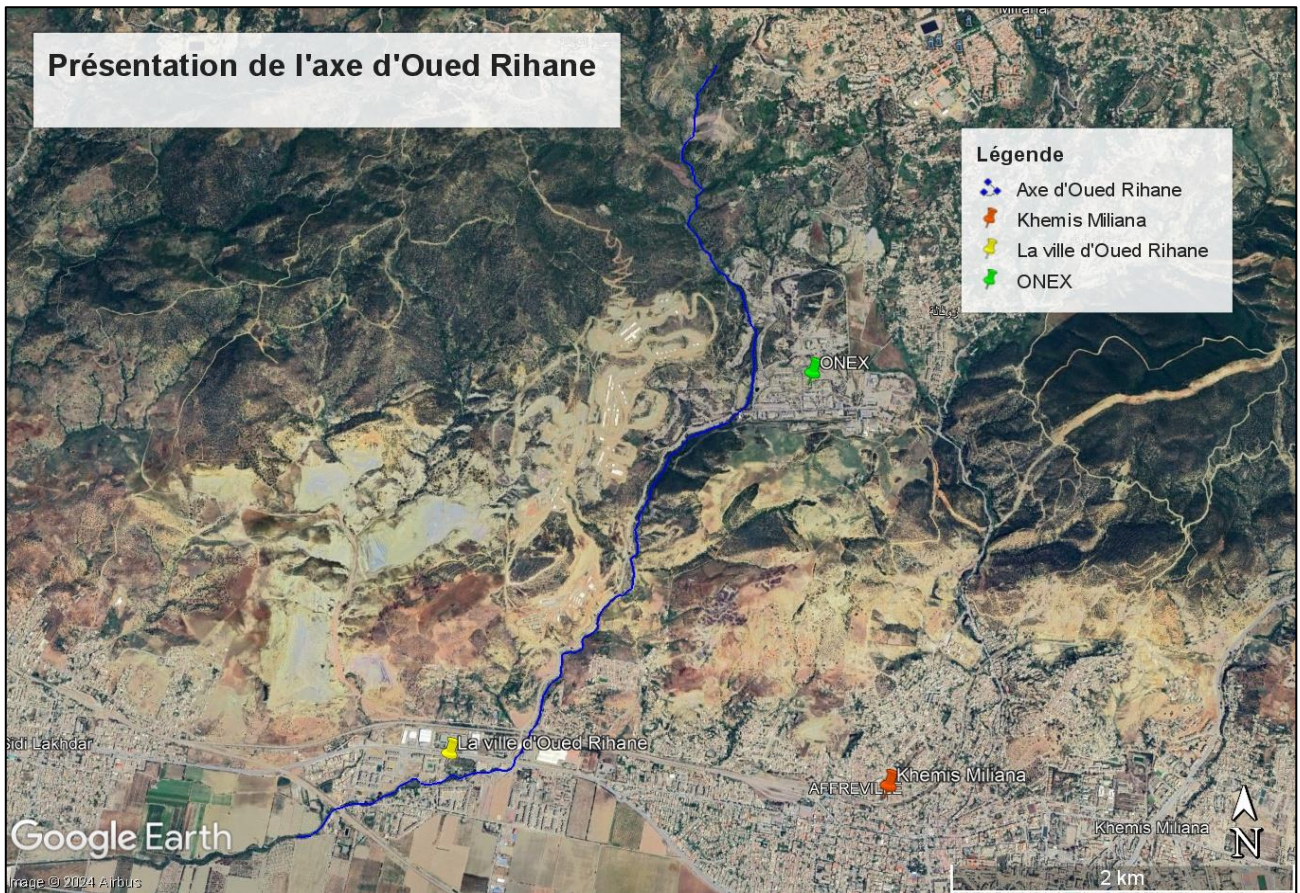
### I.1.1 situation l'usine des matières explosives (Onex) :

La région autour de ONEX, située près de Khemis Miliana dans la wilaya d'Aïn Defla, en Algérie, est caractérisée par la Forêt de Sidi Sebaa et le mont Djebel Zaccar. Les principales localités sont Khemis Miliana et Miliana, où se trouvent également le sanctuaire de Sidi M'Hamed et Oued Rihane. ONEX, un cours d'eau long de 7,04 kilomètres, traverse près de la Commune de Khemis Miliana, dans la Daïra de Miliana. Les coordonnées géographiques de cette région sont approximativement Latitude : 36°17'16.08"N et Longitude : 2°12'38.16"E. Ces détails géographiques sont pertinents pour le fabricant ONEX.



**Figure I.2 :** Localisation de l'usine des matières explosives (Onex).

La figure ci-dessous illustre la localisation géographique de l'Axe de l'Oued Rihane.



**Figure I.3 :** Présentation du tracé d’oued Rihane.

## **I.2 Climatologie :**

L'étude de la climatologie est cruciale car elle permet de mieux comprendre les phénomènes hydrologiques en analysant la pluviométrie, les températures, le vent, les jours de sirocco (vent très chaud et sec, chargé de poussières) et le gel. Les données climatologiques sont fournies par différents secteurs spécialisés dans le relevé, le traitement et le stockage des données. L'ONM (Office National de Météorologie) fournit les données sur la température, la vitesse du vent et l'évaporation, tandis que la pluviométrie est relevée par l'ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques) de la wilaya de Blida.

### **I.2.1 Températures :**

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*).

Le tableau ci-dessous présente les températures minimales, moyennes et maximales mensuelles enregistrées à la station sélectionnée sur une période de 36 ans (1986-2022).

**Tableau I.1** Températures mensuelles minimales, moyennes et maximales enregistrées à la station choisie en (°C) (1986 / 2022). (Source : ONM).

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
T <sub>moy</sub> (°C)	30,9	19,4	13,1	12,2	10	12,4	14,6	16	23,3	30	32,3	29,7
T <sub>min</sub> (°C)	11	7,6	5,6	22	12,3	12	11,5	4,4	9,6	16,4	19	17
T <sub>max</sub> (°C)	44	33,6	28,4	24	23,6	26	27,4	31,2	39,6	45	49	43,6

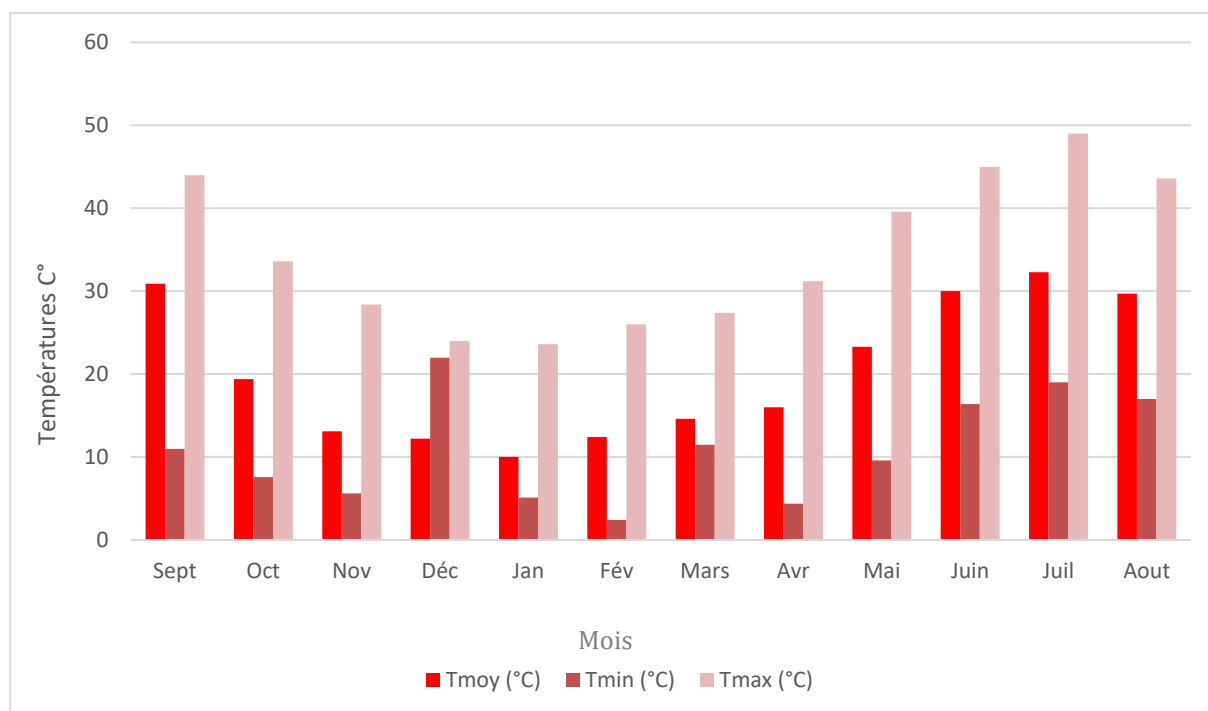
Avec :

T<sub>min</sub> : Température minimale mensuelle (°C);

T<sub>moy</sub> : Température moyenne mensuelle (°C);

T<sub>max</sub> : Température maximale mensuelle (°C).

L'analyse des températures mensuelles sur une période de 36 ans (1986-2022) révèle que le mois de février enregistre des températures minimales pouvant descendre jusqu'à 2,4°C, tandis que les températures maximales atteignent 49°C en juillet et août. La température moyenne interannuelle est de 20,3°C.



**Figure I.4 :** Températures mensuelles moyennes, minimales et maximales à la station choisie (1986-2022) (Source : ONM).

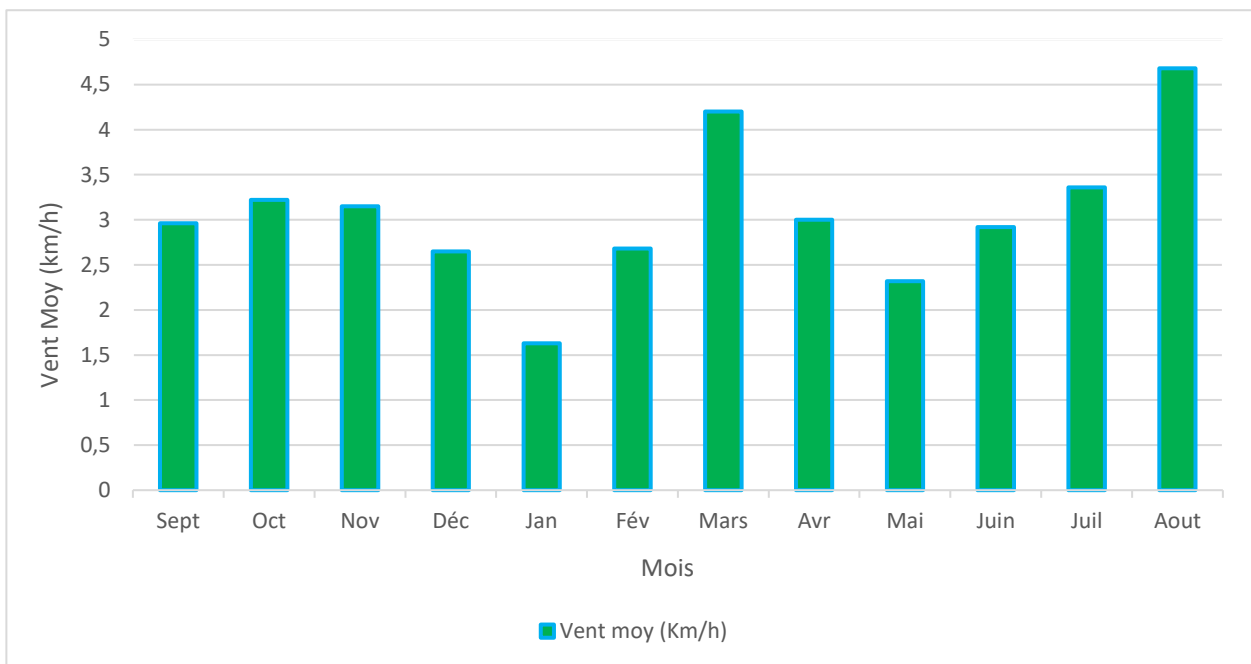
### I.2.2 Vent :

L'analyse des vents est essentielle pour la conception des infrastructures et dans le domaine de l'hydraulique. Il convient de connaître leur répartition mensuelle quant à leur vitesse et leur fréquence sans pour autant négliger leur direction (*Touaibia, 2015*).

Le tableau ci-dessous Les vitesses moyennes du vent moyen enregistrées à la station choisie sur une période de 36 ans (1986-2022).

**Tableau I.2** Moyennes mensuelles de la vitesse du vent à la station de Barrage Herraза (km/h) (1986/2022). ( Source : ONM )

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
Vent moy (Km/h)	2,96	3,22	3,15	2,65	1,63	2,68	4,2	3	2,32	2,92	3,36	4,68



**Figure I.5** Distribution des vitesses du vent en m/s (1986-2022) (Source : ONM).

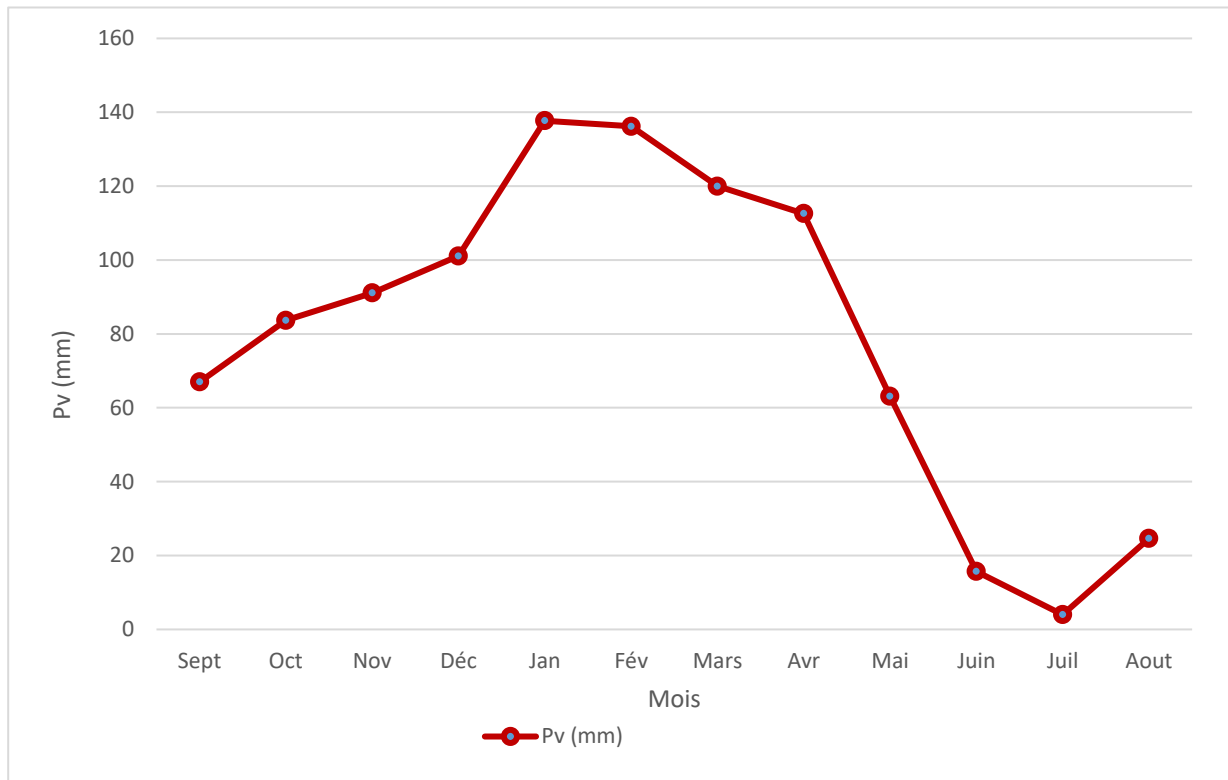
### I.2.3 Précipitations :

Les précipitations se réfèrent à toutes les eaux météorologiques collectées par un bassin versant ou une surface spécifique. 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*).

Le tableau ci-dessous Les précipitations enregistrées à la station Barrage Herraза sur une période de 36 ans (1986-2022).

**Tableau I.3** Répartition des pluies mensuelles interannuelles de la station pluviométrique 011718 (Source : ANRH Blida).

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
Pv (mm)	67	83,7	91,1	101,1	137,7	136,2	120	112,6	63,1	17,5	4	24,6

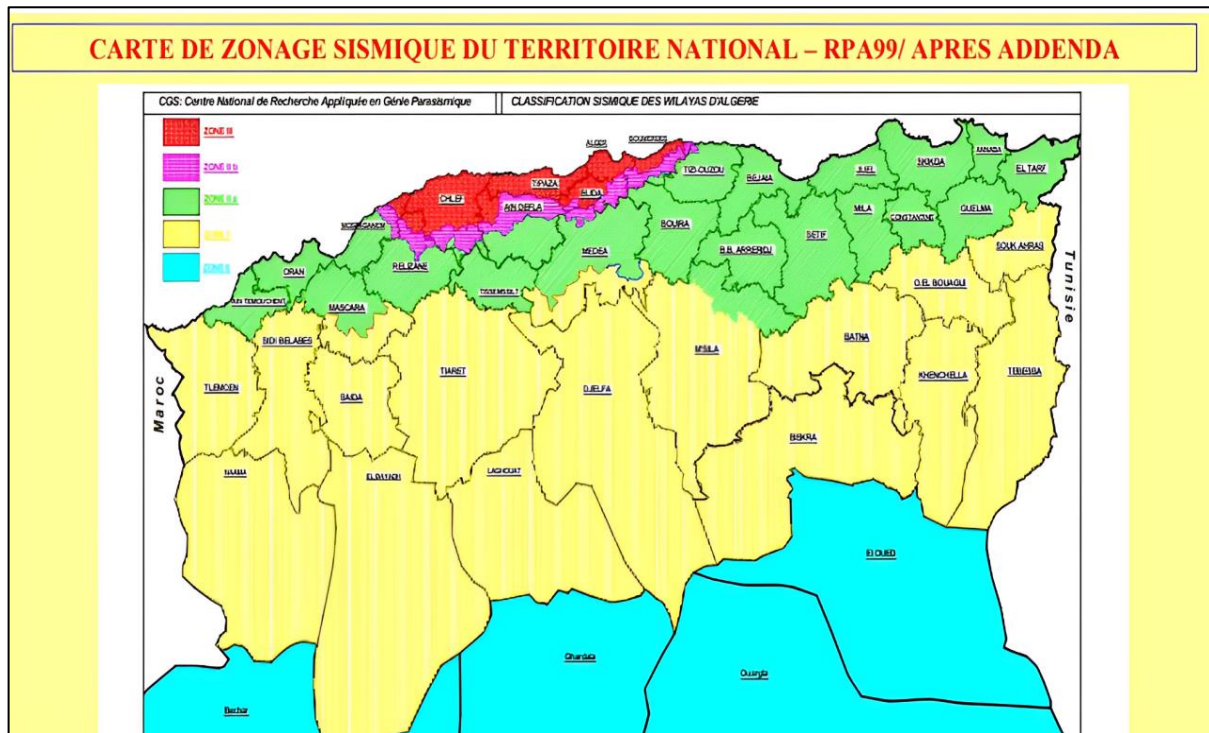


**Figure I.6** Evolution de la pluviométrie mensuelle interannuelles ( Source : ANRH Blida ).

#### I.2.4 Sismicité :

En termes de risque sismique, l'Algérie, en raison de sa position dans une zone de convergence des plaques, est une région à risque élevé. Tout au long de son histoire, elle a connu de nombreux séismes destructeurs. Le territoire national est classé en cinq zones de sismicité croissante, définies comme suit :

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



- La figure ci-dessus montre que notre zone d’étude est classée en zone II.b : **une zone à sismicité moyenne.**

### Conclusion :

Ce chapitre introductif sur la zone d’étude permet de développer une compréhension approfondie de la région sous tous ses aspects (climatiques, topographiques, etc.), ce qui facilite la compréhension des véritables causes des inondations, qu’il s’agisse des oueds, des plaines ou de leur interaction. Pendant les périodes de crue, cette analyse aide également à anticiper leur comportement. De plus, elle permet d’évaluer les dommages causés et de fournir une première idée des actions à envisager avant de commencer les études hydrologiques et hydrauliques.

# **Chapitre II : Etude Géologique et Géotechnique**



## **Introduction :**

Pour garantir la protection contre les inondations de la ville d'Oued Rihane et de l'usine Onex contre les menaces liées à l'oued Rihane, il est essentiel de concevoir et dimensionner un système d'aménagement sécurisé conforme aux normes locales. Cela nécessite une étude approfondie de la géologie et de la géotechnique pour comprendre la nature et les propriétés physico-chimiques du sol. Cette analyse repose sur des observations sur le terrain, des essais de reconnaissance in-situ et en laboratoire, ainsi que sur une interprétation précise des cartes géologiques disponibles. Ce chapitre présente une évaluation détaillée de la géologie et de la géotechnique de la zone, couvrant la partie amont de l'usine Onex et la partie aval de la ville d'Oued Rihane. L'objectif principal est de formuler des recommandations préventives et correctives fondées sur une compréhension approfondie des caractéristiques géologiques, géomorphologiques et géotechniques spécifiques à cette région. Ces mesures visent à réduire les risques d'inondations et à renforcer la résilience de la ville d'Oued Rihane ainsi que de l'usine Onex face aux événements hydrologiques extrêmes.

## **II.1 Etude géologique :**

### **II.1.1 Géologie régionale :**

Plaine du Haut-Chélif, à laquelle correspond la ville Khemis Miliana, est décrite commettant une zone déprimée à sédimentation récente Mio-Plio-Quaternaire. Elle est traversée d'Est en Ouest par l'oued Chélif qui entre dans la plaine par le seuil de Djendel et en sort par celui du Doui, La partie Nord de la plaine est dominée par une ligne de reliefs que forment le Djebel Gontas (871 m), le massif des Zaccars (1579 et 1532 m) et des Aribis (Littré). Elle appartient au Tell septentrional, La partie Sud est limitée par les premiers contreforts de l'Ouarsenis. Elle appartient au Tell méridional, Les pointements jurassico-primaires des Zaccars, Doui et Aribis constituent l'autochtone épi métamorphique à schistosité anté-nappe sur lequel repose l'allochtone caractérisé par des nappes de charriage à matériel crétacé. Ces nappes venant du Nord se sont mises en place au Miocène inférieur, Le bassin du Haut-Chélif correspond à un sillon intra montagneux subsident, dans lequel l'érosion des reliefs environnants et les transgressions successives ont permis le dépôt de fortes épaisseurs de sédiments Néogènes et Quaternaires.

### **II.1.2 Stratigraphie :**

Les terrains qui constituent le substratum anté-Miocène sont formés de schistes argileux siluro-dévonien (Primaire), de poudingues, de schistes et quartzites permo-triasiques.

Le Trias est formé de dolomies, cargneules et de calcaires dolomitiques, d'épaisseur et d'extension réduite. Ces terrains affleurent à l'Ouest de la plaine, dans le massif du Doui et au Nord dans le Zaccar, Le Jurassique est essentiellement calcaire. Il affleure au Doui où il est représenté par des dolomies d'extension réduite. Dans le Zaccar où il présente une forte épaisseur (700 m environ), le Jurassique est formé de calcaires massifs azoïques, de schistes gréseux et de marno-calcaires au sommet. Ces calcaires sont souvent dolomités, Le reste du matériel anté-Miocène qui affleure largement sur les bordures Nord et Sud de la plaine, est représenté par des terrains Crétacés allochtones. Le Néocomien est formé d'argile schisteuse d'épaisseur 800 m environ au Nord et à l'Ouest des Zaccars. L'Albien présente le faciès flysch.

Le Cénomaniens est calcaire et marno-calcaire. Le Sénonien est marneux avec des intercalations de bancs calcaréo-marneux.

### II.1.3 Les terrains constitutifs de la plaine du Haut-Chéelif (Khemis Miliana) :

Les formations existant dans l'oued Rihane sont essentiellement représentées par des dépôts de marnes, de grès et d'alluvions qui se sont accumulés dans le bassin subsident durant tout le Mio-Plio-Quaternaire.

Distinction des couches sédimentaires, du bas vers le haut de la série (de la plus ancienne vers la plus récente) :

- **Le Miocène inférieur** : Il est discordant sur le substratum anté-Néogène. Il représente le Burdigalien qui débute par une série conglomératique de base puis se termine par une série marneuse Cartennienne.
- **Le Miocène supérieur** : Il succède en continuité de sédimentation au Miocène inférieur.
- **Le Pliocène** : Le bassin du Haut-Chéelif est soumis, vers la fin du Miocène, à un vaste remblaiement qui l'exonde progressivement. La régression est matérialisée par l'accumulation de grès et conglomérats.
- **Le Quaternaire** : Il se divise en trois (03) niveaux bien distincts :
  1. **Le Quaternaire ancien** : Il est formé de deux niveaux qui se superposent comme suit :
    - ✓ **Les alluvions argileuses à la base** : Tout d'abord, il y a une couche d'argile brune et graveleuse.
    - ✓ **Les alluvions grossières** : Ce niveau est constitué d'amas de galets ou blocs.
  2. **Le Quaternaire récent** : Il est représenté par des limons bruns et des argiles de 10 à 20 m d'épaisseur discordant sur les conglomérats du Quaternaire ancien. Il recouvre les zones les plus basses de la vallée.

### II.1.4 Evolution paléogéographique et structurale :

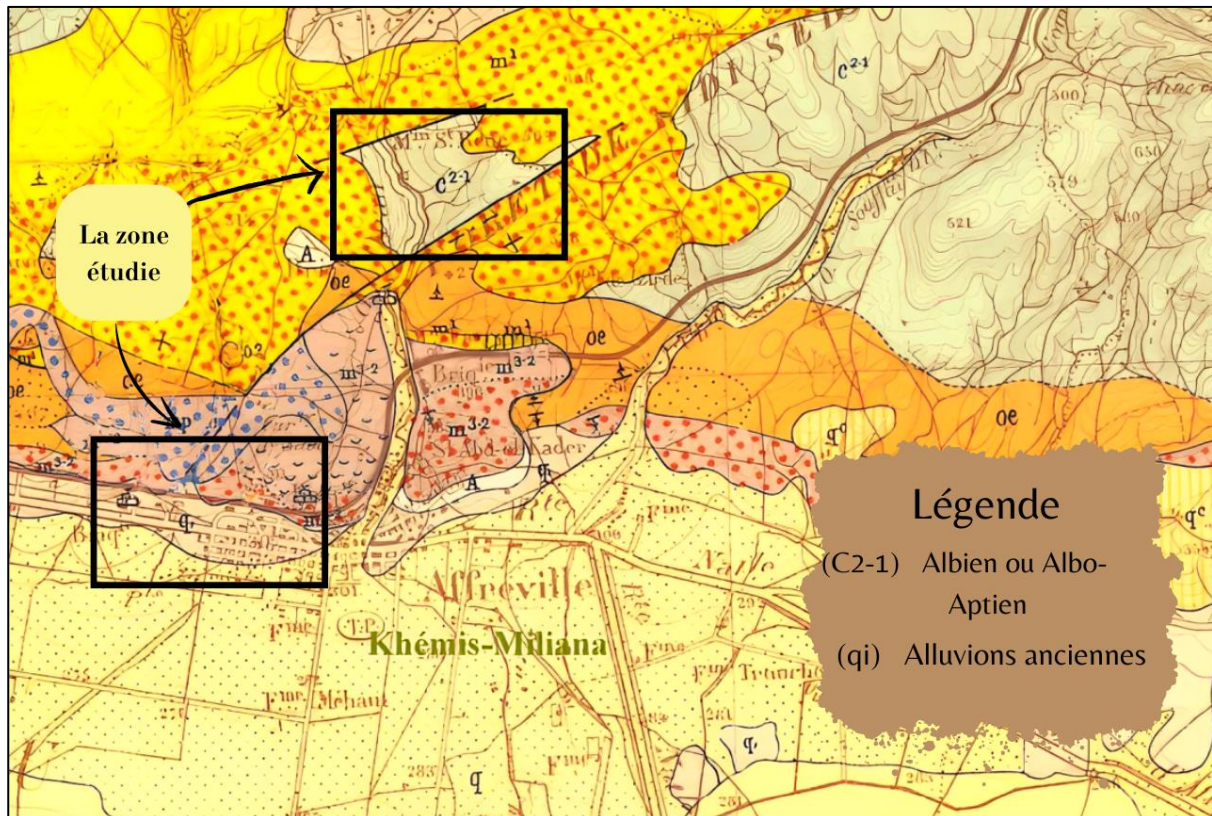
Le massif du Zaccar, formé au Jurassique et Crétacé, et le massif du Doui, d'âge primaire et Jurassique, représentent des reliefs autochtones de tectonique complexe et encore largement méconnue qui encadrent le bassin du Haut-Chéelif. Après l'installation des nappes de charriage venant du Nord (phase alpine du Miocène inférieur), les bassins sédimentaires du Chéelif se sont formés. Une phase de compression orientée principalement Nord-Sud a conduit à la formation de plis secondaires orientés ENE-WSW et à l'allongement est-ouest des bassins du Chéelif.

- **Le Miocène inférieur** : Les bassins subsidents du Chéelif s'individualisent. Celui du Haut-Chéelif en particulier se comporte comme un synclinorium (succession de plis synclinaux et anticlinaux) bordé par les massifs rigides à tectonique cassante du Zaccar et du Doui.
- **Le Miocène supérieur** : Les massifs bordiers se remettent à jouer le long de failles et de flexures. Le Zaccar et le Doui se dressent davantage.

- **Le Pliocène** : La transgression Est-Ouest Pliocène s'arrête à l'Ouest au niveau du seuil Aribis-Doui défini précédemment.
- **Le Quaternaire** : Le Quaternaire est discordant sur les terrains Néogènes. La plaine de Khemis Miliana s'est entièrement creusée dans le Miocène supérieur et c'est en partie avec les matériaux qui en proviennent qu'elle a été remblayée.

### II.1.5 Description détaillée des terrains sédimentaires :

La figure suivante représente extrait de carte géologique de Miliana n° 84 au 1/50.000°.



**Figure II.1** extrait de carte géologique de Miliana n° 84 au 1/50.000°.

Description suivante les séries stratigraphiques, dans notre zone d'étude, en amont coté usine Onex et en aval coté la ville d'oued Rihane :

- **Albien ou Albo-Aptien (C<sup>2-1</sup>)** : C'est une série à faciès flysch, très plissée et ravinée. Schistes gris ou brunâtres, noduleux, alternant avec de petits bancs quartzeux. Il peut atteindre des épaisseurs de 1000 m. Nous retrouvons cette série juste au-dessus de la voie ferrée. Elle forme le cœur de l'anticlinal (pendages divergent de part et d'autre de la série) et affleure à la faveur de l'érosion intense qui a sévi après les régressions du Miocène. La série est plus développée au Nord-Ouest et à l'Est de Khemis Miliana.
- **Alluvions anciennes (qi)** : (Niveau inférieur) Ces alluvions dominant les cônes de déjection et la plaine sont généralement mieux cimentés que les produits des cônes de déjection. Il s'agit tout d'abord d'une série d'argile brune et graveleuse qui se superpose à un niveau qui est constitué d'amas de galets ou de blocs roulés correspondant au remaniement des grès, poudingues et marnes du Miocène supérieur et du Mio-Pliocène.

Ces derniers ont été entièrement démantelés au centre de la plaine. Ces alluvions affleurent au pied du massif du Zaccar.

## II.1.6 Aperçu tectonique et structural :

La zone de l'usine de Onex et d'oued Rihane qui appartient à la région de Khemis Miliana correspond à un ensemble de plis orientés grossièrement E-W et affectant l'épaisse série allant du Quaternaire au Primaire. La tectonique est extrêmement variée et différente suivant que l'on s'adresse au matériel tertiaire, au Crétacé ou au matériel Jurassico-Primaire.

## II.1.7 Description lithologique des différentes fouilles :

**II.1.7.1 Fouille F1 (Côté de l'usine des matières explosives Onex) :** Située sur le côté de l'usine Onex de 0 à 1,70 m de profondeur, Il ya des limons bruns marno-sableux, réagissant à l'acide chlorhydrique, avec des éléments de gros galets baignant dans la matrice limoneuse. Les galets sont de nature gréseuse et le sable est grossier, bien visible à l'œil nu. Ce sont des terrains datés du Quaternaire récent. La limite d'investigation a été arrêtée à 1,70m de profondeur et l'échantillonnage fait à 1,20 m.

**II.1.7.2 Fouille F2 (côté de la ville d'oued Rihane) :** Réalisée dans le coté de la ville d'oued Rihane, sur une plateforme prédestinée à la construction d'une mosquée. De 0 à 2,00 m de profondeur, en évidence des marnes argileuses très peu sableuse, ayant réagi à l'acide chlorhydrique, de couleur beige à brune, Elles paraissent plastiques et sont très malléables avec les doigts. Elles ne comportent pas d'éléments de graviers dans sa matrice. Ces marnes sont très compactes et légèrement indurées. Là également, ces terrains sont datés du Quaternaire récent.

## II.2 Etude géotechnique :

Dans les études géotechniques, le terme "sol" englobe tous les matériaux présents à la surface de la terre, qu'il s'agisse de roches ou de matériaux meubles comme le sable, ou cohérents comme l'argile. L'objectif principal de l'étude géotechnique est d'analyser et de quantifier le comportement des sols, qui peuvent être très divers et hétérogènes en fonction de leur nature. Il est essentiel de connaître en détail leurs propriétés physiques et mécaniques, surtout lorsqu'ils sont destinés à servir de fondation pour la construction d'ouvrages.

Afin de déterminer ces caractéristiques physiques et mécaniques des sols à analyser, des fouilles ont été réalisées et des prélèvements d'échantillons effectués dans chacune d'elles.

**II.2.1 Travaux de reconnaissance :** Ces travaux ont consisté en la réalisation de deux (02) fouilles F1 et F2. Les différentes séries stratigraphiques rencontrées ont été répertoriées sur le levé géologique au 1/500<sup>e</sup> (en annexe) en ayant pris soin de faire la description macroscopique (in situ) de ces terrains qui supporteront les différents ouvrages hydrauliques projetés.

**Tableau II.1** Quantité des Travaux.

N°	Nature des travaux	Quantité de travaux
01	Fouilles	02

## **II.2.2 Essais de laboratoire :**

### **II.2.2.1 Essais physiques :**

- Analyse granulométrique et sédimentométrique.
- Teneur en eau naturelle (W).
- Densité sèche .

### **II.2.2.2 Essais mécaniques :**

- Limites d'Atterberg.
- Essai de cisaillement rectiligne (CU).

### **II.2.2.3 Aspect géotechnique :**

- Les rives des Châabas du côté usine ONEX paraissent à l'état stable. Les argiles helvétiques se sont déposées au Vindobonien il y a de cela 16 millions d'années, ce qui dénote une cohésion quasi parfaite de cette formation et qu'il ne devrait pas y avoir de risque de tassement, Afin de donner une certaine stabilité à ces argiles, il y aura lieu d'adoucir la pente par l'intermédiaire de banquettes de façon à ce qu'il n'y ait pas de mouvement de terrains.
- Pour ce qui est des deux oueds qui se trouvent à l'Est d'oued Rihane et qui se jettent dans la nature en aval de la route, en dessous de la voie ferrée, leur lit mineur n'est pas très large et leurs talus sont peu élevés. Leur aménagement ne devrait pas poser de problème d'assise de fondation puisque le substratum est bien consolidé.

## **III.2.3 Résultats des essais de laboratoire :**

Pendant la campagne géotechnique, deux (02) fouilles de reconnaissance ont été foncées le long des oueds qui traversent coté usine Onex et coté la ville d'oued Rihane et se déversent dans la ville de Khemis Miliana. Ces fouilles ont montré une certaine homogénéité de faciès puisqu'elles sont toujours à prédominance fine argilo-marneuses, sableuses, parfois graveleuses.

Ces fouilles ont été échantillonnées afin de procéder aux essais physiques et mécaniques au niveau du laboratoire des Travaux Publics (CTTP) conformément au programme de reconnaissance et des essais qui étaient programmés et que nous avons établi et ce dans le but de déterminer leurs propriétés géotechniques.

### **III.2.3.1 Essais physiques :**

- **Teneur en eau naturelle (W) :** La valeur de la teneur en eau naturelle  $W_n$  est de 20.0 % pour F1 et 16,4 % pour F2, ce qui signifie que ces matériaux sont peu à moyennement humides.
- **Densité sèche ( $\gamma_d$ ) :** La densité sèche ( $\gamma_d$ ) de F1 est de 1,52, ce qui dénote une certaine légèreté de l'échantillon alors que pour F2, elle atteint 1,7 t/m. Ces valeurs sont plutôt faibles à moyennes.

- **Analyse granulométrique et sédimentométrique :** L'analyse granulométrique réalisée sur les deux (02) échantillons a permis de déterminer la proportion en poids des différentes particules constituant ces matériaux. Elle révèle des sols à prédominance fine, argilo-sablo-graveleuse pour les deux échantillons.
- Le pourcentage des inférieures à 0,08 mm est respectivement de 78 % pour F1 et 77 % pour F2.
- La courbe granulométrique de l'échantillon F1 est étalée mais plus ou moins discontinue alors que celle de F2 est également étalée mais continue ce qui montre une distribution spatiale des éléments variée et les particules les plus représentées sont les argiles, les limons, le sable, puis viennent les graviers en dernier.

**Tableau II.2** Résultats d'essai granulométrique (Source : CTPP).

Fouille	Prof	Graviers	Gros sable	Sable Fin	Limons+Argiles	/	Classification
N°	(m)	20-2(mm)	2-0.2(mm)	0.2-0,02(mm)	<20 ( $\mu$ )	<0,08(mm)	-
F1	1,2	11%	8%	23%	58%	78%	CL
F2	1,0	10%	20%	16%	54%	77%	CL

### III.2.3.2 Essais mécaniques :

- **Limites d'Atterberg :** L'indice de plasticité de ces matériaux est respectivement de 21,4 % pour F1 et 19,8 % pour F2, correspondant ainsi à une plasticité moyenne, Selon la classification de Cassagnarde, ces sols sont moyennement plastiques pour F1 et F2 et de catégorie «CL » (Ap).

Tous les sols très gonflants ont un très grand indice de plasticité  $I_p$  mais la réciproque n'est pas vraie. On peut évaluer le gonflement possible en fonction de  $I_p$  de la manière suivante, d'après G. SANGLERAT :

- Faible pour  $I_p$  compris entre 0 et 15 %.
- Moyen pour  $I_p$  compris entre 10 et 25 %.
- Elevé pour  $I_p$  compris entre 25 et 55 %.
- Très élevé pour  $I_p > 55$  %.

Ce qui classe nos deux (02) échantillons dans la catégorie des sols moyennement gonflants.

**Tableau II.3** Résultats d'essai Limites d'Atterberg (Source : CTTP).

Fouille N°	Prof (m)	W (%)	WL (%)	IP (%)	Classification
F1	1,20	20,00	43,7	21,4	Plasticité moyenne
F2	1,00	16,40	41,1	19,8	Plasticité moyenne

- **Essai de cisaillement rectiligne (CU) :** Les deux (02) essais de cisaillement à la boîte de Cassagnarde réalisés sur des échantillons non consolidés et non drainés (UU), recompressés à l'optimum Proctor, révèlent des matériaux de bonne résistance mécanique avec des valeurs de cohésion de 1,46 bars pour F1 et 1,76 bars pour F2, et des valeurs d'angle de frottement respectivement de 21,33 degrés pour F1 et 22,34 degrés pour F2.

**Tableau II.4** Résultats essai de cisaillement rectiligne (Source : CTTP).

Fouille N°	Prof (m)	$\phi_{Cu}$ (Degrés)	Ccu (bars)
F1	1,20	21,33	1,46
F2	1,00	22,34	1,76

### **Conclusion :**

L'étude présentée dans ce chapitre est essentielle pour l'aménagement de l'oued El Rihane. L'analyse géologique aide à comprendre la structure géologique et la géomorphologie de la région, ainsi que la morphologie et la géologie locale du site étudié. Les essais géotechniques effectués sur le terrain et en laboratoire dans le cadre de cette étude ont permis de déterminer les propriétés physiques du sol de la région et sa capacité portante, en vue de l'aménagement prévu.

# **Chapitre III : Etude hydrologique**



## Introduction

L'hydrologie, en tant que sous-ensemble des sciences de la Terre, qui étudie la distribution spatiale et temporelle des ressources en eau de surface et souterraines, ainsi que leurs attributs chimiques, biologiques et physiques. Ce domaine interdisciplinaire combine diverses disciplines scientifiques pour relever les défis liés à la gestion et à l'utilisation des ressources en eau.

Donc les études hydrologiques jouent un rôle crucial dans le développement des ouvrages hydrauliques. En fin de compte, Un de ses objectifs est d'estimer les débits maximaux pour différentes périodes de retour par exemple  $T=10$ ans et  $T=20$ ans etc...

L'objectif de ce chapitre est d'identifier les paramètres hydrologiques clés de la zone d'étude suite à la délimitation du bassin versant de " Oued El Rihane " dans la ville d'Oued Rihane ouest de Khemis Miliana. Il s'agit de déterminer ces caractéristiques à l'aide du logiciel ArcGIS. En outre, il s'agit d'estimer les périodes de retour et de déterminer les débits de crue nécessaires à la conception d'un aménagement fluvial visant à protéger la zone contre les inondations.

### III.1 Bassin versant

Le bassin versant est l'unité de base de l'équilibre hydrologique. Il définit la zone drainée par une rivière et ses affluents. Les rivières prennent généralement naissance dans des zones de formes diverses et drainent les terres qui les entourent. L'écoulement de l'eau rejoint la rivière à son point le plus bas, connu sous le nom d'exutoire.

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*).

- **ArcGIS** : est un système complet qui permet de collecter, organiser, gérer, analyser, communiquer et diffuser des informations géographiques. En tant que principale plateforme de développement et d'utilisation des systèmes d'informations géographiques (SIG) au monde, ArcGIS est utilisé par des personnes du monde entier pour mettre les connaissances géographiques au service du gouvernement, des entreprises, de la science, de l'éducation et des médias.

#### III.1.1 Caractéristiques principales du bassin versant :

##### III.1.1.1 Caractéristiques géographiques :

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

Longitude : 2,179°.

Latitude : 36,260°.

L'altitude : 281 m.

##### III.1.1.2 Caractéristiques morphologiques :

###### ➤ Surface

La superficie d'un bassin versant représente la zone géographique délimitée par les contours de la ligne de partage des eaux ou du bassin lui-même. Pour évaluer cette étendue, on peut recourir à des outils tels qu'un planimètre ou utiliser la méthode des petits carrés. Elle est habituellement exprimée en kilomètres carrés (km<sup>2</sup>), fournissant ainsi une mesure de la taille du bassin versant.

Le bassin versant d'Oued Rihane a une superficie de **S = 13,21 km<sup>2</sup>**.

#### ➤ Périimètre

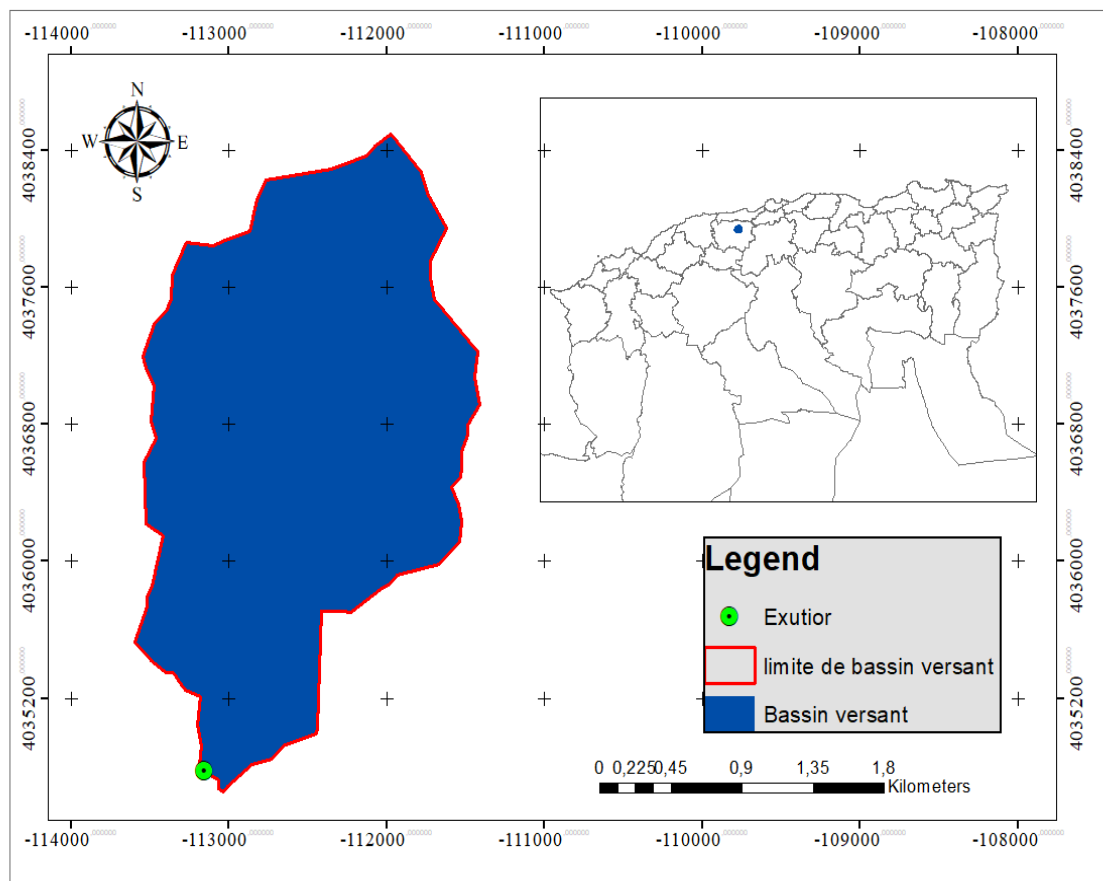
Le périmètre délimite la frontière externe du bassin. Chaque bassin réagit de manière individuelle aux précipitations qu'il reçoit. Ces caractéristiques hydrologiques sont conditionnées à la fois par le climat environnant et par les aspects physiques spécifiques du bassin lui-même.

