

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMÈRI DE TIZI-OUZOU



FACULTÉ DU GENIE DE LA CONSTRUCTION
Département d'Hydraulique

Filière : Hydraulique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Présenté pour Obtenir le Diplôme de Master

Spécialité : Ouvrages Hydrauliques

Thème

Etude de l'aménagement d'oued Bouinan, wilaya de Blida

Réalisé par :

Mme BOUROUH Noumidia

Mlle KEBAILI Sonia

Encadré Par :

Mme LEBDIRJ Fatiha

Soutenu le 30/06/2024

Remerciements

On tient à exprimer nos plus vifs remerciements à Dieu le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a donné durant toutes ces longues années d'études et qui nous ont permis d'en arriver là.

Le présent travail n'est pas seulement le fruit de nos efforts, mais également celui de bien des personnes à qui nous devons l'expression de nos vifs remerciements.

Nous adressons notre plus haut respect et notre sincère gratitude à notre promotrice Mme. LEBDIRI Fatiha pour son soutien et ses conseils.

Nous voudrions également lui témoigner notre gratitude pour sa patience et son soutien qui nous a été précieux afin de mener notre travail à bon port.

Je remercie également les membres de jury d'avoir accepté d'évaluer ce travail.

Nous ne saurons oublier nos enseignants de Département d'Hydraulique pour leurs informations et les encouragements qui nous ont apportés pendant le déroulement de ce travail.

Merci à tous ceux qui nous ont aidés pour achever ce travail.





Dédicace

*C'est avec l'aide de Dieu le Tout-Puissant que
j'achève ce modeste travail que je dédie à toutes les
personnes que j'aime, et en particulier :*

*À toi, ma chère mère, à qui je dois tant pour ses
sacrifices, son amour, son aide et son soutien. Sans
elle, je l'avoue, je ne serais pas ce que je suis
aujourd'hui.*

*À mon père, qui m'a encouragée durant mes études, et
dont l'affection m'a permis de terminer ce projet.*

*À mon mari, qui m'a soutenue et épaulée dans les
moments difficiles, qui a cru en moi et illumine ma
vie.*

À ma chère sœur,

À mes frères,

À ma belle-famille,

À ma binôme et à mes amis,

À tous ceux que j'ai involontairement oubliés,

*À tous les gens que j'aime et qui m'aiment, je dirai que
ce travail est le vôtre.*

BOUROUH Noumidia



Dédicace

Après un parcours académique de plusieurs années, rempli de nombreuses difficultés, épreuves et fatigues, me voici aujourd'hui, debout sur le seuil de mon diplôme, récoltant les fruits de mes efforts et levant mon chapeau avec fierté. Ô Dieu, à toi la louange avant que tu sois satisfait, à toi la louange lorsque tu es satisfait, et à toi la louange après satisfaction, car tu m'as aidé à accomplir ce travail et à réaliser mon rêve. Je dédie ce succès :

À celui qui m'a soutenu sans limites et m'a donné sans contrepartie, à celui qui m'a appris que la vie est une lutte dont l'arme est la science et la connaissance, à celui qui a implanté dans mon âme les vertus morales. Mon premier soutien dans ma carrière, mon pilier, ma force et mon refuge après Dieu... à ma fierté et mon honneur (mon père).

À celle à qui Dieu a placé le paradis sous ses pieds, dont le cœur m'a accueilli avant sa main et qui m'a facilité les épreuves par ses prières, au cœur tendre et à la bougie qui a éclairé mes nuits sombres, le secret de ma force et de mon succès, et la lampe de mon chemin, à la lumière de ma vie (ma mère).

À ceux pour qui ma réussite est importante, que Dieu vous protège (mon frère et ma sœur).

À tous ceux qui ont été une aide et un soutien sur ce chemin... Je vous dédie cette réalisation et le fruit de mon succès que j'ai toujours souhaité.

Me voici aujourd'hui, ayant accompli les prémices de ce travail, espérant que Dieu Tout-Puissant me fasse bénéficier de ce qu'Il m'a appris, qu'Il m'enseigne ce que j'ignore, et qu'Il en fasse un argument en ma faveur et non contre moi.

KEBAILI Sonia

Résumé

Pour protéger la zone d'étude de Bouinan contre les risques d'inondation, l'étude a débuté par la détermination des caractéristiques climatiques et topographiques du bassin versant. La deuxième partie de l'étude a été consacrée à l'analyse hydrologique pour déterminer les débits centennaux. Le diagnostic du terrain et la simulation du comportement hydraulique naturel des cours d'eau (HEC-RAS) nous ont permis d'identifier les anomalies et de déterminer les différents paramètres hydrauliques de l'écoulement. Sur la base de ce diagnostic, nous avons proposé des solutions qui ont fait l'objet d'une étude d'aménagement.

Mots clés: aménagement, Oued Bouinan, Hec Ras, Auto cad.

Abstract

To protect the Bouinan study area against the risk of flooding, the study began by determining the climatic and topographical characteristics of the watershed. The second part of the study was devoted to hydrological analysis to determine centennial flows. The field diagnosis and simulation of the natural hydraulic behavior of watercourses (HEC-RAS) allowed us to identify anomalies and determine the different hydraulic parameters of the flow. On the basis of this diagnosis, we proposed solutions which were the subject of a development study.

Keywords: Layout, Oued Bouinan, Hec Ras, Auto cad.

ملخص

لحمایة منطقة دراسة بوبینان من مخاطر الفيضانات، بدأت الدراسة بتحديد الخصائص المناخية والطبوغرافية لمستجمع المياه. أما الجزء الثاني من الدراسة فقد خصص للتحليل الهيدرولوجي لتحديد التدفقات المئوية. سمح لنا التشخيص الميداني ومحاكاة بتحديد الحالات الشاذة وتحديد المعلمات الهيدروليكية المختلفة (HEC-RAS) السلوك الهيدروليكي الطبيعي للمجري المائية للتدفق. وعلى أساس هذا التشخيص اقترحنا الحلول التي كانت موضوع دراسة تطويري الكلمات المفتاحية: التهيئة، واد بوبینان، الهيك راس، أوتوكاد

Table des matières

Introduction générale:	1
Chapitre I: Généralités sur l'aménagement des cours d'eau	3
I.1 Introduction	3
I.2 Généralités sur les cours d'eau	3
I.2.1 Morphologies des cours d'eau.....	3
I.2.2 Les différentes parties d'un cours d'eau	3
I.2.3 Les différents types de cours d'eau.....	4
I.2.4 Le réseau hydrographique	7
I.3 Les écoulements dans les cours d'eau	8
I.3.1 Définition des paramètres géométriques	8
I.3.2 Les différents types d'écoulements	9
I.3.3 Les différents régimes d'écoulements.....	10
I.4 Aménagement hydraulique des cours d'eau	11
I.4.1 Définition	11
I.4.2 Les objectifs d'aménagement.....	11
I.4.3 Différents types d'aménagement.....	12
I.5 Conclusion.....	15
Chapitre II: Analyse des caractéristiques de la zone d'étude.....	17
II.1 Introduction	17
II.2 Présentation de la zone d'étude	17
II.2.1 Situation géographique.....	17
II.2.2 Présentation de bassin versant.....	18
II.2.3 Situation climatique de la zone d'étude	19
II.3 Caractéristiques du bassin versant Oued Bouinan.....	24
II.3.1 Caractéristiques géométriques.....	24
II.3.2 Paramètres de formes	24
II.3.3 Caractéristiques du relief.....	26
II.3.4 Caractéristiques hydrographiques	32
II.3.5 Récapitulatif des caractéristiques de bassin versant.....	38
II.4 Conclusion:.....	39
Chapitre III: Traitement statistique des données et étude des apports.	41
III.1 Introduction.....	41
III.2 Série pluviométrique de Soumaa	41
III.2.1 Traitement des données de la pluviométrie.....	42
III.2.2 Présentation des caractéristiques de la série.....	42
III.2.3 Choix de la loi d'ajustement.....	44
III.3 Les pluies de courte durée.....	50
III.4 Apport annuel.....	52

III.4.1	Estimation de l'apport moyen annuel interannuelle.....	53
III.5	Caractéristique de l'écoulement.....	54
III.5.1	Module de L'écoulement	54
III.5.2	Module de l'écoulement spécifique ou relatif.....	54
III.5.3	Lame d'eau écoulée.....	55
III.5.4	Coefficient de l'écoulement	55
III.5.5	Coefficient de variation	55
III.6	Etude des crues	56
III.6.1	Formules empiriques pour la détermination de crues	56
III.7	Hydrogrammes de crue	60
III.8	Conclusion:	62
Chapitre IV:	Modélisation et simulation des crues avec HEC-RAS.....	64
IV.1	Introduction.....	64
IV.2	Modélisation	64
IV.2.1	Présentation du logiciel HEC-RAS	64
IV.2.2	L'Environnement HEC-RAS	64
IV.2.3	Les équations utilisées par le logiciel.....	66
IV.2.4	Subdivision d'une section en travers pour le calcul du débit	67
IV.2.5	Banque de données nécessaires à l'application du modèle HEC-RAS.....	68
IV.2.6	Application de HEC-RAS	69
IV.2.7	Résultat de simulation des profils en travers à l'état naturel.....	73
IV.2.8	Résultat de simulation des profils en long à l'état naturel	76
IV.3	Conclusion	79
Chapitre V:	Calcul Hydraulique	81
V.1	Introduction	81
V.2	Calcul hydraulique.....	81
V.2.1	Principe de calcul	81
V.2.2	Vitesses admissibles d'écoulement	84
V.2.3	Éléments géométriques	84
V.3	Choix du profil transversal de la section du canal.....	85
V.3.1	Section avantageuse	85
V.3.2	Choix de la revanche du canal.....	86
V.3.3	Les résultats de différents calculs des sections avantageuses	86
V.3.4	Interprétation des résultats	91
V.4	Critère de sélection de la variante d'aménagement.....	92
V.5	Conclusion.....	93
Conclusion générale:	95
Bibliographie	96

Liste des symboles

Symbol	Définition	Unité
ΔH	Dénivelée totale	m
μ	Viscosité dynamique	Kg/m/s
A_0	Apport moyenne annuelle	l
Alt_{moy}	Altitude moyenne	m
B	Largeur du canal à la surface libre ou largeur au miroir	m
b	Largeur au radier	m
C_T	Coefficient topographique	/
C	Coefficient de résistance selon Chezy	/
C_e	Coefficient de l'écoulement	/
C_R	Paramètre de ruissellement	Km ² /h
C_t	Coefficient de torrentialité	Km ⁻³
C_v	Coefficient de variation	/
D_d	Densité de drainage	Km/km ²
D_h	La profondeur hydraulique	m
D_s	Dénivelée spécifique	m
E	Coefficient d'allongement	/
F_l	Fréquence de talwegs d'ordre 1	Km ⁻²
F_r	Nombre de Froude	/
h	Hauteur de canal	m
$H_{5\%}$	Altitude 5%	m
$H_{50\%}$	Altitude médiane 50%	m
$H_{95\%}$	Altitude 95%	m
H_{max}	Altitude maximale	m
H_{min}	Altitude minimale	m
I_{moy}	Pente moyenne du cours d'eau (talweg) principale	m/m
I	Pente de fond du canal	m/m
I_g	Indice de pente globale	m/km
I_t	Intensité maximale	mm/h
K_c	Indice de compacité	/
K_H	Indice de forme de Horton	/
K_s	Coefficient de Manning Strickler	/
L_e	Lame d'eau	m
L_p	Longueur de talweg principal	m
L_r	Longueur de rectangle équivalent	km
l_r	Largeur de rectangle équivalent	km
m	Rang de précipitation	/
m	Fruit du talus du canal	/
m, n	Exposant de la parabole	/
M_0	Module d'écoulement spécifique ou relatif	l/s/km ²
M_e	Module d'écoulement	l/s
N	Nombre d'observation (taille de la série)	/
N	Paramètre régional	/
n	Coefficient de frottement de Manning.	/
P	Périmètre	m
P_0	Pluie minimale	m
P_0	Perte maximale	mm
P_0	Seuil du ruissellement journalier statistique	mm
P_A	Pluie annuelle	m