Le périmètre de bassin versant d'Oued Rihane est **P= 21,73 km**.

#### ➤ Longueur du thalweg (cours d'eau principal)

Un thalweg désigne la trajectoire tracée par les points présentant l'altitude la plus basse, que ce soit au fond d'une vallée ou dans le lit d'un cours d'eau.

La longueur du cours d'eau principal est : **L<sub>cp</sub> = 6,93 Km**.



Systeme des cordones : WGS 1984 UTM Zone 31N

**Figure III.1** : Présentation du bassin versant d'étude.

### III.1.1.3 Caractéristiques géométriques :

#### ➤ **Indice de compacité de Horton ( $K_h$ ) :**

L'indice de compacité de Horton est obtenu en calculant le rapport entre la largeur moyenne du bassin versant et la longueur du cours d'eau principal. Il se calcule par la relation :

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

Avec :

$K_h$  : Indice de compacité de Horton.

S : Surface de bassin versant ( $\text{km}^2$ ).

Lcp : La longueur du cours d'eau principale (km).

Pour :

- $K_h > 1$  ..... Bassin ramassée.
- $K_h < 1$  ..... Bassin allongée.

#### ➤ **Indice de compacité de Gravélius ( $K_G$ ) :**

D'après M. GRAVELIUS (Loaborde 2000), la configuration du bassin influe directement sur le déroulement de l'écoulement en surface. Cette configuration est définie par un paramètre appelé indice de compacité ( $K_G$ ), également connu sous le nom d'indice de forme. Il s'agit simplement du rapport entre le périmètre (P) du bassin en kilomètres (Km) et le périmètre d'un cercle de même superficie (A) exprimé en kilomètres carrés ( $\text{Km}^2$ ).

Il est donné par la formule suivante :

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

Avec :

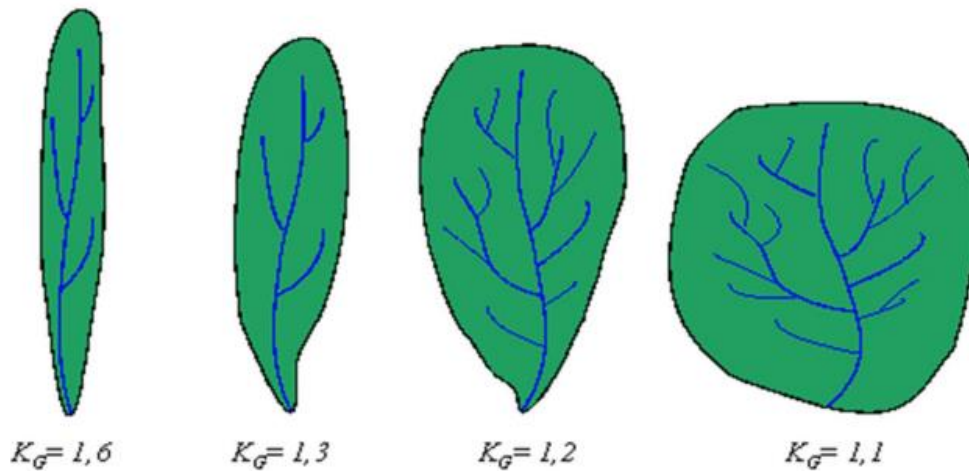
$K_G$  : Indice de compacité de Gravélius.

P : périmètre de bassin versant (km).

S : Surface de bassin versant ( $\text{km}^2$ ).

Pour :

- $K_G = 1$  ..... Bassin compacte.
- $1 < K_G < 1,3$  ..... Bassin moins compacte.
- $K_G > 1,3$  ..... Bassin allongée.



**Figure III.2 :** Différents types des BV selon le coefficient de Gravelius  $K_G$ .

Si l'indice de compacité ( $K_G$ ) s'éloigne de 1, cela signifie que le bassin présente une forme plus compacte, ce qui entraîne un temps de concentration plus court.

Et dans notre bassin versant avec une valeur de  $K_G = 1,68$  alors il est de forme bassin allongée.

➤ **Coefficient d'allongement ( $C_a$ ) :**

Ce coefficient est obtenu par la relation suivante :

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

Avec :

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

$S$  : Surface de bassin versant ( $km^2$ ).

Ce coefficient fournit des indications sur la configuration hydrologique de la zone examinée :

Un coefficient d'allongement élevé suggère que le bassin versant est plus étiré. Cela peut influencer la manière dont l'eau se déplace à travers le réseau hydrographique, éventuellement en réduisant le temps nécessaire pour qu'elle se rassemble. Cependant, cela peut également signifier une réaction plus prompte aux précipitations, entraînant des crues plus rapides.

➤ **Rectangle équivalent :**

Le rectangle équivalent, ou rectangle de Gravelius, est une méthode qui consiste à représenter le bassin versant par un rectangle ayant les mêmes caractéristiques d'indice de compacité et d'hypsométrie que le bassin étudié. Cette approche permet de comparer les bassins versants du point de vue de leur comportement hydrologique.

Le périmètre et la surface du rectangle sont respectivement :

$$P = 2(L + l) \quad \text{et} \quad A = L * l \quad (III.4)$$

La longueur L et la largeur l en Km sont données par la résolution de P et A :

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

De (III.4) et (III.5) on obtient une équation de 2<sup>ème</sup> degré admet deux solutions L et l :

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

Avec :

L : la longueur de rectangle (km).

l : la largeur de rectangle (km).

S : Surface de bassin versant (km<sup>2</sup>).

K<sub>G</sub> : Indice de compacité de Gravélius.

Les paramètres géomorphologiques du bassin versant d'Oued Rihane sont résumés dans le tableau suivant :

**Tableau III.1** : Les paramètres hydro morpho métriques du bassin versant d'Oued Rihane.

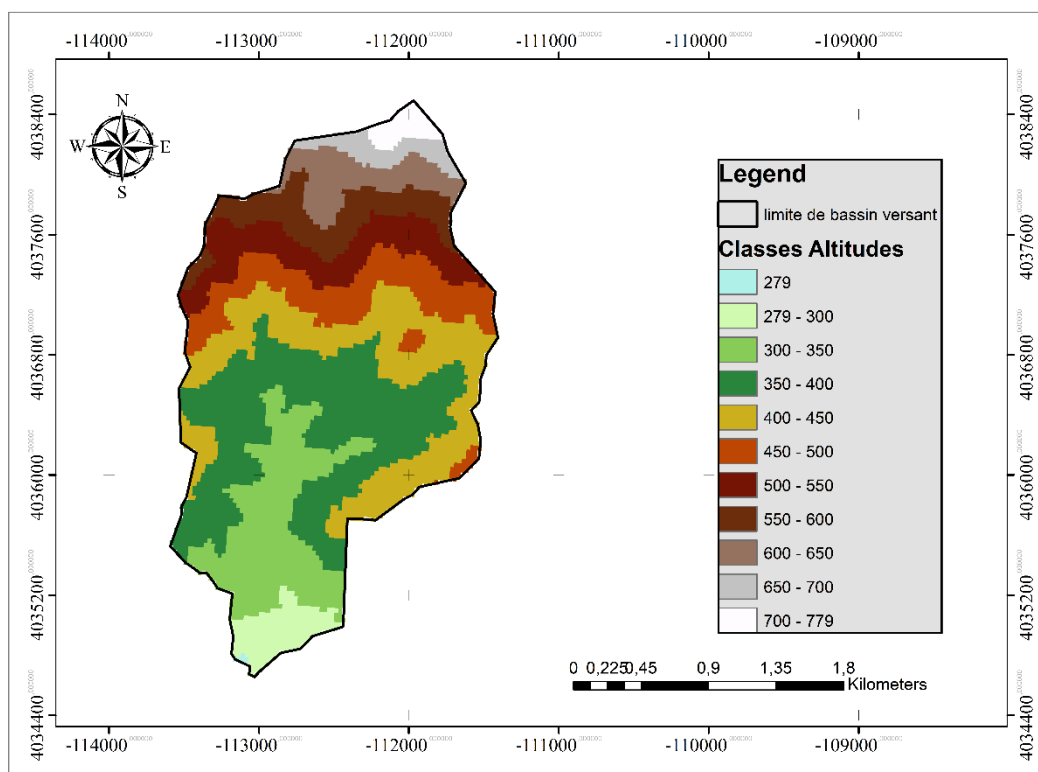
Désignation	Symbole	Unités	Valeur
<b>Superficie</b>	S	Km <sup>2</sup>	13,21
<b>Périmètre</b>	P	Km	21,73
<b>Indice de compacité de Gravélius</b>	K <sub>G</sub>	/	1,68
<b>Longueur du thalweg principal</b>	L <sub>cp</sub>	Km	6,93
<b>Coefficient d'allongement</b>	C <sub>a</sub>	/	3,63
<b>Indice de compacité de Horton</b>	K <sub>h</sub>	/	0,275
<b>Longueur Rectangle équivalent</b>	L	Km	9,56
<b>Largeur Rectangle équivalent</b>	l	Km	1,38

### III.1.2 Le relief :

L'influence exercée par le relief sur l'écoulement est intuitivement compréhensible. Cela s'explique par les variations de plusieurs paramètres hydrométéorologiques en fonction de l'altitude, tels que les précipitations, les températures et les vents. De plus, la configuration du bassin versant joue un rôle crucial. La pente du terrain influe également sur la vitesse de l'écoulement. Pour caractériser le relief, divers indices ou caractéristiques sont utilisés.

**III.1.2.1 La courbe hypsométrique :** La courbe hypsométrique offre une vue d'ensemble de la topographie du bassin versant. Elle représente la répartition de la surface du bassin en fonction de l'altitude. Sur l'axe des abscisses, elle montre la proportion de la superficie du bassin versant située au-dessus ou au-dessous de chaque altitude représentée sur l'axe des ordonnées. Ainsi, elle illustre la distribution de la superficie du bassin versant en fonction des altitudes.

La courbe hypsométrique est représentée par les altitudes sur l'axe des y et les pourcentages de surface sur l'axe des x. Elle est générée par des calculs qui déterminent comment la surface du bassin versant est répartie entre les différentes altitudes, en calculant les surfaces partielles entre les courbes de niveau successives. Cette courbe représente la proportion de la surface totale comprise entre deux courbes de niveau adjacentes. Elle constitue une représentation condensée du profil du bassin versant. Sa pente moyenne, dérivée de la courbe, est un indicateur essentiel pour comparer la topographie de différents bassins versants. La distribution des surfaces élémentaires et leurs cumuls à différentes altitudes ont été obtenus à l'aide du logiciel ArcGIS.



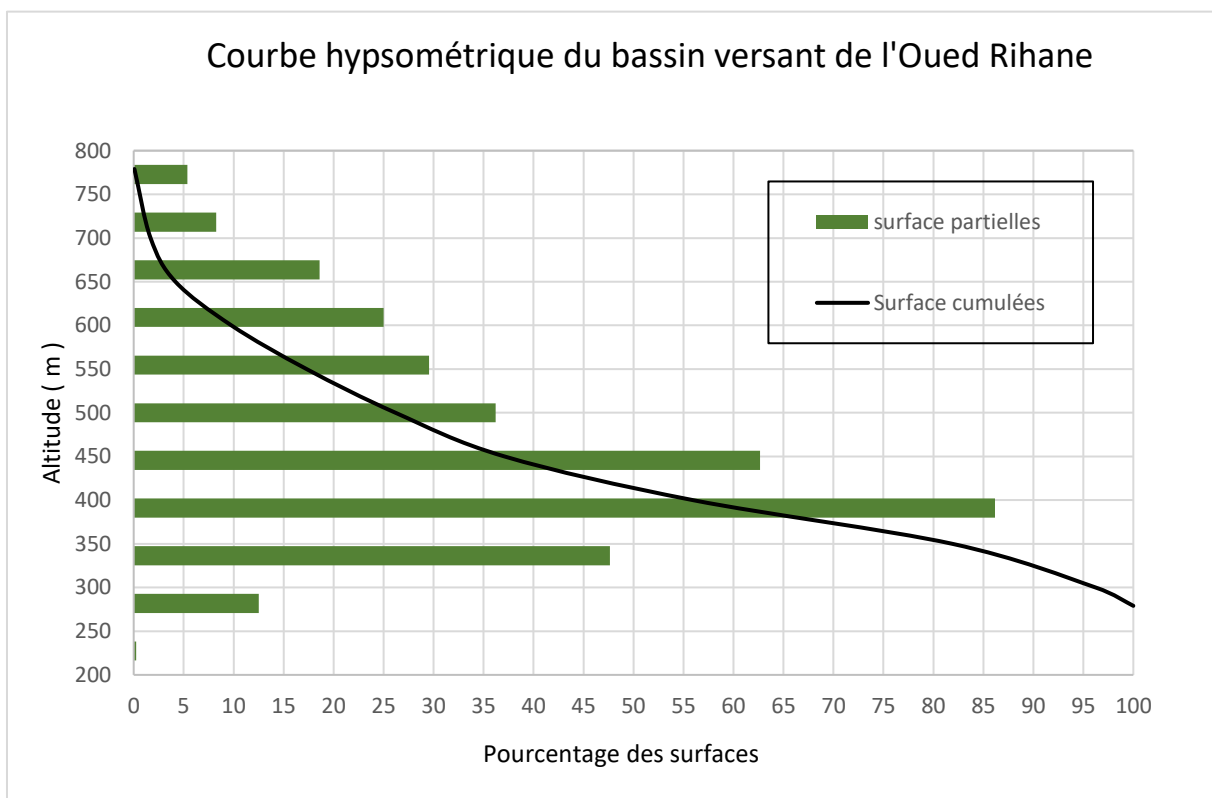
Systeme des cordones : WGS 1984 UTM Zone 31N

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

La distribution des surfaces élémentaires et leurs totaux cumulés en fonction des altitudes ont été calculés à l'aide du logiciel ArcGIS.

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

Altitudes (m)	Hi (m)	Surface (km <sup>2</sup> )	Surfaces partielles (%)	Surfaces partielles (km <sup>2</sup> )	Surfaces cumulées (%)
279-300	289,5	0,497	3,7671	0,506	3,8373
300-350	325	1,891	14,338	2,398	18,1762
350-400	375	3,422	25,940	5,820	44,1166
400-450	425	2,488	18,8582	8,309	62,9749
450-500	475	1,438	10,9	9,747	73,8741
500-550	525	1,174	8,9	10,921	82,772
550-600	575	0,992	7,522	11,913	90,2947
600-650	625	0,738	5,6	12,652	95,8942
650-700	675	0,328	2,488	12,980	98,382
700-779	739,5	0,213	1,617	13,194	100



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

Les principaux traits topographiques en termes d'altitude incluent :

- **L'altitude maximale et minimale ( $H_{\max}-H_{\min}$ )** : Ces données sont directement dérivées des cartes topographiques. L'altitude maximale désigne le point le plus élevé du bassin versant, tandis que l'altitude minimale désigne le point le plus bas, généralement à l'exutoire. Ces deux mesures sont particulièrement importantes lorsqu'il s'agit d'établir des relations avec des variables climatologiques telles que la température et les précipitations.
- **L'altitude moyenne ( $H_{\text{moy}}$ )** : L'altitude moyenne du bassin versant est un indicateur crucial qui englobe l'influence de la zonation climatique verticale. Elle est calculée en additionnant le produit des surfaces partielles  $S_i$  situées entre les courbes de niveau et leurs altitudes moyennes correspondantes  $H_i$ .

Il est donné par la formule suivante :

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

Avec :

$S_i$  : Surface partielle entre deux courbes de niveau ( $\text{Km}^2$ ).

$H_i$  : La différence d'altitude moyenne entre deux courbes de niveau successives (m).

$S$  : Superficie du bassin versant ( $\text{Km}^2$ ).

- **Altitude  $H_{5\%}$**  : C'est la projection du point qui correspond à 5% de la surface cumulée sur la courbe hypsométrique.
- **Altitude médiane  $H_{50\%}$**  : C'est la projection du point qui correspond à 50% de la surface cumulée sur la courbe hypsométrique.
- **Altitude médiane  $H_{95\%}$**  : C'est la projection du point qui correspond à 95% de la surface cumulée sur la courbe hypsométrique.

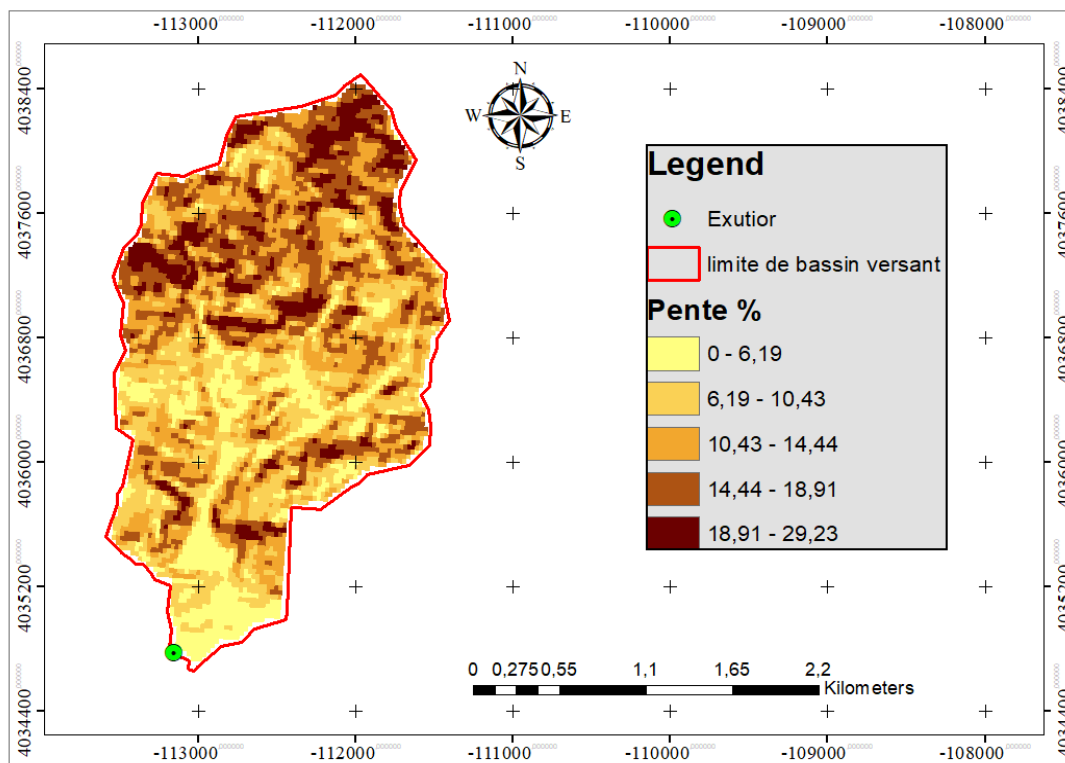
Un résumé des résultats de calculs dans le tableau suivant :

**Tableau III.3** : caractéristiques altimétriques du bassin versant d'Oued Rihane.

Altitudes	$H_{\min}$	$H_{\max}$	$H_{\text{moy}}$	$H_{5\%}$	$H_{50\%}$	$H_{95\%}$
BV Rihane	279	779	440,0185	650	412	303

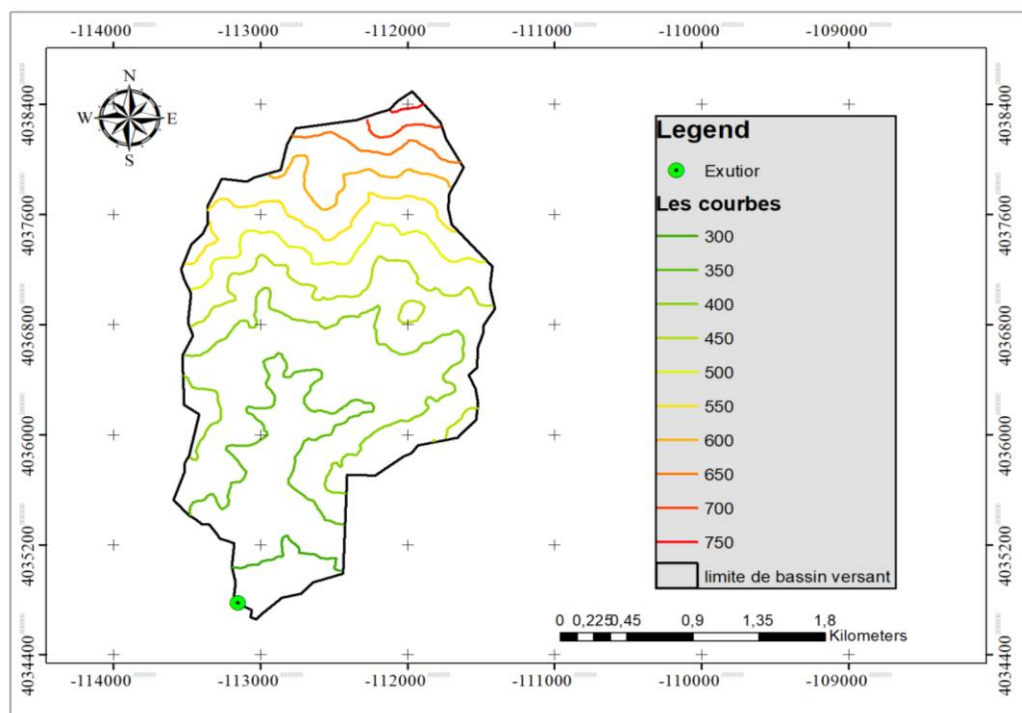
**III.1.2.2 Les indices de pente** : La connaissance de l'altitude des pentes a une grande valeur, en particulier pour les forestiers, les agriculteurs, les planificateurs et les gestionnaires des risques naturels. Elle permet d'interpréter les caractéristiques du terrain et de comprendre la morphologie des régions montagneuses ou des vallées. L'extraction de cartes des pentes est une pratique courante pour déterminer divers indices de pente, particulièrement utile dans les zones montagneuses, comme le montre la figure suivante :





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

En outre, la carte en courbes de niveau illustre une carte topographique représentant les caractéristiques du terrain par un système de courbes de niveau régulièrement espacées. Cette carte est illustrée dans la figure suivante :



Systeme des cordones : WGS 1984 UTM Zone 31N

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

### 1) Pente du bassin versant $I_{bv}$ :

Elle est définie par la formule suivante :

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

Avec :

$H_{max} - H_{min}$  : Les altitudes correspondant aux 5% et 95% de la surface totale, en termes de fréquence.

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

### 2) Pente moyenne du bassin versant $I_m$ :

La pente moyenne est une caractéristique essentielle qui offre des informations sur la configuration topographique 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  $T_c$ ) et influe directement sur le débit de pointe lors d'une averse (TOUAIBIA.2004).

$$I_m = \frac{\Delta H \{0,5L_1 + L_2 + \dots + 0,5L_n\}}{S} \quad (III.9)$$

Avec :

$\Delta H$  : Différence d'altitude entre deux courbes de niveau successives (m).

$L_1, L_2, \dots, L_n$  : Les longueurs des courbes de niveaux (Km).

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

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

Courbes	Longueur	$\Delta H$	Surface BV ( $Km^2$ )	$I_m$ (m/Km)
300	1,074	50	13,21	93,93
350	4,995			
400	5,867			
450	4,044			
500	2,748			
550	2,666			
600	1,941			
650	1,287			
700	0,613			
750	0,235			

### 3) Indice de pente globale (I<sub>g</sub>):

Cet indice permet d'évaluer le relief en se basant sur la classification de l'O.R.S.T.O.M (Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer). Il est défini comme le rapport entre l'amplitude d'altitude entre les 5% et 95% de la surface du bassin et la longueur du rectangle équivalent. 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 (Bénina 2004).

$$I_g = \frac{D}{L_r} = \frac{H_{5\%} - H_{95\%}}{L_r} \quad (\text{III.10})$$

Avec :

H<sub>max</sub> – H<sub>min</sub> : Les altitudes correspondant aux 5% et 95% de la surface totale (m).

L<sub>r</sub> : longueur du rectangle équivalent (km).

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

/	Relief	Valeur de I <sub>g</sub>
1	Relief très faible	I <sub>g</sub> < 0.002
2	Relief faible	0.002 < I <sub>g</sub> < 0.005
3	Relief assez faible	0.005 < I <sub>g</sub> < 0.01
4	Relief modéré	0.01 < I <sub>g</sub> < 0.02
5	Relief assez fort	0.02 < I <sub>g</sub> < 0.05
6	Relief fort	0.05 < I <sub>g</sub> < 0.1
7	Relief très fort	0.1 < I <sub>g</sub>

### 4) Indice de pente de Roche I<sub>p</sub> :

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).

I<sub>p</sub> est donné par la formule :

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

Avec :

L<sub>r</sub> : longueur du rectangle équivalent (km).

S<sub>i</sub> : Surface partielle entre deux courbes de niveau (Km<sup>2</sup>).

### 5) Indice de pente moyenne $I_{pm}$ :

La pente moyenne d'un cours d'eau influence la vitesse d'écoulement de l'eau vers l'exutoire du bassin et le temps de concentration. Pour calculer les pentes moyennes des cours d'eau, on se base sur le profil longitudinal du cours d'eau principal ainsi que de ses affluents. La méthode la plus fréquemment employée pour calculer la pente longitudinale d'un cours d'eau consiste à diviser la différence d'altitude entre son point le plus élevé et son point le plus bas par la distance totale parcourue par le cours d'eau.

$I_{pm}$  est donné par la formule :

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

Avec :

$L_r$  : longueur du rectangle équivalent (km).

$H_{max} - H_{min}$  : Les altitudes auxquelles se situent les 5% et 95% de la surface totale (m).

### 6) Dénivelée spécifique $D_s$ :

Puisque l'indice de pente globale décroît pour un même bassin lorsque la surface augmente. La dénivelée spécifique  $D_s$  ne présente pas cet inconvénient (Bénina, 2004).

La dénivelée spécifique est définie par la formule suivante :

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

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

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

Cela n'implique que le relief du bassin versant ; est un Relief assez fort  $100m < DS < 250m$   
(Selon O.R.S.T.O.M).

**Tableau III.7 : Résultats des calculs des pentes et du dénivelé spécifique du bassin versant de l'Oued Rihane**

Paramètres	Symboles	Unités	Valeurs
<b>Pente du bassin versant</b>	$I_{bv}$	m/Km	72,15
<b>Pente moyenne de bassins versant</b>	$I_m$	m/Km	93,93
<b>Indice de pente globale <math>I_g</math></b>	$I_g$	m/km	36,30
<b>Indice de pente moyenne <math>I_{pm}</math></b>	$I_{pm}$	m/Km	52,30
<b>Indice de pente de Roche (<math>I_p</math>)</b>	$I_p$	%	18,80
<b>Dénivelée spécifique <math>D_s</math></b>	$D_s$	m	131,91
<b>Relief</b>	/	/	Relief assez fort

### III.1.3 Etude du réseau hydrographique

#### III.1.3.1 Caractéristiques du réseau hydrographique :

Les principaux cours d'eau d'un fleuve reçoivent l'apport des affluents les plus significatifs, qui à leur tour sont alimentés par des affluents de rang inférieur, et ainsi de suite jusqu'aux ruisseaux et petits cours d'eau situés à la source du bassin, formant ainsi le réseau hydrographique des bassins versants. La description complète d'un tel réseau implique l'identification de divers paramètres.

##### ➤ Hiérarchisation du réseau :

La ramification d'un cours d'eau est déterminée en attribuant un système numérique à chaque segment du cours d'eau en fonction de son niveau d'importance.

Tout cours d'eau sans affluent est classé à l'ordre 1.

Si deux cours d'eau de même ordre  $n$  se rencontrent, le cours d'eau résultant est d'ordre  $n+1$ .

Si deux cours d'eau d'ordre différent se rejoignent, le cours d'eau résultant est de l'ordre le plus élevé des deux.

L'ordre le plus élevé correspond à l'ordre du cours d'eau principal à l'exutoire.

### III.1.3.2 Paramètres hydrographiques :

#### 1) Densité de drainage $D_d$

La densité de drainage est un concept qui se réfère au rapport entre la longueur totale de tous les talwegs ( $L_i$ ) dans un bassin et la surface totale ( $S$ ) de ce bassin. Cette mesure, exprimée en  $Km/Km^2$ , est un indicateur de la dynamique du bassin, de la stabilité de son réseau hydrographique et du type de ruissellement de surface. Elle donne une idée de la manière dont l'eau s'écoule à travers le bassin.

Elle est donnée par la formule suivante :

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

Avec :

$\sum_{i=1}^n l_i$  : La somme des longueurs de tous les cours d'eau pris en compte dans le bassin versant.

$n$  : L'ordre le plus élevé dans la classification.

La densité de drainage représente deux formes différentes de drainage.

- Densité de drainage temporaire ( $D_{dt}$ ) représente les talwegs qui coulent temporairement :

$$D_{dt} = \frac{\sum lit}{S} \quad (III.15)$$

lit : Longueurs des oueds temporaires.

- La densité de drainage permanente ( $D_{dp}$ ) : représente les cours d'eau qui ont un écoulement permanent :

$$D_{dp} = \frac{\sum lip}{S} \quad (III.16)$$

lip : Longueurs des oueds permanents.

#### 2) La densité hydrographique des thalwegs élémentaires $F$ :

La densité hydrographique est un concept qui représente le nombre total de cours d'eau ou de voies d'écoulement sur une zone spécifique. Elle est généralement exprimée en nombre de voies d'écoulement par unité de surface. C'est une mesure qui donne une idée de la quantité d'eau qui peut être transportée à travers une zone donnée.

$$F = \frac{\sum N1}{S} \quad (III.17)$$

Avec :

$N1$  : Nombre de cours d'eau d'ordre 1.

#### 3) Coefficient de torrentialité $C_t$ :

Le coefficient de torrentialité est déterminé en multipliant la densité de drainage par la fréquence des talwegs élémentaires.

$$C_t = D_d * F \quad (III.18)$$

Avec :

Dd : Densité de drainage.

F : Densité hydrographique.

#### 4) Temps de concentration Tc :

Le temps de concentration Tc des eaux sur un bassin versant correspond à la durée maximale nécessaire pour qu'une goutte d'eau parcourt le chemin hydrologique entre un point du bassin et son exutoire. Cette grandeur est souvent complexe à estimer. Il existe plusieurs formules d'usage courant, certaines relativement vieilles comme la formule de Kirpich qui date de 1940 et a été élaborée à la suite des crues qui ont frappé le nord-est des États-Unis en 1936 (Folmar et al. 2007).

Les méthodes et formules utilisées sont souvent adaptées à des régions spécifiques, reflétant ainsi les caractéristiques uniques de chaque zone géographique. En général, il est recommandé de choisir la formule la plus appropriée pour le type de bassin versant étudié. Pour cela, on privilégie les formules qui semblent applicables et qui ont été développées dans des conditions physico-géographiques similaires à celles du nord de l'Algérie. L'estimation du temps de concentration est obtenue à l'aide des formules empiriques suivantes :

##### ➤ Formule de GIANDOTTI (sud Italie 1937)

Donnée par :

$$Tc = \left( \frac{(4\sqrt{S}) + (1,5 + Lcp)}{(0,8 * \sqrt{H_{moy} - H_{min}})} \right)^{0,385} \quad (III.19)$$

Avec :

Tc : Temps de concentration (h).

H<sub>moy</sub> - H<sub>min</sub> : Altitudes moyenne et minimale du bassin versant (m).

S : Surface du bassin versant (Km<sup>2</sup>).

L<sub>cp</sub> : Longueur du cours d'eau principal (Km).

##### ➤ Formule de SOKOLOVSKY

Donnée par :

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

Avec :

Tc : Temps de concentration (h).

Lcp : Longueur du thalweg principal (Km).

S : Superficie du bassin versant (Km<sup>2</sup>).

I<sub>bv</sub> : Pente du bassin versant (m/Km).

### ➤ Formule de TURAZZA

Donnée par :

$$Tc = \frac{0,108^3 \sqrt{S \cdot Lcp}}{\sqrt{Ipm}} \quad (III.22)$$

Avec :

Tc : Temps de concentration (h).

L<sub>cp</sub> : Longueur du cours d'eau principal (Km).

S : Surface du bassin versant (Km<sup>2</sup>).

I<sub>pm</sub> : Indice de pente moyenne (m/m).

### ➤ Formule de VENTURA

Donnée par :

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

Avec :

Tc : Temps de concentration (h).

I<sub>bv</sub> : Pente du bassin versant (m/m).

S : Surface du bassin versant (Km<sup>2</sup>).

### ➤ Formule de KIRPICH

Cette approche est appropriée pour les bassins versants dont la superficie varie entre 0,4 hectare et 81 hectares, présentant des sols argileux et une pente moyenne comprise entre 3% et 10%. Le temps de concentration est calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$Tc = 0,0195 * \frac{Lcp^{0,77}}{Ipm^{0,385}} \quad (III.24)$$

Avec :

Tc : Temps de concentration (h).

L<sub>cp</sub> : Longueur du cours d'eau principal (m).

I<sub>pm</sub> : Indice de pente moyenne (m/m).



✓ **Choix du temps de concentration :**

Les équations que nous utilisons sont spécifiquement recommandées pour le Nord de l'Algérie. Ces formules produisent des résultats variés, et la valeur du temps de concentration que nous retenons est la plus petite parmi celles qui sont proches les unes des autres. Nous avons exclu les valeurs extrêmes, qu'elles soient très grandes ou très petites, pour ne conserver que les valeurs moyenne.

**Tableau III.8:** Résultats de calculs de temps de concentration.

<b>Formules utilisées</b>	<b>Temps de concentration en heures</b>
<b>Formule de GIANDOTTI</b>	2,45
<b>Formule de SOKOLOVSKY</b>	4,03
<b>Formule de TURAZZA</b>	0,067
<b>Formule de VENTURA</b>	0,054
<b>Formule de KIRPICH</b>	0,798

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

<b>Formules utilisées</b>	<b>Temps de concentration en heures</b>
<b>Formule de SOKOLOVSKY</b>	4,03
<b>Formule de GIANDOTTI</b>	2,45

Nous avons choisi d'adopter le résultat provenant de la loi de **GIANDOTTI** car c'est cette formule qui nous offre le temps de concentration le plus optimal.

- 5) **Vitesse de ruissellement  $V_r$  :** Le ruissellement est défini comme l'écoulement par gravité à la surface du sol, où les eaux météorologiques qui n'ont pas été infiltrées, évaporées ou stockées en surface suivent la pente du terrain. En Algérie, la méthode de KIRPICH est largement utilisée pour calculer la vitesse de ruissellement en se basant sur le temps de concentration.

La vitesse de ruissellement se calcule par la formule suivante :

$$V_r = \frac{Lcp}{T_c} \quad (\text{III.25})$$

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

**Tableau III.10:** Paramètres hydrographiques d'Oued Rihane.

<b>Désignation</b>	<b>Symbole</b>	<b>Unités</b>	<b>Valeur</b>
<b>Densité de drainage</b>	Dd	Km/Km <sup>2</sup>	1,37
<b>Densité hydrographique</b>	F	Km <sup>-2</sup>	3,80
<b>Coefficient de torrencialité</b>	Ct	/	5,21
<b>Temps de concentration</b>	Tc	Heures	2,45
<b>Vitesse de ruissellement</b>	Vr	Km/h	2,84

Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques géomorphologiques du bassin versant d'Oued Rihane.

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

Désignation		Symbole	Unités	Valeur
Superficie		S	Km <sup>2</sup>	13,21
Périmètre		P	Km	21,73
Longueur du talweg principal		Lcp	Km	6,93
Indice de compacité de Gravélius		KG	/	1,686
Indice de compacité de Horton		Kh	/	0,275
Coefficient d'allongement		Ca	/	3,635
Rectangle équivalent	Longueur	Lr	Km	9,56
	Largeur	l	Km	1,38
Altitudes	Maximale	Hmax	m	779
	Moyenne	Hmoy	m	440,02
	Minimale	Hmin	m	279
	Médiane 5%	H5%	m	650
	Médiane 50%	H50%	m	412
	Médiane 95%	H95%	m	303
Pente du bassin versant		Ibv	m/Km	72,15
Pente moyenne du bassin versant		Im	m/Km	93,93
Indice de pente de Roche		Ip	%	18,30
Indice de pente moyenne		Ipm	m/Km	52,30
Indice de pente globale		Ig	m/Km	36,30
Dénivelée spécifique		Ds	m	131,91
La somme des longueurs des cours d'eau		$\sum Li$	Km	18,19
Nombre des talwegs d'ordre 1		$\sum N1$	/	51
Densité de drainage		Dd	Km/Km <sup>2</sup>	1,37
Densité hydrographique		F	Km <sup>-2</sup>	3,8
Coefficient de torrentialité		Ct	/	5,21
Temps de concentration		Tc	Heures	2,45
Vitesse de ruissellement		Vr	Km/h	2,84



Les caractéristiques de la station sont montrées dans le tableau suivant :

**Tableau III.12:** Caractéristique de la station hydrométrique « El Ababsa » (Source : ANRH).

Station	Code	Coordonnées			Période d'observation
EL Ababsa	011715	X (m)	Y (m)	Z (m)	1972-2018
		443,95	318,05	320	

**Tableau III.13:** Caractéristiques des stations Pluviométrique (Source : ANRH).

Code de la station	Nom de la station	Type de la station	Les coordonnées			Période d'observation
			X	Y	Z	
011717	Khemis	Pluviométrique	456.2	329	300	1975-2018
011711	Sidi Lakhder	Pluviométrique	452	329.65	250	1958-2018
011718	Herraza	Pluviométrique	445.35	321.4	312	1984-2018

Le tableau suivant représente la répartition des débits maximaux annuels de la station prise pour une période de 41 ans.

**Tableau III.14:** Série des débits maximaux annuels prise de la station 011715 (Source : ANRH).

Années	Qmax (m <sup>3</sup> /s)	Années	Qmax (m <sup>3</sup> /s)	Années	Qmax (m <sup>3</sup> /s)
1972	45.5	1988	42.1	2004	24.2
1973	31.8	1989	23.2	2005	46
1974	34.7	1990	25.2	2006	24.7
1975	27.1	1992	16.1	2007	49.3
1977	25.4	1993	33.5	2008	41
1978	38.5	1994	56.5	2009	28.4
1979	42.4	1995	39	2010	26.5
1980	30.2	1996	30	2011	27.5
1981	28.9	1997	34.7	2012	46.1
1982	63.7	1998	37.5	2014	25.4
1983	35.1	1999	21	2018	28.4
1984	29.6	2000	44		
1985	44.6	2001	34.1		
1986	48.6	2002	41.2		
1987	31.2	2003	22.2		

### III.2.1.2 Ajustement de la série des débits et les pluies maximales journalières

L'exactitude des résultats d'une analyse fréquentielle est fortement liée à la sélection du modèle fréquentiel, en particulier de sa nature. Plusieurs facteurs peuvent aider à faciliter ce choix, mais il n'y a malheureusement pas de méthode globale et infaillible.

À partir d'un échantillon de  $n$  observations, on construit un histogramme de fréquence d'apparition et une courbe de fréquence cumulée de non dépassement. Si le nombre  $n$  devient important, on cherche à déterminer la loi de distribution de la population. La fréquence se transforme alors en densité de probabilité.

**Tableau III.15:** modèles fréquentiels et leurs validités.

Lois	Variables
Normale	Précipitations annuelles, Débits, Volume de stockage des réservoirs
Log Normale	Débits maxima annuels, Précipitations journalières, Précipitations annuelles, Volume du ruissellement mensuel, Volume du ruissellement annuel
Pearson type III (Gamma)	Débits maxima annuels, Précipitations journalières, Précipitations annuelles, Volume du ruissellement mensuel, Volume du ruissellement annuel
Loi de Gumbel et Fréchet	Débits maxima annuels
Loi exponentielle	Précipitations journalières, Durée entre deux événements
Loi de Goodrich	Valeurs moyennes annuelles (débits, précipitations, etc..)

- **Logiciel HYFRAN-PLUS :** Le logiciel HYFRAN-PLUS permet de calibrer différentes distributions statistiques sur une série de données, sous réserve de l'indépendance, de l'homogénéité et de la stationnarité (voir publications sur le Système d'Aide à la Décision, SAD). Un outil de Système d'Aide à la Décision a été développé pour aider à sélectionner la distribution la plus appropriée afin d'estimer les quantiles pour des périodes de retour élevées.

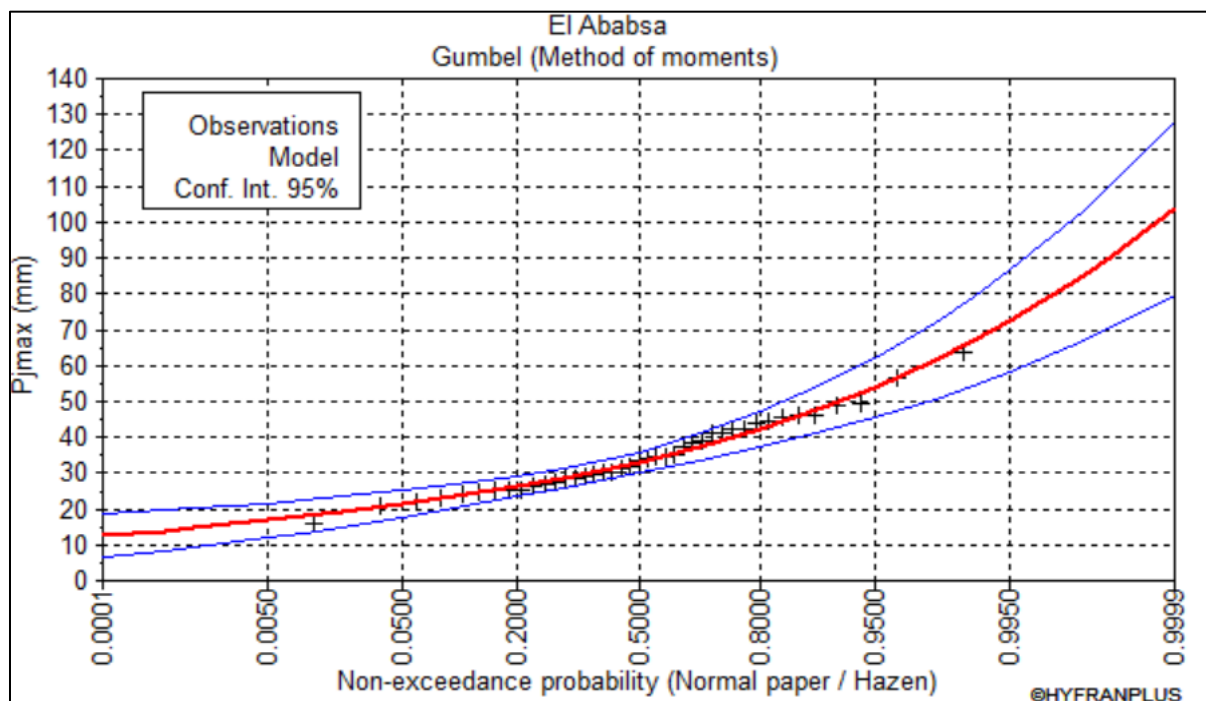
#### 1. Ajustement de la série à la loi de GUMBEL :

La loi de Gumbel est largement reconnue et utilisée pour décrire la distribution des valeurs extrêmes. En effet, la loi double exponentielle est la distribution limite de la valeur maximale d'un échantillon de  $n$  valeurs. Lorsqu'on considère le maximum annuel d'une variable comme le maximum de 365 valeurs quotidiennes, cette loi devrait être en mesure de représenter les séries de maxima annuels. L'ajustement de la série à la loi de Gumbel a

été réalisé à l'aide du logiciel HYFRAN-PLUS, et les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant :

**Tableau III.16:** Résultats d'ajustement à la loi de Gumbel.

Période de retour	Probabilité de fréquence	Débit max jour	Écart type	Intervalle de confiance
1000	0,9990	85,3	9,25	67,2-103
100	0,9900	66,9	6,28	54,6-79,2
50	0,9800	61,3	5,39	50,7-71,9
20	0,9500	53,9	4,22	45,6-62,1
10	0,9000	48,1	3,34	41,6-54,7
5	0,8000	42,1	2,47	37,3-47,0
2	0,5000	33,1	1,47	30,2-36,0



**Figure III.9 :** Graphique d'ajustement à la loi de Gumbel de la station 011715.

Voici une comparaison des propriétés de la loi de Gumbel et de l'échantillon, présentée dans le tableau suivant :

**Tableau III.17:** Comparaison des caractéristiques entre la loi de GUMBEL et l'échantillon.

Paramètres	Caractéristiques de l'échantillon	Caractéristiques de la loi
Minimum	16,1	None
Maximum	63,7	None
Moyen	34,8	34,8
Écart type	10,2	10,2
Médian	33,5	33,1
Coefficient de variation Cv	0,295	0,295
Coefficient d'asymétrie Cs	0,679	1,14
Coefficient d'aplatissement Ck	2,98	2,4

## 2. Ajustement à la loi Log Normale (Loi de Galton) :

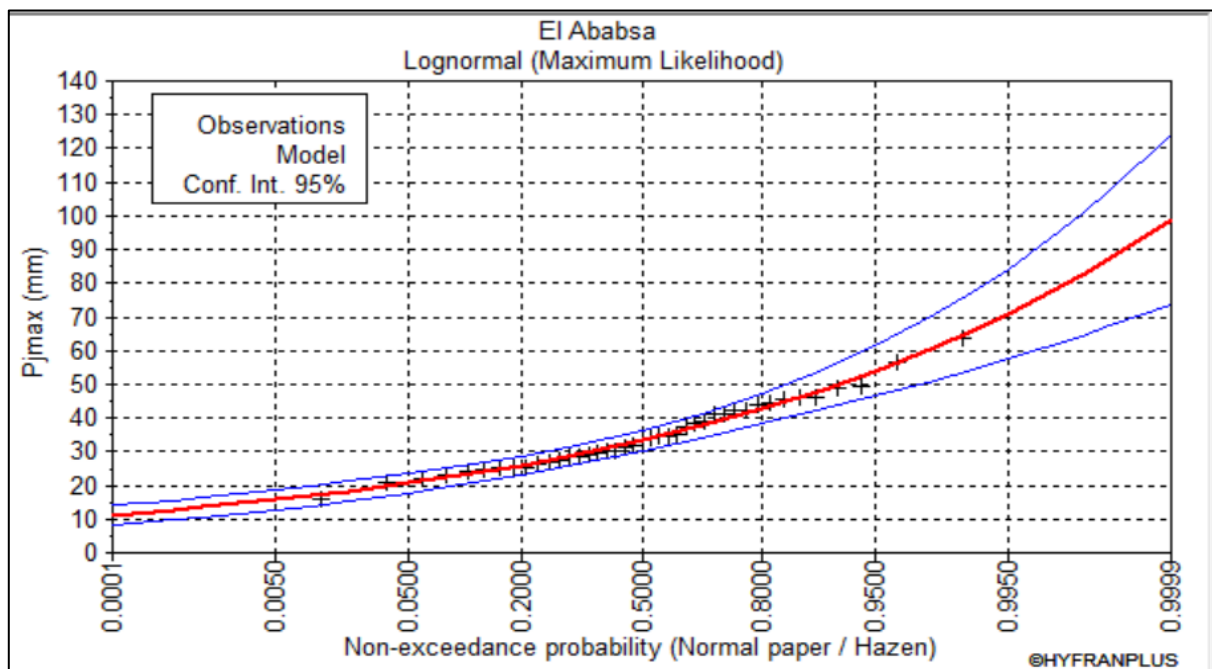
On affirme qu'une variable aléatoire  $X$  suit une distribution log-normale lorsque la variable  $v$ , qui est le logarithme naturel de  $x$  ( $v = \ln x$ ), suit une distribution normale. La loi de Galton est une dérivée de la loi normale qui devient asymétrique suite à une transformation de variable.

L'ajustement de la série de données à la loi log-normale a également été réalisé grâce au logiciel HYFRAN. Les résultats de cette opération sont présentés dans le tableau suivant :

**Tableau III.18:** Résultats d'ajustement à la loi de Log normal.

Période de retour	Probabilité de fréquence	Débit max jour	Écart type	Intervalle de confiance
1000	0,9990	82,4	9,15	64,5-100
100	0,9900	65,9	5,86	54,4-77,4
50	0,9800	60,8	4,95	51,1-70,6
20	0,9500	54,0	3,81	46,5-61,5
10	0,9000	48,5	3,01	42,6-54,4
5	0,8000	42,7	2,28	38,2-47,1
2	0,5000	33,3	1,52	30,4-36,3





**Figure III.10 :** Graphique d'ajustement à la loi de Log normal de la station 011715.

Voici une comparaison des propriétés de la loi log-normale et de l'échantillon, illustrée dans le tableau suivant :

**Tableau III.19:** Comparaison des caractéristiques de la loi de Log normal et de l'échantillon.

Paramètres	Caractéristiques de l'échantillon	Caractéristiques de la loi
Minimum	16,1	0
Maximum	63,7	None
Moyen	34,8	34,8
Écart type	10,2	10,4
Médian	33,5	33,3
Coefficient de variation Cv	0,295	0,299
Coefficient d'asymétrie Cs	0,679	0,925
Coefficient d'aplatissement Ck	2,98	4,56

✓ Comparaison entre les deux Lois d'ajustement :

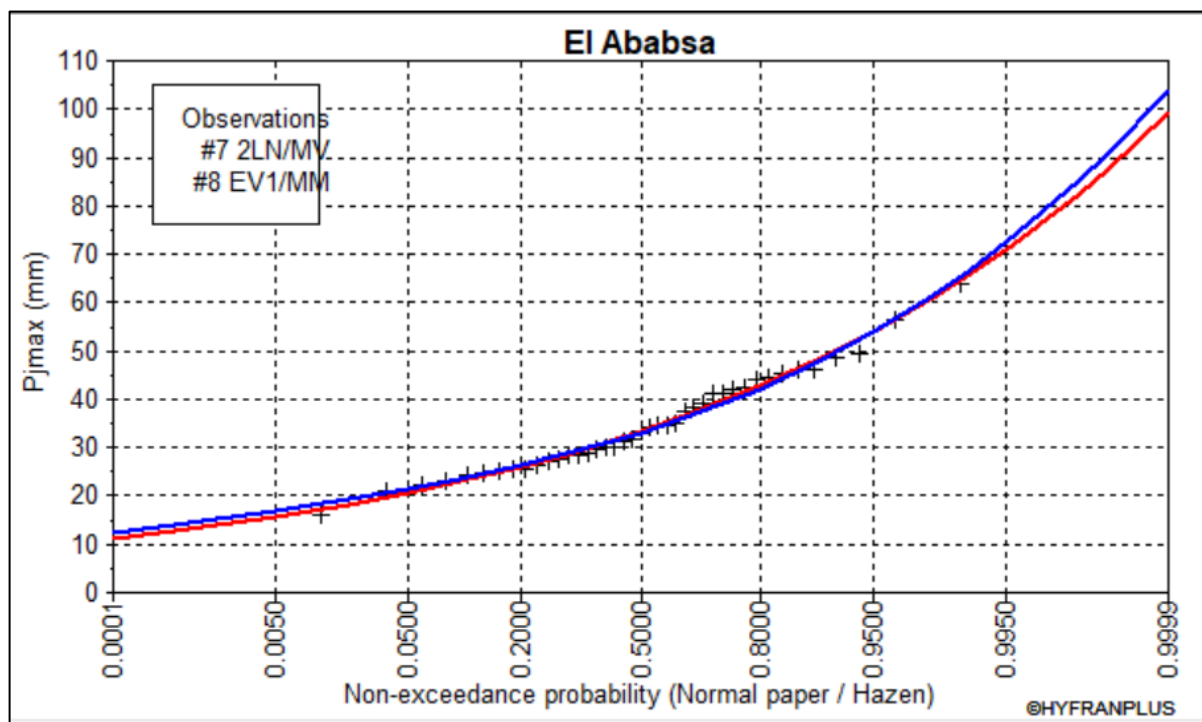


Figure III.11 : Comparaison entre les deux lois d'ajustement de la station 011715.

### III.2.1.3 Choix de la loi d'ajustement

Il est inévitable qu'il y ait des différences entre les fréquences expérimentales des valeurs observées et les fréquences des mêmes valeurs dérivées d'une fonction de distribution arbitraire. Bien que l'ajustement graphique soit une première étape importante, il n'est pas suffisant pour déterminer définitivement la loi théorique à utiliser. Le test statistique d'adéquation est une méthode qui permet de comparer la convenance de plusieurs lois dans le but de choisir celle qui offre le meilleur ajustement. Parmi les tests les plus couramment utilisés, on trouve le test du chi-carré ( $\chi^2$ ).

#### ➤ Le test d'adéquation de $\chi^2$

L'objectif d'un test d'adéquation, aussi appelé test d'ajustement, est de confirmer si le modèle sélectionné est en adéquation avec les données observées. Plus précisément, il s'agit de mettre en place une procédure de test pour vérifier la validité de l'hypothèse selon laquelle les observations sont issues d'une loi spécifique. Le test du  $\chi^2$  (chi-carré) est le plus couramment utilisé dans ce contexte.

En effet, pour décider de la loi à choisir, nous comparons les variables  $\chi^2$  calculées et  $\chi^2$  théoriques (tabulées) à un niveau de risque de 5%, c'est-à-dire un seuil de confiance de 95%. Cette comparaison nous permet de déterminer si les écarts observés entre les fréquences empiriques et théoriques sont statistiquement significatifs. Si la valeur  $\chi^2$  calculée est supérieure à la valeur  $\chi^2$  théorique, cela indique un écart notable entre les

données observées et la distribution théorique envisagée. La valeur  $\chi^2$  théorique (tabulée) est extraite de la table de  $\chi^2$  en fonction des paramètres  $\gamma$  et  $\alpha$ .

Le test de Khi carré ( $\chi^2$ ) est utilisé pour un seuil de signification  $\alpha$  imposé en général à 5%, et un degré de liberté  $\gamma$  (Touaibia, 2015).

- Si  $\chi^2$  calculée  $>$   $\chi^2$  théorique (tabulé) : On refuse la loi d'ajustement.

- Si  $\chi^2$  calculée  $\leq$   $\chi^2$  théorique (tabulé) : La loi d'ajustement sera retenue.

Les résultats du test du chi carré  $\chi^2$  ont été obtenus à l'aide du logiciel HYFRAN Plus et sont présentés dans le tableau suivant :

**Tableau III.20** : Résultats du test de  $\chi^2$ .

<b>Loi de distribution</b>	<b>Degré de liberté <math>\gamma</math></b>	<b>Nombre de classe</b>	<b><math>\chi^2</math> calculée</b>	<b><math>\chi^2</math> théorique (tabulé)</b>
<b>Gumbel</b>	5	8	6,8	11,07
<b>Log Normale</b>	5	8	7,6	11,07

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

### III.2.2 Estimation des débits maximums fréquents à l'aide de la méthode GRADEX :

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).

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).

#### 1. 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 (Meddi et Zeroual, 2018) :

- **Hypothèse N° 1** : La distribution des précipitations sur le bassin est asymptotiquement décrite par une loi de Gumbel ou une loi exponentielle, selon la méthode d'échantillonnage utilisée. Le Gradex représente la pente de la courbe de distribution sur un graphique qui montre les précipitations en fonction du logarithme de la période de retour.
- **Hypothèse N° 2** : Le déficit d'écoulement, défini comme la différence entre le volume d'eau précipité et celui écoulé à l'exutoire du bassin versant sur une période de temps donnée, cesse d'augmenter en moyenne au-delà d'une certaine valeur de pluie. En d'autres termes, au-delà d'un certain seuil de saturation du bassin versant, la distribution du déficit d'écoulement ne dépend plus de la valeur de la pluie ou du débit. Graphiquement, cette hypothèse se traduit par un parallélisme entre la fonction de répartition des précipitations et celle des écoulements sur une période de temps donnée, à partir d'un point pivot fixé généralement entre 10 et 50 ans selon le bassin versant étudié.
- **Hypothèse N° 3** : Indépendamment de sa fréquence ou de sa durée de retour, le débit de crue de pointe (valeur maximale observée) peut être déterminé à partir du volume d'eau écoulé (sur la période de temps considérée), en utilisant un coefficient de multiplication moyen spécifique au bassin versant. Ce coefficient, également connu sous le nom de coefficient de forme ou de coefficient d'affinité, peut être estimé à partir des hydrogrammes des crues enregistrées sur le bassin versant.

### III.2.2.1 Les phases de la méthode :

- Ajuster par la loi de Gumbel des pluies maximales journalières.
- Calculer le Gradex des précipitations a (pente de la droite de Gumbel).

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

- Ajustement des débits observés à la loi de Gumbel pour déterminer le débit décennal (point pivot de l'extrapolation des débits). Exprimer le débit décennal en termes de lame d'eau équivalente par la formule :

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

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

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

Avec :

a : Gradex de la pluie.

$\mu$  : Variable réduite de Gumbel.

Et :

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

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

Pour T=10ans :

$$b' = Q10ans - a\mu. \quad (III.31)$$

Tracer la droite de l'équation 3.11 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 m3/s par la formule :

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

- Calcul du débit de pointe

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

Ainsi :

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

Sélectionner une durée de pas de temps n heures (habituellement équivalente à la moyenne des intervalles de temps de base des hydrogrammes de crues disponibles). Pour des raisons pratiques, une valeur arrondie est souvent retenue, comme 2, 4, 6... jusqu'à 48 heures. Les débits de pointe résultants sont relativement insensibles à n ; il est simplement crucial de ne pas commettre d'erreur significative dans l'ordre de grandeur de n.

### III.2.2.2 Application de la méthode de GRADEX

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

**Tableau III.21:** Caractéristique des stations pluviométriques (Source : ANRH).

Station	Code	Coordonnées			Nombre d'années
		X(m)	Y(m)	Z(m)	
Harraza	011718	445,35	321,4	312	31
Sidi lakhder	011711	452	329,65	250	41
Khemis	011717	456,2	329	300	44

**Tableau III.22:** Précipitations maximales journalières de la station pluviométrique de la station de Herraça 011718 (Source : ANRH).

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

- Nombres d'heures :  $n = 2$  h.
- Ajustement par la loi de Gumbel des pluies maximales journalières de la station pluviométrique de la station de Herraça 011718.

**Tableau III.23:** Résultats d'ajustement par la loi de Gumbel des pluies maximales journalières de la station pluviométrique de la station de Herraça 011718.

Période de retour	Probabilité de fréquence	Débit max jour	Ecart type	Intervalle de confiance
1000	0,9990	76,6	9,32	58,3-94,8
100	0,9900	60,1	6,33	47,7-72,6
50	0,9800	55,3	5,43	44,5-65,8
20	0,9500	48,6	4,25	40,2-56,9
10	0,9000	43,4	3,37	36,8-50
5	0,8000	38,1	2,49	33,2-43
2	0,5000	30	1,48	27,1-32,9

- L'équation de la droite de Gumbel pour la station pluviométrique Herraça en utilisant le logiciel Hyfran-Plus sont données ci-dessous :

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

Avec :

Le Gradex 'a' :  $a = 7,1$

$b = 27,4$

- Le débit décennal de la station hydrométrique de Al Ababsa 011715 est :

$$Q_{10\text{ans}} = 48,1 \text{ m}^3/\text{s}$$

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

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

$$R(\text{mm}) = 26,4 \text{ mm}/24\text{h}$$

- Étendre la distribution des débits au-delà de 0.9 (T=10 ans) en utilisant une droite ayant une pente équivalente au Gradex de la pluie :

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

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

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

Alors :

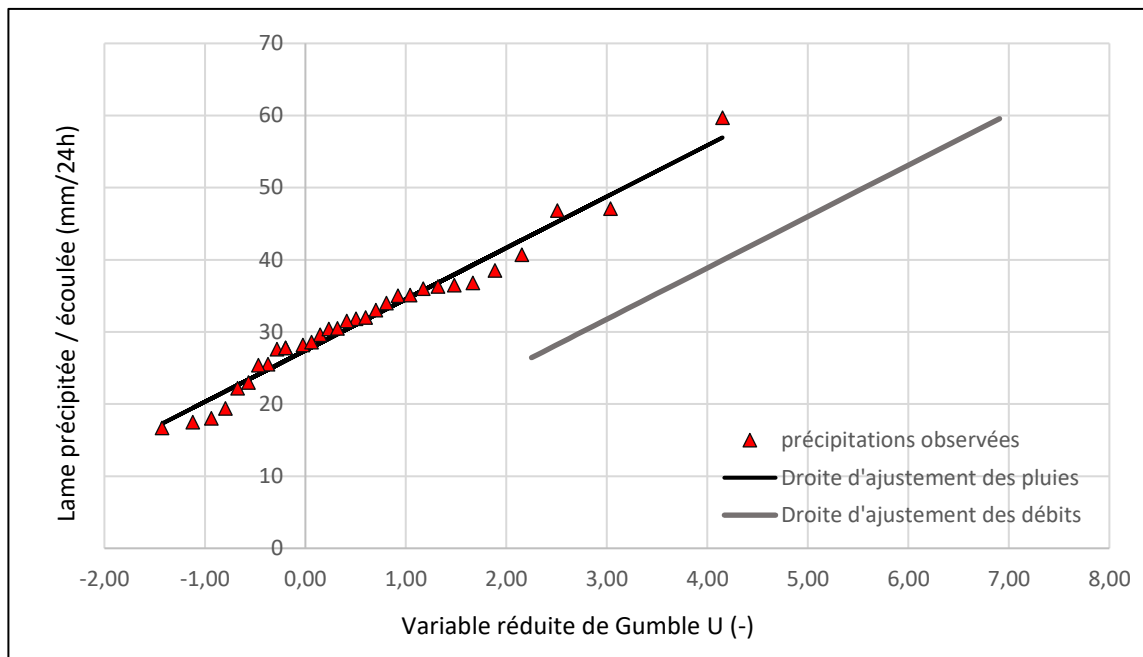
$$b' = 10,43$$

Donc :

$$Q_{\mu\%} = 7,1 \mu + 10,43$$



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



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

- On calcule les débits de pointe pour les différentes périodes de retour, tel que on a le coefficient de pointe :  $C_p = 1,5$

Avec :

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

**Tableau III.24:** Résultat de calcul pour la station de Harraza pour les différentes périodes de retour.

Temps de retour (ans)	Fréquence empirique selon Hazen	u	Précipitation	Débits moyen (mm/24h)	Débits moyen (m <sup>3</sup> /s)	Débits de Point
10	0,9000	2,25	43,432	26,4	49	73
20	0,9500	2,97	48,6	31,6	58	87
50	0,9800	3,9	55,2	38,2	70	105
<b>100</b>	<b>0,9900</b>	<b>4,6</b>	<b>60,1</b>	<b>43,1</b>	<b>79</b>	<b>119</b>
1000	0,9990	6,61	76,6	59,6	109	164

- On applique les mêmes étapes de la méthode de GRADEX sur les autres stations

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

Période de retours (ans)	Station hydrométrique El Ababsa	Stations pluviométriques		
		Herraza	Sidi Lakhdar	Khemis
10	48,1	73	73	78
20	53,9	87	97	100
50	61,3	105	128	130
<b>100</b>	<b>66,9</b>	<b>119</b>	<b>151</b>	<b>151</b>
1000	85,3	164	229	224

- ✓ La station pluviométrique donne le plus grand débit qui est de 151m<sup>3</sup>/s, on le prend donc comme débit du projet.

### 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 approche implique la construction d'une courbe en utilisant deux équations paraboliques, l'une représentant la montée de la crue et l'autre sa décrue.

➤ **Branche de crue (montée) :**

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

T<sub>m</sub> = T<sub>c</sub> (pour les petits bassins versants).

Avec :

T<sub>c</sub> qui est le temps de concentration du bassin versant (heures).

Q<sub>m</sub> : Débit instantané de montée (m<sup>3</sup>/s).

➤ **Branche de décrue (descente) :**

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

Avec :

Q(t) : Débit à l'instant t (m<sup>3</sup>/s).

$Q_{\max}$  : Débit maximal de la crue (m<sup>3</sup>/s).

-  $T_m$  : temps de montée (h)

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

-  $T_d$  : temps de décrue (h)

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

-  $T_b$  : temps de base (h)

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

- m,n : puissances des paraboles (m=3 ; n=2)

**Tableau III.26:** Coefficient de forme de l'hydrogramme de crue " $\delta$ ".

Description du cours d'eau	Valeur de " $\delta$ "
Petits ruisseaux et vallées dans des bassins versants sans végétation et peu 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
Rivières de taille moyenne à grande, avec des plaines d'inondation étendues.	4,0 – 7,0

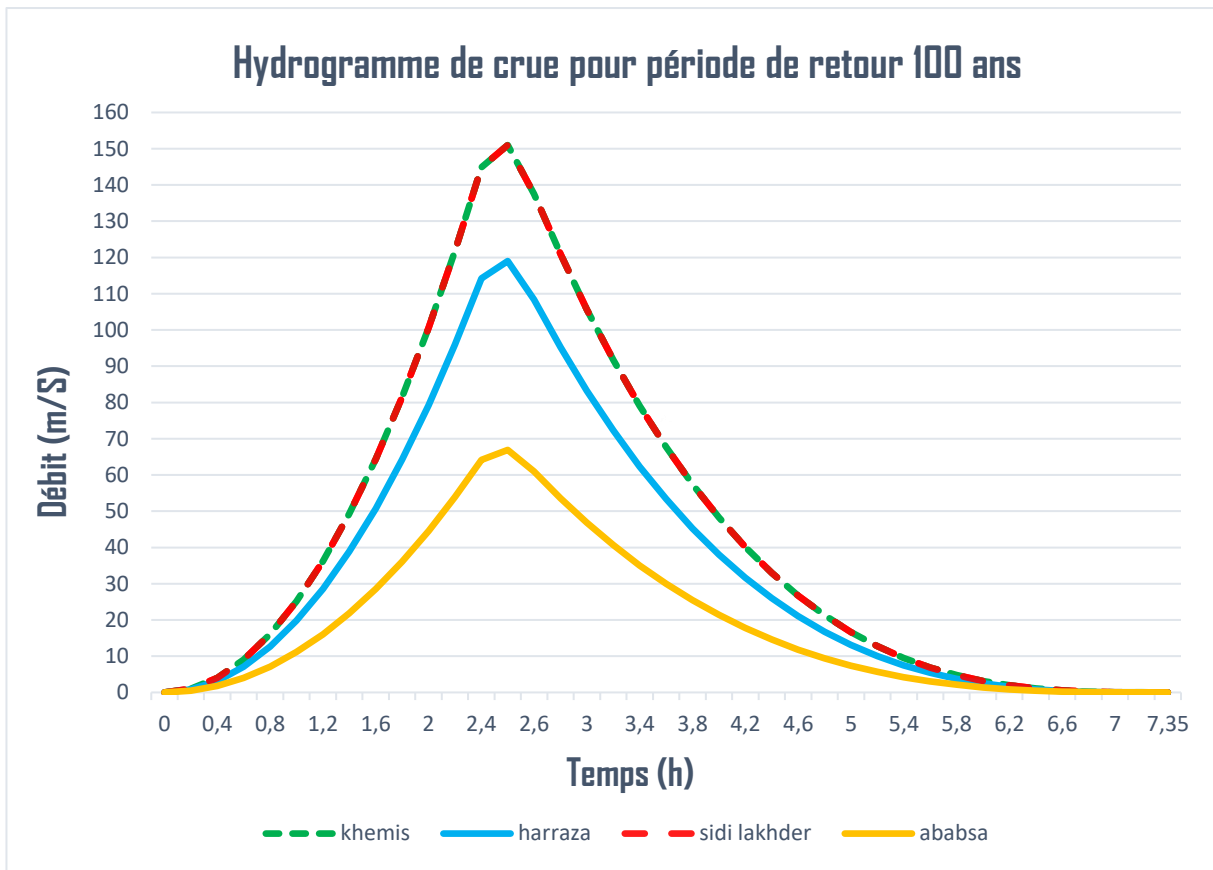
**Tableau III.27:** Paramètres de calcul de l'hydrogramme de crue.

Paramètre	Unités	Valeur
$T_c$	Heures	2,45
$T_m$	Heures	2,45
$T_d$	Heures	4,9
$T_b$	Heures	7,35
m	/	3
n	/	2
$\delta$	/	2

Le tableau suivant présente l'hydrogramme de crue pour période de retour 100 ans les différentes stations :

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

Temps	Période de retour 100 ans			
	Station hydrométrique	Stations pluviométrique		
	Ababsa	Herraza	Sidi Lakhdar	Khemis
	Q (m3/s)	Q (m3/s)	Q (m3/s)	Q (m3/s)
0	0	0	0	0
0,2	0,44	0,793	1,00	1,00
0,4	1,78	3,17	4,02	4,02
0,6	4,01	7,13	9,05	9,05
0,8	7,13	12,688	16,099	16,09
1	11,14	19,82	25,156	25,1
1,2	16,04	28,54	36,22	36,2
1,4	21,8	38,85	49,30	49,30
1,6	28,53	50,75	64,39	64,39
1,8	36,11	64,23	81,50	81,50
2	44,58	79,30	100,62	100,62
2,2	53,94	95,95	121,75	121,75
2,4	64,19	114,1	144,899	144,8
<b>2,45</b>	<b>66,9</b>	<b>119</b>	<b>151</b>	<b>151</b>
2,6	60,94	108,40	137,5	137,55
2,8	53,56	95,27	120,8	120,89
3	46,80	83,25	105,64	105,64
3,2	40,6	72,29	91,73	91,73
3,4	35,04	62,33	79,10	79,10
3,6	29,98	53,33	67,68	67,68
3,8	25,44	45,25	57,42	57,42
4	21,37	38,02	48,25	48,25
4,2	17,77	31,61	40,116	40,11
4,4	14,59	25,96	32,94	32,9
4,6	11,82	21,03	26,69	26,69
4,8	9,42	16,77	21,28	21,28
5	7,37	13,12	16,6	16,65
5,2	5,65	10,05	12,75	12,75
5,4	4,21	7,500	9,51	9,516
5,6	3,04	5,420	6,87	6,87
5,8	2,11	3,766	4,788	4,7
6	1,399	2,488	3,15	3,15
6,2	0,864	1,53	1,95	1,952
6,4	0,487	0,86	1,10	1,100
6,6	0,23	0,42	0,54	0,541
6,8	0,09	0,168	0,21	0,213
7	0,024	0,04	0,05	0,055
7,2	0,001	0,003	0,004	0,004
7,35	0	0	0	0

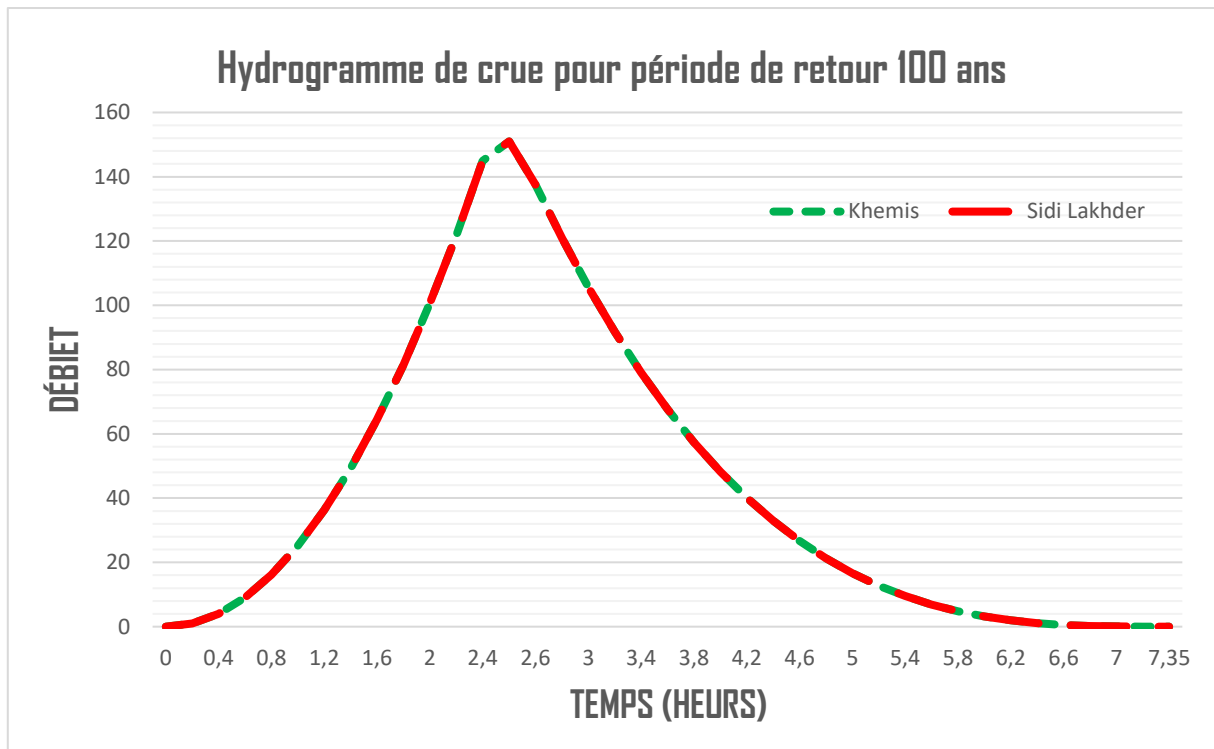


**Figure III.13 :** Hydrogramme de crue pour période de retour 100 ans pour les différentes stations.

### III.2.4 Choix de la crue du projet

La crue de projet est définie comme la crue la plus importante que la structure doit pouvoir gérer, en fonction d'une probabilité spécifique. Le choix de la crue pour ce projet est principalement basé sur l'importance de la structure à construire, les conséquences potentielles en aval et les considérations techniques et économiques liées à l'aménagement et à l'environnement.

Dans le cadre de cette initiative visant à lutter contre les inondations, nous avons choisi une période de retour de 100 ans. Nous avons observé que la station pluviométrique du Khemis 011717 et la station pluviométrique de Sidi Lakhder 011711 présentent le même débit, fournissant un débit en pourcentage plus élevé que celui obtenu par la méthode GRADEX appliquée aux autres stations pluviométriques et à la station hydrométrique. En conséquence, nous avons décidé d'adopter un débit de conception de 151 m<sup>3</sup>/s.



**Figure III.14 :** Hydrogramme de crue du projet pour les deux stations pluviométriques Khemis 011717 et Sidi Lakhder 011711.

## Conclusion

Ce chapitre a pour objectif de déterminer les paramètres hydrologiques nécessaires pour l'aménagement de l'Oued Rihane, afin de protéger les villes d'Oued Rihane et le site de l'usine de matériaux explosifs ONEX contre les crues centennales. Pour cette étude hydrologique, nous avons utilisé les données fournies par la station hydrométrique ainsi que par les stations pluviométriques réparties sur le bassin versant de l'Oued Rihane. En appliquant la méthode GRADEX, nous avons déterminé le débit centennal de la crue. En conclusion, nous avons choisi un débit de projet de 151 m<sup>3</sup>/s.

# **Chapitre IV : Diagnostic et modélisation du cours d'eau.**

## Introduction

Avant d'entreprendre tout projet d'aménagement, il est essentiel de réaliser une étude hydraulique approfondie. Cette démarche consiste à examiner de manière détaillée les écoulements dans les canaux, qu'ils soient naturels ou artificiels, et à évaluer les risques d'inondations.

La prévention des inondations devient particulièrement critique lorsque les niveaux d'eau augmentent et que les débits sont élevés. La conception des infrastructures de protection contre les crues est généralement axée sur la gestion des hauteurs d'eau, sans pour autant négliger les problèmes liés à l'érosion.

La modélisation hydraulique a pour but de prédire de façon numérique l'évolution des caractéristiques hydrauliques pendant une crue : débits, vitesses d'écoulement, niveaux d'eau, etc. Cette approche permet de déterminer les zones susceptibles d'être inondées, de calculer les temps d'immersion et d'estimer la montée des eaux. Il est important de noter que les modèles hydrauliques sont des simplifications schématiques des systèmes réels.

## Généralités

L'étude des écoulements naturels est un domaine intégré à l'hydraulique à surface libre. Ce qui la distingue de l'hydraulique en charge est la présence d'une surface libre, directement exposée à l'atmosphère. Dans ces conditions, la gravité devient le moteur principal de l'écoulement, contrairement aux écoulements en charge où c'est le gradient de pression qui prédomine. On parle alors d'écoulements gravitaires.

Une caractéristique essentielle de ces écoulements est la faible profondeur de l'eau par rapport à la longueur de l'écoulement, que ce soit le cours d'une rivière ou une conduite. La variété des écoulements à surface libre et leurs applications couvrent un large éventail, comprenant les rivières, les cours d'eau et les fleuves, mais aussi les écoulements dans des conduites partiellement remplies, comme dans les systèmes d'irrigation ou d'assainissement.

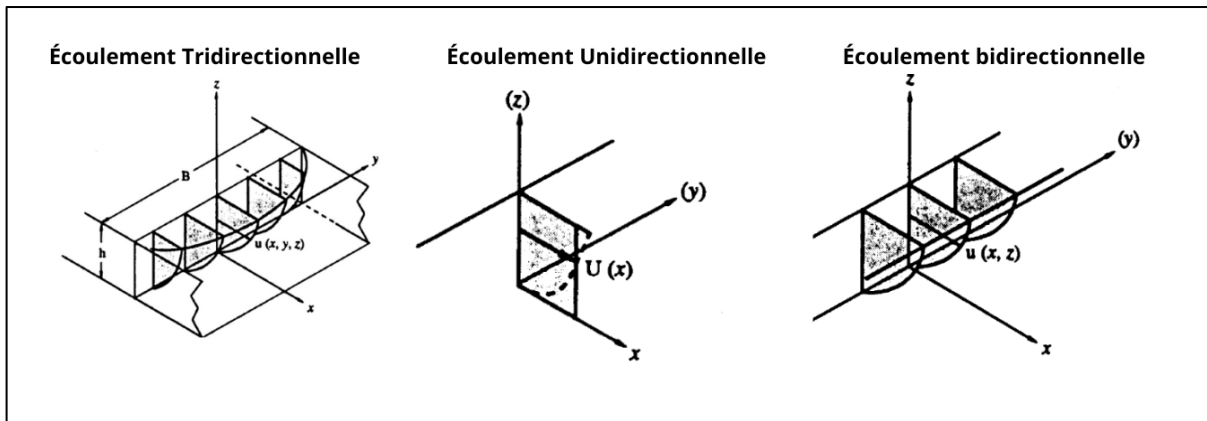
Pour modéliser ces écoulements, il est nécessaire de diviser le domaine global en deux sous-domaines non miscibles, séparés par une interface claire représentant la surface libre. Le premier sous-domaine est constitué d'un volume d'eau, tandis que le second, situé au-dessus, est rempli d'air.

### IV.1 Rappel de quelques notions :

#### IV.1.1 Paramètres Hydraulique :

- **Débit** : Le débit représente la mesure de la quantité d'eau qui passe à travers un canal pendant une durée donnée. C'est un élément essentiel pour évaluer la quantité d'eau circulant dans un système hydraulique. Il est habituellement indiqué en mètres cubes par seconde ( $m^3/s$ ) ou en litres par seconde (l/s).
- **Vitesse de l'écoulement (V)** : La vitesse d'écoulement représente la rapidité avec laquelle l'eau se déplace à travers le système. Cette vitesse peut fluctuer selon la forme du canal, la pente, la rugosité de la surface, entre autres facteurs. Son évaluation est cruciale pour comprendre les performances hydrauliques et le transport des sédiments. Généralement, elle est exprimée en mètres par seconde (m/s).





**Figure IV.1 :** Schéma représente la dimensionnalité et directionnalisé de l'écoulement  
(Source : Roland O. YONABA - 2015).

- **Pente hydraulique (i) :** La pente désigne l'inclinaison du terrain par laquelle l'eau s'écoule. Elle impacte la vitesse de l'écoulement et sert à évaluer les propriétés et les performances hydrauliques d'un système. Cette mesure est habituellement exprimée en pourcentage.

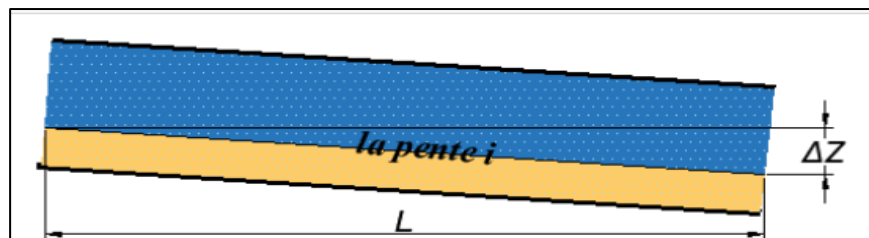
On calcule la pente par la relation suivante :

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

Avec :

$\Delta Z$  : la différence de niveau entre les altitudes ( $Z_1 - Z_2$ ).

L : la longueur.



**Figure IV.2 :** Schéma représente la pente.

- **Le coefficient de Manning (n) :** Représente un paramètre définissant la rugosité de la surface d'écoulement ou du lit d'un cours d'eau. Ce coefficient est habituellement établi par des expérimentations pour diverses surfaces telles que le béton, l'herbe, les graviers, etc. Il est généralement symbolisé par "n" et est adimensionnel.
- **La pression :** Représente la force exercée par l'eau sur une surface spécifique. Elle est couramment exprimée en Pascal (Pa) ou en bar. Ainsi, à la surface libre d'un canal, la pression est approximativement équivalente à la pression atmosphérique, soit 1 bar.
- **Poids volumique  $\gamma_w$  :** Le poids volumique de l'eau est noté :

$$\gamma_w = g \cdot \rho_w \quad (IV.2)$$

Avec :

$\rho_w$  : La densité de l'eau est de 1000 kg/m<sup>3</sup>.

g : désigne l'accélération de la pesanteur et vaut 9.81 m/s<sup>2</sup>.

#### IV.1.2 Paramètres géométriques :

- **Hauteur normale  $h_n$**  : C'est la hauteur d'un écoulement permanent uniforme dans un bief. La hauteur normale est fonction du débit Q, de la rugosité K, et de la pente moyenne.
- **Largeur au miroir (B)** : C'est la distance horizontale entre les parois du canal mesurée à la surface de l'eau, elle exprimé en mètres.
- **Périmètre mouillé (P)** : C'est la longueur du contour de la section transversale du canal en contact avec l'eau.
- **Surface mouillée transversale (S)** : C'est l'aire de la section transversale du canal occupée par l'eau.
- **Rayon hydraulique** : C'est la longueur caractéristique est noté :

$$R = \frac{S}{P} \quad (IV.3)$$

- **Pente longitudinale (i)** : La pente longitudinale représente la pente du fond du canal dans la direction de l'écoulement.
- **Largeur au fond (b)** : C'est la distance horizontale entre les deux parois ou les bords inférieurs d'un canal.
- **Le lit mineur** : On parle du lit habituel d'un cours d'eau, par opposition au lit majeur qui représente l'empreinte maximale historique du cours d'eau ou la plaine inondable. Le terme "niveau des plus hautes eaux" (PHE) est également utilisé pour décrire la cote maximale atteinte par la surface libre d'un cours d'eau.
- **Le lit majeur** : Représente la zone que le cours d'eau occupe lors des périodes de crue, englobant les zones inondées. Le lit d'étiage, ou chenal d'étiage, désigne la partie du cours d'eau occupée pendant les périodes d'étiage, lorsque le débit d'eau est au plus bas.
- **Tirant d'eau** : Profondeur maximale d'une section d'écoulement.

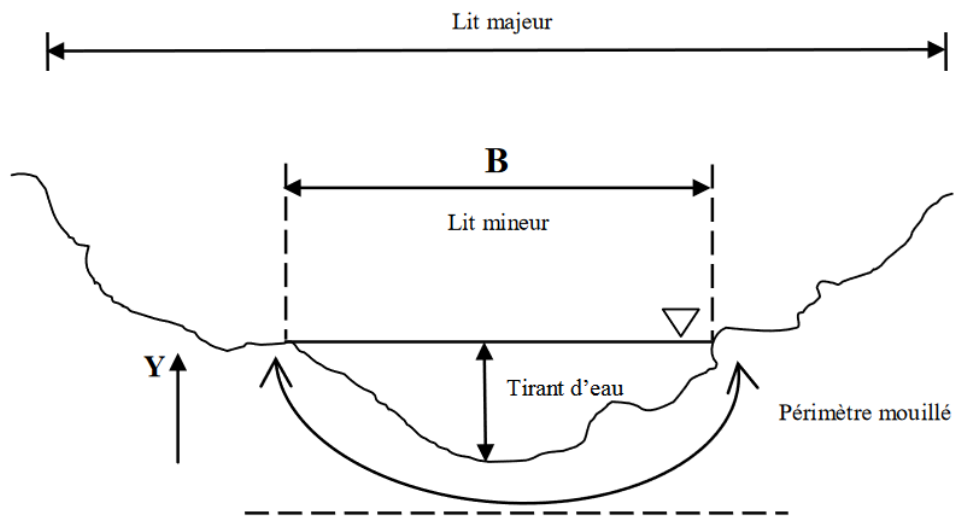


Figure IV.3 : Coupe transversale d'un canal naturel

## IV.2 Type d'écoulement :

### IV.2.1 Variable dans le temps :

- **Écoulement stationnaire (permanent) :**

Un écoulement est considéré comme permanent lorsque les vitesses moyennes et ponctuelles ( $V$  et  $U$ ) ainsi que la profondeur  $h$  restent constantes dans le temps et en tout point de l'espace, dans toutes les directions. Par conséquent, le débit demeure constant entre les différentes sections du canal, sans apport latéral.

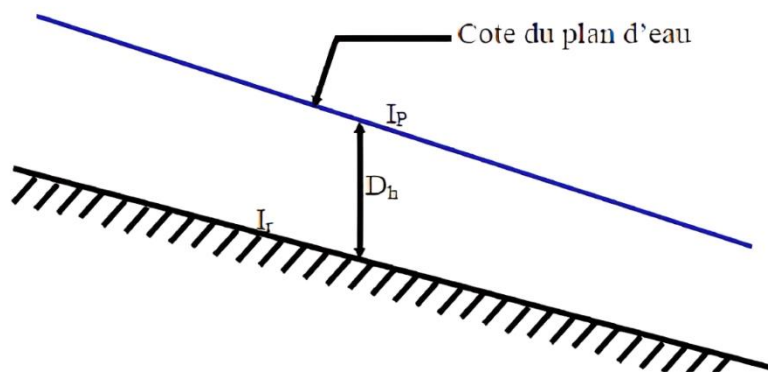


Figure IV.4 : Écoulement permanent (M. HASSANE, 2009/2010).

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

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

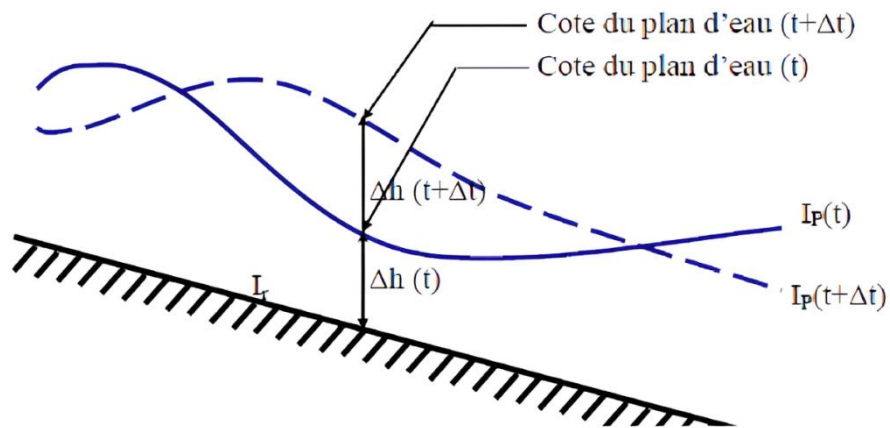


Figure IV.5 : Écoulement non permanent (M. HASSANE, 2009/2010).

#### IV.2.2 Variabilité dans l'espace :

- **L'écoulement uniforme** : Est caractérisé par deux conditions (la permanence et la continuité). On considère qu'un écoulement est uniforme lorsque la profondeur, la pente, la vitesse et la section droite restent constantes sur une distance spécifique du canal.
- **L'écoulement non uniforme** : la vitesse et la profondeur du fluide changent le long du cours d'eau.
  - Pour un écoulement non uniforme graduellement varié, les variations de la profondeur et de la vitesse du fluide se produisent progressivement le long du canal.
  - En revanche, dans un écoulement non uniforme rapidement varié, les changements de profondeur et de vitesse du fluide se produisent rapidement et brusquement le long du canal.

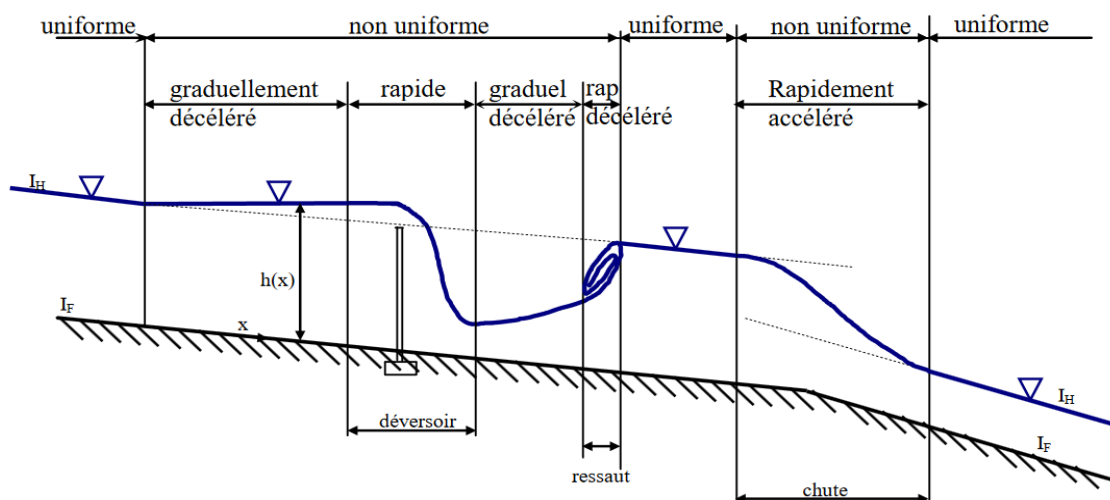


Figure IV.6 : Diagramme représentant les divers types d'écoulements (M. HASSANE, 2009/2010).

### IV.3 Régime d'écoulement :

Un écoulement peut être catégorisé en différents types en fonction du nombre de Froude, qui prend en compte les forces d'inertie et les forces gravitationnelles. (Lancastre, 1996).

Il est défini comme le rapport entre les forces de gravité et les forces d'inertie où :

$$F_r = \frac{v}{\sqrt{g D_h}} \quad (\text{IV.4})$$

Avec :

$v$  : Vitesse moyenne de l'écoulement.

$D_h$  : Profondeur hydraulique.

$g$  : Accélération gravitationnelle.

Le nombre de Froude permet de classer les écoulements de la manière suivante :

- Écoulement fluvial  $F_r < 1$
- Écoulement torrentiel  $F_r > 1$
- Écoulement critique  $F_r = F_{rc} = 1$

La classification en régime fluvial, torrentiel ou critique s'applique spécifiquement au cas du régime uniforme.