$P_{j.max}$	Pluies journalières maximales	mm
P_m	Périmètre mouillée	m
P_{moy}	Pente moyenne	m/km
P_{moy}	Pluie moyenne annuelle	m
P_{tc}	Pluie de courte durée	mm
Q_d	Débit instantané au moment de la décrue	m^3/s
Q_m	Débit instantané au moment de la montée	m^3/s
Q_{max}	Débit maximum de la crue	m^3/s
$Q_{max.p\%}$	Débit maximum de crue (de pointe)	m^3/s
Q_T	Débit de pointe	m^3/s
R_e	Nombre de Rynolds	/
R_h	Rayon hydraulique	m
S	Surface	m^2
S_m	Section mouillée	m^2
T	Période de retour	ans
T_B	Temps de base	h
T_{B0}	Constante régionale	/
T_c	Temps de concentration	h
t_d	Temps de décrue	h
t_m	Temps de montée	h
U	Variable réduite de GALTON	/
V	Volume d'écoulement	Hm^3
V_r	Vitesse du ruissellement	km/h
y	Variable réduite de GUMBEL	/
α	Paramètre de SOKOLOVSKY	/
β	Exposant climatique	/
λ	Coefficient des zones géographique et des pluies annuelles	/
ν	Viscosité cinématique	m^2/s
ρ	Masse volumique	Kg/m^3

Liste des abréviations

- ANRH : Agence nationale des ressources hydriques.
- B.V : Bassin versant.
- PDAU : Plan Directeur d'Aménagement et D'urbanisme.
- O.R.S.T.O.M : Office de la recherche scientifique et technique outre-mer.
- HEC-RAS : Hydrologic Engineering Center River Analysis System (Système d'analyse des -- rivières du centre d'ingénierie hydrologique).

Liste des tableaux

Tableau (II.1): Température observée.....	20
Tableau (II.2): Relation Ombrothermique.....	20
Tableau (II.3): Humidité relative moyenne enregistrée à la station de Blida.....	21
Tableau (II.4): vitesse de vent moyenne.....	22
Tableau (II.5): L'insolation journalière enregistrée à la station Blida.....	23
Tableau (II.6): la quantité de pluie moyenne à Blida.....	23
Tableau (II.7): Les caractéristiques géométriques du bassin versant Oued Bouinan.....	24
Tableau (II.8): Récapitulatif des paramètres de formes du sous bassin versant Oued Bouinan..	26
Tableau (II.9): Répartition hypsométrique du bassin versant.....	28
Tableau (II.10): Résultats du calcul de l'altitude moyenne.....	29
Tableau (II.11): Classification du relief d'après O.R.S.T.O.M. (selon Ig).....	31
Tableau (II.12): Classification du relief d'après O.R.S.T.O.M (selon Ds).....	31
Tableau (II.13): Résultats du calcul de la pente moyenne de B.V selon Carlier et Leclerc.....	32
Tableau (II.14): Chevelu hydrographique du bassin versant Oued Bouinan.....	33
Tableau (II.15): Les longueurs des cours d'eau (des talwegs) du bassin versant Oued Bouinan.	35
Tableau (II.16): Comparaison des résultats des formules.....	38
Tableau (II.17): Récapitulatif des caractéristiques morpho métriques et hydrographiques du bassin versant Oued Bouinan.....	38
Tableau (III.1): Série pluviométrique de la station Soumaa.....	41
Tableau (III.2): Caractéristiques de la série pluviométrique de la station de Soumaa.....	42
Tableau (III.3): Résultats de l'ajustement à la loi de GALTON.....	45
Tableau (III.4): comparaison des Caractéristiques de l'échantillon.....	46
Tableau (III.5): Résultat d'ajustement par la loi de Galton pour les périodes de retour.....	46
Tableau (III.6) : Résultat de l'ajustement à la loi de GUMBEL.....	47
Tableau (III.7): Comparaison des caractéristiques de loi et de l'échantillon.....	49
Tableau (III.8): Résultat d'ajustement par la loi de Gumbel pour les périodes de retour Appropriées.....	49
Tableau (III.9): Comparaison entre deux lois d'ajustement :.....	50
Tableau (III.10): Pluies et intensités maximales de durée t (h) et de périodes retour T (ans).....	51
Tableau (III.11): Récapitulatif des résultats des apports.....	54
Tableau (III.12): Résultats des paramètres d'écoulement.....	56
Tableau (III.13): Paramètre régional du climat variant tabulé.....	57
Tableau (III.14): Paramètre régional du relief variant tabulé.....	58

Tableau (III.15): Valeurs du paramètre P_0 (Boutoutaou Dj. 2008).....	58
Tableau (III.16): résumer de calcule avec différent formule des Débit de différentes fréquences (Oued Bouinan).....	60
Tableau (III.17): Temps de monté et de décrue du bassin versant Bouinan.....	61
Tableau (III.18): Les débits de crues des différentes périodes de retour.....	61
Tableau (IV.1): Les résultats de la simulation d'Oued Bouinan à l'état naturel avec logiciel HEC-RAS.....	77
Tableau (V.1): Valeurs estimées pour le coefficient de Manning Strickler en fonction de la nature des Parois.....	83
Tableau (V.2): la hauteur de revanche correspondante en fonction du débit de conception.	86
Tableau (V.3): Section trapézoïdale en béton avec la pente de 0, 01.....	86
Tableau (V.4): Sections trapézoïdales en béton avec la pente de 0,003.....	88
Tableau (V.5): Sections trapézoïdales en béton avec la pente de 0, 01 avec le gabion.....	90

Liste des figures

Figure (I.1) : schéma de différentes parties d'un cours d'eau.....	4
Figure (I.2) : Le ru du Buzot (France).	4
Figure (I.3) : Un ruisseau.	5
Figure (I.4) : Un canal.....	5
Figure (I.5) : Un torrent.....	5
Figure (I.6) : Une rivière.	6
Figure (I.7) : Un fleuve.	6
Figure (I.8) : Un oued.	7
Figure (I.9) : schéma d'un réseau hydrographique.	7
Figure (I.10) : Schéma de classification du réseau hydrographique selon le système de strahler (1957).	8
Figure (I.11) : Schéma des paramètres de la section de l'écoulement.	8
Figure (I.12) : Schéma des écoulements permanents et non permanents.	9
Figure (I.13) : Schéma représentant les différents types d'écoulement.	10
Figure (I.14) : L'enrochement.	13
Figure (I.15) : Le gabion.....	14
Figure (I.16) : Les épis.....	14
Figure (II.1) : Localisation de la commune Bouinan dans la wilaya de Blida	17
Figure (II.2) : Schéma d'un Bassin versant avec une ligne de partage des eaux, un cours d'eau principal et un exutoire. (Source : Syndicat Mixte Contrat de Rivière Gartempeols).	18
Figure (II.3) : Situation de bassin versant Oued Bouinan.....	19
Figure (II.4) : graphique ombrothermique.....	21
Figure (II.5) : La moyenne des vitesses des vents moyens horaires.	22
Figure (II.6) : La quantité de pluie moyenne.	24
Figure (II.7) : État de maturité du relief des BV.....	27
Figure (II.8) : Courbe hypsométrique et hypsogramme du bassin versant Oued Bouinan.....	28
Figure (II.9) : Classification du réseau hydrographique du bassin versant Oued Bouinan.	34
Figure (III.1) : Représentation des observations sur papier normal	43
Figure (III.2) : Histogramme des observations.....	43
Figure (III.3) : Ajustement à la loi de GALTON (log normal).	46
Figure (III.4) : Ajustement pas la loi de Gumbel.....	48
Figure (III.5) : Comparaison entre deux lois d'ajustement.....	49
Figure (III.6) : Courbes de pluies fréquentielles.....	52

Figure (III.7) : Courbes d'intensité pour différentes durées et fréquences.....	52
Figure (III.8): carte de localisation des bassins hydrographiques en Algérie.....	59
Figure (III.9): L'hydrogramme de crue.....	62
Figure (IV.1): fenêtre principale de HEC-RAS.....	65
Figure (IV.2): Conservation de la charge entre deux sections.....	67
Figure (IV.3): Méthode de subdivision du débit par le modèle HEC-RAS.....	68
Figure (IV.4): Création d'un nouveau projet ".prj" sur HEC-RAS.....	70
Figure (IV.5): Modèle géométrique du cours d'eau.....	70
Figure (IV.6): données du débit pour les cinq (05) périodes de retours.....	71
Figure (IV.7): Présentation de la fenêtre des conditions aux limites.....	72
Figure (IV.8): Fenêtres de simulation pour le régime Fluvial.....	72
Figure (IV.9): Fenêtre principale du HEC-RAS et visualisation des coupes transversales.....	73
Figure (IV.10): Profil en travers de la station du Point kilométrique 0 d'Oued à l'état naturel..	73
Figure (IV.11): Profil en travers de la station du Point kilométrique 17,35 d'Oued à l'état naturel.....	74
Figure (IV.12): Profil en travers de la station du Point kilométrique 55,57 d'Oued à l'état naturel.....	74
Figure (IV.13): Profil en travers de la station du Point kilométrique 158,33 d'Oued à l'état naturel.....	75
Figure (IV.14): Profil en travers de la station du Point kilométrique 260,03 d'Oued à l'état naturel.....	75
Figure (IV.15): Profil en travers de la station du Point kilométrique 357,01 d'Oued à l'état naturel.....	76
Figure (IV.16): Le profil en long d'Oued à l'état naturel donné par le modèle HEC-RAS	77
Figure (V.1): Éléments géométriques de quelques sections de canaux (Image tirée du web).....	84
Figure (V.2): schéma des caractéristiques géométriques de notre profil trapézoïdal avec la pente naturel de 0,01 avec le béton.....	87
Figure (V.3) : schéma des caractéristiques géométriques de notre profil trapézoïdal avec la pente de 0,003 avec le béton.....	89
Figure (V.4) : schéma de proposition de la réalisation de chute.....	89
Figure (V.5) : schéma des caractéristiques géométriques de notre profil trapézoïdal avec la pente de 0,01 avec le gabion.....	91

Introduction générale

Introduction générale:

Les inondations constituent un risque majeur pour les populations et les infrastructures dans de nombreuses régions du monde. Les oueds, cours d'eau à écoulement temporaire, sont particulièrement sujets aux crues soudaines et violentes, qui peuvent causer des dégâts importants. L'aménagement des oueds est une stratégie essentielle pour réduire les risques d'inondation et protéger les populations riveraines.

La présente étude concerne l'aménagement d'Oued Bouinan, pour la protection contre les inondations.

Ce travail est structuré en cinq chapitres :

Dans le premier chapitre, nous allons aborder sur les généralités sur l'aménagement des cours d'eau.

Le deuxième chapitre, est définie la zone d'étude, et décrit une présentation détaillée du bassin versant de l'Oued Bouinan qui fait partie du bassin hydrographique côtier Algérois (2a) Ouest.

Le troisième chapitre, nous avons utilisé le logiciel Hyfran pour le traitement statistique des données pluviométriques en exploitant deux lois : Gumbel et Galton, ces lois d'ajustement sont utilisées pour un événement qui a une faible probabilité de se reproduire, puis procédé au calcul des apports liquide ainsi que les crues à l'aide de différentes formules.