Lorsque :

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

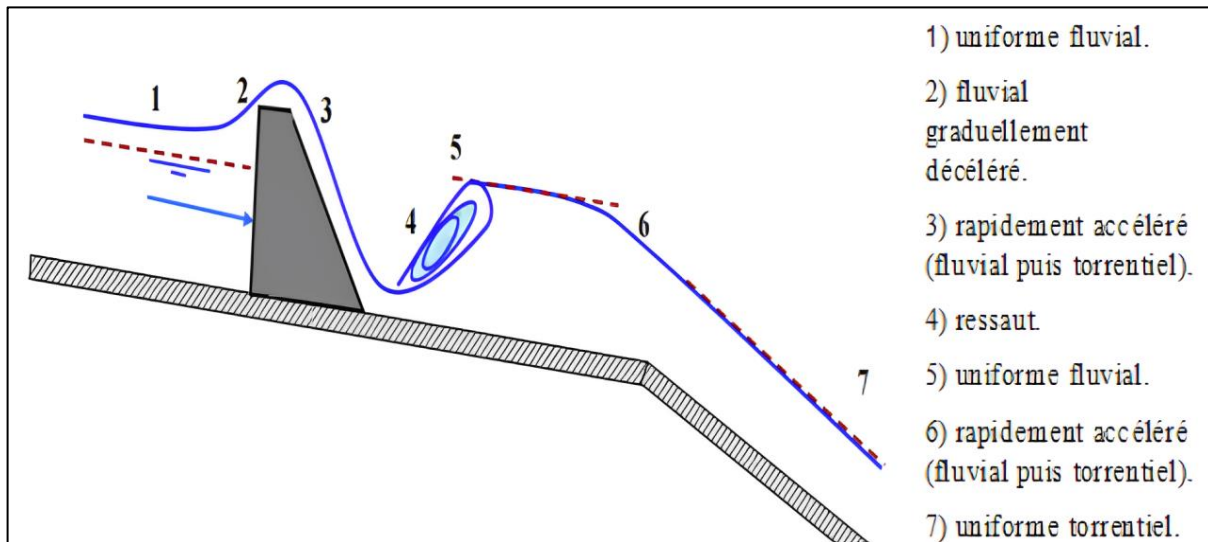
Par conséquent, les effets du nombre de Reynolds  $Re$ , et du nombre de Froude,  $F_r$ , donnent quatre régimes d'écoulement.

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

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

Donc la combinaison des deux nombres donne la classification suivante :

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



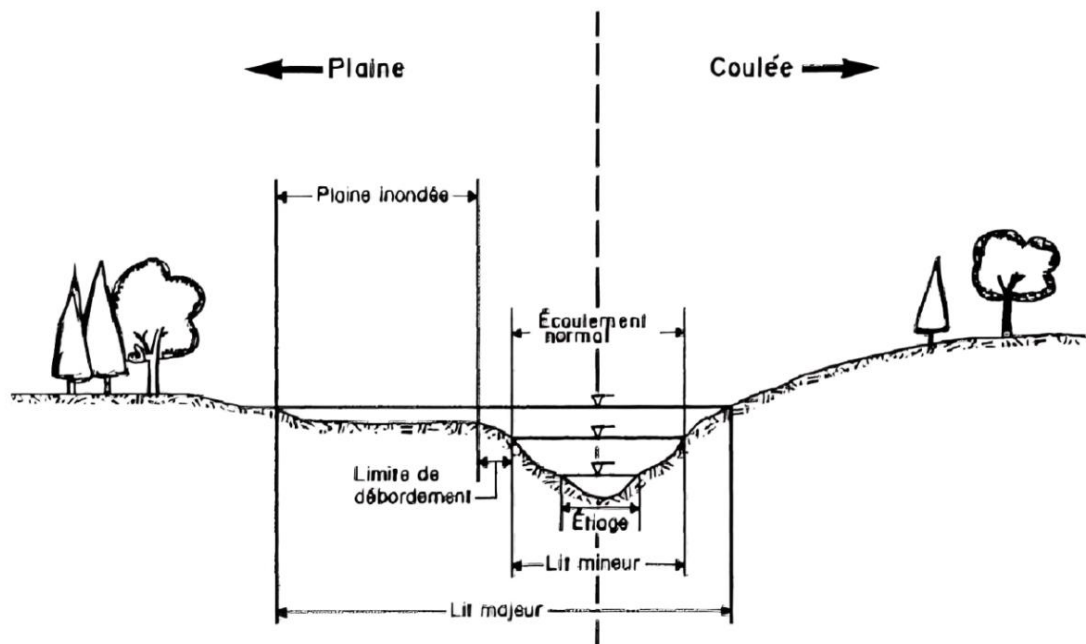
**Figure IV.7 :** Diagramme illustrant les divers types de régimes d'écoulement (M. HASSANE, 2009/2010).

#### IV.4 Cours d'eau :

Dans les oueds et les rivières, l'eau s'écoule généralement à ciel ouvert, en surface, et est influencée par divers facteurs tels que la pente, la géométrie du canal et la rugosité du profil hydraulique. En fonction de leur aménagement, on distingue deux types de cours d'eau :

##### IV.4.1 Les canaux naturels :

Les canaux naturels désignent les cours d'eau qui se forment naturellement sur (ou sous) terre, tels que les ruisseaux, les torrents, les rivières, les fleuves et les estuaires. Leurs caractéristiques géométriques et hydrauliques sont souvent assez irrégulières.



**Figure IV.8 :** Cours d'eau dans son environnement (Source : Dr Habibi Brahim - 2013).

#### IV.4.2 Les canaux artificiels :

Il s'agit de cours d'eau créés par l'activité humaine, tels que les canaux découverts construits au niveau du sol (utilisés pour la navigation, l'approvisionnement en eau, le drainage, l'irrigation, etc.) ou les canaux couverts où les liquides ne remplissent pas toute la section (tunnels hydrauliques, aqueducs, drains, égouts). Les caractéristiques hydrauliques des canaux artificiels sont généralement uniformes, et l'application des principes de l'hydraulique conduit souvent à des résultats satisfaisants.

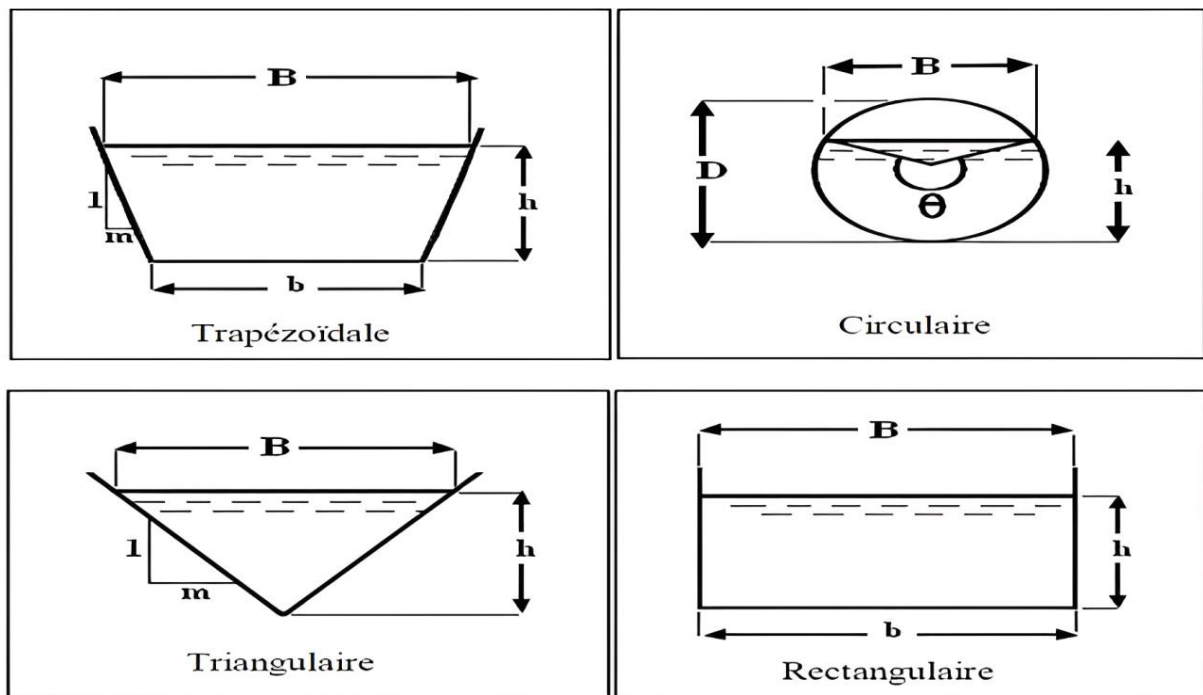


Figure IV.9 : Canaux artificiels (Source : TOUMI Abdelouaheb - 2016).

#### IV.5. Diagnostique et modélisation du cours d'eau non Aménagé :

##### IV.5.1 Modélisation de l'écoulement :

##### IV.5.1.1 Choix du type de modèle hydraulique :

Nous avons choisi le logiciel de calcul HEC-RAS (version 6.5) pour notre étude, car il offre de nombreux avantages :

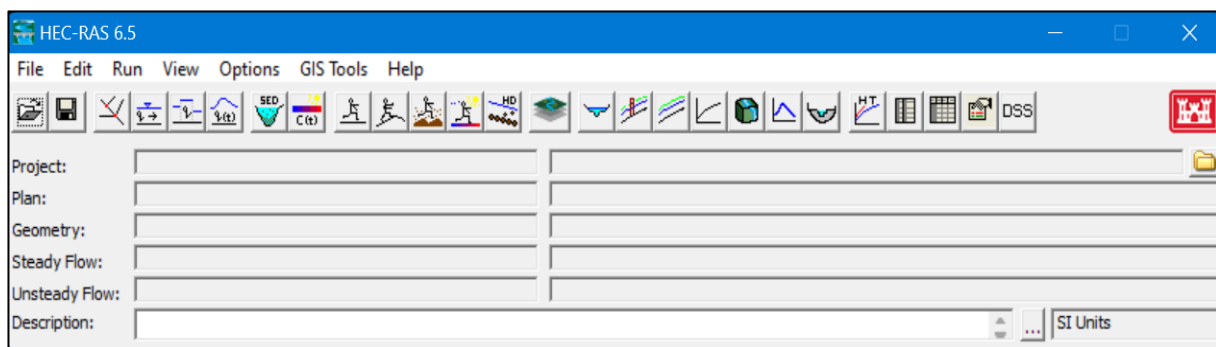
- Il est gratuit et peut être facilement téléchargé en ligne.
- Il nous permet d'étudier l'impact de la construction d'ouvrages tels que des ponts, des seuils et des épis sur les cours d'eau.
- Nous pouvons utiliser ce logiciel pour étudier les inondations et comprendre comment elles se produisent.
- Il offre la possibilité de réaliser des modélisations 1D ou 2D des rivières et des plaines d'inondation, ce qui nous donne une vision précise des différentes situations.

- Le logiciel prend en compte les différents types de régimes d'écoulement, comme les régimes surcritique, de transition et supercritique, tout en prenant en considération les effets des ouvrages hydrauliques tels que les ponts et les seuils.
- Nous pouvons exploiter les résultats cartographiques pour identifier les zones à risque et prendre des mesures appropriées pour les gérer.

#### IV.5.1.2 Présentation du logiciel HEC-RAS :

Développé et distribué gratuitement par le Centre d'Ingénierie Hydrologique de l'US Army Corps of Engineers, HEC-RAS est un logiciel de simulation des écoulements dans les cours d'eau et les canaux. Jusqu'à la version 5.0, le modèle était principalement unidimensionnel, ce qui limitait la modélisation des variations hydrauliques liées aux changements de forme de la section transversale, aux coudes et autres aspects des écoulements en 2D ou 3D. À partir de la version 5.0, le logiciel permet la modélisation 1D ou 2D des rivières et des plaines d'inondation (*Cheloufi & Foul, 2018*).

HEC-RAS intègre divers aspects hydrologiques et hydrauliques, notamment l'analyse du ruissellement des précipitations, l'hydraulique fluviale, l'évaluation des dommages d'inondation, la simulation des écoulements permanents et non permanents, le transport des sédiments, l'analyse de la qualité de l'eau, ainsi que des fonctions facilitant la conception des ouvrages hydrauliques (*Cheloufi & Foul, 2018*).



**Figure IV.10 :** Interface utilisateur du logiciel HEC-RAS (version 6.5).

#### IV.5.1.3 Objectif du logiciel HEC-RAS :

Il calcule les hauteurs de l'eau le long des canaux naturels et artificiels. Il le fait en utilisant des données d'écoulement permanent, pour lesquelles il calcule la hauteur de l'eau à différentes sections du canal. Il peut également simuler des crues en utilisant des hydrogrammes, ce qui signifie qu'il peut prédire comment l'eau va monter et descendre au fil du temps lorsqu'il y a une augmentation soudaine du débit.

HEC-RAS se base sur le modèle 1D de Saint Venant, ce qui signifie qu'il regarde l'écoulement de l'eau dans une seule direction le long du canal. Il utilise l'équation de l'énergie pour calculer ces hauteurs d'eau, en prenant en compte des facteurs tels que la friction sur le fond du canal et les changements de largeur du canal qui peuvent affecter l'écoulement. Dans certaines situations où l'écoulement change rapidement, comme près des ponts ou aux endroits où les rivières se



rejoignent, le programme utilise une autre équation appelée l'équation de quantité de mouvement pour faire des calculs plus précis.

#### **IV.5.1.4 Fonctionnement de HEC-RAS :**

HEC-RAS possède une capacité avancée pour modéliser une variété étendue de conditions d'écoulement. Le centre de commande, élément central d'HEC-RAS, facilite la gestion et l'intégration des divers types de données :

- Géométrie ;
- Débits et conditions aux limites ;
- Conditions de calcul ;
- Résultats.

#### **IV.5.2 Application d'HEC-RAS sur Oued Rihane :**

##### **IV.5.2.1 Banque de données nécessaires à l'application du modèle HEC-RAS :**

Pour utiliser le modèle HEC-RAS, il est essentiel de disposer d'une banque de données spécifique à la zone d'étude, comprenant :

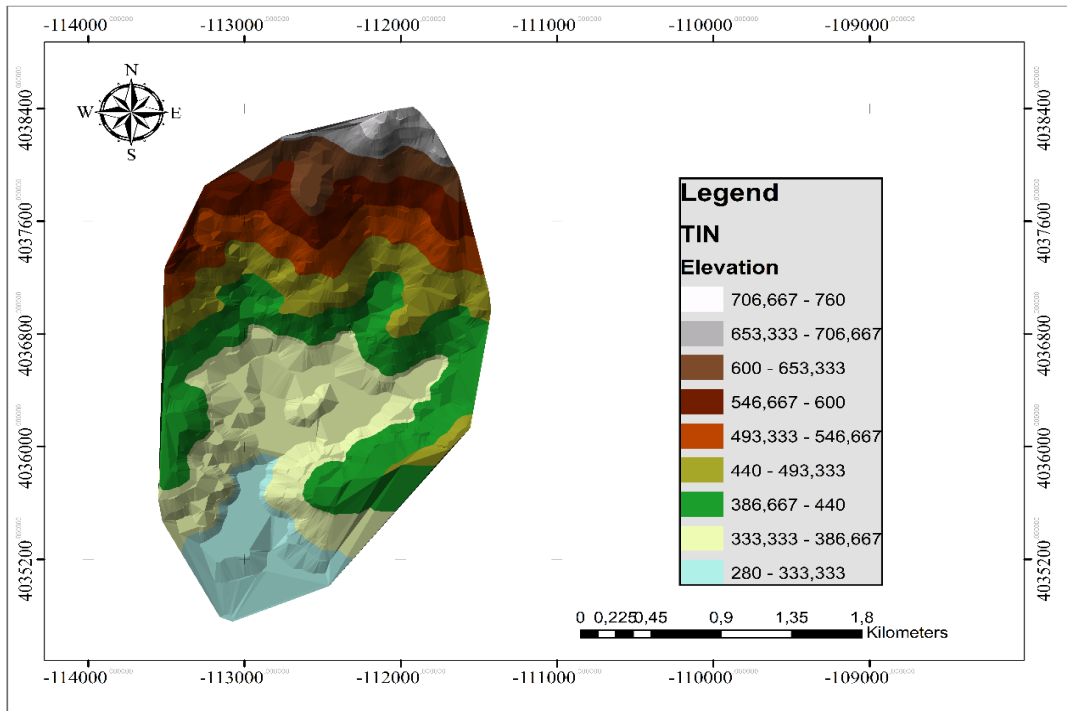
- Une série de couples distance-altitude pour toutes les sections transversales ;
- La distance entre deux sections successives (rives et axe du canal) ;
- Les coefficients de contraction et d'expansion ;
- Les données sur l'écoulement et les conditions aux limites (*Jabbour, 2006*).

##### **IV.5.2.2 Les données géométriques :**

Les données géométriques nécessaires comprennent l'établissement de la connectivité pour le réseau hydrographique (schéma du système de rivière), les données des sections transversales et les informations sur les ouvrages hydrauliques existants ou projetés (ponts, barrages, structures latérales, déversoirs, etc.) (*Idrici, 2017*).

##### ➤ **Construction du TIN « Terrain Irregular Network » :**

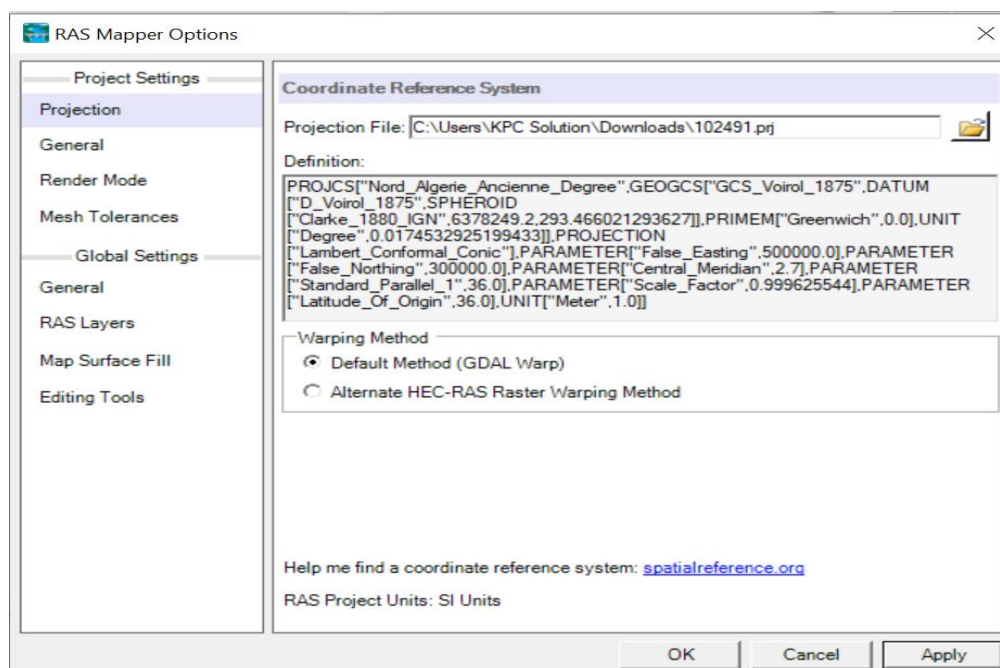
Nous utilisons le logiciel ArcGIS pour créer un modèle numérique de terrain (MNT) basé sur un échantillonnage semi-dirigé irrégulier. Ce modèle représente le relief sous la forme d'un réseau triangulaire irrégulier appelé Triangular Irregular Network (TIN). Avec ce TIN, nous pouvons visualiser l'écoulement des cours d'eau sur RAS MAPPER et produire des cartes détaillées montrant la profondeur de l'eau, la vitesse du courant, et d'autres caractéristiques importantes.



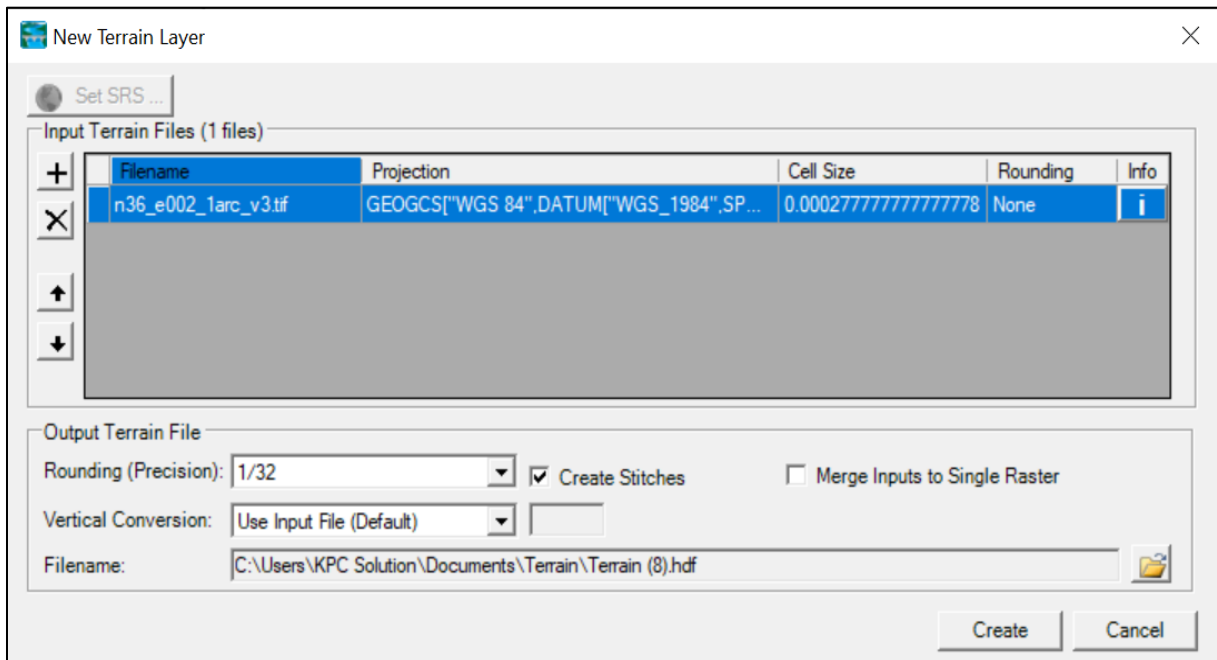
Systeme des cordones : WGS 1984 UTM Zone 31N

**Figure IV.11** : TIN (réseau irrégulier triangulé) de la zone d'étude.

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



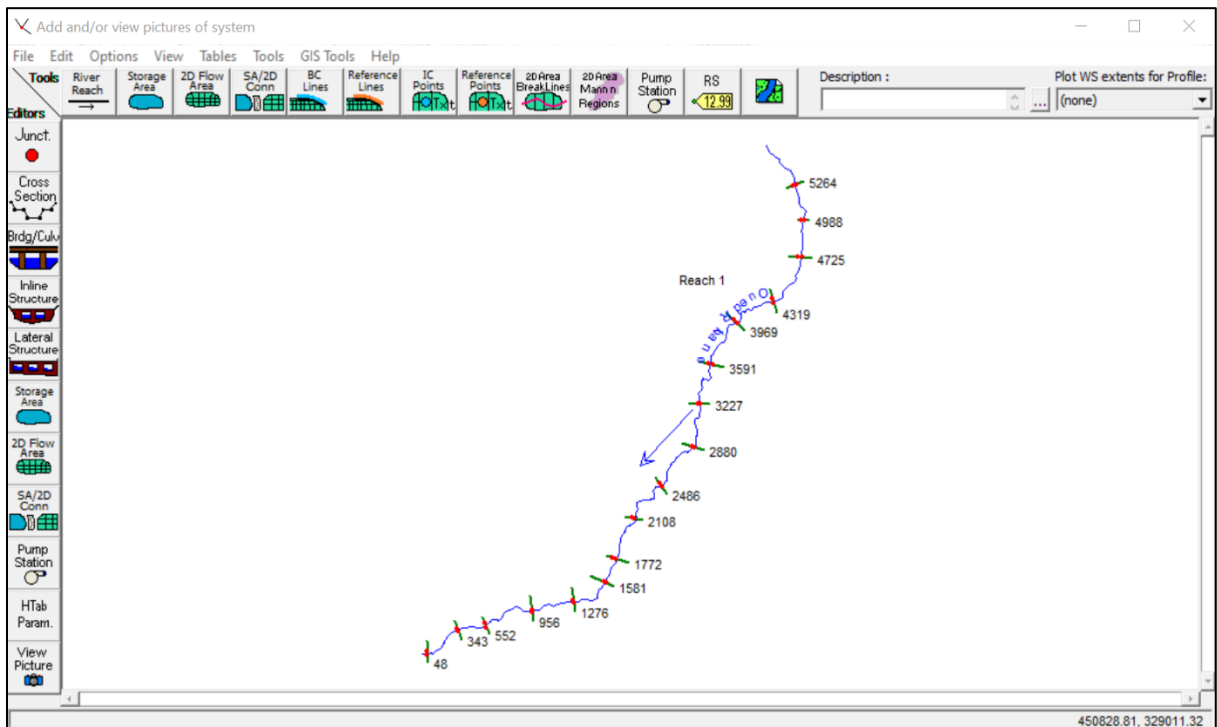
**Figure IV.12** : Insertion fichier de projection.



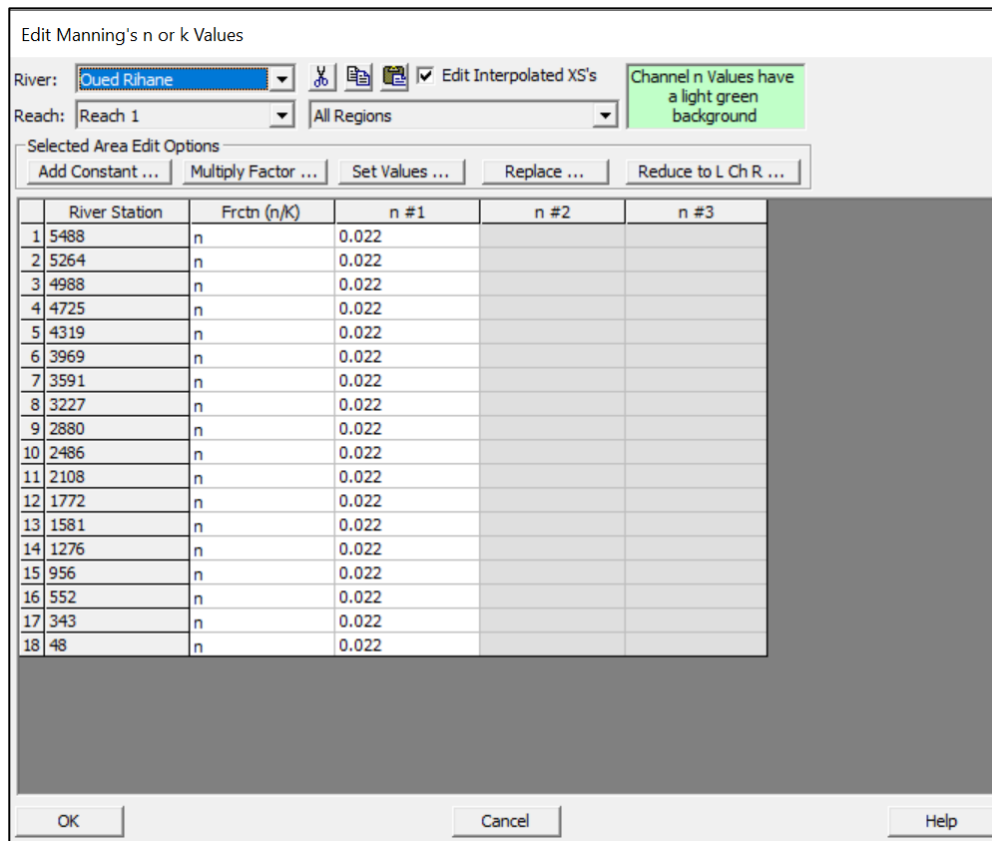
**Figure IV.12 :** Insertion des données du terrain.

- Après avoir importé avec succès les données dans HEC-RAS, nous commençons par tracer l'axe de la rivière, le lit mineur et le lit majeur, ainsi que les sections en travers. Cependant, les profils obtenus ne contiennent pas les profondeurs nécessaires. Nous devons donc ajuster leur géométrie pour obtenir des sections transversales avec une forme correcte, permettant ainsi une représentation précise de la rivière et de son lit.

Les sections transversales tirées à partir du RAS MAPPER sont représentées dans la figure suivante :



**Figure IV.13** Définition du tracé de l'oued Rihane et des sections en travers de l'oued.



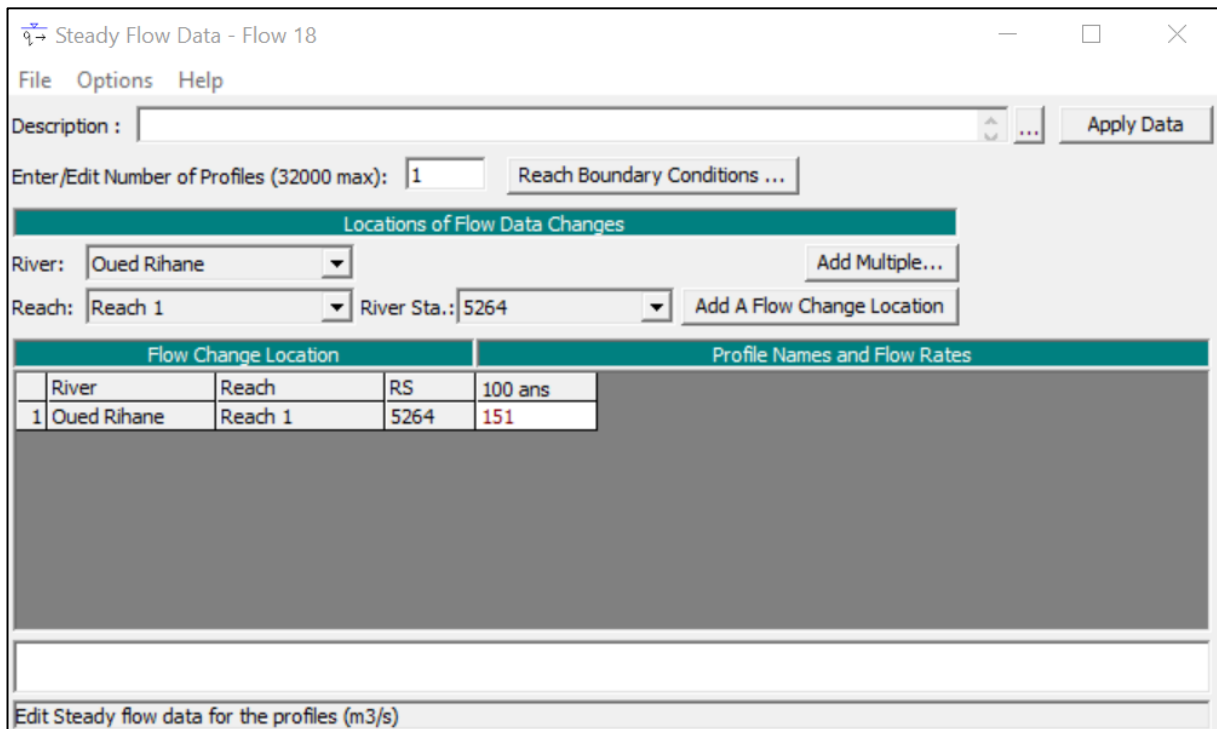
**Figure IV.14** Introduction des valeurs de Manning (terrain naturel).

➤ **Condition aux limites (Boundary condition) :**

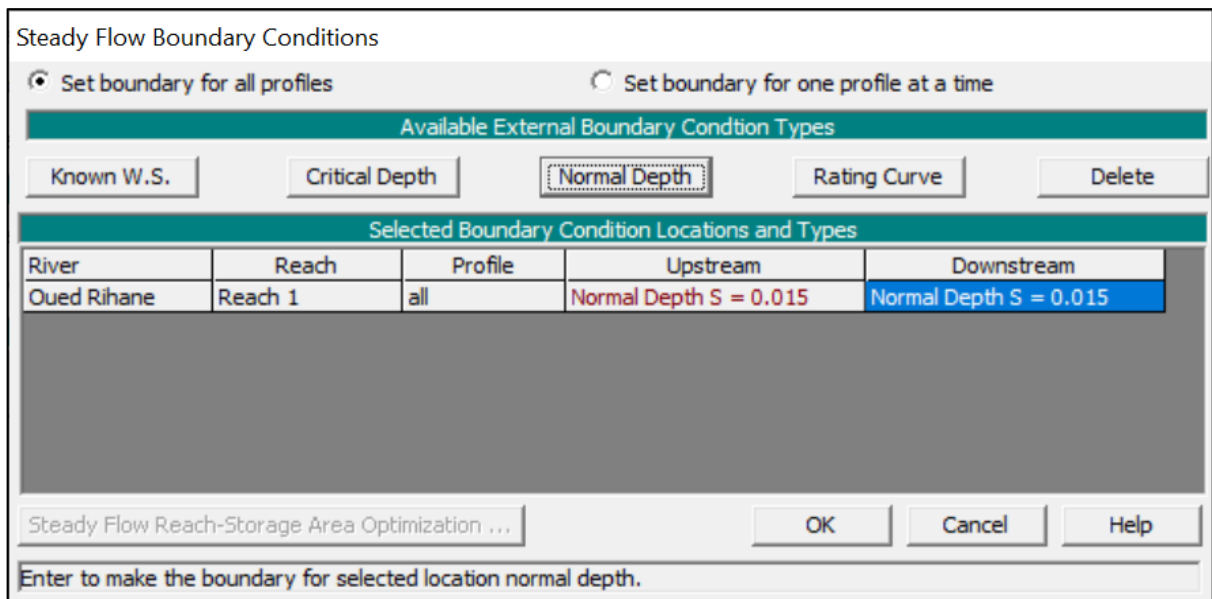
Une fois que les données géométriques de chaque section sont enregistrées, la prochaine étape dans la modélisation hydraulique avec HEC-RAS consiste à spécifier les débits d'entrée et à définir toutes les conditions limites nécessaires pour permettre le calcul des profils de surface d'eau pour chaque section du réseau fluvial.

Les conditions limites revêtent une importance capitale dans la modélisation hydraulique. Pour simuler un écoulement permanent, il est crucial d'établir des conditions limites à l'amont, à l'aval, ou aux deux extrémités, afin de déterminer l'altitude de la surface de l'eau à chaque segment du cours d'eau. C'est à partir de là que HEC-RAS peut effectuer les calculs hydrauliques.

Dans notre étude, en raison de l'écoulement en régime mixte, des calculs appropriés sont effectués en conséquence, nécessitant l'introduction de conditions limites aux extrémités amont et aval. Nous avons choisi d'utiliser la profondeur normale comme condition, ce qui implique la spécification d'une pente d'énergie. HEC-RAS utilisera cette valeur pour calculer la profondeur en utilisant l'équation de Manning. Pour estimer cette pente d'énergie, nous mesurons la pente du tronçon en aval de notre segment modélisé.



**Figure IV.15** Introduction des données hydrauliques d'Oued Rihane.



**Figure IV.16** Définition des conditions aux limites.

➤ **Simulation :**

- ✓ Une fois les données géométriques et hydrométriques entrées, ainsi que les conditions aux limites définies, il est crucial de sélectionner le régime fluvial approprié parmi les options disponibles : fluvial, torrentiel ou mixte, pour initier les calculs.

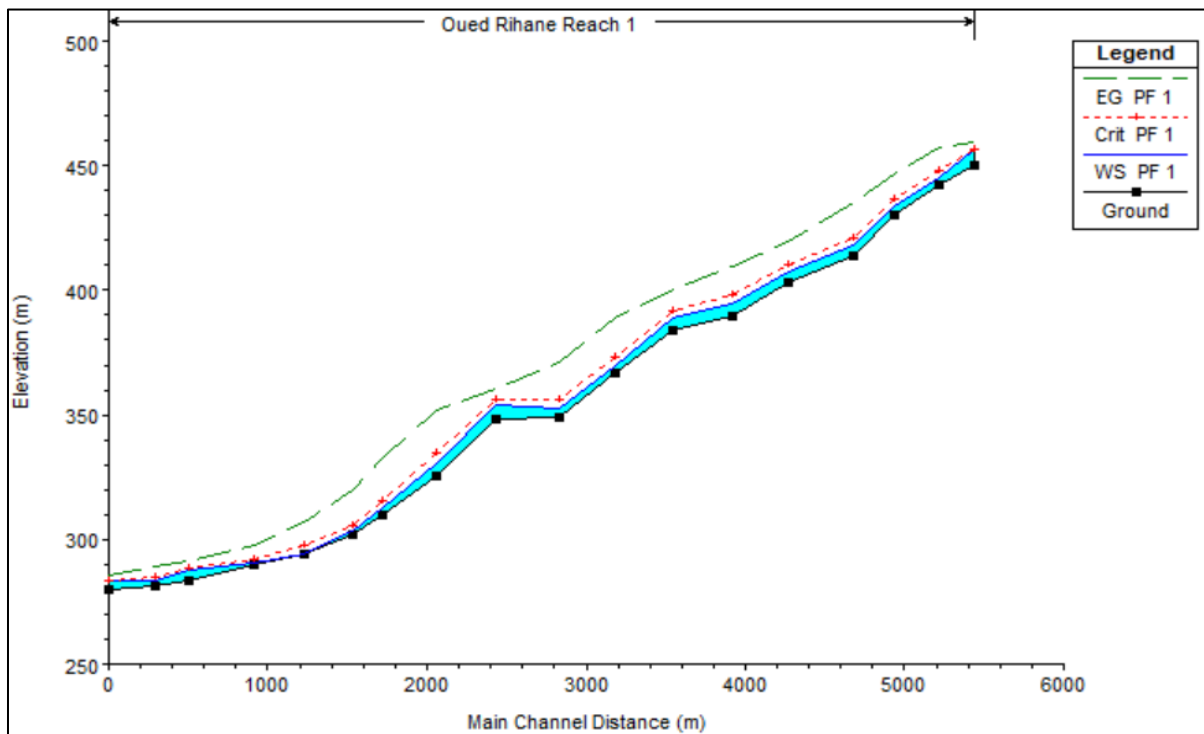
- ✓ Dans notre cas, nous choisissons un régime mixte avant de lancer la simulation.
- ✓ En ce qui concerne le débit centennal calculé dans la partie hydrologique, il s'élève à **151 m<sup>3</sup>/s**.

#### IV.5.2.3 Résultats de la simulation :

Les résultats obtenus à partir de la simulation avec HEC-RAS offrent une précieuse vision de l'écoulement constant dans un système fluvial ou hydraulique spécifique. Cette simulation permet une analyse détaillée de la répartition des vitesses, des niveaux d'eau et des débits à travers le réseau hydrographique. Ces données nous permettent d'anticiper les risques d'inondation de manière plus précise.

- **Le profil en long :**

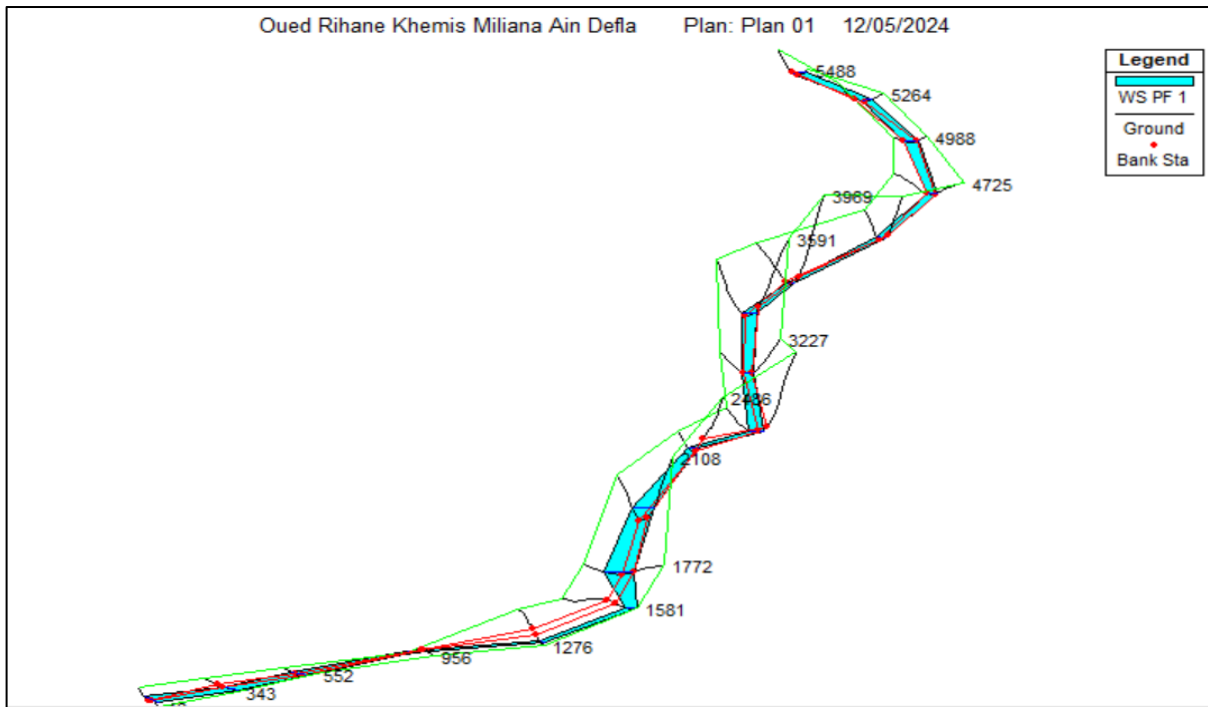
La ligne d'eau illustre une coupe transversale du tronçon d'étude, montrant le niveau de la surface de l'Oued ainsi que le niveau d'eau correspondant à une période de retour centennale.



**Figure IV.17** Le profil en long du cours d'eau lors d'une crue centennale à l'état naturel.

- **Vue en 3D des tronçons modélisés :**

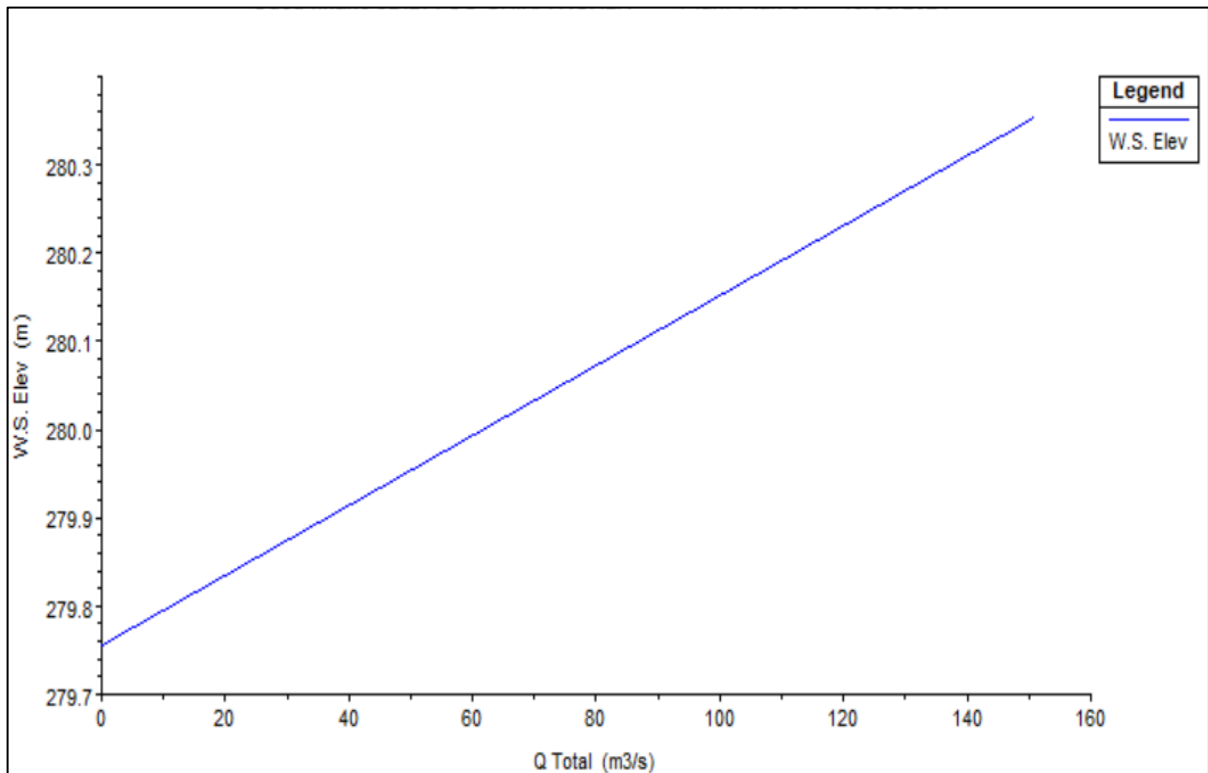
HEC-RAS offre une visualisation tridimensionnelle qui simplifie la surveillance du comportement des eaux de crue pour différentes périodes de retour.



**Figure IV.18** Représentation en trois dimensions de l'oued Rihane.

- **Restitution de la courbe de tarage :**

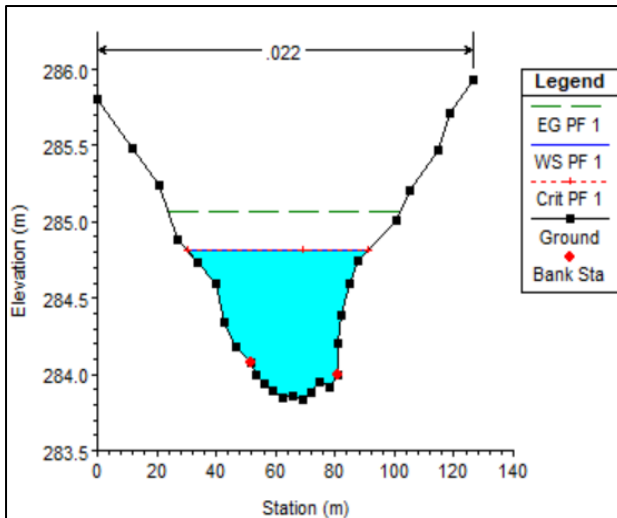
À l'aide de HEC-RAS, nous avons obtenu une représentation graphique montrant la variation de la hauteur d'eau en fonction du débit  $m^3/s$ .