Dans le quatrième chapitre, est réservé au diagnostic sur l'état des lieux d'Oued Bouinan, en outre à l'exploitation des résultats obtenus précédemment pour façonner une simulation hydraulique du comportement d'Oued à l'état naturel (sans aménagement) à l'aide du logiciel HEC-RAS, ainsi identifier les zones à risques de débordements qui nécessitent des aménagements.

Dans le cinquième chapitre, mis au point le dimensionnement hydraulique de la section d'écoulement adéquate avec la proposition de plusieurs variantes d'aménagement.

Enfin, nous terminâmes par une conclusion générale, se présentant comme une synthèse de nos résultats et, qui résume succinctement les différentes parties évoquées ci-dessus.

Chapitre I :
Généralités sur
l'aménagement des
cours d'eau

I.1 Introduction

L'aménagement de cours d'eau comprend des interventions techniques et des ouvrages le long des cours d'eau afin de protéger les personnes, les animaux et les biens matériels contre les dangers.

Dans ce chapitre, nous présentons quelques généralités sur l'aménagement des cours d'eau.

I.2 Généralités sur les cours d'eau

I.2.1 Morphologies des cours d'eau

La morphologie des cours d'eau correspond à la forme que prennent les rivières en fonction des conditions climatiques et géologiques (nature du sol, débit, pente, granulométrie du fond, etc.). Leur aspect évolue ainsi d'amont en aval mais également de façon transversale on parle alors de faciès d'écoulement. [14]

I.2.2 Les différentes parties d'un cours d'eau

Diverses parties peuvent caractériser un cours d'eau :

- **La source** : représente le point d'origine d'un cours d'eau.
- **L'amont** : (la partie la plus élevée du cours d'eau topographiquement) en opposition à l'aval (la partie la moins élevée).
- **Le lit mineur** : c'est-à-dire l'espace qui est occupé de manière permanente par le cours d'eau.
- **Le lit majeur** : est occupé temporairement en période de crue lors des inondations.
- **La rive** : borde le cours d'eau.
- **Les berges** : délimitent le lit mineur maintenu par la végétation (les saules, aulnes ...).
- **Les annexes hydrauliques** : peuvent être définies comme une forme topographique quelconque, remplie plus ou moins d'eau et fréquemment coupée du lit majeur du fleuve durant la période d'étiage.
- **Le méandre** : est une boucle formée par le cours d'eau. Il existe quand l'eau passe sur une pente faible.
- **La ripisylve** : correspond à la végétation de bords de cours d'eau ; elle est composée de plusieurs strates : herbacée, arbuste, arborée...
- **L'embouchure ou l'estuaire** : est le lieu où le cours d'eau termine sa course (généralement dans un océan, dans la mer ou dans un lac). [14]

La structure du cours d'eau

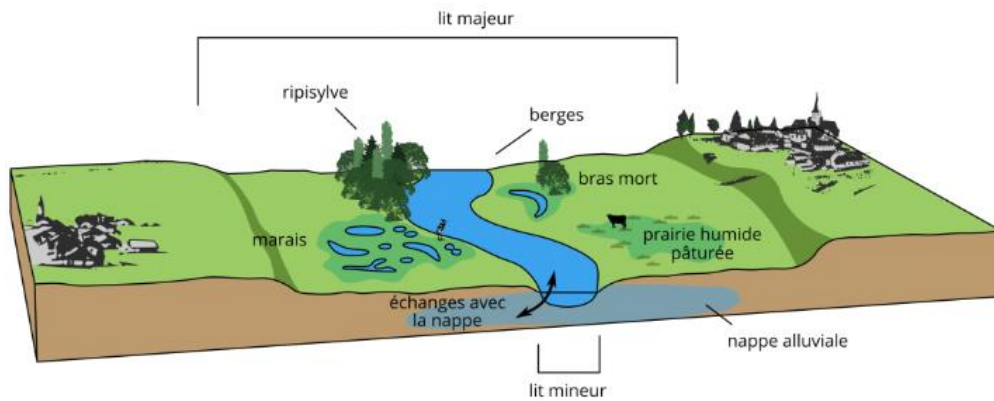


Figure (I.1) : schéma de différentes parties d'un cours d'eau.

I.2.3 Les différents types de cours d'eau

Les différents types de cours d'eau sont :

- **Le ru** : petit cours d'eau, souvent en tête de bassin, s'écoulant en surface.



Figure (I.2) : Le ru du Buzot (France).

- **Les ruisseaux** : petits cours d'eau de faible largeur et de faible longueur. C'est le cours d'eau le plus élémentaire ; il recueille les eaux qui ruissellent sur les versants, il n'a pas de tributaire



Figure (I.3) : Un ruisseau.

- **Le canal :** conduit naturel ou artificiel permettant le passage d'un fluide.



Figure (I.4) : Un canal.

- **Les torrents :** cours d'eau situés généralement en montagne ou sur des terrains accidentés, au débit rapide et irrégulier.

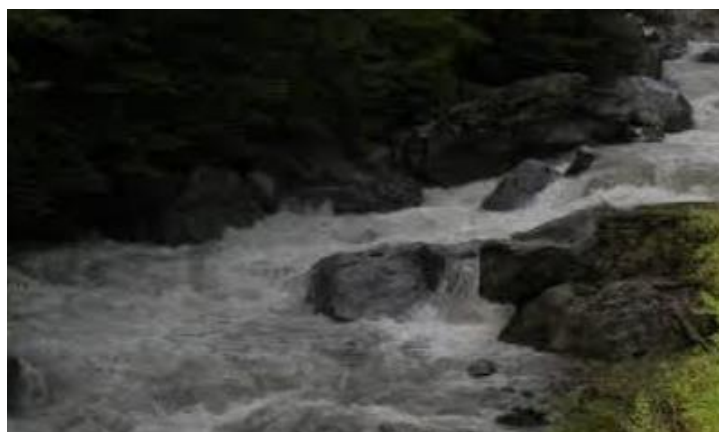


Figure (I.5) : Un torrent.

- **Les rivières :** Le mot rivière désigne un cours d'eau plus ou moins important qui se termine dans une autre rivière, un fleuve ou un lac. Certaines rivières peuvent disparaître par infiltration ou par évaporation.



Figure (I.6) : Une rivière.

- **Les fleuves :** Le mot fleuve s'applique en général à un long cours d'eau puissant collectant les eaux de nombreux affluents, et qui se jette dans la mer.



Figure (I.7) : Un fleuve.

- **Oued :** terme d'origine arabe désignant un cours d'eau temporaire dans la région aride ou semi-aride. Son écoulement dépend des précipitations et il peut rester à sec pendant de très longues périodes. [14]



Figure (I.8) : Un oued.

I.2.4 Le réseau hydrographique

Le réseau hydrographique fait référence à un système organisé de canaux, de rivières et de cours d'eau qui facilitent l'écoulement de l'eau de surface, qu'il soit permanent ou temporaire, dans un bassin versant ou une région spécifique. [14]

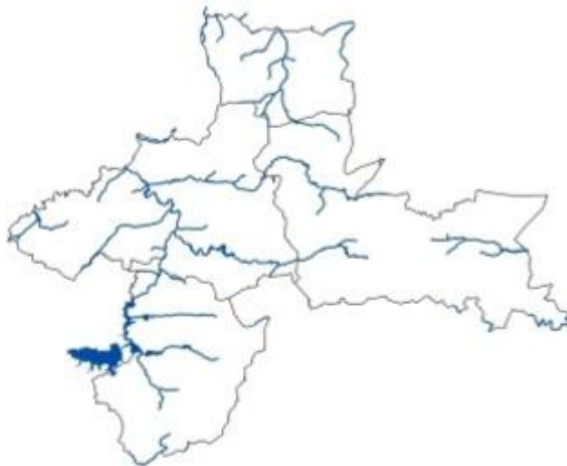


Figure (I.9) : schéma d'un réseau hydrographique.

Classification du réseau hydrographique selon le système de strahler (1957) :

- Tout cours d'eau dépourvu de tributaires est d'ordre un.
- Le cours d'eau formé par la confluence de deux cours d'eau d'ordre différent prend l'ordre du plus élevé des deux.
- Le cours d'eau formé par la confluence de deux cours d'eau de même ordre est augmenté de un.

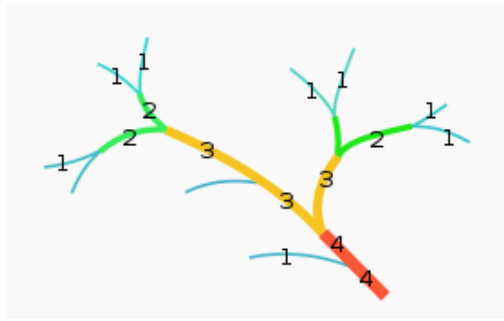


Figure (I.10) : Schéma de classification du réseau hydrographique selon le système de strahler (1957).

I.3 Les écoulements dans les cours d'eau

I.3.1 Définition des paramètres géométriques

Ces paramètres sont relatifs à une section du chenal dans un plan perpendiculaire à son axe, dont la position est définie par une abscisse (x). Les paramètres essentiels sont le tirant d'eau (y) :

- La section mouillée (S_m) : surface verticale du cours d'eau occupée par l'eau ;
- La largeur au miroir (L) : largeur à la surface du cours d'eau mesurée perpendiculairement à l'écoulement ;
- Le périmètre mouillé (P_m) : longueur du segment de la section qui est en contact avec l'eau.

Ils sont définis sur le schéma de la figure (I.11). Bien noter que le périmètre mouillé est la longueur de paroi en contact avec l'eau (berges et fond), mais ne comporte pas le contact eau-atmosphère.

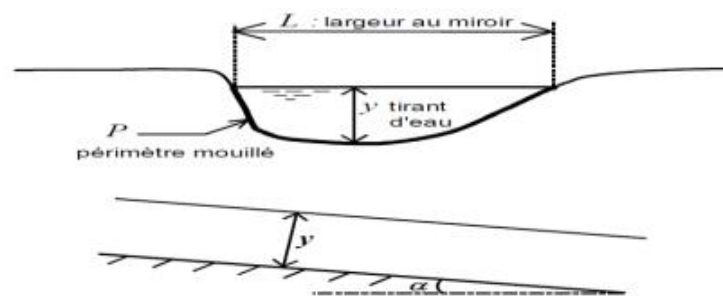


Figure (I.11) : Schéma des paramètres de la section de l'écoulement.

- Le rayon hydraulique est le rapport entre section mouillée et périmètre mouillé, $R = S/P$.
- La pente du chenal est la pente de son fond, mesurée tout le long de son axe, et comptée positivement si le chenal est descendant. Elle est notée i ($i = \sin\alpha$). Si z désigne la cote du fond, alors $i = - dz/dx$.
- Profondeur (y) : distance verticale mesurée entre le fond du cours d'eau et la surface de l'eau. Cette profondeur est dépendante du débit, qu'elle permet souvent de caractériser. [3]

I.3.2 Les différents types d'écoulements

Les écoulements à surface libre peuvent être classés suivant la variation des paramètres hydrauliques (notamment la profondeur de l'écoulement ou la profondeur hydraulique) dans le temps et dans l'espace.

Si le temps est pris comme critère de classification, on distinguera alors :

Écoulement est permanent (ou stationnaire) : si les vitesses (V) et la profondeur (D_h) restent invariables dans le temps en grandeur et en direction ; le débit est constant entre les différentes sections du canal.

Écoulement est non-permanent : si les paramètres hydrauliques varient avec le temps ; le débit n'est pas constant.

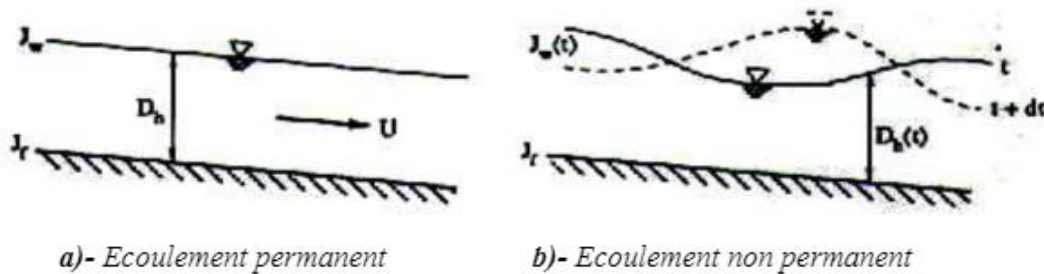


Figure (I.12) : Schéma des écoulements permanents et non permanents.

Si l'espace est pris comme critère de classification, on distinguera cette fois-ci

Écoulement est uniforme : si la profondeur (D_h) ainsi que les autres paramètres, restent invariables dans les diverses sections du canal.

La ligne de la pente de fond est donc parallèle à la ligne de la surface libre et l'on a $I = J$.

Écoulement est non uniforme (ou varié) : si la profondeur (D_h) ainsi que les autres paramètres, changent d'une section à l'autre.

La pente de fond diffère alors de celle de la surface libre, $I \neq J$. Cette variation peut être graduelle ou brusque et rapide. Par conséquent, l'écoulement non uniforme ou varié se subdivise en :

- **Écoulement graduellement varié :** la profondeur (D_h) ainsi que les autres paramètres, ne changent que très lentement d'une section à l'autre.

- **Écoulement brusquement varié :** la profondeur (D_h) ainsi que les autres paramètres changent brusquement, parfois avec des discontinuités. Cela se manifeste en général au voisinage d'une singularité, telle qu'un déversoir, un rétrécissement, un ressaut hydraulique ou une chute brusque. [12]

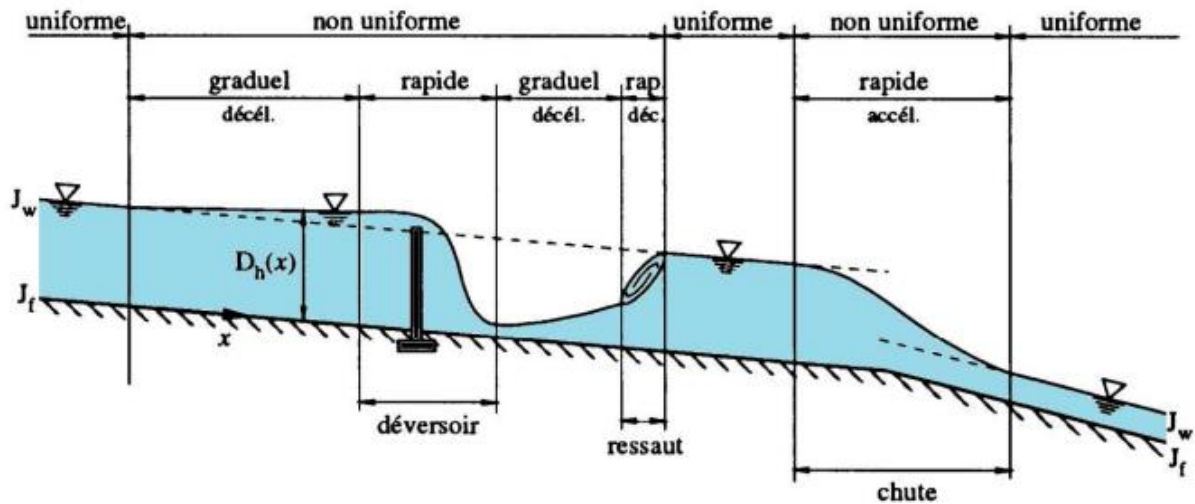


Figure (I.13) : Schéma représentant les différents types d'écoulement.

I.3.3 Les différents régimes d'écoulements

L'écoulement d'un fluide dans un canal à surface libre engendre les forces suivantes : forces d'inertie, forces de gravité et forces de frottement (viscosité et rugosité). L'effet de la gravité sur le régime d'écoulement est représenté par le rapport des forces d'inertie aux forces de gravité. Ce rapport, de grande utilité en hydraulique des écoulements à surface libre, est défini comme étant le nombre de Froude, et est exprimé par: [15]

$$F = \frac{V}{\sqrt{g \times H_m}} \quad (I.1)$$

Où:

- V: la vitesse d'écoulement;
- g: l'accélération de la pesanteur;
- Hm: la profondeur hydraulique (S/B).

Pour un canal rectangulaire, Hm devient la profondeur d'écoulement h.

- **Si F = 1:** on dira que l'écoulement est en régime Critique. Et la profondeur d'écoulement correspondante H égale à la profondeur critique Hc.
- **Si F > 1 (H < Hc):** l'écoulement est en régime Torrentiel (Supercritique). Les forces d'inertie sont prépondérantes, et ceci se traduit par une importante vitesse d'écoulement.
- **Si F < 1 (H > Hc):** l'écoulement est en régime Fluvial (Subcritique). Dans ce cas, l'effet de la gravité est plus prononcé, ceci se traduit par une faible vitesse d'écoulement.

La vitesse critique $V = \sqrt{g \times H_m}$ est souvent appelée célérité de l'onde gravitaire.

I.4 Aménagement hydraulique des cours d'eau

I.4.1 Définition

L'aménagement hydraulique c'est la gestion et l'entretien des cours d'eau. Son objectif est de restaurer la qualité du milieu naturel dégradé, par manque d'entretien et par les pollutions, pour améliorer la qualité des eaux et préserver les ressources biologiques. Les domaines d'intervention de l'aménagement de l'aménagement hydraulique sont :

- Constructions des barrages ;
- Correction des lits des Oueds ;
- Protection de l'érosion des sols ;
- Assainissement des eaux pluviales. [11]

I.4.2 Les objectifs d'aménagement

Les objectifs et les techniques d'aménagement des cours d'eau ont évolué en relation avec l'intérêt que l'homme attache à certains des fonctions de la rivière pour l'exploiter ou la protéger. Ces aménagements répondaient souvent à des objectifs légitimes :

- La fourniture d'eau potable pour la population et le bétail,
- La fourniture d'eau pour l'agriculture et l'industrie,
- Le laminage des crues,
- Contrôle des niveaux d'eau (Crue et Etiage),
- Lutter contre l'érosion des berges,
- Faciliter la navigation fluviale,
- Produire de l'énergie hydroélectrique,
- Et, beaucoup plus récemment, créer des bases de loisirs.

Bien souvent les aménagements hydrauliques répandent à des buts multiples et leur gestion devient très complexes sur chaque but déterminé exige un mode de gestion défierent, les cas extrêmes sont :

La protection contre les crues : Le barrage devrait être toujours vide. Par exemple Barrage sur Oued Tlata, pour la protection de la ville de Ghazaouet contre les inondations.

La réserve d'eau : Le barrage devrait être toujours plein, Par exemple Barrage Fontaine de Gazelle w de Biskra.

La maîtrise de la qualité de l'eau : est également un objectif très recherché dans le monde. En effet la pollution est un obstacle à l'utilisation de l'eau à des fins multiples. [11]

1.4.3 Différents types d'aménagement

1.4.3.1 Calibrage

Le calibrage d'un cours d'eau consiste à lui fournir une nouvelle section pour répondre aux nouvelles demandes de débit de ruissellement ou d'évacuation souterraine. Un calibrage est un terrassement pour élargir le lit de la rivière et/ou l'approfondir. Ce travail peut s'accompagner d'une rectification de tracé pour augmenter la pente, souvent il s'accompagne aussi d'enlèvement de la végétation.

1.4.3.2 Construction des digues fluviales

Les endiguements parallèles aux cours d'eau sont une technique classique pour mettre en place les parcelles riveraines hors d'eau. Les techniques de mise en œuvre sont les mêmes que pour très petits barrages. La terre utilisée doit être étanche, elle est mise en place par couches compactées de 30 à 50 cm. Les pentes amont et aval doivent assurer la stabilité au glissement, ce qui conduit à des valeurs maximales de l'ordre 1/2.

1.4.3.3 Nettoyage du lit ordinaire

Un simple nettoyage du lit ordinaire peut permettre un meilleur écoulement des débits avant débordement. L'arrachement de matériaux peut aussi conduire à de nouveaux encombrements à l'aval, créant localement des conditions défavorables mais pouvant, également, annihiler les gains escomptés en amont. Dans certains cas, il pourra être envisagé l'implantation de seuils en complément, afin de diminuer la pente et, par suite, de réduire les vitesses. Il convient aussi, avant toute intervention de suppression d'obstacle ou de végétation, de se poser la question de leur réelle inutilité et de s'interroger, notamment, sur le rôle qu'ils jouent dans la dynamique fluviale pour l'équilibre du lit et la stabilité des berges.

1.4.3.4 Protection des berges

Pour protéger l'érosion, il faut donc s'opposer au mécanisme en interposant un écran entre la berge et l'eau. On peut distinguer les trois types de techniques de protection de berges qui sont les suivants :

- ***Les techniques végétales de protection des berges***

Les techniques d'ingénierie végétale, telles que les fascines hélophytes ou le tissage, sont des techniques qui utilisent tout ou partie de plantes vivantes. Ces techniques sont basées sur la capacité de la plante à se reproduire, en maintenant le sol en place tout au long de sa croissance. Ses racines dissipent l'énergie hydraulique par pertes de pression au sein de la texture végétale. Ils sont privilégiés dans les zones où les contraintes hydrauliques sont modérées et où les terrains disponibles en crête extérieure permettent un renouvellement en pente douce.

- **Matériaux granulaire pour protéger les berges**

Les matériaux minéraux utilisés pour protéger les berges des rivières de l'érosion sont des enrochements de carrière, des gabions ou des blocs de béton préfabriqués. Ils offrent de nombreux avantages en matière de protection des banques, notamment :

- Flexibilité contre la déformation du sol ou l'affouillement.
- Capacité de drainage.
- Peut être installé à sec et dans l'eau.

- **Enrochement**

L'utilisation de cailloux, de roches et plus récemment de roc concassé s'est montrée une solution intéressante pour protéger les cours d'eau et les canaux de l'érosion et réaliser certaines structures hydrauliques. Pour être efficace, leur utilisation dans des projets d'hydraulique nécessite une bonne connaissance de leurs propriétés et des lois de l'hydraulique.



Figure (I.14) : L'enrochement.

- **Les blocs préfabriqués en béton**

Les blocs de béton préfabriqués sont disponibles en dixièmes de taille. Leur légèreté peut être compensée par des connexions filaires ou des procédés d'emboîtement ou d'auto-blocage, et ils sont plus adaptés à l'aménagement de plages en pente douce sur des rivières ou des lacs. Certains procédés utilisent des blocs avec des cellules, leur permettant de se remplir de terre végétale.

- **Gabion**

Les gabions peuvent être utilisés pour plusieurs types d'ouvrages, où ils combinent les fonctions de protection contre l'érosion et de soutènements. Les gabions et les matelas sont adaptés aux ouvrages hydrauliques et doivent être conçus pour résister aux actions hydrauliques. En règle générale, ils sont utilisables pour des vitesses du courant allant jusqu'à 6 m/s et des hauteurs de vagues jusqu'à 1.5 m. Lorsque les gabions risquent d'être exposés à des conditions très abrasives, la surface supérieure des gabions doit être protégée par un revêtement de béton ou de bitume.