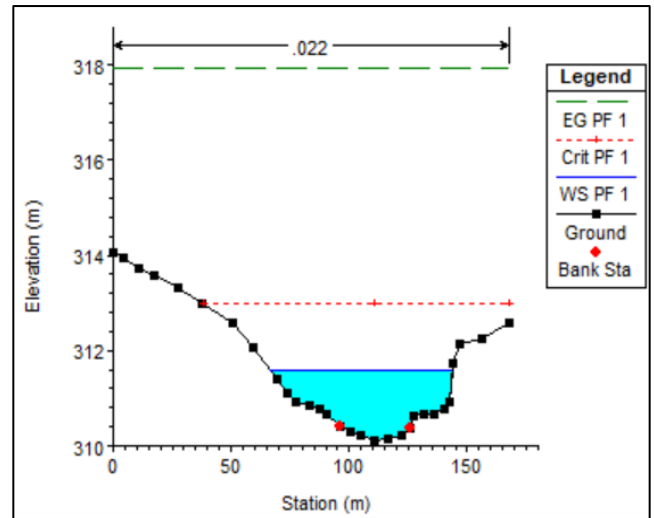
**Figure IV.19** Courbe de tarage du tronçon modélisé d'Oued Rihane.

- **Les profils en travers :**

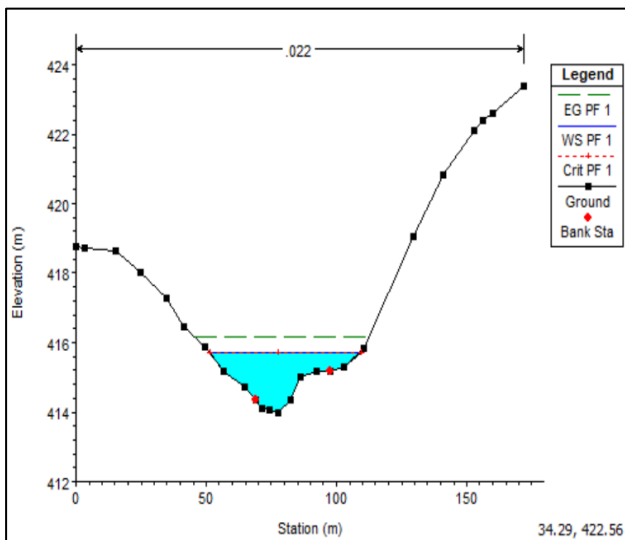
En utilisant l'option d'affichage des résultats par profil transversal, nous avons pu obtenir des détails approfondis à chaque point le long du tracé du cours d'eau. Nous avons constaté que la plupart des sections sont susceptibles d'être submergées.



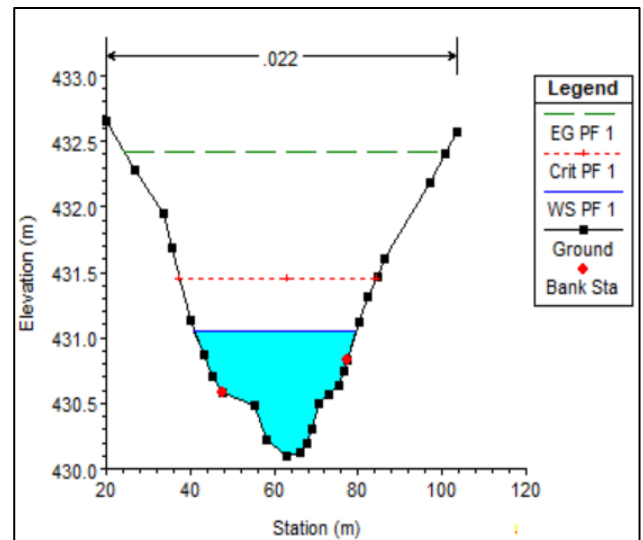
Section 552.



Section 1772.



Section 4725.



Section 4988.

**Figure IV.20 :** Les profils en travers de quatre sections choisies de l'oued Rihane.



- Le logiciel offre également la possibilité de générer des tableaux récapitulatifs contenant tous les paramètres hydrauliques pour diverses structures telles qu'un barrage ou tout autre ouvrage, ainsi que pour une surface de stockage spécifique, pour chaque station (profil en travers) individuellement, ou pour l'ensemble des stations simultanément.

Tableau IV.1 : Principaux éléments hydrauliques pour toutes les stations (Source : Logiciel HEC-RAS).

River Sta	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m <sup>2</sup> )	Top Width (m)	Froude # Chl
5264	442.08	443.08	443.39	444.07	0.015008	3.51	35.00	52.95	1.58
4988	430.09	430.92	431.69	435.21	0.096799	9.28	16.80	35.74	4.06
4725	413.98	415.22	415.79	417.55	0.046435	7.04	22.69	42.91	2.88
4319	403.15	404.21	404.64	405.63	0.019497	5.58	29.00	39.57	1.96
3969	389.35	390.47	391.36	394.45	0.058036	8.84	17.08	23.39	3.30
3591	383.85	385.37	385.61	386.29	0.009439	4.27	35.72	37.92	1.40
3227	366.48	367.02	367.95	375.64	0.290131	13.57	8.87	32.95	6.75
2880	349.19	349.84	350.35	351.65	0.026955	4.30	25.96	39.32	2.07
2486	348.38	349.63	349.63	350.27	0.003893	2.17	43.63	33.83	0.84
2108	325.48	326.72	327.98	343.87	0.304023	14.15	8.40	14.55	7.39
1772	310.11	310.90	311.36	312.86	0.035390	6.57	26.70	62.55	2.56
1581	302.14	300.97	301.63	303.90	0.063263	-	19.92	36.60	0.00
1276	293.88	291.26	291.71	292.75	0.022350	-	27.96	38.54	0.00
956	290.04	288.19	288.28	288.71	0.007219	-	47.73	63.19	0.00
552	283.83	284.93	285.16	285.66	0.007754	4.07	44.14	70.51	1.28
343	281.06	281.00	281.41	282.49	0.038477	-	27.91	58.37	0.00
48	279.76	280.35	280.36	280.64	0.005967	2.00	64.12	116.33	0.97

- $Min^{Ch.El}$  : Altitude du radier du canal.
- $Vel^{chnl}$  : Vitesse d'écoulement.
- $W.S^{Elev}$  : Altitude du plan d'eau calculé.
- $Flowa^{rea}$  : Section mouillée.
- $Top^{Width}$  : Largeur au miroir.
- $E.G^{Elev}$  : Altitudes de la ligne d'énergie.
- Froude<sup>chl</sup> : Nombre de Froude.
- $E.G^{slope}$  : Pente de la ligne d'énergie.

#### IV.5.2.4 Interprétation des résultats :

En observant le niveau d'eau dans toutes les sections transversales de l'oued, nous remarquons que celui-ci est inondé sur toute sa longueur, selon les paramètres suivants :

- La vitesse d'écoulement varie entre **2.00 m/s à 14.15 m/s** ;
- Le régime d'écoulement change tout au long de l'oued. Cette observation est confirmée par les valeurs du nombre de Froude, qui varient entre **0.84 à 7.39**.

#### IV.6 La cartographie du risque d'inondation :

- Après avoir généré les profils d'inondation à l'aide du logiciel HEC-RAS, notre prochaine étape est de délimiter et de cartographier les zones à risque d'inondation. Pour cela, il est nécessaire de déterminer les niveaux d'eau dans différentes sections des oueds.
- Pour repérer les points de débordement et les zones à risque d'inondation, nous avons utilisé l'outil RAS-MAPPER dans le logiciel HEC-RAS pour simuler l'état du cours d'eau lors d'une crue centennale. Cette approche nous a permis de générer les cartes qui seront présentées dans la phase suivante de notre étude.
- La création de cartes des risques a pour but de repérer les dangers principaux en fonction de plusieurs critères, comme l'impact anticipé, la probabilité d'occurrence ou le degré actuel de contrôle des risques. L'élaboration de ces cartes peut être justifiée par les objectifs suivants :
  - ✓ Établir un système de contrôle interne ou de gestion des risques approprié.
  - ✓ Assister la direction dans l'élaboration de sa stratégie et dans la prise de décisions.
  - ✓ Guider la planification des audits internes en identifiant les processus ou activités présentant les risques les plus importants.

- La gestion du risque consiste en l'organisation et les moyens nécessaires pour se préparer et réagir efficacement à une crise, facilitant ainsi la prise de décision. Cette approche comprend trois phases :
  - ✓ Prévion : mise en place de mesures pour anticiper un événement imprévu et améliorer sa gestion.
  - ✓ Protection et prévention : réduction de la gravité potentielle d'un risque par des mesures de protection, tandis que la prévention vise à diminuer la probabilité qu'un risque dépasse un seuil d'acceptabilité fixé par l'autorité compétente.
  - ✓ Communication d'informations à tous les intervenants dans la gestion des risques, de l'individu au préfet.

#### IV.6.1 Carte des profondeurs :

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

- Submersion légère : avec une profondeur inférieure à 0,5 mètre ;
- Submersion modérée : avec une profondeur comprise entre 0,5 et 1 mètre ;
- Submersion importante : avec une profondeur dépassant 1 mètre (*Graguid, 2011*).



**Figure IV.21** : Réseau des profondeurs d'eau pour une crue centennale.

- D'après la carte de profondeur d'eau obtenue, la hauteur d'eau varie entre 0,5 et 3 m. Les zones à fort risque de submersion se situent dans le côté de centre-ville d'Oued Rihane et côté usine des matériaux explosives Onex. La concentration des zones à risque près de la confluence met en évidence l'importance cruciale d'une planification urbaine résiliente et de stratégies d'adaptation pour atténuer les impacts potentiels de la submersion. Cette approche est indispensable pour formuler des politiques publiques visant à garantir la sécurité des communautés riveraines et à promouvoir un développement durable dans la région.

#### IV.6.2 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



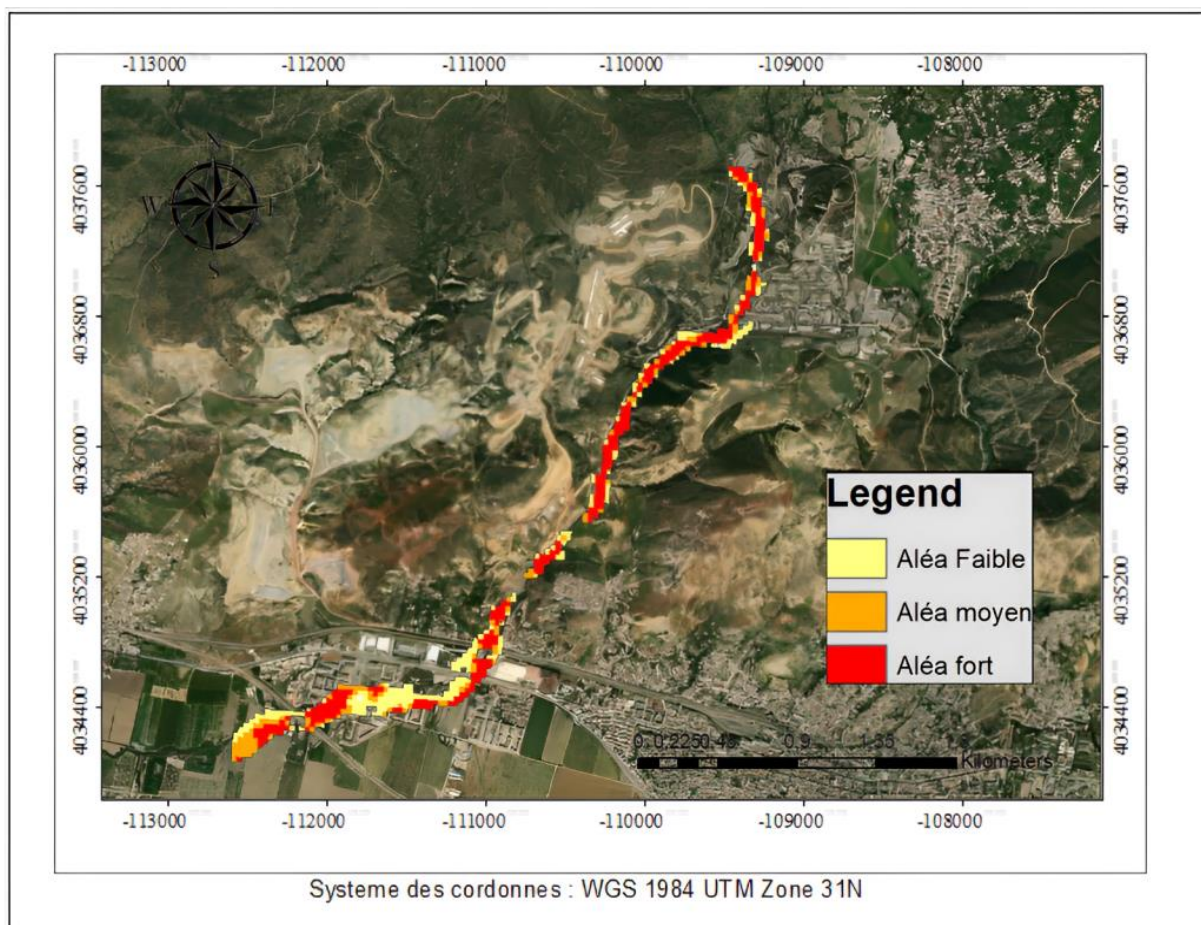
**Figure IV.22** : Carte de vitesse d'eau pour la période de retour 100 ans.

#### IV.6.3 Classes d'aléa :

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

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

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



**Figure IV.23 :** Carte de l'aléa pour la crue centennale.

- Les zones de risque élevé se trouvent principalement le long du cours d'eau, en particulier près du centre-ville d'Oued Rihane et coté de l'usine des matériaux explosives Onex, Comme le montre la carte de profondeur d'eau, ces zones à haut risque se trouvent également dans des portions du lit du cours d'eau présentant des pentes plus marquées, ce qui accroît la probabilité d'inondations lors de crues importantes. La

corrélation entre la carte des aléas d'inondation et la carte des vitesses d'écoulement est également notable : Les zones à risque élevé correspondent généralement aux secteurs où les vitesses d'écoulement sont les plus rapides. Cela indique une convergence entre les risques hydrologiques et les dynamiques d'écoulement, mettant en lumière des zones critiques nécessitant une attention particulière en matière de prévention des inondations.

#### IV.6.4 Cartographie de la vulnérabilité :

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

Nous avons élaboré une cartographie de l'occupation des sols dans le bassin versant de l'Oued Rihane, ce qui nous permettra de créer prochainement une carte de vulnérabilité.

#### IV.6.5 Élaboration de la carte de risque :

Pour élaborer une carte du risque, il est crucial de croiser la localisation de la vulnérabilité avec celle de l'aléa. Cette fusion se fait à travers une requête dans un système d'information géographique (SIG), permettant ainsi de superposer les deux ensembles de données nécessaires. Cette approche implique de définir des niveaux de risque en fonction des niveaux de vulnérabilité agricole et urbaine ainsi que de l'aléa hydrologique.

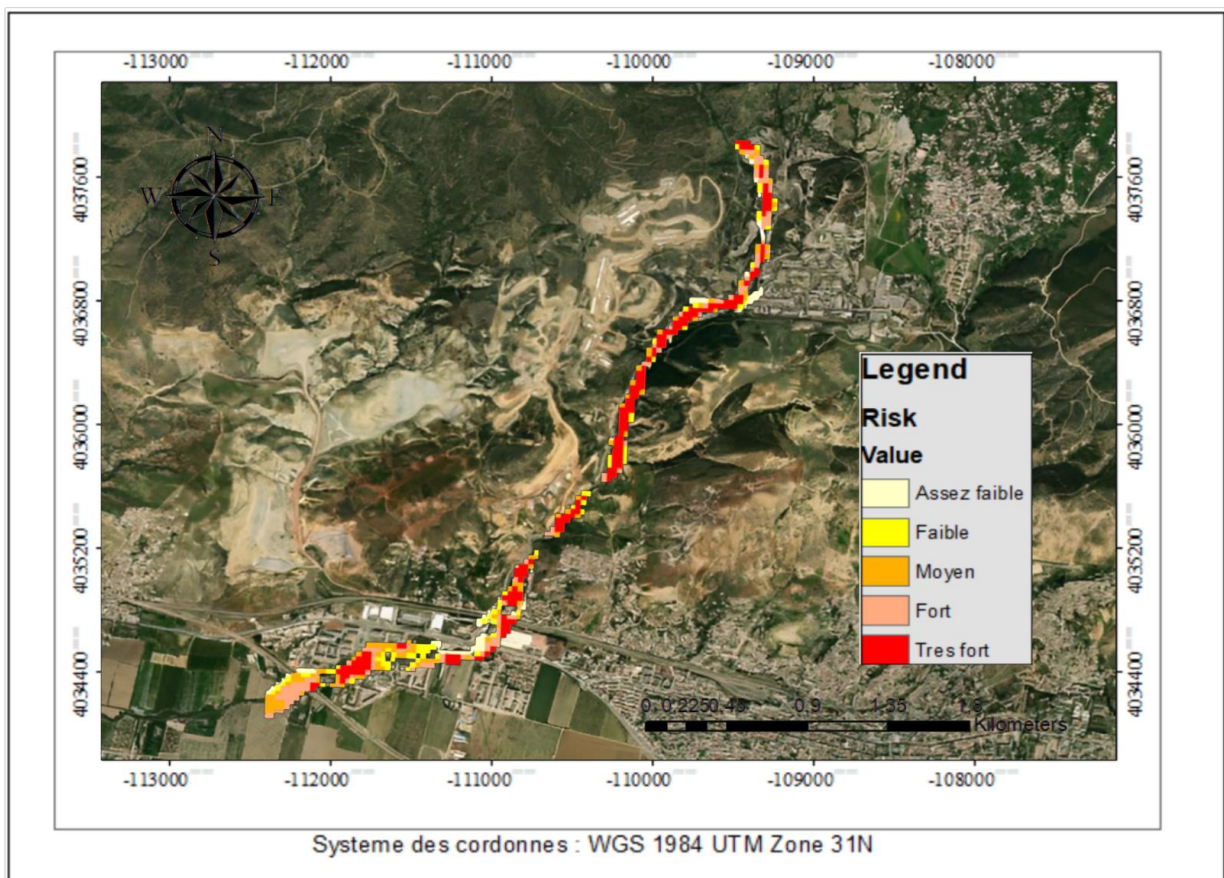


Figure IV.24 : Carte des risques d'inondation de la zone d'étude.

- La carte du risque d'inondation donne une évaluation complète des zones à forte vulnérabilité dans la région examinée. Ces résultats sont essentiels pour la gestion des risques et la planification urbaine, facilitant une approche proactive pour faire face aux défis potentiels associés aux inondations.

## **Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons analysé la situation de notre zone d'étude et sa réponse aux inondations causées par une crue centennale. À l'aide du logiciel HEC-RAS, nous avons identifié les différentes zones inondables et élaboré une carte des profondeurs, ce qui nous a permis de déterminer la profondeur d'eau à divers emplacements.

Cette analyse détaillée des zones sensibles fournit une base solide pour planifier des mesures préventives ciblées. Ces résultats nous guident vers la prochaine étape du projet, où nous examinerons en détail diverses alternatives. L'objectif sera d'explorer des solutions innovantes et durables pour renforcer la protection contre les inondations, en tenant compte des caractéristiques spécifiques des zones à risque.

# **Chapitre V : Études des variantes d'aménagement.**



## Introduction

L'objectif de cette étude est de protéger l'usine des matières explosives (Onex), située en amont de l'oued Rihane, ainsi que la ville d'Oued Rihane, située en aval. Cette protection repose sur la sélection des meilleures solutions de développement après avoir proposé diverses alternatives.

Les variables prises en compte sont basées sur les résultats obtenus dans les chapitres précédents et sur notre analyse. La zone étudiée tient compte des conditions naturelles pour évacuer les eaux de crue vers l'exutoire tout en respectant toutes les conditions d'écoulement. Il est également crucial de garantir la stabilité des berges et de considérer l'impact environnemental des solutions proposées. La variante optimale sera déterminée à travers différents processus d'évaluation.

### V.1 Présentation des principales orientations :

#### V.1.1 La protection contre les crues :

Les stratégies pour diminuer le risque d'inondations dans les zones sensibles actuellement affectées peuvent être regroupées en deux catégories :

##### V.1.1.1 Protection directe (Rapprochée) :

La protection directe implique une intervention directe sur le site menacé, en mettant en œuvre les actions suivantes :

- **Curage** : Cette action améliore nettement les conditions d'écoulement en éliminant les obstacles et dépôts qui entravent le flux des eaux dans le cours d'eau. Le débroussaillage est également essentiel, notamment lors de la traversée des zones urbanisées pour des raisons sanitaires, et dans les sections courantes pour réduire la rugosité et augmenter la capacité d'écoulement.
- **Réalisation des canaux** : Cette action permet de restaurer le couloir initial de l'oued. Elle est indispensable lorsque le lit de l'oued et son domaine hydraulique ont été entièrement occupés par des bâtiments ou des infrastructures routières.
- **Recalibrage** : Cette action consiste à élargir et approfondir les sections des cours d'eau pour augmenter leur capacité d'évacuation et garantir une section mouillée conforme aux critères de protection souhaités.
- **Protection des berges** : Ces mesures incluent toutes les infrastructures conçues pour stabiliser le sol contre les effets de l'eau. Les rives sont exposées aux courants turbulents provoqués par les crues et aux glissements de terrain causés par l'infiltration d'eau après le retrait des crues. Il est aussi crucial de protéger les rives à proximité d'infrastructures telles que les ponts.
- **Endiguement des oueds** : Cette action consiste à construire des digues le long des deux berges du cours d'eau. Elle est facilement réalisable grâce aux ressources locales en main-d'œuvre et en matériaux. De plus, ce type de protection permet une protection sélective, pouvant être mise en place progressivement en commençant par sécuriser les zones les plus riches et les plus peuplées contre la plupart des crues. Cependant, ce

procédé présente l'inconvénient de provoquer une élévation notable du niveau des eaux et de compliquer le drainage des terrains bas.

#### **V.1.1.2 Protection indirecte (Eloignées) :**

La protection indirecte, en revanche, implique d'intervenir à une certaine distance des sites menacés, au-delà du périmètre d'aménagement, en mettant en place des infrastructures sur les cours d'eau responsables des inondations :

- **Création de canaux périphériques** : Il s'agit de rediriger les eaux vers les cours d'eau afin de les acheminer vers des zones situées en dehors des zones à protéger. Ce processus peut impliquer la redirection d'une partie ou de la totalité du débit d'un cours d'eau vers un autre.
- **Aménagement des bassins versants** : Cet aménagement vise à lutter contre l'érosion en utilisant des techniques biologiques et/ou en construisant des seuils en gabions. Ces mesures visent à réduire les vitesses d'écoulement et à favoriser le dépôt des sédiments en amont.
- **Construction de barrages** : Mise en place de seuils pour stocker et réguler les crues en amont des zones menacées. Il est essentiel d'optimiser le volume et la capacité de régulation du barrage afin de répondre de manière optimale aux besoins de protection envisagés.

#### **V.1.2 La protection contre l'érosion :**

Tout comme pour le risque d'inondation, le risque d'érosion découle de la conjonction de l'aléa érosion et des enjeux présents. Cette situation se rencontre dans les zones non urbanisées, notamment là où le bord de la route ne correspond pas à la rive de la rivière.

##### **V.1.2.1 Érosion du lit :**

L'érosion du lit peut être attribuée à divers facteurs :

- **Une cause naturelle** : le lit s'ajuste à de nouvelles conditions hydrologiques et de transport de sédiments en diminuant sa pente.
- **Les extractions dans le lit** : ces activités ont un effet direct qui peut se propager vers l'amont (érosion régressive) et parfois vers l'aval (érosion progressive).
- La mise en place d'infrastructures visant à limiter l'expansion des zones inondables de la rivière, comme les digues ou les remblais.

##### **V.1.2.2 Érosion des berges :**

- L'érosion des berges se produit lorsque l'eau de la rivière enlève des particules de matériaux constitutifs de la berge. Ce phénomène se produit lorsque la vitesse du courant et sa turbulence surpassent le poids des particules et leur cohésion éventuelle. L'enlèvement des grains se produit de manière similaire à un choc qui détache les particules de la berge et les transporte vers l'aval où elles peuvent se déposer. Ce processus est plus prononcé lorsque le courant forme un angle avec la berge.

- L'éboulement (ou effondrement) se produit lorsqu'un volume de berges cohérentes en surplomb s'effondre à la suite d'un affouillement à la base.
- L'affouillement, quant à lui, est un type d'érosion qui se produit spécifiquement à la base d'une berge ou d'un ouvrage.
- Les techniques d'aménagement pour protéger les berges peuvent être divisées en deux approches principales :
  - ✓ La protection linéaire par revêtement.
  - ✓ La protection par épis.
- Les épis sont des structures utilisées pour réduire la largeur d'un cours d'eau pendant les périodes de faible débit, ce qui peut améliorer la navigabilité. De plus, ils servent à atténuer l'érosion en déviant les courants rapides loin des berges vulnérables.
- Les revêtements sont la méthode la plus fréquemment employée pour aménager les berges des cours d'eau. Ils consistent à appliquer une couche de matériau résistant à l'érosion sur les matériaux facilement érodables des berges. On utilise divers matériaux tels que des enduits, des géotextiles et des enrochements à cette fin.

## V.2 Calcul hydraulique des canaux :

Pour un écoulement dont la variation est lente, on peut supposer que dans chaque section, la pente de la ligne de charge correspond à celle d'un régime uniforme.

### V.2.1 Conditions de l'écoulement uniforme :

- Le débit de l'eau dans chaque section des tronçons proposés est constant ;
- La profondeur  $h$  du courant est constante en sa longueur ;
- La rugosité des parois est constante ;
- Le canal est prismatique ;
- La pente de chaque section est constante ;
- Les résistances locales sont absentes.

### V.2.2 Formules de calcul :

La formule essentielle pour calculer un écoulement permanent uniforme est la formule de Chézy.

La vitesse moyenne de l'écoulement peut être exprimée de la manière suivante :

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

En utilisant le produit suivant :

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

Alors :

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

Avec :

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

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

$n$  : Coefficient de rugosité.

$I$  : Pente de fond du canal (radier).

### ➤ Détermination de coefficient de Chézy

En utilisant des formules empiriques pour déterminer le coefficient de Chézy peut être exprimée comme suit :

- **Formule de PAVLOVSKY :**

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

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

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

- **Formule d'AGROSKINE :**

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

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

$Rh$  : Rayon hydraulique.

$n$  : Coefficient de rugosité.

- **Formule de MANING-STRICKLER :**

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

La formule de Manning-Strickler permet de transformer la formule de Chézy sous la forme suivante :

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

Avec :

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

Cette formule est la plus couramment utilisée pour le dimensionnement de diverses formes géométriques de sections ouvertes. Elle est exprimée par la relation suivante :

$$Q = \frac{1}{K_s} Rh^{\frac{2}{3}} \times Sm \times \sqrt{I} \quad (\text{V.9})$$

Avec :

$Q$  : débit de dimensionnement ( $m^3/s$ ).

$n$  : rugosité du canal.

$Sm$  : section mouillée du canal en ( $m^2$ ).

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

$Rh$  : rayon hydraulique en ( $m$ ).

- **Formule de BAZIN :**

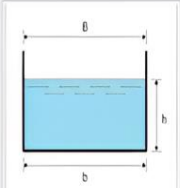
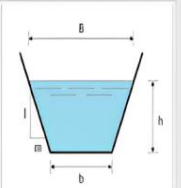
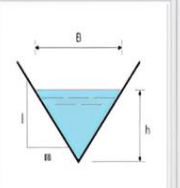
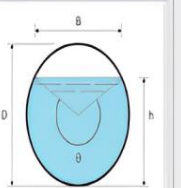
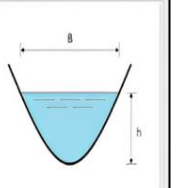
$$C = \frac{87}{1 + \frac{mb}{\sqrt{Rh}}} \quad (\text{V.10})$$

$mb$  : Coefficient de BAZIN.

Avec :

$mb$  est entre 0,06 et  $1.75m^{0.75}$ .

Les formules des éléments géométriques pour cinq types différents de sections de canaux sont représentées dans la figure suivante :

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

**Figure V.1 :** Les éléments géométriques pour des sections ouvertes diverses (Graf, 2000).

### V.2.3 Sélection des paramètres de dimensionnement :

➤ **Choix de pente pour le projet :**

Avant de procéder au calcul hydraulique, il est essentiel de choisir la pente du projet de manière appropriée.

➤ **Le coefficient de rugosité :**

La rugosité du canal dépend de la nature de son revêtement. Les valeurs de rugosité de certains types de revêtements sont présentées à titre d'exemple dans le tableau suivant :

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

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

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

Dans les canaux à surface libre, une perte de charge imprévue peut entraîner une élévation de la surface libre et un risque de débordement. Il est donc essentiel de prévoir une marge de sécurité au-dessus de la ligne d'eau calculée pour prendre en compte l'accumulation de dépôts solides, la croissance de la végétation, les vagues causées par le vent, etc.

La marge de sécurité varie généralement de 0,30 m pour les petits canaux à 0,60 à 1,20 m pour les grands canaux. Il est donc indispensable de tenir compte de toutes les circonstances qui peuvent conduire à modifier ces indications (*Lencastre, 2008*).

**Tableau V.2** Revanches utilisées (Degoutte, 2012).

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

➤ **Vitesse d'érosion :**

Pour prévenir les ruptures du fond et des berges des canaux dues à l'action dynamique du courant d'eau, il est essentiel que la vitesse de celui-ci ne dépasse pas la vitesse limite maximale. Les valeurs de vitesse moyenne limite d'érosion pour les lits consolidés sont données dans le tableau ci-dessous (*Degoutte, 2012*).

**Tableau V.3** Les valeurs de vitesse moyenne limite d'érosion pour les lits consolidés sont établies selon les recherches (Degoutte en 2012).

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

### V.3 Étude des variantes :

Comme les zones submersibles le long de l'oued Rihane ont déjà été définies, à savoir l'usine des matières explosives (Onex) en amont et la ville d'oued Rihane en aval, les solutions pour réduire le risque d'inondations dans les zones actuellement inondables sont de trois types :

- ✓ La réalisation d'un canal en enrochement de forme trapézoïdale.
- ✓ La réalisation d'un canal en béton de forme trapézoïdale.
- ✓ La réalisation d'un canal en gabion.

Un calcul hydraulique sera effectué pour chaque variante en vérifiant l'état d'écoulement à l'aide d'une simulation avec HEC-RAS pour chaque tronçon du cours d'eau. Une description des différentes variantes d'aménagement sera proposée afin de choisir la solution la plus appropriée d'un point de vue technico-économique.

De plus, il est nécessaire de prendre des mesures pour faciliter les interventions de sécurité civile en cas de crue et réduire la vulnérabilité des personnes pendant ces événements : planification des actions, alerte aux populations et scénarios de crise, ainsi que la protection de l'usine contre toute inondation.

#### V.3.1 Canal en béton armé :

La proposition implique la construction d'un canal en béton armé de forme trapézoïdale. Cette configuration présente plusieurs avantages, notamment une durée de vie prolongée, une forme étroite adaptée à l'environnement urbain, de meilleures propriétés hydrauliques, une construction rapide et une protection accrue. Nous avons choisi un coefficient de  $m=1$  pour la pente du talus, ce qui permet d'obtenir un angle de  $45^\circ$  sur le terrain, facilitant ainsi la mise en œuvre sur le plan technique.

Pour simuler ces canaux, nous utilisons le logiciel FLOW-MASTER, qui nous aide à déterminer les caractéristiques hydrauliques du canal. Ensuite, une simulation plus détaillée est réalisée avec HEC-RAS afin d'affiner notre analyse et d'évaluer plus précisément les performances du canal dans différentes conditions d'écoulement.

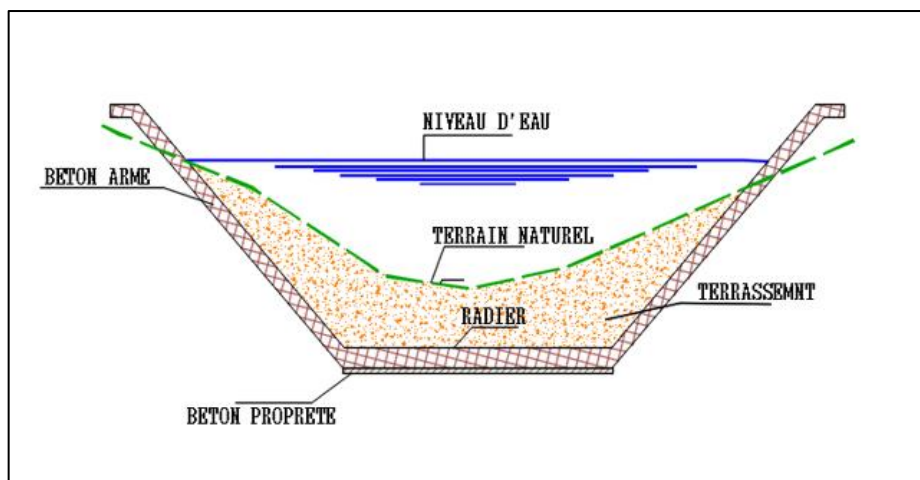


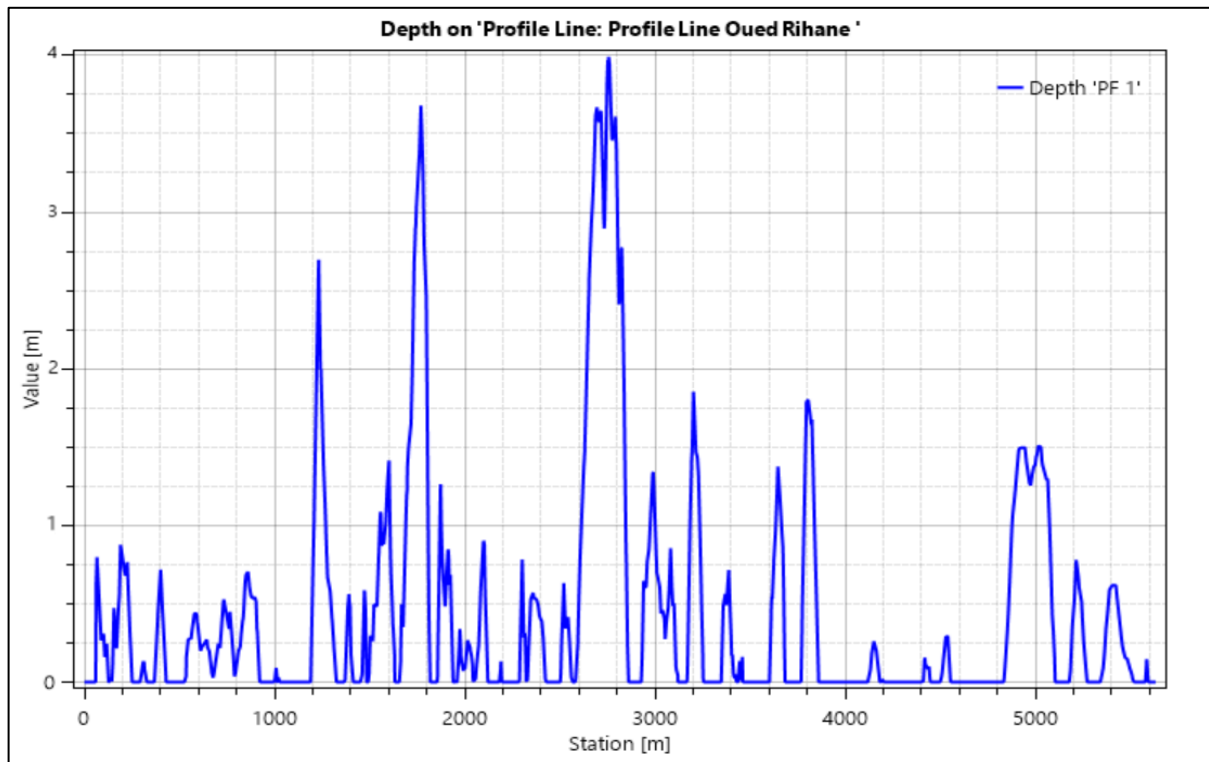
Figure V.2 : Canal trapézoïdale en béton.



## ▪ Dimensionnement

Le calcul des caractéristiques du canal a été réalisé à l'aide du logiciel **FLOW MASTER**.

La première proposition concerne la réalisation d'un canal en béton armé de forme trapézoïdale. Selon le plan, la profondeur normale de cette section est de 4,01 m. Le canal s'étend sur 800 mètres en amont de la rivière, traversant l'usine de matériaux explosifs, et sur 1900 mètres en aval, traversant le centre de la ville d'Oued Rihane ouest la ville de Khemis Miliana.



**Figure V.3** : La profondeur normale du tronçon d'Oued Rihane.

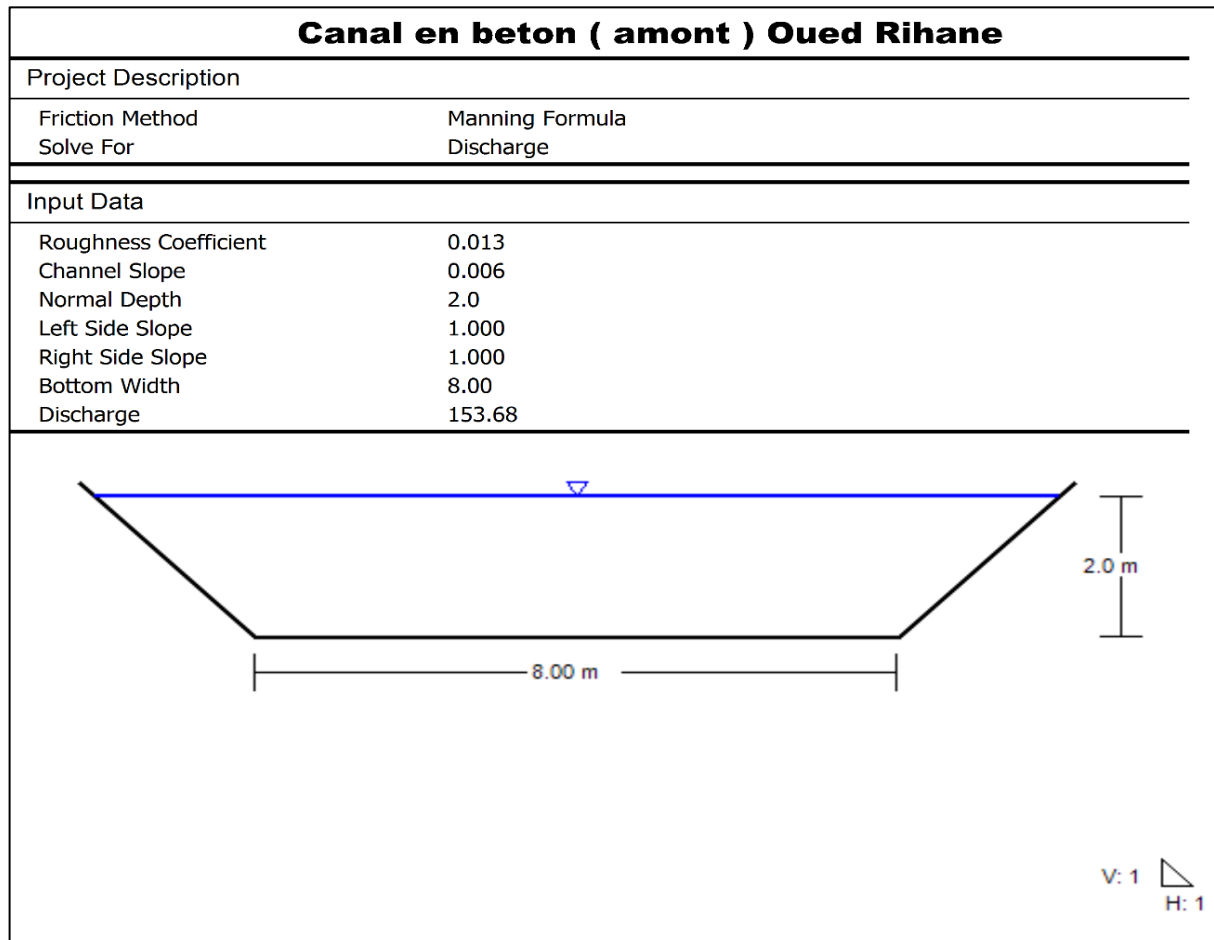
### ➤ Variante 1 Amont : Tronçon 1 (amont) : Coté de l'usine des matières explosives (Onex).

Voici les résultats du calcul hydraulique pour le canal trapézoïdal :

**Tableau V.4** Dimensions de l'aménagement en béton de l'Oued Rihane (Amont).

Tronçon	Section de départ	Section D'arrivé	Longueur (m)	Pente du projet (%)	Fruit de talus	Largeur du fond (m)	La largeur au miroir	Hauteur du canal	La rugosité
Amont	4319	5264	800	0.006	1	8	12	2	0.013

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



**Figure V.4 :** Dimensions du canal trapézoïdale en amont d’Oued Rihane.

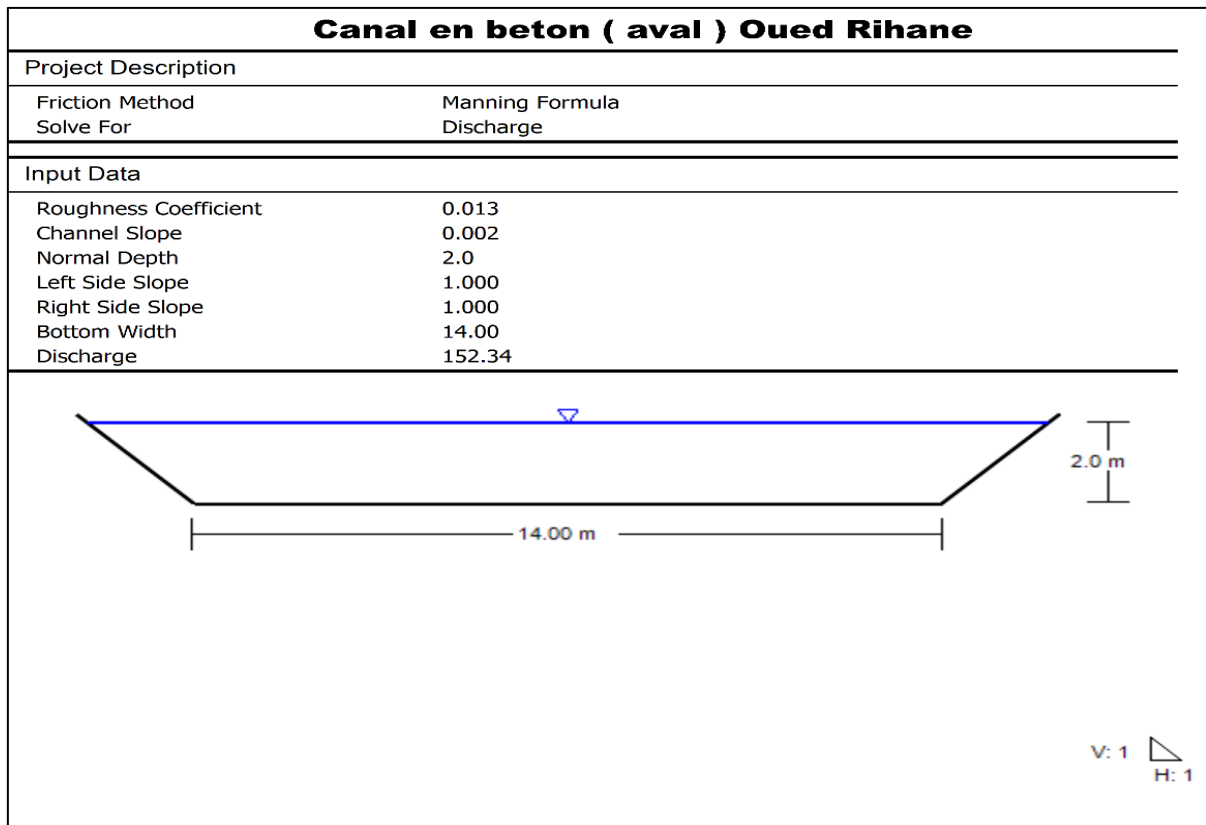
➤ **Variante 1 Aval : Tronçon 2 (Aval) : Coté de la ville de Oued Rihane Ouest de Khemis Miliana.**

Voici les résultats du calcul hydraulique pour le canal trapézoïdal :

**Tableau V.5** Dimensions de l’aménagement en béton de l’Oued Rihane (Aval).

Tronçon	Section de départ	Section D’arrivé	Longueur (m)	Pente du projet (%)	Fruit de talus	Largeur du fond (m)	La largeur au miroir	Hauteur du canal (m)	La rugosité
Aval	48	2108	1900	0.002	1	14	18	2	0.013

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



**Figure V.5 :** Dimensions du canal trapézoïdale en aval d'Oued Rihane.

▪ **Paramètres d'écoulement :**

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

**Tableau V.6** Les résultats de la simulation d'écoulement d'un canal en béton d'Oued Rihane (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)	(m <sup>2</sup> )	(m)	/
5264	440.00	441.98	442.83	444.93	0.011990	7.93	19.04	11.82	1.83
4988	428.00	429.11	430.86	440.56	0.015273	8.54	17.68	11.6	2.03
4725	410.00	412.86	412.86	414.12	0.013476	8.23	18.34	11.72	1.92
4319	399.00	401.86	401.86	403.12	0.01250	8.05	18.76	11.79	1.87
2108	323.00	325.15	325.15	326.12	0.0061	5.64	26.77	17.41	1.38
1772	308.00	310.14	310.14	311.12	0.003661	4.89	30.8	17.87	1.17
1581	299.00	299.74	301.11	309.38	0.00983	6.48	23.30	17.01	1.60
1276	289.00	291.16	291.16	291.72	0.00465	5.25	28.76	17.64	1.24
956	286.50	287.35	288.03	290.58	0.00515	5.41	27.91	17.54	1.3
552	281.00	282.27	283.14	285.38	0.007587	6.03	25.04	17.21	1.52
343	278.00	279.03	280.14	283.90	0.00851	6.24	24.20	17.11	1.6
48	277.00	278.53	279.23	280.58	0.00854	6.23	24.20	17.12	1.6

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

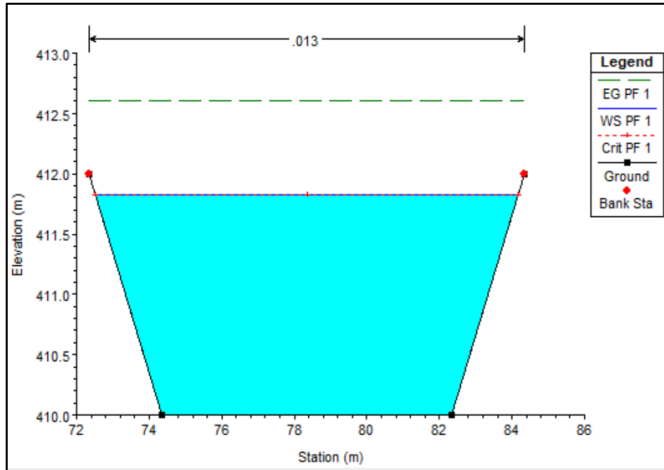
▪ **Interprétation :**

Selon le nombre de Froude, nous constatons que le régime d'écoulement est torrentiel ( $Fr > 1$ ). De plus, la vitesse d'écoulement ne dépasse pas 10 m/s, ce qui empêche l'érosion du béton. Le périmètre mouillé atteint un maximum de 11,82 m en amont, du côté de l'usine

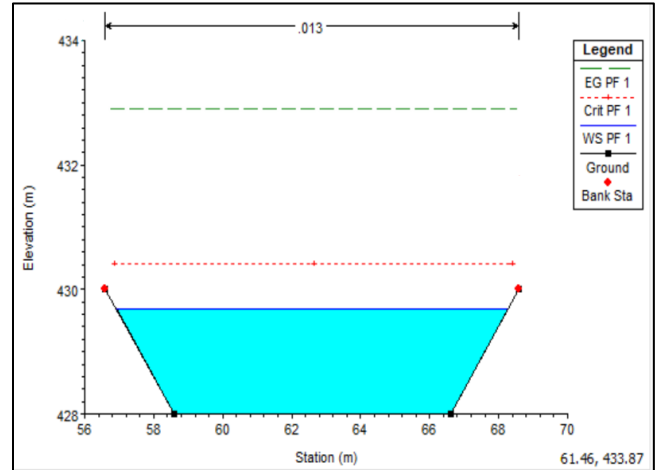
des matières explosives (Onex), et 17,87 m en aval, du côté de la ville d'Oued Rihane. D'un point de vue technique, le canal trapézoïdal en béton armé offre une protection efficace.