Figure (I.15) : Le gabion.

- **Les épis**

Les épis peuvent être en terre, enrochements, ou en gabions. Ils sont placés dans les anses à forte érosion, afin de favoriser le dépôt entre eux et de ce fait réaliser le comblement des espaces affouillés. Lorsque la nécessité oblige, on réalise des épis avec une combinaison de deux (parfois plus) matériaux de nature différente. [6]



Figure (I.16) : Les épis.

I.5 Conclusion

Les cours d'eau sont souvent aménagés pour répondre à divers besoins tels que la protection contre les inondations, la régulation des débits et l'approvisionnement en eau. Cependant, ces aménagements peuvent perturber l'équilibre naturel des cours d'eau en altérant leur dynamique et leur morphologie. Il est donc crucial de dimensionner ces ouvrages de manière à limiter leurs impacts négatifs et à préserver la continuité écologique des rivières. Cela peut impliquer la stabilisation des lits, la protection des berges contre l'érosion et la création de retenues d'eau pour maintenir les niveaux en période de sécheresse. Une approche intégrée est nécessaire pour aménager durablement les rivières en conciliant les différents enjeux liés à l'eau.

Chapitre II :
Analyse des
caractéristiques de la
zone d'étude

II.1 Introduction

Le but de L'étude hydrologique du bassin versant qui draine l'Oued BOUINAN est de définir pour les diverses périodes de retours, des hydrogrammes de crue et de mieux comprendre le fonctionnement hydrologique du bassin versant.

Dans ce chapitre nous définissons la zone d'étude et de déterminer les différents paramètres morphométriques et hydrographiques du bassin (Superficie, Altitude, formes des unités hydrologiques, pente, relief, temps de concentration, ...etc.), qui interviennent, et souvent de façon combinée, dans les modèles de l'écoulement.

II.2 Présentation de la zone d'étude

II.2.1 Situation géographique

La commune de Bouinan est située au centre de la wilaya de Blida, à environ 16 km au nord-est de Blida et à environ 34 km au sud d'Alger et à environ 45 km au nord-est de Médéa, d'une altitude de 91 m. (Latitude/Longitude :36°31'54' nord/2°59'31' est). Sur une superficie de 73.20 km² avec une population de 31070hab (2008), est sa densité est 424 hab/km².Elle est limitée par :

- La commune Chebli au nord et au nord-est ;
- La commune Bougara à l'est ;
- La commune Hammam Melouane au sud et au sud-est ;
- La commune Chréa au sud-ouest ;
- La commune Soumaa à l'ouest ;
- La commune Boufarik au nord-ouest. [7]



Figure (II.1) : Localisation de la commune Bouinan dans la wilaya de Blida .

II.2.2 Présentation de bassin versant

II.2.2.1 Définition de bassin versant

Un bassin versant est une unité territoriale correspondant à l'ensemble du territoire qui alimente un cours d'eau en eau. Les limites du territoire d'un bassin versant sont appelées les lignes de partage des eaux et sont constituées des sommets qui séparent les directions d'écoulement des eaux de ruissellement. La direction d'écoulement des eaux dans un bassin versant implique que ces eaux se dirigeront vers un exutoire commun (cours d'eau, lac, fleuve, océan). Les eaux souterraines, au même titre que les eaux de surface, font partie intégrante du bassin versant.

Dans un bassin versant, l'écoulement des eaux se fait de l'amont vers l'aval au travers d'un réseau hydrographique (réseau de drainage) d'ordre plus ou moins important. Il comprend un cours d'eau récepteur (cours d'eau principal) et ses tributaires (cours d'eau qui se jette dans un cours d'eau de plus grande importance ou dans un lac). Chaque bassin versant est composé de plusieurs sous-bassins versants qui, à leur tour, sont également composés de sous-bassins versants. [8]



Figure (II.2) : Schéma d'un Bassin versant avec une ligne de partage des eaux, un cours d'eau principal et un exutoire. (Source : Syndicat Mixte Contrat de Rivière Gartempeols).

II.2.2.2 Bassin versant de la zone d'étude (Oued Bouinan)

Le bassin hydrographique de l'oued Bouinan s'étend :

- En latitude : $36^{\circ}29'20.48''\text{N}$ à $36^{\circ}32'16'18''\text{N}$;
- En longitude : $2^{\circ}57'39.97''\text{E}$; $2^{\circ}59'10.69''\text{E}$;
- En Altitude : 75.56 m à 880.65 m pour une dénivelée de 805.09m ;

- En surface : 9.203 km² ;
- En périmètre : 16.9 km.

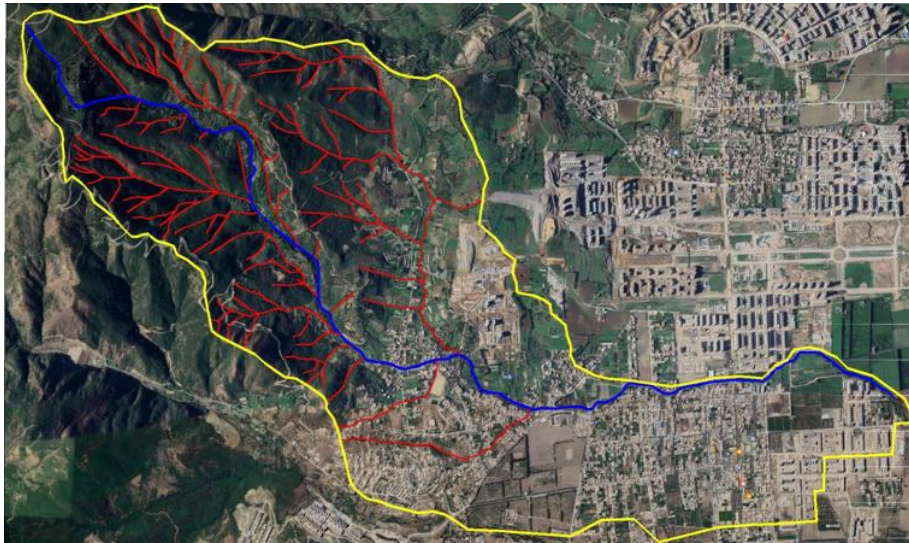


Figure (II.3) : Situation de bassin versant Oued Bouinan.

II.2.3 Situation climatique de la zone d'étude

Le climat est la répartition statistique des conditions atmosphériques dans une région donnée sur une période donnée. Elle est réalisée à partir de valeurs moyennes établies à partir des mesures statistiques mensuelles et annuelles, ainsi que basées sur des données atmosphériques locales : température, précipitations, ensoleillement, humidité, vitesse du vent. Le climat des régions continentales du monde dépend de leur latitude et de leur proximité avec les principales masses d'eau de la Terre. À des fins de recherche, les facteurs climatiques influencent directement :

- les modalités et conditions de réalisation des travaux prévus (calendrier des travaux, calendrier, saison, etc.) ;
- le choix de la qualité des matériaux de construction ;
- l'ampleur des travaux prévus. [13]

II.2.3.1 Facteurs climatologiques

Les facteurs climatiques pris en compte sont :

- la température ;
- le vent ;
- la neige ;
- l'humidité relative ;
- les précipitations. [9]

• **La température**

La température est un élément majeur dans les phénomènes de concentration et d'évaporation de l'eau, et constitue un terme essentiel dans la définition du déficit d'écoulement.

Le climat de la région est caractérisé par deux saisons :

- Une saison chaude allant du mois de mai au mois d'octobre ;
- Une saison froide allant du mois d'octobre au mois d'avril.

Selon le plan directeur d'aménagement urbain (PDAU), la température moyenne des maximales est 27.68°C en été et 16.21°C en hiver, par contre la température moyenne des minimales est 17.23°C en été et 7.93°C en hiver, ce qui donne une température moyenne de 22.45°C en été et 12.07°C en hiver, voir le tableau qui suit :

Tableau (II.1): Température observée.

Température \ période	été	hiver
T° moyenne des maximales	27.68	16.21
T° moyenne des minimales	17.23	7.93
T° moyennes	22.45	12.07

• **Relation Ombro-Thermique**

Un graphique ombrothermique est un type particulier de diagramme climatique représentant les variations mensuelles sur une année des températures et des précipitations selon des gradations standardisées pour mettre en évidence les périodes de sécheresse : une gradation de l'échelle des précipitations correspond à deux gradations de l'échelle des températures (P=2T) ; donne la répartition temporelle inverse entre les précipitations et les températures selon le tableau (II.2); Les résultats sont illustrés dans la figure (II.4).

Tableau (II.2): Relation Ombrothermique.

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
T° moyenne (°C)	9.5	9.8	12.4	14.8	18.1	22.4	25.8	26	22.7	19.3	13.7	10.7
2T (°C)	19	19.6	24.8	29.6	36.2	44.8	51.6	52	45.4	38.6	27.4	21.4
Pluie moyenne(mm)	85	71	73	72	60	12	3	11	35	58	83	78

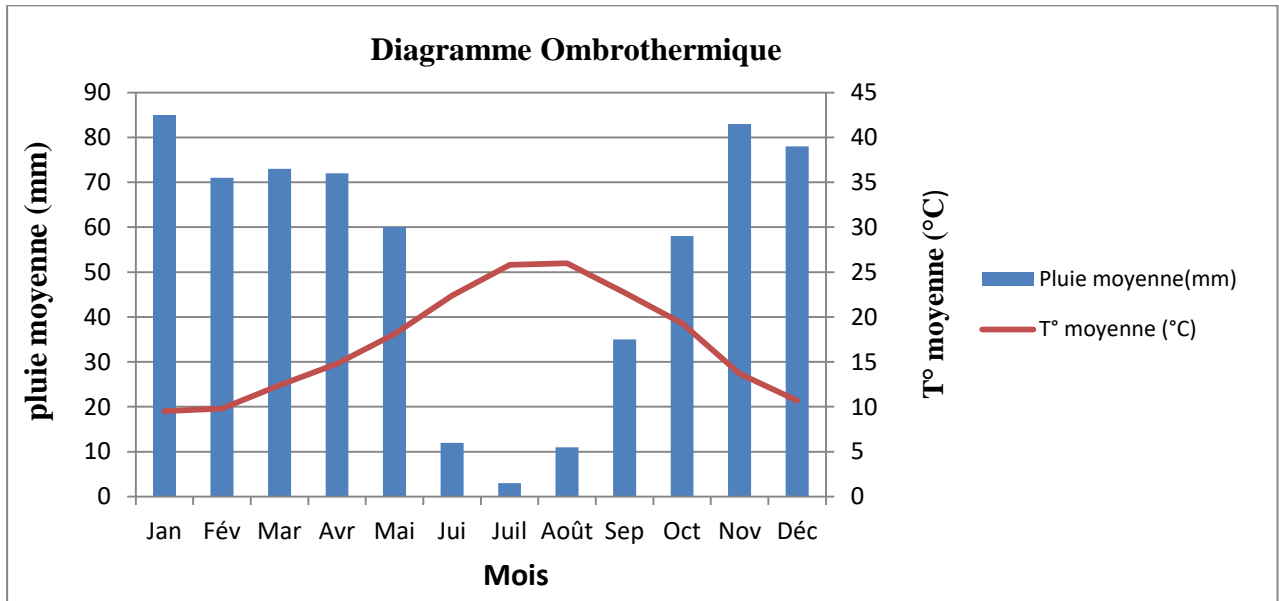


Figure (II.4) : graphique ombrothermique.

Les précipitations moyennes les plus faibles sont enregistrées en juillet avec 3 mm seulement. Une moyenne de 85 mm fait de mois de janvier le mois ayant le plus haut taux de précipitation.

- **L'humidité relative**

L'humidité relative ou l'hygrométrie est la quantité de vapeur d'eau présente dans l'air. Le tableau (II.3) donne les valeurs observées (en pourcentage) de l'humidité relative à la station climatologique de Blida.

Tableau (II.3): Humidité relative moyenne enregistrée à la station de Blida.

mois	jan	fév	mar	avr	mai	jui	juil	août	sep	oct	nov	déc
Humidité (%)	76	74	72	71	69	61	56	57	64	67	73	76

Le tableau montre que l'humidité relative variée entre 56% (enregistrée au mois de juillet) et 76% (enregistrée au mois de janvier et décembre), la moyenne annuelle est 68%.

- **Le vent**

Cette section traite du vecteur vent moyen horaire étendu (vitesse et direction) à 10 mètres au-dessus du sol. Le vent observé à un emplacement donné dépend fortement de la topographie locale et d'autres facteurs, et la vitesse et la direction du vent instantané varient plus que les moyennes horaires.

La vitesse horaire moyenne du vent à Blida connaît une variation saisonnière modérée au cours de l'année.

Chapitre II : Analyse des caractéristiques de la zone d'étude

La période la plus venteuse de l'année dure 6 mois, du 27 octobre au 27 avril, avec des vitesses de vent moyennes supérieures à 12,6 kilomètres par heure. Le mois le plus venteux de l'année à Blida est décembre, avec une vitesse horaire moyenne du vent de 14,1 kilomètres par heure.

La période la plus calme de l'année dure 6 mois, du 27 avril au 27 octobre. Le mois le plus calme de l'année à Blida est août, avec une vitesse horaire moyenne du vent de 11,1 kilomètres par heure.

Tableau (II.4): vitesse de vent moyenne.

Mois	jan	fév	mar	avr	mai	jui	jul	août	sep	oct	nov	déc
Vitesse de vent (km/h)	14	14	13.3	13	11.7	11.1	11.2	11.1	11.4	12.1	13.6	14.1

La direction horaire moyenne principale du vent à Blida varie au cours de l'année.

Le vent vient le plus souvent du nord pendant 3,6 mois, du 22 mai au 11 septembre, avec un pourcentage maximal de 36 % le 6 août. Le vent vient le plus souvent de l'est pendant 1,6 semaine, du 11 septembre au 22 septembre, avec un pourcentage maximal de 30 % le 12 septembre. Le vent vient le plus souvent de l'ouest pendant 8,0 mois, du 22 septembre au 22 mai, avec un pourcentage maximal de 42 % le 1 janvier.

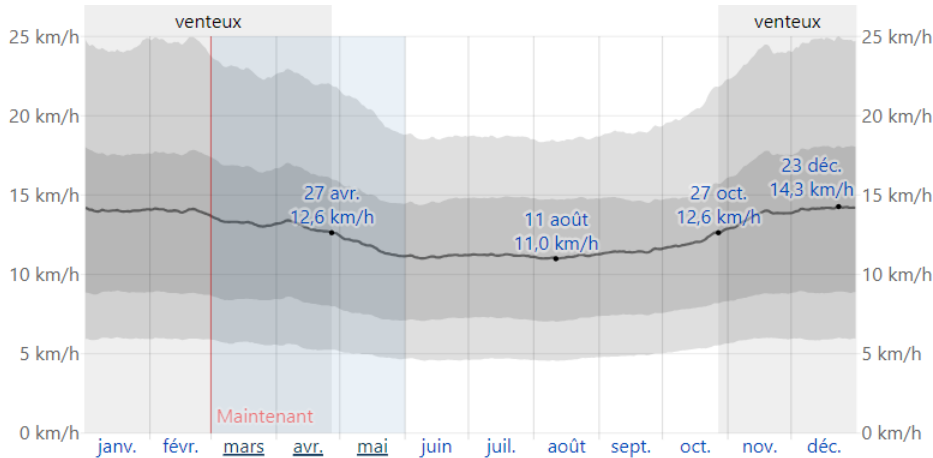


Figure (II.5) : La moyenne des vitesses des vents moyens horaires.

- ***L'insolation***

L'insolation ou l'ensoleillement signifie la quantité d'énergie solaire reçue par jour, qui veut dire le nombre d'heures d'exposition au soleil par jour. Les données sur l'insolation sont dans le tableau suivant :

Tableau (II.5): L'insolation journalière enregistrée à la station Blida.

Mois	jan	fév	mar	avr	mai	jui	jul	août	sep	oct	nov	déc
Insolation Tot moy (h)	5	6	6	7	8	9	10	10	8	7	5	5

Le tableau (II.5) indique qu'on est plus exposé au soleil au mois de juillet et août pendant 10 heures, l'ensoleillement atteint sa valeur minimale au mois de janvier, novembre et décembre avec 5 heures. La valeur moyenne annuelle d'insolation enregistrée est de 7.17 heures.

- ***La neige***

La neige est une forme de précipitations atmosphériques constituée de particules de glace ramifiées contenant de l'air. La neige se forme par condensation solide de la vapeur d'eau lorsqu'il y a suffisamment de froid et d'humidité dans l'atmosphère, elle apparaît du mois de décembre au mois de mars sur les hauteurs de la commune de Chréa.

- ***La pluviométrie***

Pour montrer la variation au cours des mois et pas seulement les totaux mensuels, nous montrons l'accumulation de pluie au cours d'une période glissante de 31 jours centrée sur chaque jour de l'année. Blida connaît des variations saisonnières considérables en ce qui concerne les précipitations de pluie mensuelles.

La période pluvieuse de l'année dure 9,4 mois, du 29 août au 10 juin, avec une chute de pluie d'au moins 13 millimètres sur une période glissante de 31 jours. Le mois le plus pluvieux à Blida est décembre, avec une chute de pluie moyenne de 59 millimètres.

La période sèche de l'année dure 2,6 mois, du 10 juin au 29 août. Le mois le moins pluvieux à Blida est juillet, avec une chute de pluie moyenne de 2 millimètres.

Tableau (II.6): la quantité de pluie moyenne à Blida.

Mois	jan	fév	mar	avr	mai	jui	jul	août	sep	oct	nov	déc
Pluie(mm)	54.4	54.8	43.9	42.3	33.2	9.7	2.5	7.2	23	36.8	55.3	59.4

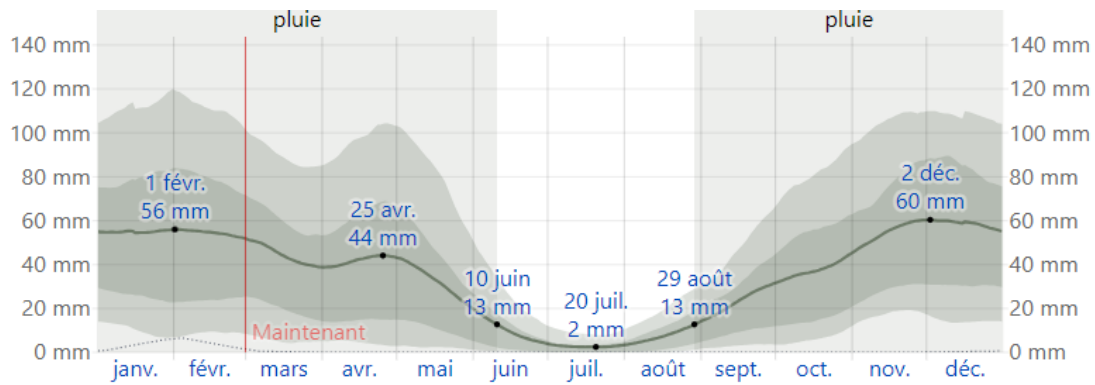


Figure (II.6) : La quantité de pluie moyenne.

II.3 Caractéristiques du bassin versant Oued Bouinan

II.3.1 Caractéristiques géométriques

Tableau (II.7): Les caractéristiques géométriques du bassin versant Oued Bouinan.

Surface « S » (Km ²)	Périmètre « P » (Km)	Côte maximale « H _{max} » (m)	Côte minimale « H _{min} » (m)	Dénivelée « ΔH » (m)
9.203	16.9	880.65	75.56	805.09

II.3.2 Paramètres de formes

La forme d'un bassin versant influence directement sur l'allure de l'hydrogramme à l'exutoire du bassin versant. Par exemple, une forme allongée favorise, pour une même pluie, les faibles débits de pointe de crue, ceci en raison des temps d'acheminement de l'eau à l'exutoire plus importants. Ce phénomène est lié à la notion du temps de concentration. En revanche, les bassins en forme ramassée, présentant un temps de concentration plus court, auront les plus forts débits de pointe. [13]

II.3.2.1 Indice de compacité de GRAVELIUS K_c (1914)

Le coefficient (l'indice) de compacité de GRAVELIUS et appelé aussi l'indice de forme. On l'établit en comparant le périmètre du bassin à celui d'un cercle qui aurait la même surface. Le coefficient " K_c " de GRAVELIUS est égal au rapport de ces deux grandeurs. C'est un paramètre qui renseigne sur la forme du bassin versant et à ce titre, a une influence majeure sur les débits de crue.

Si on désigne par "S" la surface du bassin versant en kilomètres carrés (km²) et par "P" son périmètre en kilomètres (km) on aura :

$$K_c = 0.28 \frac{P}{\sqrt{S}} \quad (II.1)$$

Avec :

- P : Le périmètre du bassin versant en [Km] ;
- S : L'aire du bassin versant en [Km²].
- Si : $1.5 < K_c < 1.80$: le bassin est de forme allongée ;
- Si : $1.0 < K_c < 1.15$: le bassin a une forme ramassée.

Pour notre bassin versant : $K_c = 1.56$, il est compris entre 1.5 et 1.8, donc le bassin est allongé.

Un bassin très allongé ne réagira pas de la même manière qu'un bassin de forme très ramassée ; Plus la forme du bassin versant est allongée et plus le temps de concentration augmente et vice-versa.

II.3.2.2 Rectangle équivalent

Cette notion permet la comparaison des bassins versants entre eux de point de vue de l'influence sur la forme d'écoulement. Il s'agit donc d'une transformation géométrique dans laquelle le contour du bassin devient un rectangle de même périmètre, les courbes de niveaux des droites parallèles aux petits côtés du rectangle et l'exutoire un des petits côtés du rectangle que nous avons appelé rectangle équivalent, soit :

- L_r et l_r : La longueur et la largeur du rectangle équivalent en [Km] ;
- P : Le périmètre du bassin versant en [Km] ;
- S : L'aire du bassin versant en [Km²].

Il se calcule comme suit :

$$L_r = K_c \frac{\sqrt{S}}{1.128} \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.128}{K_c} \right)^2} \right) \quad (\text{II.2})$$

$$l_r = K_c \frac{\sqrt{S}}{1.128} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.128}{K_c} \right)^2} \right) \quad (\text{II.3})$$

- K_c : Le coefficient de compacité de Gravelius.
- $L_r = 7,53$ km.
- $l_r = 1,38$ km.

II.3.2.3 Coefficient d'allongement

Le coefficient d'allongement détermine la réponse du bassin versant aux précipitations. Cette notion est explicitement utilisée dans la méthode de Caquot sous la forme d'un coefficient de correction de débit, donné par la formule.

$$E = \frac{L_r}{\sqrt{S}} \quad (\text{II.4})$$

Avec :

- E : Coefficient d'allongement
- L_r : La longueur du rectangle équivalent en [Km] ;
- S : L'aire du bassin versant en [Km²].
- E=2,48.