▪ **Les sections en travers :**

Les sections en travers de l'oued Rihane après la simulation sont représentées dans la figure ci-dessous :

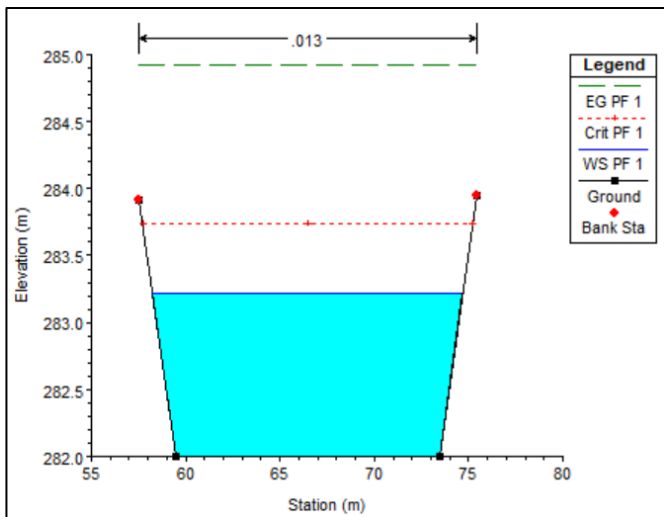


Station 4725.

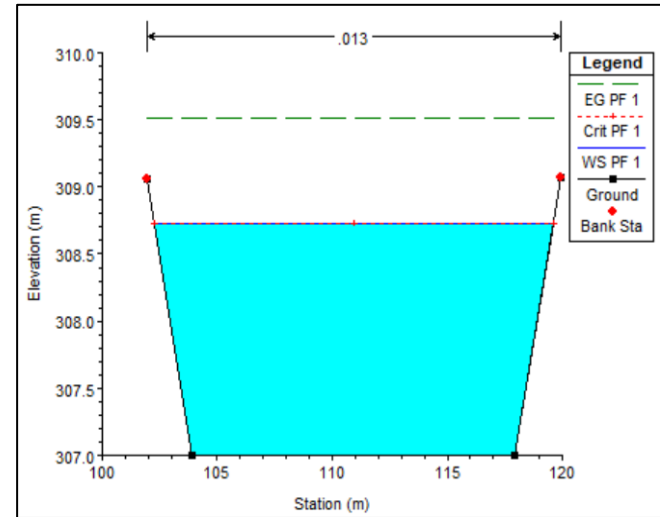


Station 4899.

**Figure V.6 :** Profils en travers d'un canal trapézoïdale pour une crue de 100 ans sur le tronçon amont d'Oued Rihane.



Station 552.



Station 1772.

**Figure V.7 :** Profils en travers d'un canal trapézoïdale pour une crue de 100 ans sur le tronçon aval d'Oued Rihane.

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

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

Donc :

- Les parois en béton armé ont une épaisseur de 15 cm.
- Le radier en béton armé avec une épaisseur de 30 cm.
- Il est conseillé d'utiliser une épaisseur de 15 cm pour le béton de propreté.

Et devis de la variante canal en béton armé est déterminé à partir des quantités des terrassements et des volumes de remblai et le déblai calculés par HEC-RAS.

**Tableau V.7** Devis de la variante canal trapézoïdale en béton armé en amont d'oued Rihane.

Désignations des travaux		Unité	Quantité	Prix unitaire (DA)	Montant (DA/mL)
Terrassement	Déblais	m3	18371	250	4592750
	Remblais	m3	1639	700	1147300
Béton de propreté		m3	448	8000	3584000
Béton dosé à 350 Kg/m3		m3	3371,970149	32000	107903044,8
Montant total					117,227,094.8

**Tableau V.8** Devis de la variante canal trapézoïdale en béton armé en aval d'oued Rihane.

Désignations des travaux		Unité	Quantité	Prix unitaire (DA)	Montant (DA/mL)
Terrassement	Déblais	m3	83838	250	20959500
	Remblais	m3	5603	700	3922100
Béton de propreté		m3	1862	8000	14896000
Béton dosé à 350 Kg/m3		m3	9718,429104	32000	310989731,3
Montant total					350,767,331.3

**Tableau V.9** Devis de la variante canal trapézoïdale en béton armé Totale d'oued Rihane.

	Tronçons	
	Amont	Aval
Montant (DA)	117227095	350767331
Montant Totale (DA)	467,994,426	
TVA 19%	889,189,40.94	
Total TTC	556,913,366.9	

### ▪ Résultat :

Les canaux en béton offrent une durabilité exceptionnelle, résistant aux intempéries et à l'usure, avec une longue durée de vie et un besoin minimal de maintenance. Leur faible rugosité et leur étanchéité assurent une efficacité hydraulique optimale en réduisant les pertes d'eau. Adaptables et flexibles, ils peuvent être moulés en diverses formes et tailles, et sont faciles à réparer. Leur robustesse structurelle garantit une grande stabilité et une sécurité accrue.

### V.3.2 Canal en gabions :

Les matelas en gabions sont principalement utilisés pour réaliser les revêtements et les protections anti-affouillements. Ils sont disponibles en diverses dimensions, les plus courantes étant  $2,0 \times 1,0 \times 0,5$  m et  $2,0 \times 1,0 \times 1,0$  m. La mise en œuvre des canaux en gabions se fait de manière spécifique ; les sacs sont disposés de façon à créer un escalier, ce qui permet d'assurer la stabilité des berges.

#### • Avantages des structures en gabion :

- ✓ **Flexibilité des ouvrages :** Les gabions sont flexibles, ce qui leur permet de s'adapter aux déformations naturelles du terrain, particulièrement autour des organes de dissipation d'énergie, des bajoyers et des protections contre les affouillements.
- ✓ **Facilité de mise en œuvre :** Certains types de barrages ou de seuils en gabions peuvent être construits sur deux ans sans risque majeur de destruction pendant la saison des pluies intermédiaire. Il est également relativement facile d'envisager une surélévation éventuelle de l'ouvrage. De plus, les formes géométriques de ces structures sont, par nature, assez simples.
- ✓ **Coût réduit :** Il est envisageable de construire des ouvrages totalement déversant à moindre coût par rapport à leurs équivalents en béton.

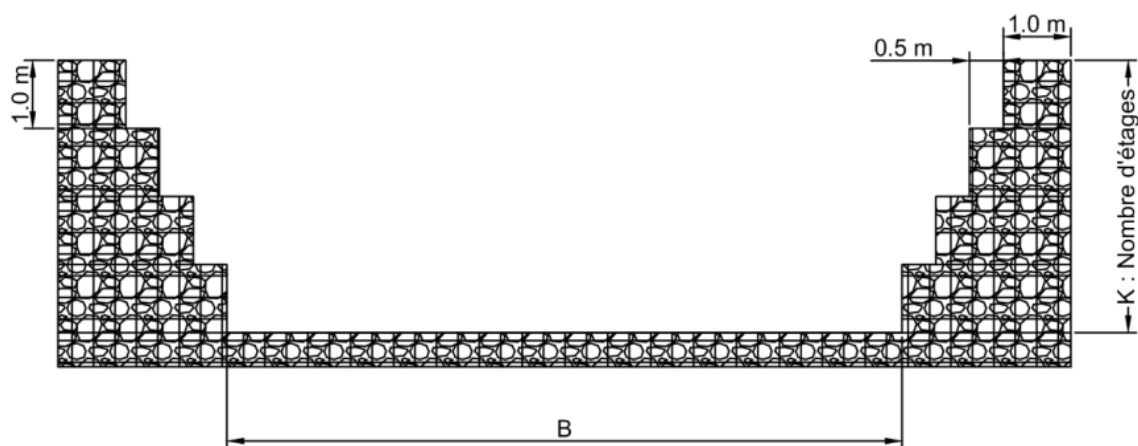


Figure V.8 : Coupe en travers d'un canal en gabion.

Les caractéristiques d'une section gabionnée sont les suivantes :

➤ Section  $S_m$  ( $m^2$ ) :

$$S_m = 0.5k(k-1) + bk \quad (V.11)$$

➤ Périmètre  $P_m$  (m) :

$$P_m = b + 3k - 1 \quad (V.12)$$

➤ Rayon hydraulique  $R_h$  (m) :

$$R_h = \frac{0.5k(k-1) + bk}{b + 3k - 1} \quad (V.13)$$

Avec :

K est le nombre d'étages.

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

▪ **Dimensionnement :**

Pour dimensionner ce canal, nous avons supposé une largeur de canal  $b=14$  mètres. Le coefficient de Manning est  $n=0,035$  pour les gabions et la pente du canal est  $I=0,006$  en amont et  $I=0,002$  en aval. Nous avons ensuite calculé le nombre de caisses K pour un débit centennal de  $Q=151 \text{ m}^3/\text{s}$ .



**Tableau V.10** Les résultats de calcul des nombres de caisses pour le canal en gabion en amont d'oued Rihane.

K (caisses)	Q ( m <sup>3</sup> /s )	S (m <sup>2</sup> )	P (m)	R (m)
10	1033,619	190	43	4,419
9	831,576	162	40	4,050
8	686,798	140	37	3,784
7	554,212	119	34	3,500
6	433,745	99	31	3,194
5	325,433	80	28	2,857
<b>4</b>	<b>229,497</b>	<b>62</b>	<b>25</b>	<b>2,480</b>
3	146,495	45	22	2,045
2	77,668	29	19	1,526
1	25,875	14	16	0,875

**Tableau V.11** Les résultats de calcul des nombres de caisses pour le canal en gabion en aval d'oued Rihane.

K (caisses)	Q (m <sup>3</sup> /s)	S (m <sup>2</sup> )	P (m)	R (m)
10	653,718	190	43	4,419
9	525,935	162	40	4,050
8	434,369	140	37	3,784
7	350,514	119	34	3,500
6	274,324	99	31	3,194
<b>5</b>	<b>205,822</b>	<b>80</b>	<b>28</b>	<b>2,857</b>
4	145,146	62	25	2,480
3	92,652	45	22	2,045
2	49,122	29	19	1,526
1	16,365	14	16	0,875

- Pour notre cas, nous pouvons utiliser un canal de 4 caisses, garantissant un débit de 151 m<sup>3</sup>/s avec une revanche de 1 m dans le tronçon amont de l'Oued Rihane, côté de l'usine

des matières explosives (Onex). De plus, nous pouvons opter pour un canal de 5 caisses avec une revanche de 1 m dans le tronçon aval de l'Oued Rihane, côté de la ville d'Oued Rihane.

▪ **Paramètres d'écoulement :**

Les résultats de la simulation sont représentés dans le tableau ci-dessus :

**Tableau V.12** Résultats de la simulation d'écoulement d'un canal en gabion d'Oued Rihane (Source : HECRAS).

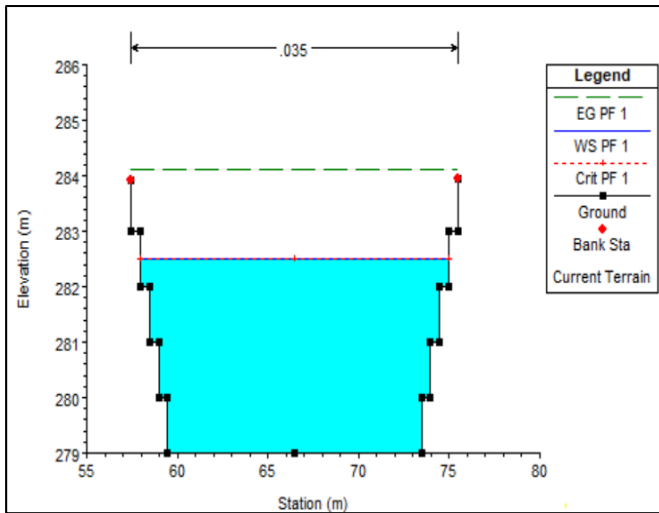
River Sta	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude Chl
/	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m <sup>2</sup> )	(m)	/
5264	440.00	442.50	442.50	443.09	0.00999	4.54	33.36	16.00	1.00
4988	427.00	429.27	429.27	430.32	0.013138	4.52	33.38	16.00	1.00
4725	410.00	412.27	412.27	413.32	0.011368	4.53	33.37	16.00	1.00
4319	399.00	400.27	401.27	403.29	0.013074	5.64	53.71	17.10	1.19
2108	320.00	322.27	322.27	323.32	0.013255	4.54	33.27	16.00	1.00
1772	305.00	307.77	309.23	312.55	0.02122	5.55	33.56	16.00	1.32
1581	297.00	298.29	299.27	301.74	0.02788	5.89	28.00	15.00	1.55
1276	288.00	290.10	290.55	291.34	0.017265	4.95	30.53	16.00	1.14
956	285.00	287.48	287.48	288.03	0.007145	3.51	52.12	19.00	0.74
552	279.00	282.51	282.51	284.10	0.013074	5.59	53.71	17.00	1.00
343	276.00	277.15	278.27	281.57	0.115980	5.66	30.00	15.00	1.40
48	275.00	277.27	277.27	278.32	0.013158	4.53	33.35	16.00	1.00

▪ **Interprétation :**

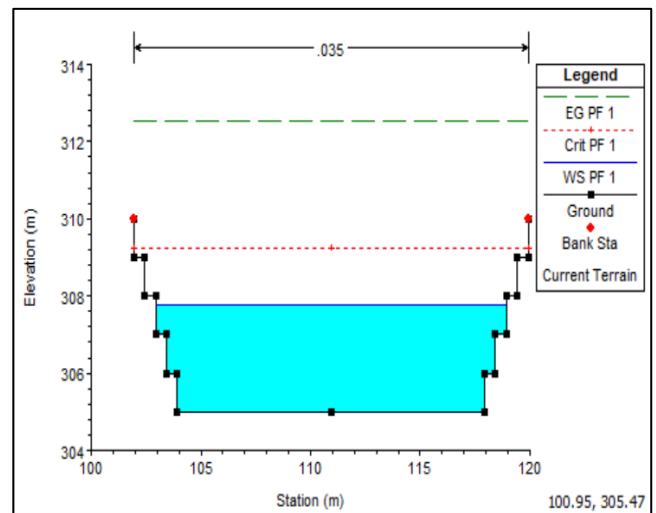
Nous constatons que, d'après le nombre de Froude, le régime d'écoulement est torrentiel (Fr supérieur à 1) et que la vitesse d'écoulement ne dépasse pas 6 m/s. Cette vitesse reste admissible pour un gabion. Le périmètre mouillé est de 17,10 m au maximum en amont, du côté de l'usine des matières explosives (Onex), et de 19,00 m en aval, du côté de la ville d'Oued Rihane. D'un point de vue technique, le canal gabionné assure une bonne protection.

▪ **Les sections en travers :**

Les sections en travers de l'oued Rihane après la simulation sont représentées dans la figure ci-dessous :

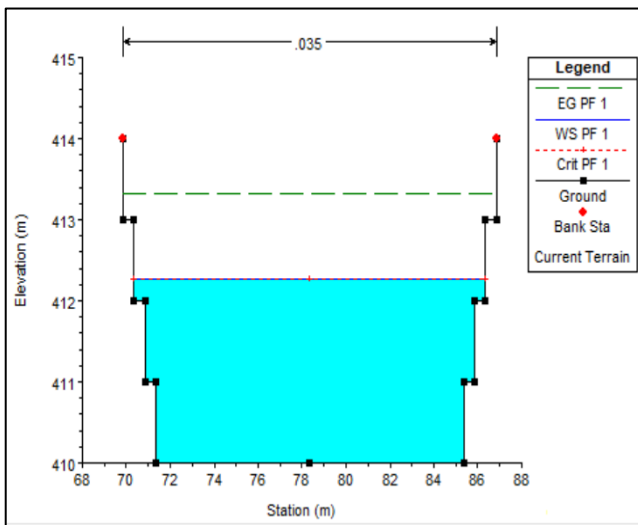


Station 552.

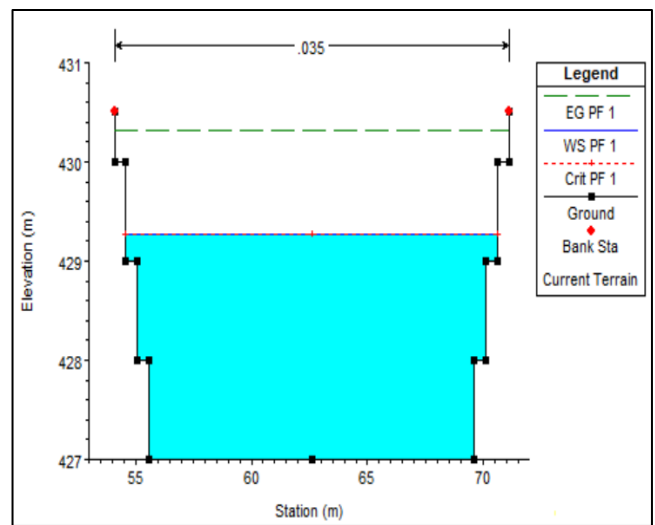


Station 1772.

**Figure V.9 :** Profils en travers d'un canal en gabion pour une crue centennale sur le tronçon amont d'Oued Rihane.



Station 4725.



Station 4899

**Figure V.10 :** Profils en travers d'un canal en gabion pour une crue centennale sur le tronçon aval d'Oued Rihane.

- **Estimation du coût de la variante :** Représentés dans les tableaux suivants :

**Tableau V.13** Devis de la variante canal en gabion en amont d'oued Rihane.

Désignations des travaux		Unité	Quantité	Prix unitaire (DA)	Montant (DA/mL)
Terrassement	Déblais	m3	66268	250	16567000
	Remblais	m3	2640	700	1848000
Gabion		m3	7031	5000	35155000
Géotextile		m2	29500	5000	147500000
Montant total					201,070,000

**Tableau V.14** Devis de la variante canal en gabion en aval d'oued Rihane.

Désignations des travaux		Unité	Quantité	Prix unitaire (DA)	Montant (DA/mL)
Terrassement	Déblais	m <sup>3</sup>	46903	250	11725750
	Remblais	m <sup>3</sup>	6840	700	4788000
Gabion		m <sup>3</sup>	14050	5000	70250000
Géotextile		m <sup>2</sup>	58942	5000	294710000
Montant total					381,473,750

**Tableau V.15** Devis de la variante canal en gabion Totale d'oued Rihane.

	Tronçons	
	Amont	Aval
Montant (DA)	201070000	381473750
Montant Totale (DA)	582,543,750	
TVA 19%	110,683,312.5	
Total TTC	693227062.5	

- **Résultats :**

Donc cette variante assure une protection efficace et présente des avantages hydrauliques considérables, leur installation peut être laborieuse et coûteuse en main-d'œuvre, nécessitant une expertise spécifique. Les cages métalliques peuvent rouiller avec le temps, surtout dans des environnements humides, ce qui compromet leur durabilité. Les pierres peuvent se déplacer ou s'éroder, réduisant l'efficacité structurelle des gabions. De plus, leur perméabilité peut entraîner des problèmes de fuite dans certains cas, nécessitant un entretien plus fréquent pour maintenir leur efficacité.

### V.3.3 Canal en enrochement :

Un canal en enrochement est un aménagement de cours d'eau utilisant des matériaux tels que des pierres, des cailloux ou des blocs de roche. Ces matériaux renforcent les berges, stabilisent le lit de la rivière et contrôlent l'érosion due à l'écoulement de l'eau. Ils offrent une structure robuste et durable tout en permettant un écoulement contrôlé. Conçus pour résister aux forces hydrauliques, les canaux en enrochement conservent leur intégrité structurelle à long terme, tout en s'intégrant harmonieusement à leur environnement naturel, ce qui en fait une solution adaptée aux aspects esthétiques et environnementaux.

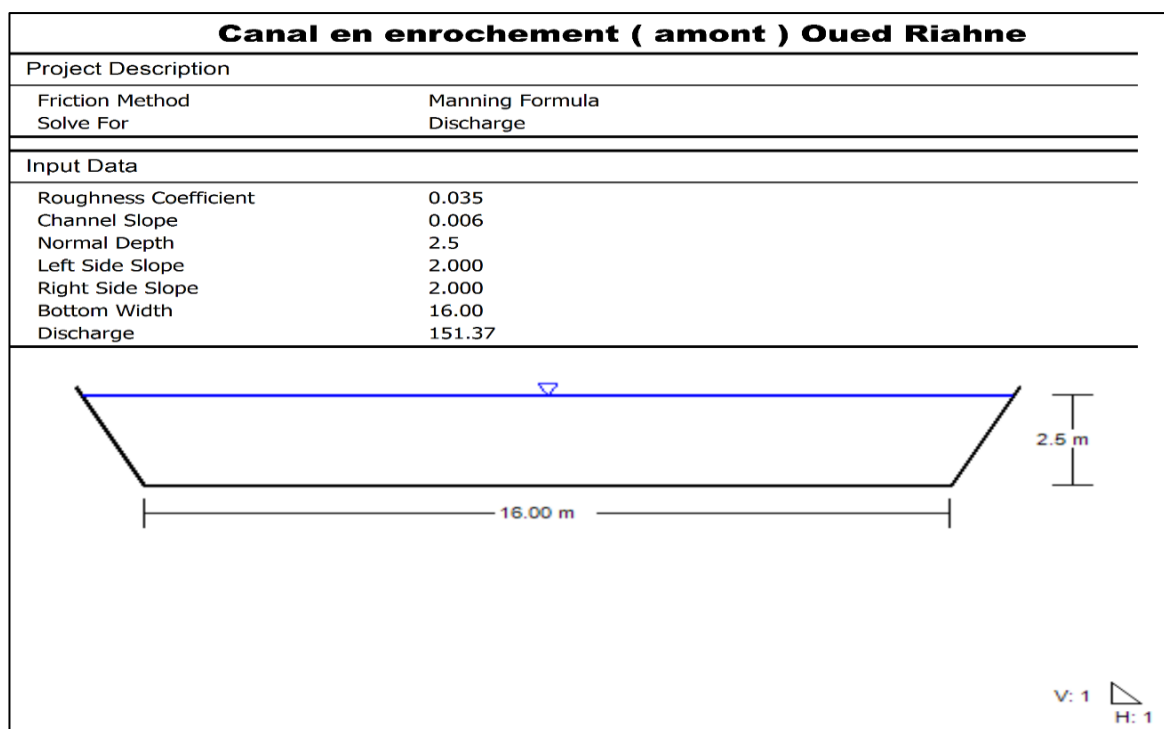
- **Dimensionnement :**

- **Variante 1 Amont : Tronçon 1 (amont) : Coté du l'usine des matières explosives (Onex).**

**Tableau V.16** Dimensions de l'aménagement en enrochement de l'Oued Rihane (Amont).

Tronçon	Section de départ	Section D'arrivé	Longueur (m)	Pente du projet (%)	Fruit de talus	Largeur du fond (m)	La largeur au miroir	Hauteur du canal (m)	La rugosité
Amont	4319	5264	800	0.006	2	16	26	2.5	0.035

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



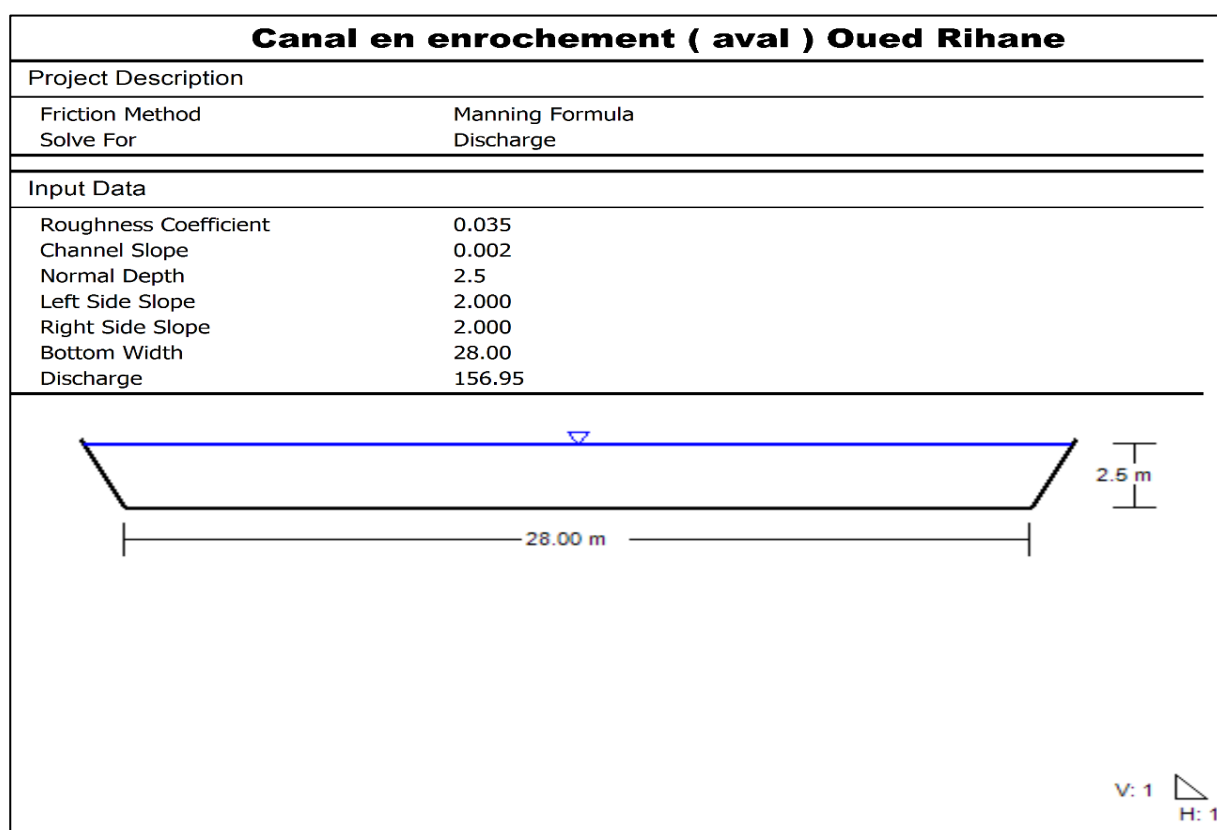
**Figure V.11** : Dimensions du canal trapézoïdale en amont d'Oued Rihane.

➤ **Variante 1 Aval : Tronçon 2 (Aval) : Coté de la ville de Oued Rihane Ouest de Khemis Miliana.**

**Tableau V.17** Dimensions de l'aménagement en enrochement de l'Oued Rihane (Aval).

Tronçon	Section de départ	Section D'arrivé	Longueur (m)	Pente du projet (%)	Fruit de talus	Largeur du fond (m)	La largeur au miroir	Hauteur du canal (m)	La rugosité
Aval	48	2108	1900	0.002	2	28	38	2.5	0.035

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



**Figure V.12** : Les dimensions du canal trapézoïdale en aval d'Oued Rihane.

▪ **Paramètres d'écoulement :**

Les résultats de la simulation sont représentés dans le tableau ci-dessus :

**Tableau V.18** Résultats de la simulation d'écoulement d'un canal en enrochement d'Oued Rihane (Source : HECRAS).

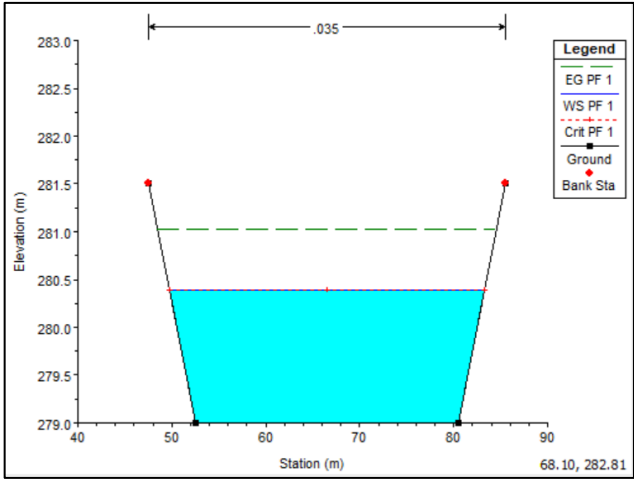
River Station	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m <sup>2</sup> )	Top Width (m)	Froude # Chl
5264	439.00	440.92	440.92	441.72	0.010790	4.01	38.03	23.67	0.98
4988	428.00	428.87	429.92	433.76	0.012963	3.6	41.94	24.32	0.79
4725	412.00	412.76	413.92	419.37	0.016783	3.88	38.91	23.82	0.87
4319	400.00	401.78	401.92	402.74	0.002620	3.75	40.27	24.04	0.85
2108	320.00	321.39	321.39	322.03	0.011378	3.53	42.72	33.55	1.00
1772	305.00	305.51	306.39	310.73	0.021370	4.32	34.92	32.61	1.33
1581	297.00	298.15	298.39	299.11	0.021370	4.32	34.92	32.61	1.33
1276	288.00	288.96	289.39	290.37	0.039910	4.96	28.65	31.83	1.47
956	285.00	286.39	286.39	287.03	0.011341	3.53	42.77	33.56	1.00
552	279.00	280.18	280.39	281.08	0.019590	4.21	35.90	32.73	1.28
343	276.00	276.98	277.39	278.32	0.036652	4.89	29.43	31.93	1.41
48	275.00	276.39	276.39	277.03	0.011338	3.53	42.77	33.56	1.00

▪ **Interprétation :**

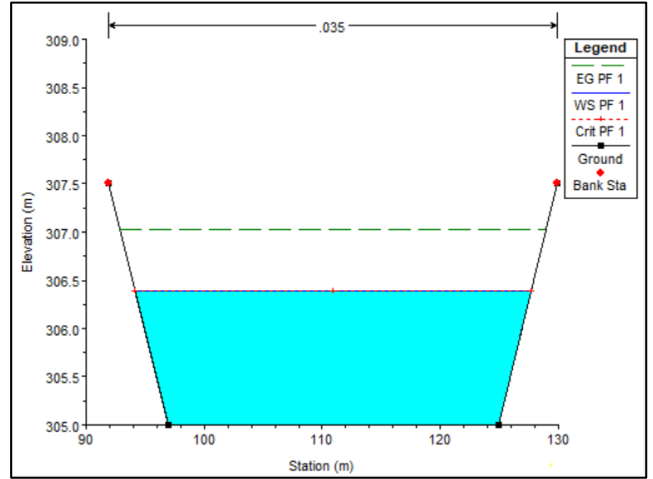
Nous observons que, selon le nombre de Froude, le régime d'écoulement est fluvial ( $Fr < 1$ ) et que la vitesse d'écoulement ne dépasse pas 6 m/s. Le périmètre mouillé est de 24,32 m au maximum en amont, du côté de l'usine des matières explosives (Onex). En aval, du côté de la ville d'Oued Rihane, le nombre de Froude indique que le régime d'écoulement est torrentiel ( $Fr > 1$ ) et que la vitesse d'écoulement reste inférieure à 6 m/s, avec un périmètre mouillé maximal de 33,56 m. Cette vitesse est acceptable pour un canal en enrochement. D'un point de vue technique, un canal enrochement offre une bonne protection.

▪ **Les sections en travers :**

Les sections en travers de l’oued Rihane après la simulation sont représentées dans la figure ci-dessous :

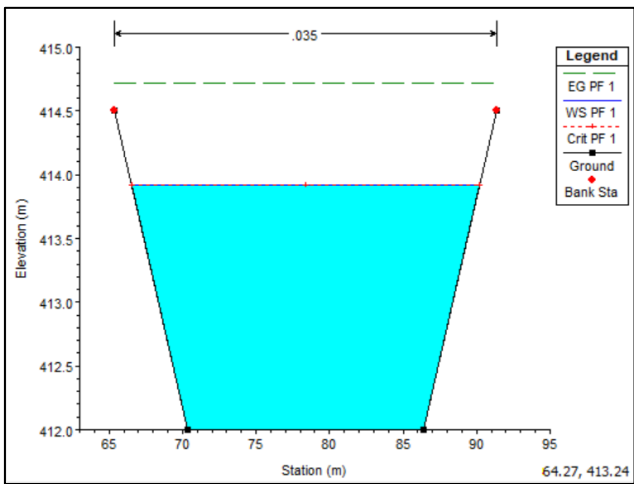


Station 552.

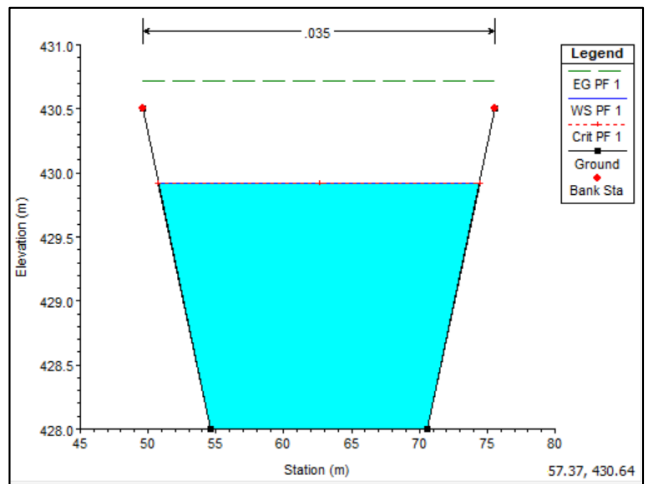


Station 1772.

**Figure V.13 :** Profiles en travers d’un canal enrochement pour une crue centennale sur le tronçon amont d’Oued Rihane.



Station 4725.



Station 4899

**Figure V.14 :** Profiles en travers d’un canal enrochement pour une crue centennale sur le tronçon aval d’Oued Rihane.



▪ **Conception du canal en enrochement**

L'enrochement est une technique couramment utilisée pour stabiliser les berges et le fond des cours d'eau. Elle consiste à empiler des roches issues de carrières, avec une inclinaison modérée des talus, généralement comprise entre 3/2 et 2/1, sans recours à des liens en béton.

Le tonnage estimé pour l'aménagement d'Oued Rihane en enrochement, destiné à protéger la ville d'Oued Rihane contre les crues, varie de 1 à 1,5 tonne. Le diamètre médian des roches (D50) est d'environ 500 cm.

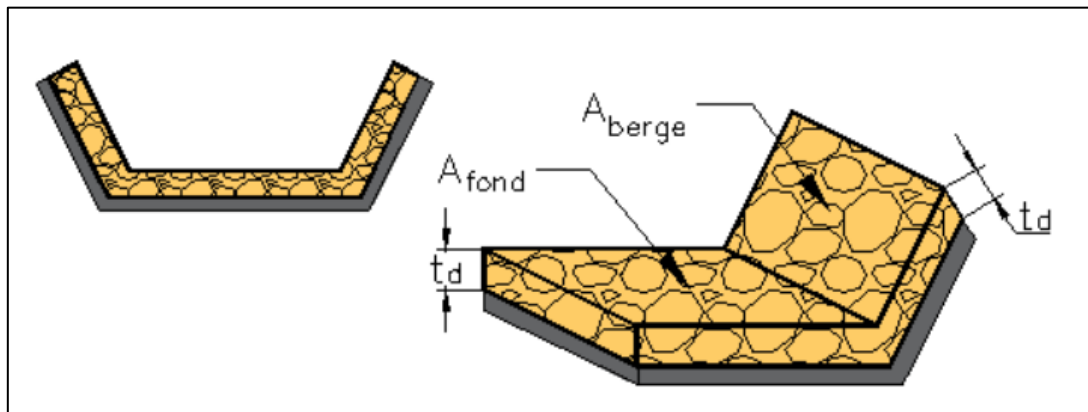


Figure V.15 : Canal en enrochement.

➤ **Epaisseur orthogonale théorique  $t_d$  (m) :**

$$t_d = n \times D_{50} \quad (V.14)$$

➤ **Volume globale de dimensionnement  $\mathcal{V}_{b,d}$  (m<sup>3</sup>) :**

$$\mathcal{V}_{b,d} = A \times t_d \quad (V.15)$$

Avec :

$n$  : nombre de couche  $n = 1$ .

$D_{50}$  : Diamètre médian  $D_{50} = 0.5m$ .

$A$  : Aire (surface) (m<sup>2</sup>).

➤ **Les sections d'enrochement :**

$$A = L \times l_{alus} \quad (V.16)$$

Avec :

$$l_{alus} = h \sqrt{1 + m^2} \quad (V.17)$$

**Tableau V.19** Sections d'encrochement.

		<b>L(m)</b>	<b>l (m)</b>	<b>A(m<sup>2</sup>)</b>
<b>Amont</b>	<b>Fond</b>	800	8	6400
	<b>Talus gauche</b>	800	5,6	4480
	<b>Talus droite</b>	800	5,6	4480
<b>Aval</b>	<b>Fond</b>	1900	14	26600
	<b>Talus gauche</b>	1900	5,6	10640
	<b>Talus droite</b>	1900	5,6	10640

**Tableau V.20** Volumes d'encrochement.

		<b>n</b>	<b>D50 (m)</b>	<b>td(m)</b>	<b>A(m<sup>2</sup>)</b>	<b>V(m<sup>3</sup>)</b>
<b>Amont</b>	<b>Fond</b>	1	0,5	0,5	6400	3200
	<b>Talus gauche</b>	1	0,5	0,5	4480	2240
	<b>Talus droite</b>	1	0,5	0,5	4480	2240
<b>Aval</b>	<b>Fond</b>	1	0,5	0,5	26600	13300
	<b>Talus gauche</b>	1	0,5	0,5	10640	5320
	<b>Talus droite</b>	1	0,5	0,5	10640	5320
Volume totale						31620

**Tableau V.21** Sections du géotextile.

		<b>A(m<sup>2</sup>)</b>	<b>A totale (m<sup>2</sup>)</b>
<b>Amont</b>	<b>Fond</b>	6400	63240
	<b>Talus gauche</b>	4480	
	<b>Talus droite</b>	4480	
<b>Aval</b>	<b>Fond</b>	26600	
	<b>Talus gauche</b>	10640	
	<b>Talus droite</b>	10640	

- **Estimation du coût de la variante** : Représentés dans les tableaux suivants :

**Tableau V.22** Devis de la variante canal en enrochement Totale d’oued Rihane.

Désignations des travaux		Unité	Quantité	Prix unitaire (DA)	Montant (DA/mL)
Terrassement	Déblais	m3	443689	250	110922250
	Remblais	m3	13936	700	9755200
Enrochement		m3	31620	15000	474300000
Géotextile		m2	63240	5000	316200000
Montant total					911,177,450
TVA 19%					173,123,715.5
Total TTC					108,430,1166

▪ **Résultat :**

Bien que cette variante assure une protection efficace et présente des avantages hydrauliques considérables, sa construction est coûteuse en raison du prix et du transport des roches, ainsi que de la main-d'œuvre spécialisée requise pour une installation correcte. De plus, les canaux en enrochement occupent généralement plus d'espace que d'autres types de canaux, ce qui peut poser problème dans les zones restreintes. Les roches peuvent également se déplacer ou s'éroder, nécessitant une maintenance régulière pour garantir leur efficacité.

**V.4 Choix de la variante d'aménagement :**

Il semble que toutes les trois options sont capables de gérer le débit de crue sans risque de débordement. Le choix de la variante sera donc guidé par des considérations technico-économiques afin de rassurer les futurs investisseurs, de respecter l'environnement naturel et de prévenir l'érosion des berges. Il prendra également en compte les priorités de la ville, les caractéristiques locales de l'environnement et la géomorphologie de la rivière. Dans notre cas, l'Oued Rihane traverse à la fois la ville d'Oued Rihane et l'usine des matières explosives (Onex). Ainsi, il est prévu d'aménager cette section de l'Oued avec un canal trapézoïdal en béton à la fois en amont et en aval.

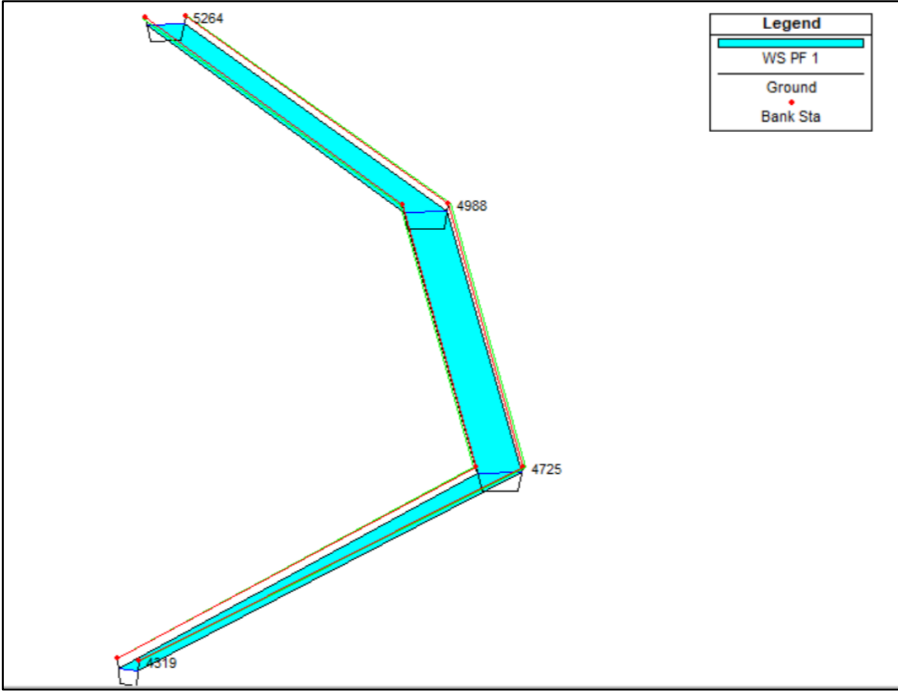
**V.4.1 Recommandation :**

Dans cette situation, la construction d'un barrage de rétention est une recommandation judicieuse car il joue un rôle crucial dans la prévention des inondations en régulant efficacement les débits des cours d'eau. En retenant l'eau dans des réservoirs lors des périodes de fortes pluies ou de fonte des neiges, ces barrages diminuent significativement le risque de crues soudaines en aval. Cette capacité à contrôler les débits permet une gestion sécurisée et prévisible des flux d'eau, assurant ainsi la protection des zones riveraines contre les dommages associés aux inondations. De plus, en libérant l'eau de manière contrôlée pendant les périodes de sécheresse, les barrages de rétention contribuent à maintenir des niveaux d'eau stables dans les cours d'eau, En résumé, les barrages de rétention jouent un rôle vital dans la gestion intégrée des ressources en eau, offrant une protection efficace contre les inondations tout en favorisant une utilisation

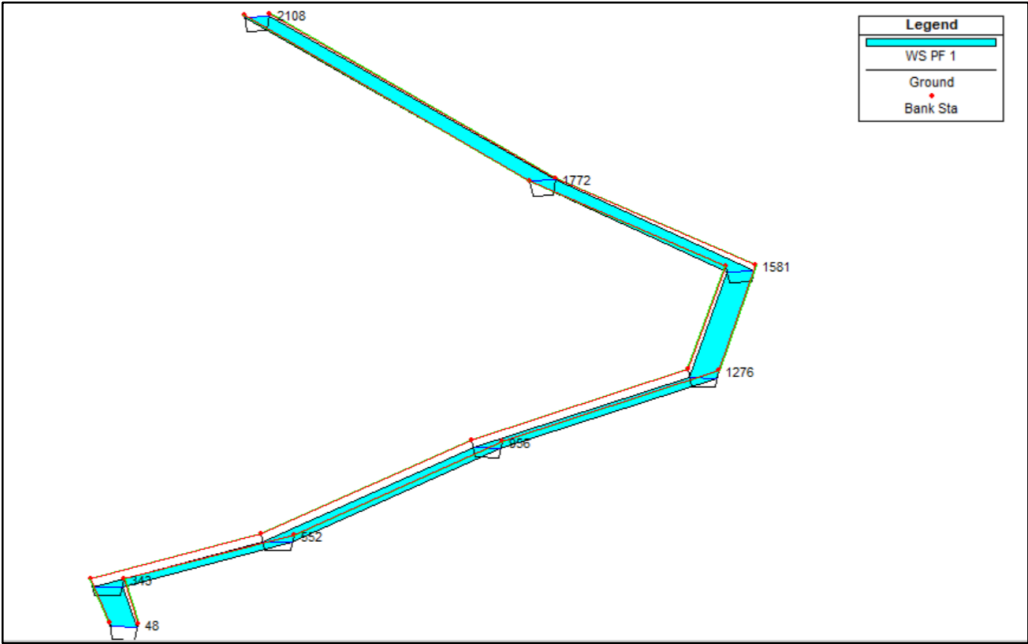
durable des ressources hydriques, particulièrement cruciale dans des environnements sensibles comme celui des installations industrielles telles que l'usine des matières explosives (Onex).