II.3.2.4 Indice de forme de Horton

Il est utilisé pour prédire l'intensité de l'écoulement à l'exutoire d'un bassin versant, un facteur de forme élevé (> 0.5) indique un bassin versant de forme plutôt circulaire, et un débit de pointe élevé d'une durée relativement courte, il exprime le rapport de la surface du bassin versant à la longueur du cours d'eau (talweg) principal (Horton, 1932).

$$K_H = \frac{S}{L_p^2} \tag{II.5}$$

- K_H : Indice de forme de Horton adimensionnel ;
- S : Surface du bassin versant en [km²] ;
- L_p : Longueur de cours d'eau (talweg) principal en [km].
- Si K_H < 1 : Bassin de forme allongée ;
- Si K_H > 1 : Bassin de forme ramassée.

Pour notre cas K_H = 0.15 donc c'est un bassin versant de forme allongée.

Tableau (II.8): Récapitulatif des paramètres de formes du sous bassin versant Oued Bouinan

paramètres de forme	Surface « S » (km ²)	Périmètre « P » (km)	Indice de Gravelius « K _c »	Longueur du rectangle équivalent « L _r » (km)	Largeur du rectangle équivalent « l _r » (km)	Coefficient d'allongement « E »	Indice de forme de Horton « K _H »	forme de BV
Sous bassin versant d'Oued Bouinan	9,203	16,9	1,5598	7,5327	1,2334	2,48	0,149	Allongée

II.3.3 Caractéristiques du relief

Le relief est défini par les courbes de niveau et caractérisé par la courbe hypsométrique ; il possède une influence directe sur les facteurs climatiques, et une influence indirecte sur la formation des écoulements en surface, il détermine l'aptitude au ruissèlement, à l'infiltration, à l'évaporation et au régime d'écoulement. Donc il caractérise le comportement hydraulique du bassin versant ; Une pente plus forte provoque un écoulement rapide donc un temps de concentration court. [13]

II.3.3.1 Courbe hypsométrique

Le relief d'un bassin est souvent caractérisé par la courbe de sa répartition hypsométrique ; qui fournit une vue synthétique de la pente et représente la répartition de la surface en fonction de son altitude et, qui permet de juger l'âge et le degré d'érosion d'un bassin versant. Cette courbe, qui porte en abscisse le pourcentage des surfaces (surfaces cumulées) du bassin qui se trouve au-dessus de l'altitude représentée en ordonnée. L'interprétation de l'aspect de la courbe hypsométrique est donnée en fonction du degré d'érosion associé à l'âge du bassin.

- (1) Les vieux bassins présentent de larges topographies pratiquement planes où l'altitude variée très peu et, présentent un potentiel érosif assez faible.
- (2) Les bassins, correspondant à la courbe du milieu, sont des bassins proches de l'état dit d'équilibre ou « mature ». Qui offrant un potentiel érosif moyen à faible.
- (3) Les bassins plus jeunes montrent une superficie faible par rapport au changement d'altitude initiale, ce qui est caractéristique des bassins abrupts où le potentiel érosif est assez important.

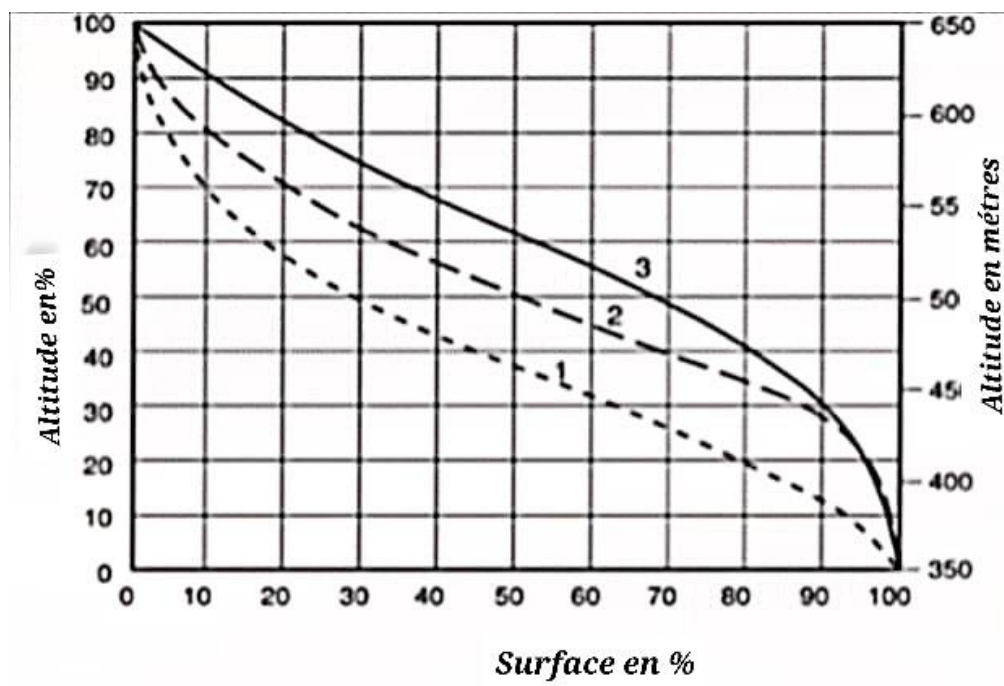


Figure (II.7) : État de maturité du relief des BV

Tableau (II.9): Répartition hypsométrique du bassin versant.

N°	Classe d'altitude (m)	Altitude moyenne (m) ($Alt_i + Alt_{i-1}$)/2	Surface élémentaire S_i (Km ²)	Surface cumulée $\sum S_i$ (Km ²)	Surface élémentaire S_i en (%)	Surface cumulée en (%)
1	75,56-100	87,5	1,325401	1,325401	14,401836	99,99645768
2	100-200	150	3,783096	5,108497	41,107204	85,59462132
3	200-300	250	1,573699	6,682196	17,099848	44,48741715
4	300-400	350	0,916823	7,599019	9,9622188	27,38756927
5	400-500	450	0,608345	8,207364	6,6102901	17,42535043
6	500-600	550	0,40317	8,610534	4,3808541	10,81506031
7	600-700	650	0,296386	8,90692	3,2205368	6,434206237
8	700-800	750	0,224734	9,131654	2,4419646	3,213669456
9	800-880,65	840	0,07102	9,202674	0,7717049	0,771704879

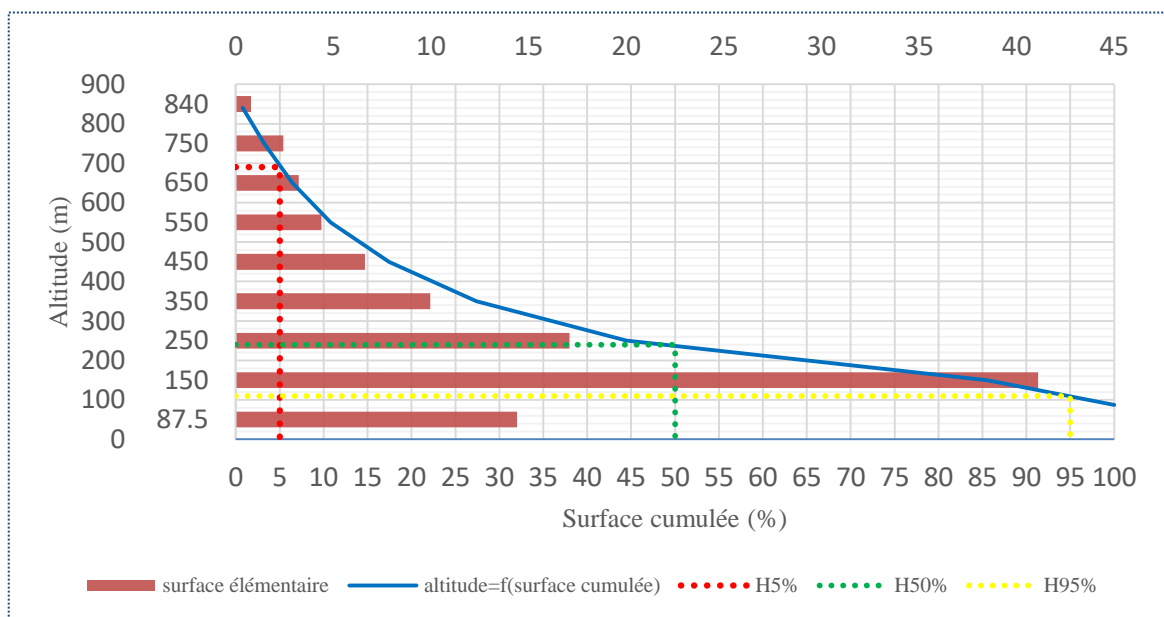


Figure (II.8) : Courbe hypsométrique et hypsogramme du bassin versant Oued Bouinan.

La forme de la courbe hypsométrique (tableau (II.9) et figure (II.8)) ressemble à celle d'un bassin vieux. Donc, ce bassin versant présente un potentiel érosif assez à faible.

II.3.3.2 Hauteurs caractéristiques

• **Altitudes maximale et minimale**

Elles se lisent directement sur la carte topographique, l'élévation maximale correspondant au point le plus haut du bassin versant amont, tandis que l'élévation la plus basse est en aval du bassin versant, correspondant au point le plus bas à l'exutoire.

- Altitude maximale : $H_{max} = 880.65m$;
- Altitude minimale : $H_{min} = 75.56m$;
- Dénivelée totale : $\Delta H = 805.09 m$.

• **Altitude moyenne du bassin versant**

Elle reflète l'influence de la zonalité climatique verticale ; elle est parfois utilisée pour évaluer certains paramètres hydro-climatiques où la mise en place de modèles hydrologiques et se calcule par la relation.

$$Alt_{moy} = \frac{\sum(S_i(Alt_i + Alt_{i-1}))}{2S} \quad (II.6)$$

- Alt_{moy} : Altitude moyenne du bassin versant [m] ;
- Alt_i : Altitude de la courbe de niveau i [m] ;
- Alt_{i-1} : Altitude de la courbe de niveau i-1 [m] ;
- S : Surface totale du bassin versant en [Km²] ;
- S_i : Surface partielle comprise entre deux (02) courbes de niveau consécutives n et n-1 en [Km²].

$Alt_{moy} = 251,50 m$.

Tableau (II.10): Résultats du calcul de l'altitude moyenne

N°	Altitude Alt_i (m)	$(Alt_i + Alt_{i-1})$ (m)	Surface S_i (km ²)	$S_i * (Alt_i + Alt_{i-1})$ (m.km ²)
0	880,65	-	-	-
1	800	1680,65	0,07102	119,35976
2	700	1500	0,224734	337,101
3	600	1300	0,296386	385,3018
4	500	1100	0,40317	443,487
5	400	900	0,608345	547,5105
6	300	700	0,916823	641,7761
7	200	500	1,573699	786,8495
8	100	300	3,783096	1134,9288
9	75,56	175,56	1,325401	232,6874
Somme			9,202674	4629,0019
2S		18,405348	$Alt_{moy}(m)$	251,50309

- **Altitude médiane**

L'altitude médiane correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 50 % de la surface totale du bassin, sur la courbe hypsométrique, cette grandeur se rapproche de l'altitude moyenne si la pente de la courbe est régulière.

- $H_{50\%} = 240\text{m}$.

- **Altitudes $H_{95\%}$ et $H_{5\%}$**

Les altitudes $H_{95\%}$ et $H_{5\%}$ sont obtenues depuis la courbe hypsométrique.