**V.4.2 Résultat des cartes d'oued Rihane après l'aménagement :**

Les figures ci-dessous montrent la vue en trois dimensions d'oued Rihane en amont et en aval après leur aménagement.



**Figure V.16 :** Vue en 3D en amont d'Oued Rihane.



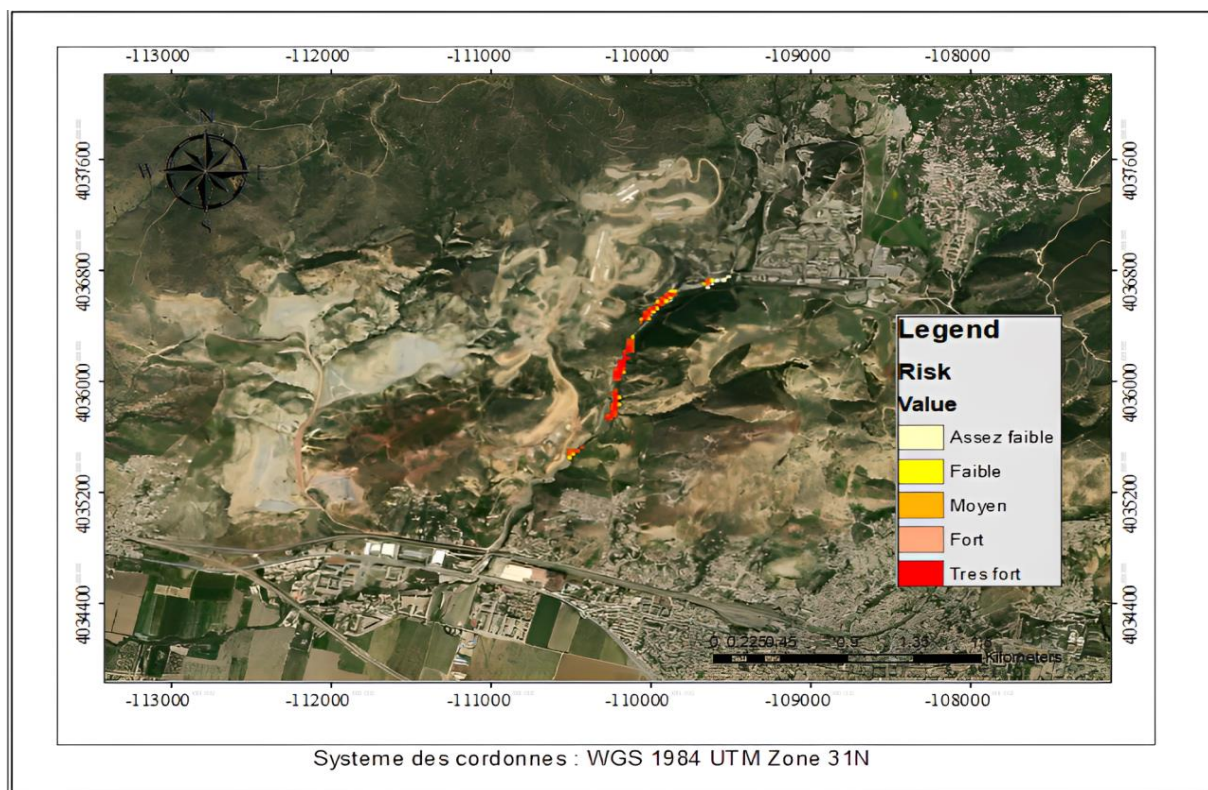
**Figure V.17 :** Vue en 3D en aval d'Oued Rihane.

La figure suivante illustre la carte de profondeur d'eau extraite du RAS-Mapper.



**Figure V.18:** Carte de profondeur d'eau D'oued Rihane après aménagement pour T = 100 ans.

La figure suivante illustre la carte des risques d'oued Rihane (Source : ArcGIS).



**Figure V.19 :** Carte des risques D'oued Rihane après aménagement pour  $T = 100$  ans.

### **Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons choisi d'aménager l'oued Rihane en explorant plusieurs variantes et en sélectionnant des matériaux et des sections appropriés. Nous avons mené une étude hydraulique en amont et en aval en utilisant le logiciel de calcul hydraulique Flowmaster. Les calculs et simulations réalisés avec le logiciel HEC-RAS ont démontré qu'après ces aménagements.

Les deux variantes d'aménagement en gabion et en enrochement doivent être évitées en raison des déchets d'usine des matières explosives (Onex) qui s'écoulent directement dans l'oued et contiennent des produits chimiques. Ces produits chimiques peuvent facilement se propager dans l'environnement à cause de la perméabilité des gabions et des enrochements. De plus, le coût de construction de ces solutions est exorbitant. C'est pourquoi nous avons opté pour un canal trapézoïdal en béton, car il répond à toutes les exigences de sécurité et de prévention, tout en étant plus économique.

# **Chapitre VI : Etude génie civil.**

## Introduction

En génie civil, la précision dans le calcul et le dimensionnement des ouvrages est cruciale. Les problèmes d'interaction, qui peuvent se produire entre différents systèmes physiques de protection, sont particulièrement réputés en génie civil et peuvent causer des dommages significatifs lors d'un séisme. On peut citer :

- **Le couplage entre un fluide et une structure, connu sous le nom d'interaction fluide-structure :** Les forces aérodynamiques  $F_a$  (forces de pression) s'exercent sur la surface mouillée  $S_m$  du solide  $SS$ , lequel se déplace et/ou se déforme sous l'action du fluide  $FF$ , caractérisé par son champ de vitesse et de pression. Le couplage entre ces deux milieux se manifeste par un cycle d'interactions entre le fluide et le solide. Le déplacement et/ou la déformation du solide affecte le champ d'écoulement, influençant ainsi la direction et l'intensité des charges aérodynamiques. La nature de cette interaction varie selon les systèmes, et il est possible de ne considérer que l'influence du fluide sur le solide (ou vice versa). La modification d'un seul paramètre  $F_a$ ,  $FF$ ,  $S_m$  ou  $SS$  peut entraîner une déstabilisation.
- **Interaction entre la structure et le sol :** Aujourd'hui, on parle d'interaction sol-structure pour décrire les situations où le comportement d'une structure ne peut être évalué avec précision sans considérer le comportement du sol en contact et de son interface. L'objectif d'une analyse prenant en compte l'interaction sol-structure, du point de vue de la structure, est de déterminer l'impact de l'action du sol sur la structure, en particulier les pressions de contact en fonction de la déformation de la structure, afin de procéder aux vérifications nécessaires pour son dimensionnement. Il s'agit donc de s'assurer que les prévisions du comportement du sol sont cohérentes avec la réponse de la structure, notamment en termes de déformation.
- **Entre les trois en même temps :** interaction fluide-structure-sol ; les champs de température et de contrainte interagissent au sein du même système.

### VI.1 action et sollicitation :

En génie civil, les concepts d'action et de sollicitation sont fondamentaux pour la conception et le dimensionnement des structures. Ces concepts permettent de garantir que les structures résistent aux différentes forces et contraintes auxquelles elles seront soumises durant leur utilisation.

#### VI.1.1 Actions :

Les actions, également appelées charges ou forces, sont les influences extérieures qui exercent une pression ou une force sur une structure. Elles peuvent être classées en différentes catégories :

- **Les Charges Permanentes :** Les charges permanentes, également appelées charges fixes ou charges permanentes (symbolisées par  $G$ ), sont des charges qui restent constantes et n'évoluent pas avec le temps. Elles sont principalement dues au poids propre des matériaux et des éléments structurels permanents par exemple :



- **Poids propre des structures** : Le poids des poutres, des colonnes, des murs, des planchers, etc.
  - **Matériaux de construction** : Le poids des matériaux de finition tels que les revêtements de sol, les cloisons non mobiles, les revêtements de toiture.
  - **Équipements fixes** : Les systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation (HVAC), les ascenseurs, les escaliers mécaniques.
- **Les Charges Temporaires** : Les charges temporaires, également appelées charges variables (symbolisées par Q), sont des charges qui peuvent varier en intensité, en position et dans le temps. Elles incluent les charges d'utilisation et les charges climatiques par exemple :
- **Charges d'exploitation** : Charges dues à l'occupation humaine (personnes), les meubles, les véhicules dans les parkings, les équipements mobiles.
  - **Charges climatiques** : Neige, vent, pluie, variations thermiques.
  - **Charges de construction** : Charges temporaires lors de la construction ou de la rénovation d'un bâtiment, telles que les échafaudages, les équipements de construction, les matériaux stockés temporairement.
- **Les Charges Accidentelles** : Les charges accidentelles (symbolisées par A) sont des charges imprévues et généralement de courte durée, résultant d'événements accidentels ou exceptionnels par exemple :
- **Séismes** : Forces générées par les mouvements sismiques.
  - **Impacts** : Chocs dus à des collisions, par exemple des véhicules ou des objets tombants.
  - **Explosions** : Forces générées par des explosions internes ou externes.
  - **Incendies** : Charges thermiques et structurales dues à un incendie.
- **Les Charges Hydrauliques** : Les charges hydrauliques sont des charges résultant de la pression exercée par l'eau ou tout autre liquide sur une structure. Elles peuvent varier selon le niveau d'eau et la dynamique des fluides en jeu par exemple :
- **Pression hydrostatique** : Pression due à l'eau en statique, par exemple contre les parois d'un réservoir, d'un barrage ou des fondations immergées.
  - **Pression hydrodynamique** : Pression due à l'eau en mouvement, par exemple l'impact des vagues sur une digue ou un quai.
  - **Inondations** : Forces exercées par l'eau lors d'une crue ou d'une inondation.
  - **Flottabilité** : Forces verticales exercées par un liquide sur une structure immergée partiellement ou totalement, tendant à la faire flotter.

## VI.1.2 Sollicitations :

Les sollicitations désignent les efforts (**effort normal, effort tranchant**) et les moments (**moment de flexion, moment de torsion**) générés par les actions agissant sur les éléments d'une construction. En règle générale, les sollicitations sont calculées en utilisant un modèle élastique linéaire pour la structure. On applique les méthodes de la résistance des matériaux lorsque la forme des pièces le permet.

## VI.2 caractéristiques des matériaux :

**VI.2.1 Béton :** Le béton est un matériau composite largement utilisé dans la construction, composé de trois principaux ingrédients : le ciment, les granulats (tels que le sable, le gravier ou les agrégats) et l'eau. Lorsque le ciment est mélangé à de l'eau, il subit un processus chimique de durcissement qui crée une liaison solide entre les granulats. Bien que le béton présente une faible résistance aux efforts de traction, il peut supporter des efforts de compression importants. Pour compenser cette faiblesse, des barres d'acier (armatures) sont insérées dans les zones soumises à la traction. Ce matériau combinant béton et acier est appelé béton armé. Les déformations différées du béton comprennent le retrait et le fluage.

Le béton est principalement utilisé dans les travaux de génie civil en raison de :

- Sa forte résistance à la compression.
- Sa durabilité sans entretien.

**VI.2.1.1 le retrait :** Le retrait, ou retrait de la contraction, est un phénomène naturel où le béton subit une contraction dimensionnelle au fil du temps. Ce phénomène est principalement dû à la perte d'eau dans le béton pendant le durcissement, entraînant une réduction de son volume. Le retrait du béton peut survenir à différentes étapes du processus de durcissement et se catégorise en plusieurs types, selon les conditions climatiques :

- $1,5 \times 10^{-4}$  pour les régions très humides.
- $2 \times 10^{-4}$  pour les régions humides.
- $3 \times 10^{-4}$  pour les régions tempérées sèches.
- $4 \times 10^{-4}$  pour les régions sèches et chaudes.
- $5 \times 10^{-4}$  pour les régions très sèches.

**VI.2.1.2 Le fluage :** Le fluage est une déformation complémentaire qu'une éprouvette en béton subit au fil du temps lorsqu'elle est constamment chargée. Les modules d'élasticité instantanée ( $E_{ij}$ ) et différée ( $E_{vj}$ ) sont donnés par les formules suivantes :

- $E_{ij} = 1100 \times (f_{cj})^{1/3}$
- $E_{vj} = 3700 \times (f_{cj})^{1/3}$

Par exemple, pour une résistance du béton  $f_{c28}$  de 25 MPa :

- $E_{ij} = 32164,2$  MPa
- $E_{vj} = 10818,9$  MPa

**VI.2.2 Les armatures :** Les armatures en acier se comportent de manière similaire en traction et en compression. Les principales caractéristiques des aciers d'armature sont leur très haute résistance, leur ductilité, leur contrainte élastique, et leur module de Young. Les armatures longitudinales et les éléments principaux en béton armé doivent avoir une haute adhérence (HA) et une limite élastique  $f_e \leq 500$  MPa.

### VI.3 Contraintes de calcul :

#### VI.3.1 Béton :

- **Résistance à la compression ( $f_c$ ) :** C'est la résistance maximale du béton à la compression, mesurée en Mégapascal (MPa). Cette caractéristique est essentielle pour déterminer la capacité du béton à supporter des charges de compression sans subir de déformations excessives ou de rupture.
- **Module d'élasticité ( $E$ ) :** C'est la mesure de la rigidité du béton, indiquant comment il réagit aux charges appliquées et à la déformation. Le module d'élasticité est exprimé en MPa et est utilisé pour calculer les déformations élastiques dans les éléments structuraux en béton.
- **Contrainte de traction ( $f_t$ ) :** Bien que le béton ait une faible résistance à la traction, cette caractéristique est importante pour évaluer sa capacité à résister aux forces de traction, comme celles induites par les charges de vent ou les contraintes thermiques.
- **Coefficient de sécurité ( $\gamma$ ) :** Il représente un facteur de sécurité appliqué aux charges de conception pour tenir compte des incertitudes dans les conditions de charge, des variations dans les propriétés des matériaux, etc. Il est utilisé pour déterminer les valeurs limites admissibles des contraintes.

#### VI.3.2 Acier :

- **Limite élastique ( $f_y$ ) :** C'est la contrainte maximale que l'acier peut supporter sans subir de déformation permanente. Elle est mesurée en Mégapascal (MPa) et détermine la résistance de l'acier à la traction.
- **Module d'élasticité ( $E$ ) :** Comme pour le béton, le module d'élasticité de l'acier (également en MPa) mesure sa rigidité et sa capacité à résister aux déformations sous l'effet des charges appliquées.
- **Ductilité et résilience :** Ce sont des propriétés importantes de l'acier en génie civil. La ductilité se réfère à la capacité de l'acier à se déformer considérablement avant la rupture, ce qui est crucial pour absorber l'énergie sismique ou dynamique. La résilience indique la capacité de l'acier à absorber et à redistribuer l'énergie lorsqu'il est soumis à des charges de choc ou de fatigue.
- **Coefficient de sécurité ( $\gamma$ ) :** Comme pour le béton, le coefficient de sécurité est appliqué aux charges de conception pour tenir compte des incertitudes et des variations dans les conditions de service.

## VI.4 Etude des voiles :

Dans la construction, les voiles remplissent un rôle crucial en soutenant les charges verticales et en opposant efficacement les forces horizontales grâce à leur forte rigidité. Ils sont couramment utilisés dans les structures en béton armé en raison de leur capacité satisfaisante à résister aux forces latérales, notamment aux séismes. Leur robustesse et leur rigidité leur permettent de gérer les déplacements à grande échelle et de les minimiser. En absorbant la majeure partie des contraintes latérales, ils améliorent significativement les performances globales de l'ouvrage et sont donc essentiels pour assurer sa sécurité.

### VI.4.1 Fonctionnement d'un voile :

Un voile agit comme une poutre encastrée à sa base. Il y a deux catégories de voiles, chacune ayant un mode de fonctionnement distinct :

- **Voile élancée** :  $\frac{h}{l} > 1,5$
- **Voile courte** :  $\frac{h}{l} < 1,5$

Et trois modes de rupture les distinguent :

**VI.4.1.1 Défaillance par flexion** : Ce type de défaillance survient uniquement dans des voiles faiblement renforcés en flexion (armatures verticales), en particulier si ces armatures sont dispersées plutôt que concentrées aux extrémités, ce qui pourrait conduire à la rupture complète des aciers en traction ou à leur plasticité.

**VI.4.1.2 Défaillance par flexion combinée à l'effort tranchant** : Cette forme de défaillance se produit lorsque la flexion (moment M) n'est pas prédominante par rapport à l'effet tranchant, entraînant ainsi la rupture ou la plasticité des armatures verticales et/ou transversales en flexion.

**VI.4.1.3 Défaillance par compression ou traction du béton** : Les voiles qui sont fortement renforcés longitudinalement et transversalement peuvent présenter ce type de défaillance, en particulier lorsqu'ils sont soumis à des charges élevées ou normales.

### VI.4.2 Conception des voiles et des dalles massives :

Pour éviter les types de défaillance mentionnés précédemment, la partie verticale du voile doit être équipée d'un nombre adéquat d'armatures verticales, horizontales et transversales. Ces renforcements permettent au voile de résister efficacement à toutes les charges qui lui sont appliquées.

### VI.4.3 Recommandations selon le RPA99 :

Les armatures verticales sont agencées en deux couches parallèles aux faces du voile pour reproduire les effets de flexion. Ces armatures doivent couvrir au minimum 20% de toute la zone tendue.

- **Les armatures horizontales** : sont disposées en deux couches près des extrémités des armatures verticales afin d'éviter leur flambement, et elles sont utilisées pour résister aux efforts tranchants. Elles doivent être munies de crochets de longueur égale à 10 fois le diamètre et pliés à 135 degrés.

- **Les armatures transversales :** sont positionnées pour protéger les barres verticales intermédiaires contre les incendies, avec au moins quatre épingles par mètre carré.

Règles communes :

- **Le pourcentage minimum des armatures :**

$$A_{\min} \begin{cases} 0,15\%S \text{ voile complet} \\ 0,01\%S \text{ zone courante} \end{cases}$$

- **Espacement des barres :**

$$St < \min(1,5 a \text{ } 30 \text{ cm})$$

- **Diamètres des barres :**

$$\emptyset = \frac{a}{10}$$

- **Longueur de recouvrement :**

$$L_r \begin{cases} 20\emptyset \text{ zone comprimée sous toutes les combinaisons} \\ 40\emptyset \text{ zone qui peut être tendue} \end{cases}$$

Avec :

$A_{V \text{ cal/face}}$  : section d'armature verticale pour une face de voile unique.

$A_{V \text{ min BAEL}}$  : section minimale d'armature verticale dans le voile complet.

$A_{V \text{ min RPA}}$  : section d'armature verticale minimale dans le voile complet.

$A_{V \text{ adap/face}}$  : section d'armature verticale par face adaptée.

Nbre/face : nombre de barres par face adaptées.

Nbre/ml : nombre de barres qui conviennent à un mètre linéaire.

St : espacement.

$A_{H \text{ min}}$  : minimale section d'armature horizontale dans le voile complet.

$A_{H \text{ cal}}$  : section horizontale d'armature pour 1 mètre linéaire.

$A_{H \text{ adap/ml}}$  : Adaptation d'une section d'armature horizontale à un mètre linéaire ;

$A_{V \text{ adpt/ml}}$  : section d'armature utilisée en mètre linéaire.

## VI.5 Etude de stabilité d'un canal :

L'étude de stabilité d'un canal trapézoïdal revêt une grande importance en ingénierie hydraulique. Son objectif est de garantir la sécurité du canal tout en assurant un transport efficace du débit d'eau, sans risque d'érosion excessive ou de débordement. La stabilité d'un tel canal dépend de plusieurs paramètres, tels que sa géométrie, le matériau utilisé pour son revêtement, la vitesse de l'eau et les conditions environnementales. Dans votre cas, la stabilité du canal a été évaluée à l'aide de deux méthodes : la méthode classique et celle issue de l'Eurocode 7.

### VI.5.1 Calcul des forces :

- **Les forces motrices :** Poussée des terres, les forces extérieures (surcharges), la force de l'eau.
- **Les forces résistantes :** Poids du canal, poids du terrain mort.

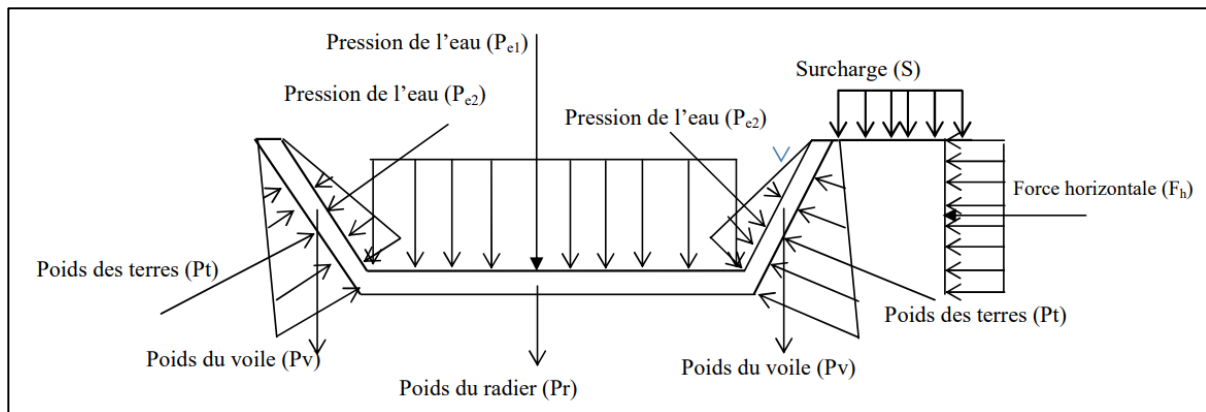
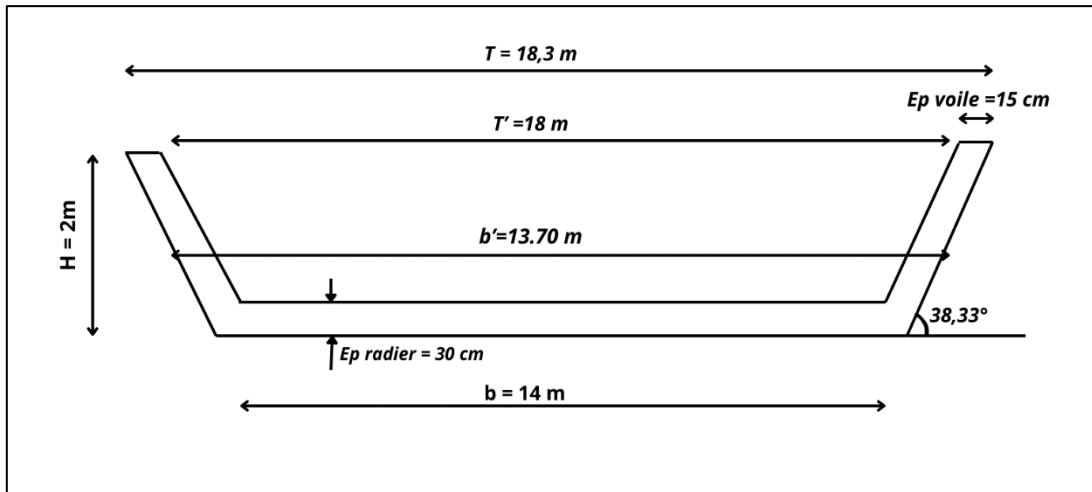


Figure VI.1 : Schéma statique des efforts.



**Figure VI.2 :** La géométrie du canal.

Les valeurs du calcul sont présentées dans le tableau ci-après :

**Tableau VI.1 :** Caractéristiques mécaniques.

Notation	Désignation	Valeur
Poids des terres	$\gamma_t$	18 KN/m <sup>3</sup>
La cohésion	C	0
L'angle de frottement	$\varphi$	30°
La surcharge	S	10 KN/m <sup>3</sup>
Poids du béton	$\gamma_b$	25 KN/m <sup>3</sup>
Poids de l'eau	$\gamma_w$	10 KN/m <sup>3</sup>

• **Déterminations des charges qui agissent sur le canal :**

▪  $P_{\text{radier}} = \gamma_b \times S_{\text{radier}} \times 1$  (VI.1)

▪  $P_{\text{voile}} = \gamma_b \times S_{\text{voile}} \times 1$  (VI.2)

▪  $g_{\text{eau}} = \gamma_w \times h_e$  (VI.3)

▪  $P_{\text{eau1}} = \gamma_w \times V_{\text{eau}}$  (VI.4)

▪  $P_{\text{eau2}} = \frac{1}{2} \times \gamma_w \times l_1^2$  (VI.5)

▪  $P_{\text{terre}} = \frac{1}{2} \times \gamma_t \times Ka \times l_2^2$  (VI.6)

$$\bullet P_{tx} = P_t \times \sin(\alpha) \quad (\text{VI.7})$$

$$\bullet P_{ty} = P_t \times \cos(\alpha) \quad (\text{VI.8})$$

$$\bullet P_{ex2} = P_{e2} \times \sin(\alpha) \quad (\text{VI.9})$$

$$\bullet P_{ey2} = P_{e2} \times \cos(\alpha) \quad (\text{VI.10})$$

$$\bullet F_h = S \times Ka \times H \quad (\text{VI.11})$$

Avec:

$$\bullet S_{\text{radier}} = \frac{b'+b}{2} \times ep_{\text{radier}} \quad (\text{VI.12})$$

$$\bullet S_{\text{voile}} = l_1 \times ep_{\text{voile}} \quad (\text{VI.13})$$

$$\bullet h_{\text{eau}} = H - ep_{\text{radier}} \quad (\text{VI.14})$$

$$\bullet l_1 = \sqrt{h_{\text{eau}}^2 + \left(\frac{h_{\text{eau}}}{\tan(\alpha)}\right)^2} \quad (\text{VI.15})$$

$$\bullet l_2 = \sqrt{H^2 + \left(\frac{H}{\tan(\alpha)}\right)^2} \quad (\text{VI.16})$$

$$\bullet Ka = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right) \quad (\text{VI.17})$$

• **Déterminations du Moment renversant/o :**

**A P'E.L.S :**

$$M_{\text{renELS}/0} = F_h \times 1,7 + P_{tx} \times (x_1 + 10) + P_{e2x \text{ gauche}} \times (y_2 + 0,35) + P_{\text{voile}} (x' + 0,10) + P_{e2y \text{ gauche}} \times (x_2 + 0,35)$$

Avec :

$$X_1 = 0,333 \times l_1 \times \cos(38,33) = 0,71 \text{ m et } Y_1 = 0,333 \times l_2 \times \sin(38,33) = 0,665 \text{ m}$$

$$X_2 = 0,333 \times l_1 \times \cos(38,33) = 0,71 \text{ m et } Y_2 = 0,333 \times l_1 \times \sin(38,33) = 1,02 \text{ m}$$

$$X' = 1,375 \times \cos(38,33) = 1,07 \text{ m}$$

$$M_{\text{renELS}/0} = 245,43 \text{ KN.m}$$

**A P'E.L.U :**

$$M_{\text{renELU}/0} = 1,5 \times (F_h \times 1,7 + P_{e2x \text{ gauche}} \times (y_2 + 0,35)) + 1,35 \times (P_{\text{voile}} (x' + 0,1) + P_{e2y \text{ gauche}} \times (x_2 + 0,35) + P_{tx} \times (x_1 + 10))$$

$$M_{\text{renELU}/0} = 479,51 \text{ KN.m}$$



• **Déterminations du Moment stabilisateur/o :**

**A P.E.L.S :**

$$M_{\text{stabilELS}} = Pe2x_{\text{droite}} \times (y2 + 0.35) + Pe2y_{\text{droite}} \times (x2 + 10.80) + Pradier(10 \times 0,5) + Pe1(10 \times 0,5) + Ptx \times y1 + Pty + Pvoile(x' + 0,1 + 10)$$

$$M_{\text{stabilELS}} = 633,78 \text{ KN.m}$$

**A P.E.L.U :**

$$M_{\text{stabilELU}} = 1,35 \times (Pradier(10 \times 0,5) + Ptx \times y1 + Pty + Pvoile(x' + 0,1 + 10)) + 1,5 (Pe2x_{\text{droite}} \times (y2 + 0.35) + Pe2y_{\text{droite}} \times (x2 + 10.80) + Pe1(10 \times 0,5))$$

$$M_{\text{stabilELU}} = 772.94 \text{ KN.m}$$

Le tableau ci-dessous présente les résultats des calculs :

**Tableau VI.2** Résultat des calcul les charges et les surcharges.

Notation	Unités	Valeur
Surface de radier	m <sup>2</sup>	4,16
Surface de voile	m <sup>2</sup>	0,41
Hauteur d'eau	m	1,7
Longueur de corde interne l <sub>1</sub>	m	2,75
Longueur de corde externe l <sub>2</sub>	m	3,22
Ka	/	0,333
Poids radié	KN	10
Poids voile	KN	10,25
Peau 1	KN	272
Peau 2	KN	37,85
Poids des terres	KN	31,07
Poids des terres projection / à l'axe X	KN	19,3
Poids des terres projection / à l'axe Y	KN	24,37
Pe2x / à l'axe X droite	KN	23,47
Pe2y / à l'axe Y droite	KN	29,7
Pe2x / à l'axe X gauche	KN	23,47
Pe2y / à l'axe Y gauche	KN	29,7
Fh due à la surcharge	KN	5,66

**VI.5.1.1 la stabilité au glissement :**

La stabilité de notre canal trapézoïdal a été vérifiée en utilisant deux méthodes :

- ✓ Classique.
- ✓ L'Eurocode 7.

➤ **Vérification de la stabilité au glissement par la méthode classique :**

On doit satisfaire la condition suivante :

$$F_G = \frac{\sum f \text{ stabilisatrices (verticale T)}}{\sum \text{forces déstabilisatrices (horizontales=Rh)}} > F_R = 1,5$$

$$F_G = \frac{(C + \sigma n \times \tan(\varphi))}{Rh} > F_R = 1,2 \quad \text{Avec : } A = B \times 1$$

Et

$\varphi$  : angle de frottement sol/fondations.

D'où :

$$F_R = \frac{C \times B + N \times \tan(\alpha)}{Rh} > F_R = 1,2$$

Alors :

$$F_G = \frac{N \times \tan(\alpha)}{Rh} > F_R = 1,2 \quad \text{car } C = 0$$

$$N = P_{ey2} \text{ droite} + P_{ey2} \text{ gauche} - 2 \times P_{ty} + P_{e1} + P_{raider} + 2 \times P_{voile}$$

$$N = 412,41 \text{ KN}$$

$$Rh = F_h = 5.66 \text{ KN}$$

$$F_G = 17,87 > 1,5 \text{ D'où la stabilité au glissement est vérifiée.}$$

➤ **Vérification de la stabilité au glissement par l'Eurocode 7 :**

Pour vérifier la stabilité au glissement selon l'Eurocode 7 on doit vérifier l'inégalité suivante :

$$H_d \leq R_{hd}$$

Avec :

$H_d$  : somme des forces déstabilisatrices.

$R_{hd}$  : force stabilisatrice.

La force stabilisatrice ( $R_{hd}$ ) est calculée comme suite :

- **Cas de sol :** en conditions drainées (**C'** et  **$\varphi'$** ) la force est déterminée par la formule suivante :

$$R_{hd} = \frac{V_d \times \tan(\delta_d)}{\gamma R_h \times \gamma R_{hd}} \quad (\text{VI.18})$$

Avec :

Vd : La somme des forces verticale à l'ELS et a l'ELU.

$\delta$  : Angle de frottement sol -fondation il est calculé par la formule ci-dessous :

$$\delta = k \times \varphi d$$

Avec :

k=2/3 cas de fondation en béton préfabriqué

k=1 cas de béton coulé sur place.

$$\varphi d = \arctg\left(\frac{\text{tang}(\phi)}{\gamma\phi}\right) = 30^\circ \text{ et } C_d = \frac{ck}{\gamma t} = 0$$

- **Cas de sol** : en conditions non drainées (**Cu et  $\varphi u=0$** ) la force est déterminée par la formule suivante :

$$R_{hd} = \min\left(\frac{A'c_{uk}}{\gamma_{Rh} \times \gamma_{Rhd}} ; 0,4 Vd\right)$$

Et

$$A' = B' \times L', (L'=1)$$

$$B' = B - 2e$$

Avec :

$C_{uk}$  : Valeur caractéristique de la cohésion non drainée.

$$\varphi u = 0 \text{ Et } C_d = \frac{cku}{\gamma c} = \frac{45}{1} = 45 \text{ KPa cas non drainés.}$$

$$\gamma_{Rh} = 1,1 \text{ et } \gamma_{Rhd} = 0,9$$

#### ✓ Vérification du glissement :

À l'ELS :

$$H_d = \sum \text{des forces horizontale (déstabilisatrices) l' à ELS}$$

$$H_d = F_h = 5.66 \text{ KN.}$$

À l'ELU :

$$H_d = \sum \text{des forces horizontale (déstabilisatrices) l' à ELU}$$

$$H_d = 1,5 \times F_h = 1,5 \times 5.66 = 8.49 \text{ KN.}$$

- **Cas drainée-Remblai ( $C'=0$  et  $\varphi'=30^\circ$ )** : On doit déterminer à l'ELS et à l'ELU la charge « Vd » qui représente la somme des différentes charges gravitaires.

### A l'ELS :

$$V_{d-ELS} = P_{ey2 \text{ droite}} + P_{ey2 \text{ gauche}} - 2 \times P_{ty} + P_{e1} + P_{raider} + 2 \times P_{voile}$$

$$V_{d-ELS} = 412,41 \text{ KN.}$$

### À l'ELU :

$$V_{d-ELU} = 1,35 \times (P_{raider} + 2 \times P_{voile} - 2 \times P_{ty}) + 1,5 \times (P_{ey2 \text{ droite}} + P_{ey2 \text{ gauche}} + P_{e1})$$

$$V_{d-ELU} = 605 \text{ KN.}$$

$$\varphi d = \arctg\left(\frac{\tan(\theta)}{\gamma\theta}\right) = 30^\circ \text{ et } Cd = \frac{Ck}{\gamma t} = 0 \text{ cas drainée (remblai).}$$

D'où:

$$\text{A l'ELS: } R_{hd} = \frac{412,41 \times \tan(30)}{1,1 \times 0,9} = 240,6 \text{ KN.}$$

$$\text{À l'ELU : } R_{hd} = \frac{605 \times \tan(30)}{1,1 \times 0,9} = 352,82 \text{ KN.}$$

✓ La condition  $Hd \leq Rhd$  est vérifiée pour les deux états limites.

- **Cas non drainée- Argile ( $Cuk=45 \text{ KPa}$  et  $\varphi_u=0$ ).**

A l'ELS:

$$R_{hd} = \min\left(\frac{(10 - 2 \times 0,009) \times 45}{1,1 \times 0,9}; 0,4 \times 412,41\right) = (453,73; 164,96) = 164,96 \text{ KN.}$$

À l'ELU :

$$R_{hd} = \min\left(\frac{(10 - 2 \times 0,009) \times 45}{1,1 \times 0,9}; 0,4 \times 605\right) = (453,73; 242) = 242 \text{ KN.}$$

✓ La condition  $Hd \leq Rhd$  est vérifiée pour les deux états limites.

### VI.5.1.2 La stabilité au poinçonnement :

La stabilité de notre canal trapézoïdal face au poinçonnement a été vérifiée selon la méthode classique, On doit satisfaire la condition suivante :

$$\sigma_{1,2} = \frac{N}{100 \times B} \left(1 \pm \frac{6e}{B}\right) \quad (\text{VI.19})$$

Avec  $e = \frac{MG}{N}$  et la largeur du canal en bas.

Et la contrainte admissible du sol est prise égale à  $\sigma_{sol} = 200 \text{ KPa}$ .

- **Déterminations des efforts résultants au centre de gravités de la base de la fondation :**

A l'ELS :

$$N_{/G} = P_{ey2 \text{ droite}} + P_{ey2 \text{ gauche}} - 2 \times P_{ty} + P_{e1} + P_{raider} + 2 \times P_{voile} = 412,41 \text{ KN.}$$

$$M_{/G} = Fh \times \frac{H}{2} = 5,66 \times \frac{2}{2} = 5,66 \text{ KN.m}$$

$$e = \frac{5,66}{412,41} = 0,013m$$

D'où :

$$\sigma_1 = \frac{N}{100 \times B} \left( 1 + \frac{6e}{B} \right) = \frac{412,41}{1 \times 10} \left( 1 + \frac{6 \times 0,013}{10} \right) = 44,54 \text{ KPa.}$$

$$\sigma_2 = \frac{N}{100 \times B} \left( 1 - \frac{6e}{B} \right) = \frac{412,41}{1 \times 10} \left( 1 - \frac{6 \times 0,013}{10} \right) = 38,02 \text{ KPa.}$$

Alors que :

$$\sigma_{moy} = \frac{3\sigma_1 + \sigma_2}{4} = \frac{3 \times 44,54 + 38,02}{4} = 42,91 \text{ KPa} < 1,5 \times \sigma_{sol} = 300 \text{ KPa.}$$

À l'ELU :

$$N_{/G} = 1,35 \times (P_{raider} + 2 \times P_{voile} - 2 \times P_{ty}) + 1,5 \times (P_{ey2 \text{ droite}} + P_{ey2 \text{ gauche}} + P_{e1}) = 605 \text{ KN.}$$

$$M_{/G} = 1,5 (Fh \times \frac{H}{2}) = 1,5 (5,66 \times \frac{2}{2}) = 8,49 \text{ KN.}$$

$$e = \frac{8,49}{605} = 0,014m.$$

D'où :

$$\sigma_1 = \frac{N}{100 \times B} \left( 1 + \frac{6e}{B} \right) = \frac{605}{1 \times 10} \left( 1 + \frac{6 \times 0,014}{10} \right) = 61 \text{ KPa.}$$

$$\sigma_2 = \frac{N}{100 \times B} \left( 1 - \frac{6e}{B} \right) = \frac{605}{1 \times 10} \left( 1 - \frac{6 \times 0,014}{10} \right) = 60 \text{ KPa.}$$

Alors que :

$$\sigma_{moy} = \frac{3\sigma_1 + \sigma_2}{4} = \frac{3 \times 61 + 60}{4} = 60,75 \text{ KPa} < 1,5 \times \sigma_{sol} = 300 \text{ KPa.}$$

### VI.5.1.3 La stabilité au poinçonnement :

La vérification de la stabilité de notre canal trapézoïdale a été réalisée selon la méthode classique.

On doit satisfaire la condition suivante :

$$\frac{\sum \text{Moments stabilisatrices}}{\sum \text{Moments déstabilisatrices}} \geq Fr = 1,5$$

Alors que :

$$\frac{772.94}{245.43} = 3,14 \geq Fr=1,5$$

D'où la stabilité du canal est vérifiée contre le renversement.

## VI.6 Le ferrailage du canal :

Le ferrailage, ou armature, est un ensemble de barres, treillis, ou cadres en acier incorporés dans le béton avant le coulage. Ces armatures sont destinées à absorber les efforts de traction, de compression, et de cisaillement que le béton seul ne peut pas supporter efficacement.

### VI.6.1 Rôle du Ferrailage :

- **Résistance à la Traction** : Le béton est fort en compression mais faible en traction. Le ferrailage améliore la résistance du béton aux forces de traction.
- **Prévention des Fissures** : Les armatures aident à répartir les contraintes et réduisent le risque de fissuration du béton.
- **Stabilité Structurale** : Elles augmentent la stabilité et la durabilité du canal, surtout dans des conditions d'utilisation intense ou dans des environnements soumis à des variations climatiques ou géologiques.
- **Distribution des Charges** : Le ferrailage aide à distribuer uniformément les charges sur toute la structure, améliorant ainsi la performance et la sécurité du canal.

### VI.6.2 Ferrailage des voiles :

Déterminations du moment à l'encastrement à vide (sans prise en compte de l'eau) :

À l'ELU :

$$M_{\text{encastrement}} = 1,35 \left( Pt \times \frac{l_1}{3} \right) + 1,5 \times Fh \times \left( \frac{H-ep}{2} \right) = 33.19 \text{ KN.m}$$

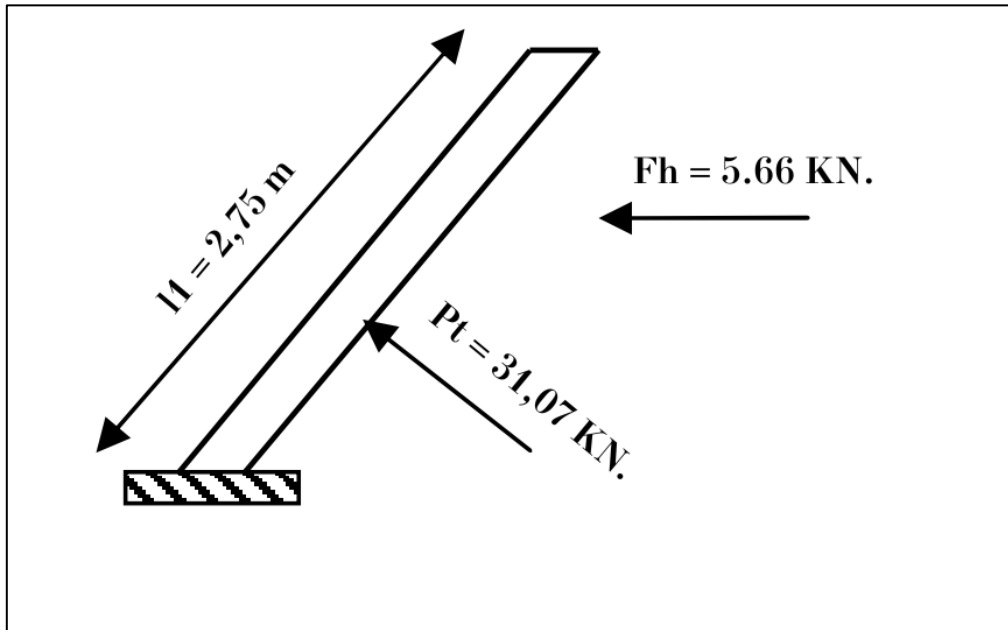
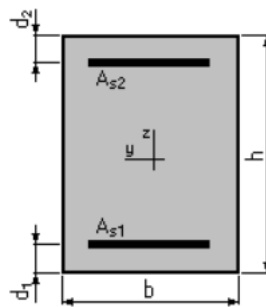


Figure VI.3 Schéma de coupe longitudinale du voile.

On prend une bande de 1m.

- $b = 100.0$  (cm)
- $h = 20.0$  (cm)
- $d1 = 3.0$  (cm)
- $d2 = 3.0$  (cm)



$$M_e = 33.19 \text{ KN.m} = 3.319 \text{ t.m}$$

$$\sigma_{bc} = \frac{0.85 \times f_{c28}}{\gamma_b} \text{ Alors } \sigma_{bc} = 14,2 \text{ MPa.}$$

$$\mu = \frac{M_e}{b \times d^2 \times \sigma_{bc}} \text{ Alors } \mu = 0,162 > \mu_r = 0,391, A_{sc} = 0$$

• **Armature comprimée :**

$$A_{sc} = 8.76 \text{ cm}^2 \text{ on choisit } 5T16 \text{ A choisie} = 10.05 \text{ cm}^2.$$

$$A_{rep} = \frac{A_{choisie}}{4} = 2.51 \text{ cm}^2 \text{ notre choix est } 5T10,$$

$$\text{Alors } A_{sc} = 10.05 \text{ cm}^2 \text{ et } A_{rep} = 3.93$$

## **Conclusion**

Dans ce chapitre, la vérification de la stabilité du canal est effectuée en utilisant deux méthodes distinctes : la méthode classique et celle prescrite par l'Eurocode 7. De plus, un ferrailage est proposé pour les voiles et le radier.



# **Chapitre VII : Organisation de chantier.**

## Introduction

L'organisation d'un chantier englobe toutes les mesures mises en œuvre pour exécuter un travail dans des conditions optimales, réduisant ainsi les coûts de production. Elle favorise un cadre favorable tant pour les travailleurs que pour les machines, ce qui augmente la productivité. Une reconnaissance approfondie du site du chantier est essentielle pour établir un calendrier technologique des équipements et les utiliser de manière rationnelle dans les différentes opérations, afin de répondre aux contraintes d'espace et de temps imposées par le marché. Une organisation efficace du chantier contribue de manière significative à la réduction des coûts de construction, évitant ainsi que le projet ne devienne trop coûteux.

Malgré les énormes défis que posent ces constructions, il est impératif d'avoir une compréhension précise de l'organisation du chantier. Pour atteindre ces objectifs, il est nécessaire de :

- Définir avec précision les méthodes d'exécution et les modes opératoires permettant l'utilisation des techniques modernes de construction avec un haut rendement.
- Répartir et coordonner les tâches en engageant une main d'œuvre spécialisée.
- Structurer adéquatement les postes de travail stabilisés, en adoptant une mécanisation de plus en plus poussée.
- Déterminer en quantité et en qualité le personnel à employer, car le coût de la main d'œuvre influence considérablement le prix de revient.

## VII.1 Généralités :

### VII.1.1 Rôles et responsabilités des intervenants sur un chantier :

Sur un chantier de construction, différents acteurs jouent des rôles cruciaux et ont des responsabilités spécifiques pour garantir le bon déroulement du projet. Voici une liste des principaux intervenants ainsi que leurs rôles et responsabilités typiques.

**VII.1.1.1 Maître d'ouvrage :** Le maître d'ouvrage (MOA) est une entité, physique ou morale (entreprise, institution, particulier, etc.), qui initie et finance un projet de construction ou de rénovation. Le maître d'ouvrage a plusieurs rôles et responsabilités, notamment :

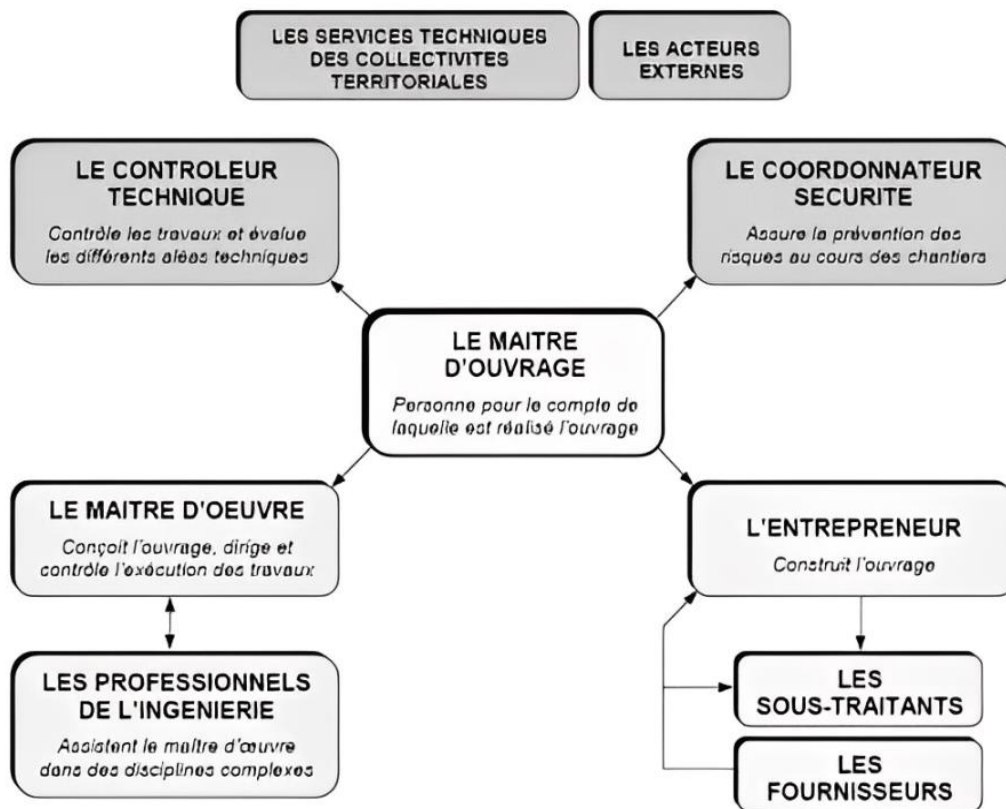
- Gérer la réalisation du projet.
- Communiquer les informations pertinentes sur le projet.
- Honorer les engagements stipulés dans les documents contractuels.
- Assurer la coordination et la cohésion de l'équipe de projet, la bonne exécution des contrats et la réalisation des travaux.
- Acquérir la propriété du projet.

**VII.1.1.2 Maître d'œuvre :** Le maître d'œuvre est une personne physique ou morale désignée par le chef de projet pour concevoir et superviser l'exécution des travaux. Le maître d'œuvre d'un chantier est responsable de l'exécution des travaux et exerce une autorité effective sur le chantier.

**VII.1.1.3 L'entreprise :** Il s'agit d'une entité, physique ou morale, ayant obtenu un contrat de travaux avec le maître d'ouvrage et chargée de :

- Contrôler la qualité du travail pour produire un ouvrage de haute qualité.
- Gérer les dépenses et les travaux.
- Élaborer un calendrier d'exécution des travaux.
- Répondre aux exigences des documents contractuels.
- Effectuer les tâches spécifiées dans son contrat.

**VII.1.1.4 L'entrepreneur :** Que ce soit une personne physique ou une société, l'entrepreneur est responsable de l'exécution des travaux et, parfois, de la conception détaillée des ouvrages. Tant que le chantier n'est pas réceptionné, l'entrepreneur est responsable de l'ouvrage en cours de construction.



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

## VII.2 Devis quantitatif et estimatif du projet :

Les estimations des coûts des travaux et aménagements proposés :

- Le coût des travaux de terrassement par unité.
- Le coût unitaire de la fourniture et de la pose de gabions.

Les montants de réalisation de la variante retenue sont présentés dans le tableau ci-dessous :

**Tableau VII.1** Devis de la variante canal trapézoïdale en béton armé Totale d'oued Rihane.

	Tronçons	
	Amont	Aval
Montant (DA)	117227095	350767331
Montant Totale (DA)	467,994,426	
TVA 19%	889,189,40.94	
Total TTC	556,913,366.9	

## VII.3 La Planification :

### VII.3.1 Définition :

La planification consiste à identifier, organiser et programmer les diverses tâches d'un projet, ainsi qu'à déterminer les compétences nécessaires pour les exécuter. En d'autres termes, c'est un outil utilisé par le chef de projet pour optimiser son efficacité opérationnelle. Les objectifs du planning incluent :

- L'organisation des postes de travail.
- La surveillance des opérations en temps réel.
- L'analyse des différentes tâches impliquées.
- La mesure du temps nécessaire à leur exécution (chronométrage).
- La recherche de moyens pour simplifier les méthodes de travail.

### VII.3.2 Étapes de la planification :

La planification est un processus guidant l'exécution des travaux, et elle comprend les étapes suivantes :

- **Collecte d'informations** : Cette phase consiste à synthétiser et analyser les données obtenues par des études comparatives, permettant une utilisation efficace du plan de réalisation de notre projet.
- **Décomposition du projet** : Le projet est subdivisé en tâches distinctes, chacune étant attribuée à un responsable, avec des besoins en équipement et une durée de réalisation basée sur le rythme de travail de chaque équipe ou machine.
- **Relations entre les tâches** : Lors de l'exécution du projet, deux types de relations entre les tâches sont essentielles. La première est basée sur une logique séquentielle,

où une tâche doit être terminée avant que la suivante ne commence. La seconde 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 réaliser. Dans les cas où les opérations se succèdent, comme dans notre situation, la méthode du chemin critique (CPM) est généralement préférée.

### VII.3.3 Plannings des travaux :

Il existe trois types de plan de travail :

- **Plan de travail au plus tôt** : Toutes les opérations commencent à leur date la plus précoce possible. Les entreprises choisissent ce type de planning lorsque leurs ressources sont abondantes et qu'elles travaillent sur plusieurs chantiers simultanément.
- **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, rendant ce plan plus économique.
- **Plan de travail intermédiaire** : Les opérations débutent à une date intermédiaire, entre la date au plus tôt et la date au plus tard. Les entreprises optent pour ce type de plan lorsque leurs ressources sont suffisantes et qu'elles travaillent sur un seul chantier, ce qui permet d'optimiser l'utilisation de leurs moyens.

### VII.3.4 Techniques de la planification :

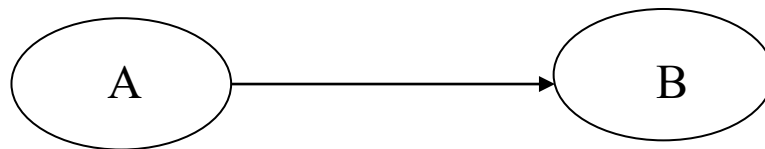
Il existe deux principales méthodes de planification :

- **Méthodes basées sur le réseau** : Ces méthodes de planification, telles que la méthode du chemin critique (CPM) et la technique d'évaluation et de revue de programme (PERT), 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.

### VII.3.4.1 Méthodes basées sur le réseau :

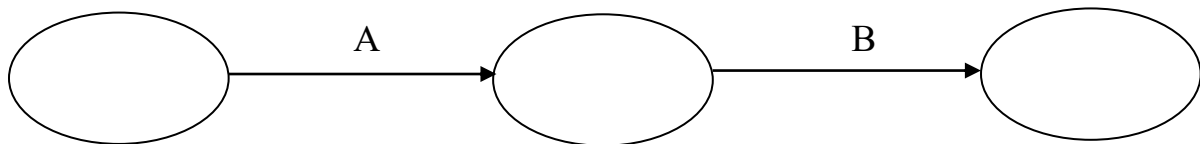
Le réseau est une représentation visuelle d'un projet permettant d'illustrer les relations entre les différentes opérations, qu'elles soient séquentielles, parallèles ou convergentes, ainsi que leurs durées de réalisation. On distingue principalement deux types de réseaux :

- **Réseau à nœuds** : Dans un réseau à nœuds, chaque nœud représente une opération ou une étape dans le processus, tandis que les flèches (ou arêtes) indiquent la séquence ou le flux d'informations 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 comment les différentes étapes d'un processus interagissent entre elles.



- ✓ L'opération (B) ne peut démarrer que lorsque l'opération (A) est entièrement terminée.

- **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 important de noter que le graphique ne peut être réalisé sans le réseau, car le réseau est un outil de calcul permettant d'obtenir des réponses à des questions spécifiques. Le graphique sert à interpréter les données provenant du réseau et de ses résultats, rendant ces informations plus claires et compréhensibles pour nous.

- **Construction du réseau :**

Pour élaborer un réseau, il est nécessaire de suivre six étapes fondamentales :

- ✓ **Élaboration de la liste des tâches** : Cette étape implique de créer une liste détaillée de toutes les activités nécessaires pour compléter le projet. Chaque tâche doit être décrite précisément et inclure des informations telles que la

durée estimée, les ressources nécessaires, les interdépendances et les responsabilités.

- ✓ **Identification des tâches préalables** : Une fois la liste des tâches établie, il est crucial de déterminer les interdépendances entre elles. Certaines tâches doivent être terminées avant que d'autres puissent commencer, établissant ainsi un ordre logique pour leur exécution.
- ✓ **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 types de graphes les plus couramment utilisés sont les diagrammes PERT et les diagrammes de Gantt.
- ✓ **Regroupement des graphes partiels** : Si le projet comporte plusieurs sous-projets ou domaines de travail distincts, les graphes partiels peuvent être regroupés pour former un plan global du projet. Cela permet de mieux visualiser la structure d'ensemble.
- ✓ **Identification des tâches de début et de fin du projet** : Il est important d'identifier les tâches qui marquent le début et la fin du projet. La tâche de début est généralement appelée "tâche initiale", tandis que la tâche de fin est la "tâche finale". Ces tâches sont souvent des jalons importants pour suivre l'avancement du projet.

### VII.3.5 Différentes méthodes basées sur le réseau :

**VII.3.5.1 Méthode C.P.M (Critical Path Method)** : Cette méthode vise à réduire les délais de réalisation d'un projet en prenant en compte trois phases distinctes :

- **Première phase** : Déterminer le personnel nécessaire pour accomplir la tâche en question.
- **Deuxième phase** : Analyser systématiquement le réseau, en détaillant les activités heure par heure et jour par jour, en fonction de l'unité de temps choisie.
- **Troisième phase** : Ajuster le réseau en fonction des contraintes ou des conditions imposées par l'entreprise (*Benlaoukli, 2004*).

**VII.3.5.2 Méthode P.E.R.T (Program Evaluation and Review Technique)** : En d'autres termes, la technique d'évaluation et de revue de programme 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.

### VII.3.5.3 Méthodes basées sur le graphique :

- **Méthode linéaire (Technique de la ligne d'équilibre)** : Cette méthode est idéale pour la planification de projets de construction comportant des tâches répétitives, c'est-à-dire lorsque 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, comme les chantiers de construction de bâtiments identiques ou de structures linéaires telles que les routes et les voies ferrées.

- **Méthode à barres** : Cette technique consiste à créer deux réseaux et un diagramme à barres (planning). Elle permet de visualiser les interdépendances entre les tâches et de déterminer la séquence dans laquelle elles doivent être exécutées. Cela facilite la gestion du projet en offrant 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 de construction en cours. Lorsque les opérations suivent une séquence spécifique, comme c'est le cas dans notre situation, il est préférable d'opter pour la méthode PERT (Program Evaluation and Review Technique) (Benlaoukli, 2004).

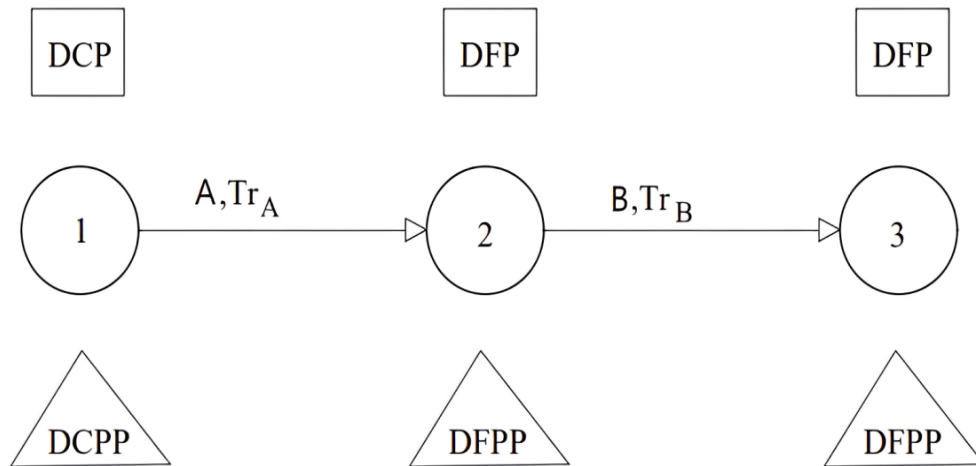
### VII.3.6 Méthode de calcul PERT :

**VII.3.6.1 Les paramètres de la méthode PERT** : Lors de l'application de la méthode PERT (Program Evaluation and Review Technique), 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 précoce à laquelle une tâche peut commencer, en tenant compte des dépendances et des contraintes du projet.
- **Tr (Temps de réalisation)** : C'est le temps estimé pour achever une tâche spécifique.
- **DFP (Date de fin au plus tôt - Early Finish)** : C'est la date la plus précoce à laquelle une tâche peut être achevée, en fonction des contraintes du projet.
- **DCPP (Date de début au plus tard - Late Start)** : C'est la date la plus tardive 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 tardive 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).



$$DFP = DCP + T_r \text{ et } DCP = DFPP - T_r$$



**Figure VII.2 :** Schéma représentatif de la méthode de PERT.

**VII.3.6.2 Chemin critique (C.C) :** Le chemin critique est la séquence d'opérations qui détermine la durée totale du projet (DTP), et ces opérations sont caractérisées par une marge totale nulle (0).

Pour identifier un chemin critique, il faut vérifier deux conditions principales :

- La marge totale (MT) de chaque opération sur ce chemin doit être égale à zéro (MT = 0).
- La somme des durées de ces opérations doit être égale à la durée totale du projet (DTP).

### VII.3.7 Diagramme de Gantt :

Le diagramme de Gantt, largement employé en gestion de projet, est l'un des outils les plus efficaces pour fournir une représentation visuelle de l'avancement des diverses 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. 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 leurs interdépendances.
- Les dates de début et de fin prévues pour chaque tâche.
- La durée de chaque tâche.

- Les chevauchements ou les écarts 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 d'ensemble et claire de la planification du projet, ce qui facilite la gestion et le suivi de son avancement.

La méthode PERT est un outil de planification visant à minimiser à la fois le temps et les coûts de réalisation d'un projet, tout en améliorant l'efficacité du travail. Pour construire le réseau, la première étape consiste à définir les diverses tâches nécessaires à la réalisation des travaux et à calculer leur durée d'exécution.

**Tableaux VII.2** Liste des opérations avec leurs durées.

Opération	Code	Durée (jours)
Installation du chantier	A	15
Travaux de terrassements en amont	B	15
Compactage en amont	C	10
Exécution de lit du béton de propreté en amont	D	30
Exécution de béton armé en amont	E	90
Travaux de terrassements en aval	F	30
Compactage en aval	G	20
Exécution de lit du béton de propreté en aval	H	60
Exécution de béton armé en aval	I	150
Déménagement du chantier	M	15

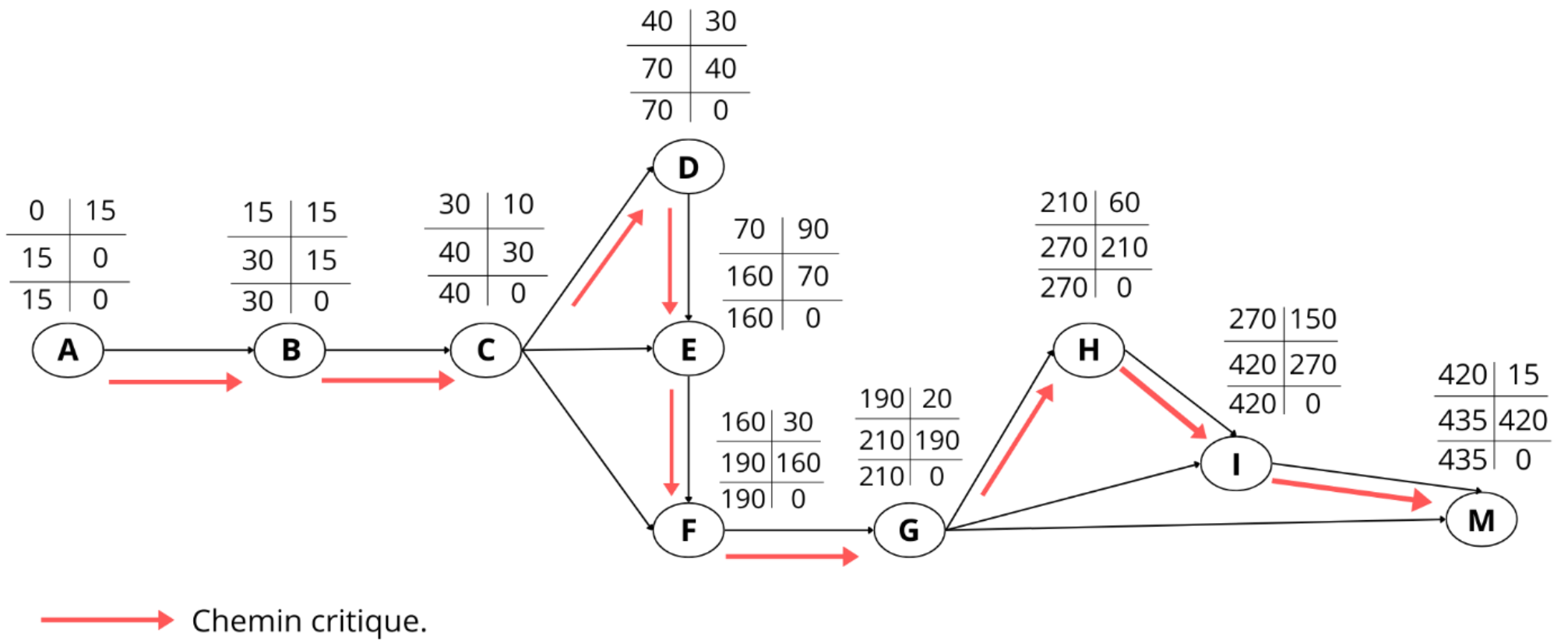
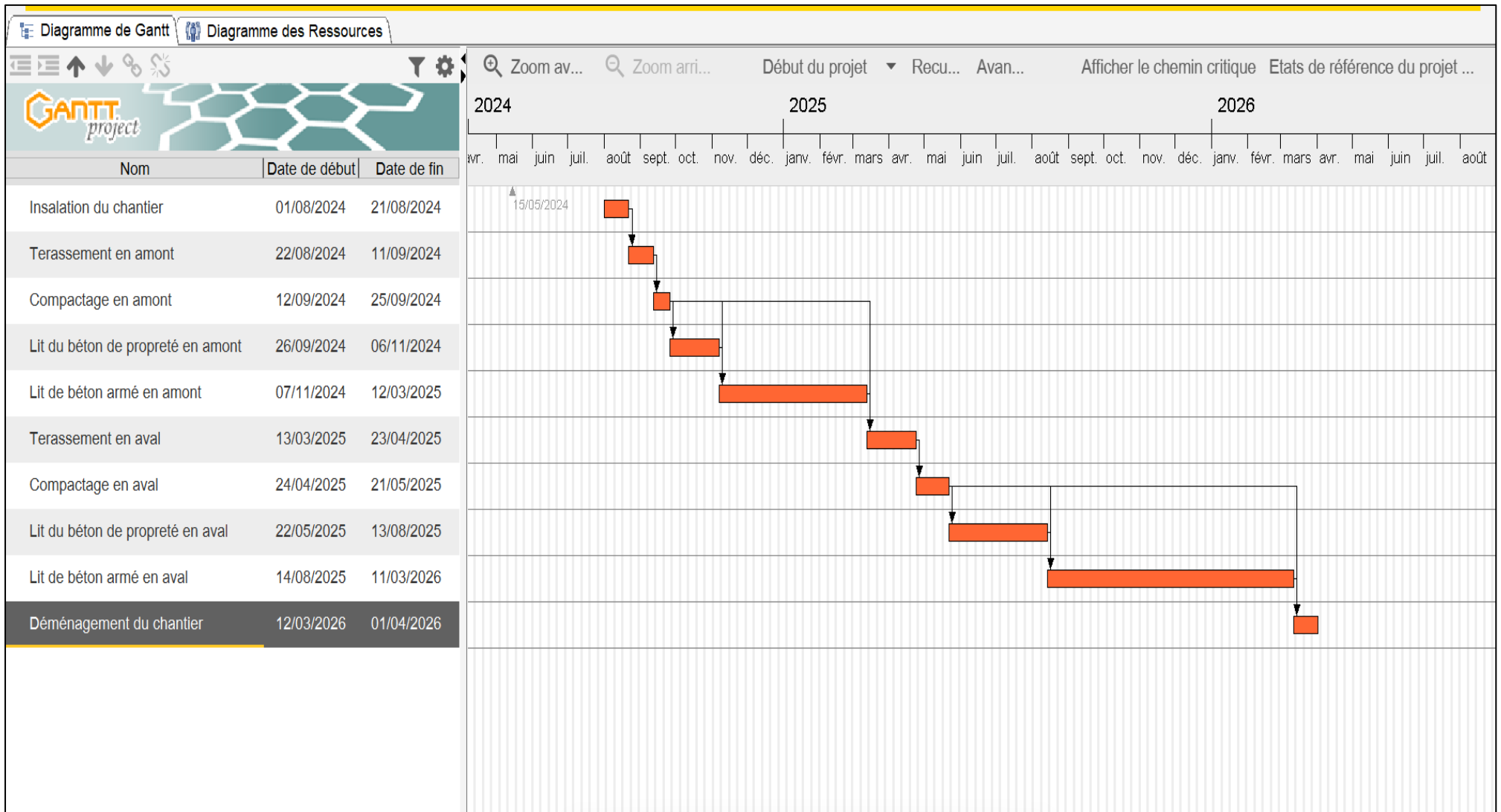


Figure VII.3 : Réseau de planification des tâches par la méthode CPM.



**Figure VII.4 :** Chronogramme du projet par le logiciel GANTT Project.

## **Conclusion**

Pour conclure ce chapitre consacré à l'organisation du chantier, il est évident que le succès de la réalisation d'un ensemble de travaux, en respectant les délais et les budgets prévus, dépend d'une gestion efficace du temps et d'une coordination précise des ressources humaines, techniques et matérielles. Le coût total estimé pour le projet d'aménagement de la ville d'Oued Rihane et l'usine de ONEX, évalué à 556,913,366.9 DA avec un délai de construction de 18 mois, souligne l'importance d'une planification rigoureuse pour atteindre l'objectif ultime de livraison dans les délais impartis, sans dépasser les coûts initiaux d'investissement.

## Conclusion générale

L'étude des crues à Oued Rihane souligne l'importance cruciale de prévoir et de gérer activement les risques d'inondations. Face à la complexité des événements météorologiques, l'utilisation de simulations numériques est essentielle pour modéliser et comprendre ces phénomènes, facilitant ainsi le développement de stratégies de gestion plus efficaces. Pour assurer la sécurité des habitants et des infrastructures, il est vital de mettre en œuvre des systèmes d'alerte avancés et des plans d'intervention bien planifiés. En adoptant une approche intégrée et proactive, il est possible d'atténuer les effets dévastateurs des inondations et de renforcer la résilience communautaire face à ces catastrophes naturelles.

Notre étude se divise en plusieurs phases. Tout d'abord, nous avons réalisé une étude de reconnaissance du site et de la zone d'étude. Cette région est caractérisée par une densité de population à Oued Rihane, avec une zone sensible près de l'usine de matériaux explosifs Onex, augmentant ainsi considérablement le risque en raison de la nature des matériaux présents. Ensuite, une étude géologique et géotechnique a été menée pour évaluer les caractéristiques du sol, essentielles pour une conception appropriée.

Après une étude hydrologique incluant une analyse hydromorphologique du bassin versant, nous avons observé qu'il présente une forme allongée avec un relief assez fort, contribuant à un temps de concentration relativement court, aggravant le risque de crues. Pour estimer le débit de crue, nous avons utilisé les données hydrométriques de la station Ababsa 011715, ajustées selon une loi statistique. Cela nous a permis de déterminer que le débit correspondant à une période de retour de 100 ans, calculé par la méthode de GRADEX, est de  $151 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Par la suite, une analyse hydraulique détaillée a été menée, basée sur une compréhension approfondie des principes hydrauliques et des caractéristiques d'écoulement d'Oued Rihane. L'outil RAS-Mapper intégré au logiciel HEC-RAS a été utilisé pour générer des profils d'eau à différents points le long du cours d'eau, permettant ainsi d'évaluer les hauteurs d'eau correspondant aux débits de crue projetés et de cartographier précisément les zones potentiellement inondées. En utilisant des données topographiques comme référence, nous avons modélisé la géométrie de l'oued, y compris son profil en long, ses sections transversales et ses berges, tout en spécifiant les débits d'entrée et toutes les conditions limites requises.

Après avoir identifié les zones à risque, trois options ont été proposées et examinées en détail du point de vue technique et économique. L'objectif était de favoriser un développement territorial mieux adapté aux risques d'inondation tout en évaluant la robustesse des options sélectionnées. Parmi celles-ci, nous avons choisi celle qui semblait la plus appropriée pour protéger à la fois le centre-ville d'Oued Rihane et l'usine de matériaux explosifs Onex, tout en étant économiquement viable. Cette solution implique la construction d'un canal en béton de profil trapézoïdal en amont d'Oued coté de l'usine Onex et en aval de l'oued coté de centre-ville d'Oued Rihane à l'ouest de Khemis Miliana. Ensuite, nous avons évalué la stabilité de cette variante aux séismes en appliquant deux méthodes (classique et Eurocode 7), suivie par le renforcement structurel nécessaire.

Le coût estimé pour l'option choisie à Oued Rihane est de 556 913 366,9 DA, avec une période de réalisation estimée à 18 mois. Pour maintenir le bon fonctionnement d'une structure, il est crucial de la maintenir correctement, garantissant ainsi son efficacité protectrice. Il est donc essentiel de sensibiliser les populations à l'importance de réagir promptement aux alertes d'inondation émises. De plus, il est recommandé d'élaborer un plan de gestion des crises en cas d'inondation afin de faciliter les évacuations nécessaires, en identifiant les zones à évacuer et en localisant les refuges dans des zones sûres à l'abri des risques d'inondation.

# Référence



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

Disponible sur : <https://www.lavoisier.fr/livre/environnement/diagnostic-amenagement-et-gestion-des-rivieres-2-ed/degoutte/descriptif-9782743014698>

- **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>

- **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 Principes et recommandations pour la mise en œuvre| (p. 32).
- **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>

- **Folmar et al. 2007** Multiple-methods investigation of recharge at a humid-region fractured rock site, Pennsylvania, USA ,

Disponible sur : <https://link.springer.com/article/10.1007/s10040-006-0149-6>

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

Disponible sur : <https://theses.hal.science/tel-00579507>

- **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 : [documentation.2ie-edu.org/cdi2ie/opac\\_css/doc\\_num.php?explnum\\_id=135](documentation.2ie-edu.org/cdi2ie/opac_css/doc_num.php?explnum_id=135)

- **Guigo, M., Voiron, C., Graillet, 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>

- **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>

- **IKHLEF Roumaissa (2023).** Étude de protection contre les inondations par Modélisation des affluents Cas : du centre de Bordj Mira (W.Béjaïa).
- **Idrici, A. (2017).** Modélisation et simulation numérique d’écoulement d’eau à surface libre avec HEC-ras cas d’oued de Saida.

Disponible sur : [https://butec.univ-saida.dz/admin/opac\\_css/doc\\_num.php?explnum\\_id=523](https://butec.univ-saida.dz/admin/opac_css/doc_num.php?explnum_id=523)

- **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>

- **Lencastre, 2008,** Hydraulique générale.

Disponible sur : <https://www.eyrolles.com/BTP/Livre/hydraulique-generale-9782212018943/>

- **KADI Karim (2023).** Protection des communes de Bordj El Kiffan et Bordj El Bahri contre les risques des inondations de l'oued El Hamiz (W.Alger).
- **Morsli, 2012.** Recherches sur la réduction des risques d'érosion par la GCES en moyenne montagne méditerranéennes algérienne.
- **Pierrick Blin, 2001** Développement d'une nouvelle méthode de cartographie du risque unitaire d'inondation (crue) pour des résidences.

Disponible sur : <https://espace.inrs.ca/id/eprint/1397/>

- **Tabet-Aoul, M. (2008).** Impacts du changement climatique sur les agricultures et les ressources hydriques au Maghreb. CIHEAM, N ° 4 8, 6.
- **Touaibia Bénina, 2004.** Manuel Pratique d'Hydrologie. Presse Madani frères, Blida, Algérie. 166p.
- **Touaibia, bénina. (2015).** Manuel pratique d'hydrologie (2ème Edition).
- **Toumi, A. (2016).** Hydraulique à surface libre (cours & exercices). 197.
- **U.S. Army Corps of Engineers, 2016a.** HEC-RAS River Analysis System – User's Manual, Hydrologic Engineering Center, CPD-68, Version 5.0. 960p.

Disponible sur : <http://www.hec.usace.army.mil/software/>

- **U.S. Army Corps of Engineers, 2016b.** HEC-RAS River Analysis System –2D Modeling User's Manual, Hydrologic Engineering Center, CPD-68A, Version 5.0. 171p.

Disponible sur : <http://www.hec.usace.army.mil/software/>

- **Yahyaoui, 2012** Inondations torrentielles. Cartographie des zones vulnérables en Algérie du Nord (cas de l'oued Mekerra, Wilaya de Sidi Bel Abbès)

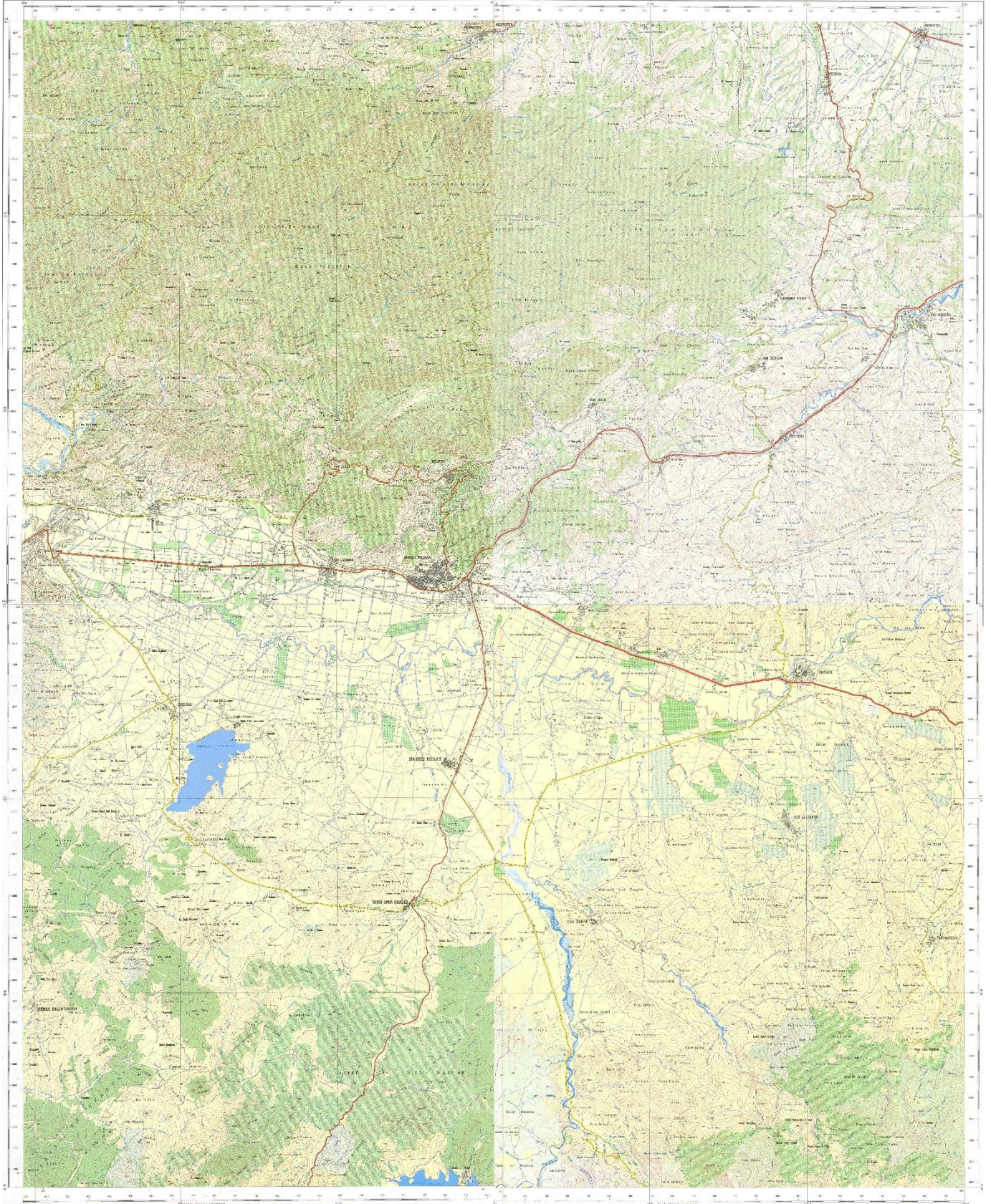
Disponiblesur : [https://scholar.google.com/citations?view\\_op=view\\_citation&hl=fr&user=Z4ijwC4AAAAJ&citation\\_for\\_view=Z4ijwC4AAAAJ:yxmsSjX2EkcC](https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=fr&user=Z4ijwC4AAAAJ&citation_for_view=Z4ijwC4AAAAJ:yxmsSjX2EkcC)

- **ZEROUAL, Ayoub, ASSANI, Ali.A., MEDDI, M. et al., 2019.** Assessment of climate change in Algeria from 1951 to 2098 using the Köppen–Geiger climate classification scheme. Clim Dyn 52, 227–243 (2019)

Disponible sur : <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4128-0>

# **Annexes**

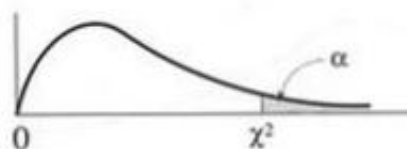
# Annex n° 01 : I : Carte topographique de la région de Khemis Miliana.





## Annexe n° 03 : Tableau des Valeurs de $\chi^2$

Table  $\chi^2$  : points de pourcentage supérieurs de la distribution  $\chi^2$



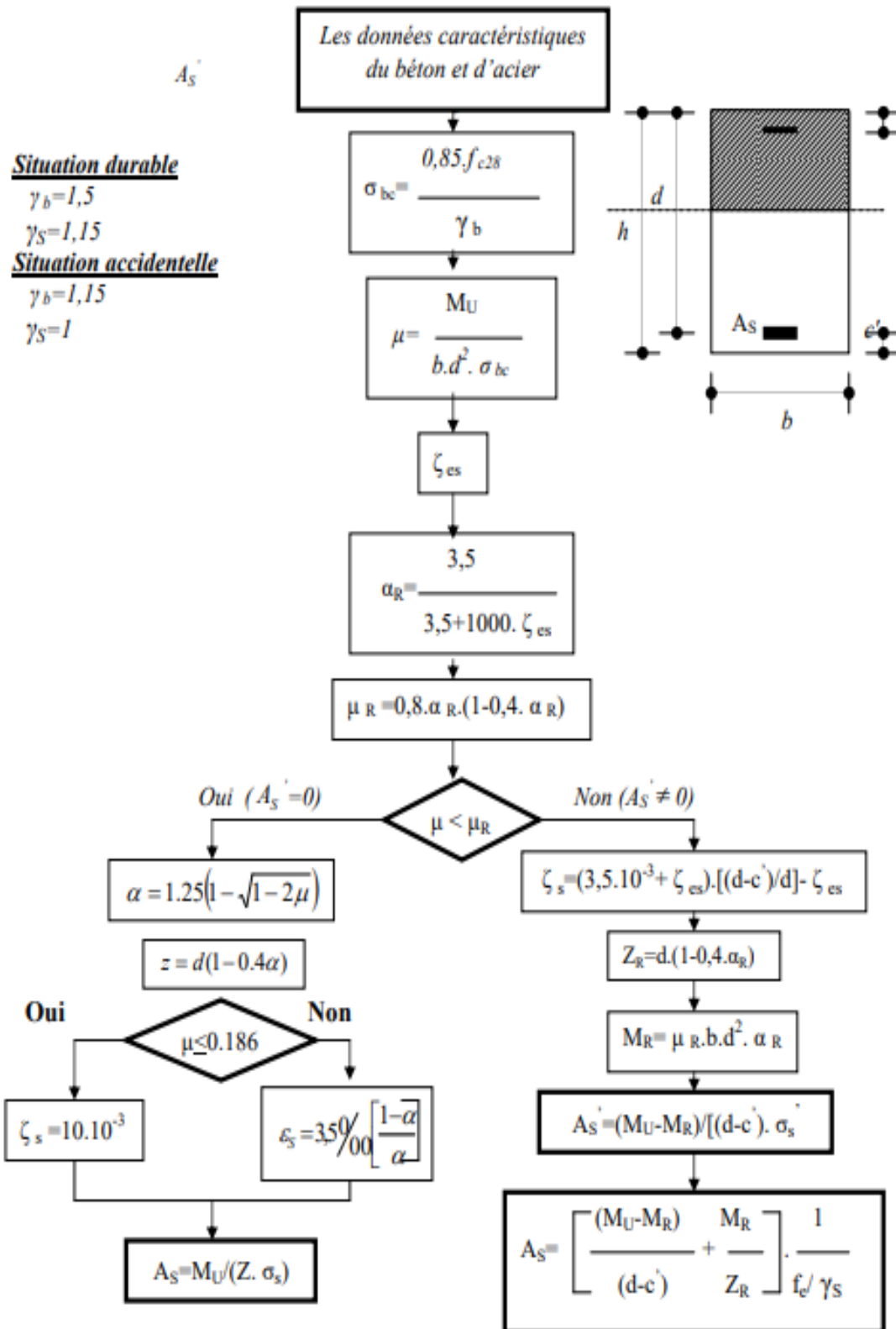
<i>dl</i>	.995	.990	.975	.950	.900	.750	.500	.250	.100	.050	.025	.010	.005
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.10	0.45	1.32	2.71	3.84	5.02	6.63	7.88
2	0.01	0.02	0.05	0.10	0.21	0.58	1.39	2.77	4.61	5.99	7.38	9.21	10.60
3	0.07	0.11	0.22	0.35	0.58	1.21	2.37	4.11	6.25	7.82	9.35	11.35	12.84
4	0.21	0.30	0.48	0.71	1.06	1.92	3.36	5.39	7.78	9.49	11.14	13.28	14.86
5	0.41	0.55	0.83	1.15	1.61	2.67	4.35	6.63	9.24	11.07	12.83	15.09	16.75
6	0.68	0.87	1.24	1.64	2.20	3.45	5.35	7.84	10.64	12.59	14.45	16.81	18.55
7	0.99	1.24	1.69	2.17	2.83	4.25	6.35	9.04	12.02	14.07	16.01	18.48	20.28
8	1.34	1.65	2.18	2.73	3.49	5.07	7.34	10.22	13.36	15.51	17.54	20.09	21.96
9	1.73	2.09	2.70	3.33	4.17	5.90	8.34	11.39	14.68	16.92	19.02	21.66	23.59
10	2.15	2.56	3.25	3.94	4.87	6.74	9.34	12.55	15.99	18.31	20.48	23.21	25.19
11	2.60	3.05	3.82	4.57	5.58	7.58	10.34	13.70	17.28	19.68	21.92	24.72	26.75
12	3.07	3.57	4.40	5.23	6.30	8.44	11.34	14.85	18.55	21.03	23.34	26.21	28.30
13	3.56	4.11	5.01	5.89	7.04	9.30	12.34	15.98	19.81	22.36	24.74	27.69	29.82
14	4.07	4.66	5.63	6.57	7.79	10.17	13.34	17.12	21.06	23.69	26.12	29.14	31.31
15	4.60	5.23	6.26	7.26	8.55	11.04	14.34	18.25	22.31	25.00	27.49	30.58	32.80
16	5.14	5.81	6.91	7.96	9.31	11.91	15.34	19.37	23.54	26.30	28.85	32.00	34.27
17	5.70	6.41	7.56	8.67	10.09	12.79	16.34	20.49	24.77	27.59	30.19	33.41	35.72
18	6.26	7.01	8.23	9.39	10.86	13.68	17.34	21.60	25.99	28.87	31.53	34.81	37.15
19	6.84	7.63	8.91	10.12	11.65	14.56	18.34	22.72	27.20	30.14	32.85	36.19	38.58
20	7.43	8.26	9.59	10.85	12.44	15.45	19.34	23.83	28.41	31.41	34.17	37.56	40.00
21	8.03	8.90	10.28	11.59	13.24	16.34	20.34	24.93	29.62	32.67	35.48	38.93	41.40
22	8.64	9.54	10.98	12.34	14.04	17.24	21.34	26.04	30.81	33.93	36.78	40.29	42.80
23	9.26	10.19	11.69	13.09	14.85	18.14	22.34	27.14	32.01	35.17	38.08	41.64	44.18
24	9.88	10.86	12.40	13.85	15.66	19.04	23.34	28.24	33.20	36.42	39.37	42.98	45.56
25	10.52	11.52	13.12	14.61	16.47	19.94	24.34	29.34	34.38	37.65	40.65	44.32	46.93
26	11.16	12.20	13.84	15.38	17.29	20.84	25.34	30.43	35.56	38.89	41.92	45.64	48.29
27	11.80	12.88	14.57	16.15	18.11	21.75	26.34	31.53	36.74	40.11	43.20	46.96	49.64
28	12.46	13.56	15.31	16.93	18.94	22.66	27.34	32.62	37.92	41.34	44.46	48.28	50.99
29	13.12	14.26	16.05	17.71	19.77	23.57	28.34	33.71	39.09	42.56	45.72	49.59	52.34
30	13.78	14.95	16.79	18.49	20.60	24.48	29.34	34.80	40.26	43.77	46.98	50.89	53.67
40	20.67	22.14	24.42	26.51	29.06	33.67	39.34	45.61	51.80	55.75	59.34	63.71	66.80
50	27.96	29.68	32.35	34.76	37.69	42.95	49.34	56.33	63.16	67.50	71.42	76.17	79.52
60	35.50	37.46	40.47	43.19	46.46	52.30	59.34	66.98	74.39	79.08	83.30	88.40	91.98
70	43.25	45.42	48.75	51.74	55.33	61.70	69.34	77.57	85.52	90.53	95.03	100.44	104.24
80	51.14	53.52	57.15	60.39	64.28	71.15	79.34	88.13	96.57	101.88	106.63	112.34	116.35
90	59.17	61.74	65.64	69.13	73.29	80.63	89.33	98.65	107.56	113.14	118.14	124.13	128.32
100	67.30	70.05	74.22	77.93	82.36	90.14	99.33	109.14	118.49	124.34	129.56	135.82	140.19

## Annexe n° 04 : Valeur de rugosité de Manning.

### Valeurs du coefficient n de Manning

Nature des surfaces	Etats des parois			
	Parfait	Bon	Assez bon	Mauvais
<b>A) Canaux artificiels</b>				
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>B) Cours d'eau naturels</b>				
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

# Annexe n° 05 : Organigramme -I- Section Rectangulaire A LELU En Flexion Simple





## Annexe n° 06 : Tableau du ferrailage

		Nombre de barres									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Diamètre de barre en (cm)	0.6	0.28	0.57	0.85	1.13	1.41	1.70	1.98	2.26	2.54	2.83
	0.8	0.50	1.01	1.51	2.01	2.51	3.02	3.52	4.02	4.52	5.03
	1	0.79	1.57	2.36	3.14	3.93	4.71	5.50	6.28	7.07	7.85
	1.2	1.13	2.26	3.39	4.52	5.65	6.79	7.92	9.05	10.18	11.31
	1.4	1.54	3.08	4.62	6.16	7.70	9.24	10.78	12.32	13.85	15.39
	1.6	2.01	4.02	6.03	8.04	10.05	12.06	14.07	16.08	18.10	20.11
	2	3.14	6.28	9.42	12.57	15.71	18.85	21.99	25.13	28.27	31.42
	2.5	4.91	9.82	14.73	19.63	24.54	29.45	34.36	39.27	44.18	49.09
	3.2	8.04	16.08	24.13	32.17	40.21	48.25	56.30	64.34	72.38	80.42

# Annexe n° 07 : Abaque de plasticité et classification de sol