- $H_{95\%} = 110\text{ m}$;

- $H_{5\%} = 690\text{ m}$.

La dénivelée "d" est la différence d'altitudes entre deux points de la surface terrestre, donc c'est la différence entre $H_{5\%}$ et $H_{95\%}$.

$$d = H_{5\%} - H_{95\%} \quad (\text{II.7})$$

- $d = 690 - 110 = 580\text{ m}$.

- **Pente moyenne**

Est un indice important, elle donne l'aperçu sur la topographie du bassin versant. Elle influe directement sur le temps de concentration et le débit de pointe lors d'une averse.

- **Indice de pente moyenne « I_{moy} »**

$$I_{moy} = \frac{\Delta H}{L_r} \quad (\text{II.8})$$

- I_{moy} : Indice de pente moyenne en [m/km] ;

- ΔH : Dénivelée totale ($H_{max} - H_{min}$) en [m] ;

- L_r : Longueur du rectangle équivalent en [km] ;

- $I_{moy} = 106,87\text{ m/km}$.

- **Indice de pente globale « I_g »**

$$I_g = \frac{d}{L_r} \quad (\text{II.9})$$

- I_g : Indice de pente globale en [m/km] ;

- d : Dénivelée entre les altitudes en [m], elle est déterminée à partir de la courbe hypsométrique;

- Tel que : $d = H_{5\%} - H_{95\%}$;

- L_r : Longueur du rectangle équivalent en [km] ;

- $I_g = 76,99\text{ m/km}$.

Tableau (II.11): Classification du relief d'après O.R.S.T.O.M. (selon I_g).

Classe de relief	Type de relief	I_g (m/Km)
R1	Très faible	<2
R2	Faible	2-5
R3	Assez faible	5-10
R4	Modéré	10-20
R5	Assez fort	20-50
R6	Fort	50-100
R7	Très fort	>100

D'après le tableau (des classifications de l'office de la recherche scientifique et technique outre-mer (O.R.S.T.O.M), le relief du bassin versant Oued Bouinan est fort. .

- Dénivelée spécifique « D_s »

$$D_s = I_g \times \sqrt{S} \quad (\text{II.10})$$

- I_g : Indice de pente globale [m/km] ;
- S : Surface du bassin versant [km²] ;
- $D_s = 233,58$ m.

Tableau (II.12): Classification du relief d'après O.R.S.T.O.M (selon D_s).

Classe de relief	Type de relief	D_s (m)
R1	Très faible	<10
R2	Faible	10-25
R3	Assez faible	25-50
R4	Modéré	50-100
R5	Assez fort	100-250
R6	Fort	250-500
R7	Très fort	>500

D'après le tableau (II.12) des classifications d'O.R.S.T.O.M, le relief du bassin versant d'Oued Bouinan est assez fort.

- Pente moyenne du bassin versant

Plusieurs méthodes ont été développées pour estimer la pente moyenne d'un bassin. Toutes se basent sur une lecture d'une carte topographique réelle ou approximative. La méthode proposée par Carlier et Leclerc (1964) consiste à calculer la moyenne pondérée des pentes de toutes les surfaces élémentaires comprises entre deux altitudes données. Une valeur approchée de la pente moyenne est alors donnée par la relation suivante :

$$P_{\text{moy}} = \frac{L_{\text{cn}} \times \Delta h}{S} \quad (\text{II.11})$$

- P_{moy} : Pente moyenne [m/km] ;
- L_{cn} : Longueur totale des courbes de niveau [km] ;
- Δh : Équidistance entre deux courbes de niveau [m] ;

- S : Surface du bassin versant [km²].

- P_{moy}=180,617 m/km.

La pente est une caractéristique importante qui renseigne sur la topographie du bassin. Elle est considérée comme une variable indépendante. Elle donne une bonne indication sur le temps de parcours du ruissellement direct donc sur le temps de concentration "Tc" et influence directement le débit de pointe lors d'une averse. Le calcul de la pente moyenne est assez facilement automatisé en se basant sur des données numériques représentant la topographie des bassins versants (Modèle Numérique d'Altitude). Le recours à ces données et méthodes est vivement encouragé ; Elle est calculée dans le tableau (II.13).

Tableau (II.13): Résultats du calcul de la pente moyenne de B.V selon Carlier et Leclerc.

N°	courbes de niveaux		L _{cn} (km)
-	880,65	-	0,00
1	800	80,65	0,4785897
2	700	100	1,2189725
3	600	100	1,3789384
4	500	100	1,9022902
5	400	100	2,3863515
6	300	100	3,0913452
7	200	100	4,9403844
8	100	100	1,2252888
-	75,56	24,44	0
L _{cn} (km)			16,6221607
S (Bassin versant) (km ²)			9,203
Δ h (Équidistance) (m)			100
P _{moy} (Carlier et Leclerc) (m/km)			180,617

II.3.4 Caractéristiques hydrographiques

II.3.4.1 Chevelu hydrographique

La classification du réseau hydrographique est facilitée par un système de numérotation des tronçons de cours d'eau (talweg principal et affluents). Il existe plusieurs types de classifications des tronçons des cours d'eau, dont celle de Strahler (1957) qui est la plus utilisée.

Selon cette classification, le cours d'eau principal à l'exutoire de notre bassin versant est d'ordre cinq (05) par conséquent c'est l'ordre de ce dernier (figure (II.9)).

Les détails du chevelu hydrographique du bassin versant Oued Bouinan sont illustrés dans le tableau suivant : [13]

Chapitre II : Analyse des caractéristiques de la zone d'étude

Tableau (II.14): Chevelu hydrographique du bassin versant Oued Bouinan.

Ordre 1						Ordre 2				Ordre 3		Ordre 4		Ordre 5	
N°	L(m)	N°	L(m)	N°	L(m)	N°	L(m)	N°	L(m)	N°	L(m)	N°	L(m)	N°	L(m)
1	415,1	32	131	63	204	1	213,2	32	157,387	1	74,1301	1	268,88	1	637,1
2	289,7	33	258	64	201	2	63,11	33	76,4312	2	145,1418	2	187,61	2	2687.64
3	332,8	34	92,2	65	626	3	205,3	34	227,051	3	19,8739	3	444,49		
4	106,3	35	133	66	291	4	50,32	35	321,734	4	435,3386	4	84,758		
5	191,9	36	163	67	373	5	240,2	36	106,016	5	248,2989	5	347,43		
6	115,4	37	126	68	287	6	98,42	37	13,9494	6	215,869	6	151,36		
7	127,4	38	121	69	125	7	79,02	38	109,028	7	375,4353	7	244,25		
8	184,6	39	325	70	326	8	122,7	39	92,2832	8	302,6999	8	142,2		
9	136,8	40	99,7	71	298	9	213,7	40	103,917	9	43,5948	9	146,24		
10	473,5	41	174	72	129	10	189,2	41	137,773	10	267,2424	10	104,84		
11	333,3	42	93,7	73	337	11	172,6	42	211,67	11	415,2751	11	133,39		
12	149	43	182	74	426	12	134,2	43	217,527	12	128,5197	12	503,52		
13	211,3	44	128	75	227	13	101,2	44	56,3356	13	56,6475	13	166,69		
14	237	45	215	76	407	14	34,94	45	70,5501	14	276,375				
15	315,1	46	648	77	203	15	327,2	46	51,8266	15	361,1359				
16	95,01	47	188	78	44,2	16	140,9	47	75,3202	16	278,433				
17	71,83	48	261	79	147.73	17	20,38			17	236,5981				
18	338,1	49	89,6	80	204	18	61,1			18	334,0322				
19	192,4	50	83,9	81	233	19	236,9			19	10,1932				
20	144,1	51	203	82	207	20	19,03			20	233,1299				
21	385,3	52	73,4	83	357	21	92,12			21	135,8383				
22	270	53	342	84	219	22	63,42			22	48,8248				
23	182,9	54	90,2	85	255	23	251,4			23	77,1416				
24	195,3	55	81,6	86	227	24	41,61			24	225,7827				
25	444,9	56	159	87	145	25	43,6			25	337,8701				
26	394,6	57	120	88	123	26	207,1			26	187,7848				
27	387,9	58	285	89	77,8	27	9E+06			27	674,2832				
28	178,7	59	126	90	384	28	102,4			28	65,6038				
29	230,9	60	155	91	889	29	111,7								
30	98,51	61	119	92	1451	30	118,2								
31	155,9	62	186	93	975	31	172,7								

L : longueurs des cours d'eau [m].

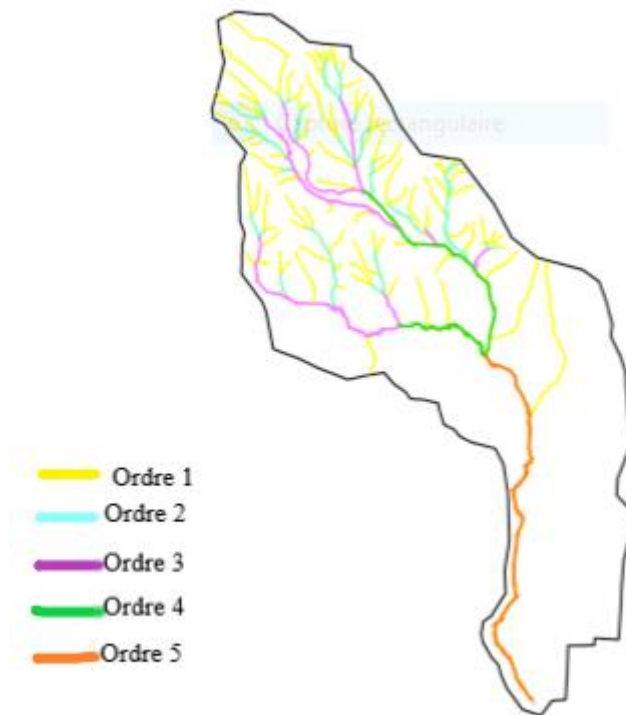


Figure (II.9) : Classification du réseau hydrographique du bassin versant Oued Bouinan.

II.3.4.2 Densité du drainage

La densité du drainage " D_d " est un rapport de la longueur totale de tous les cours d'eau (les talwegs) permanents et temporaires " $\sum L_i$ " à la surface du bassin versant " S ". C'est un paramètre qui reflète la dynamique du bassin, la stabilité du chevelu hydrographique et le type de ruissellement superficiel. La densité du drainage dépend de la géologie, des caractéristiques topographiques du bassin et, des conditions climatologiques et anthropiques.

La densité du drainage varie entre 3 et 4 pour des régions à développement très limité et elle dépasse 1000 pour des zones où l'écoulement est très ramifié avec peu d'infiltration. Elle est donnée par l'expression suivante :

$$D_d = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{S} \quad (\text{II.12})$$

- D_d : Densité du drainage en [km/km^2] ;
- L_i : Longueur de talweg i en [km] ;
- S : Surface du bassin versant en [km^2] ;
- $D_d = 2,62 \text{ km}/\text{km}^2$.

Plus la densité du drainage est élevée plus elle traduit l'existence d'un terrain imperméable favorisant le ruissellement.

Les valeurs de nombres et de longueurs, pour différents talwegs classifiés par leurs ordres, sont figurées dans le tableau suivant :

Tableau (II.15): Les longueurs des cours d'eau (des talwegs) du bassin versant Oued Bouinan.

Ordre	Nombre	Longueur (m)	Longueur (Km)
1	93	23090,0947	23,0900947
2	47	6859,7669	6,8597669
3	28	6211,0936	6,2110936
4	13	2925,641	2,925641
5	2	3323,7715	3,3237715
Total	183	42410,3677	42,4103677

II.3.4.3 Fréquence de talwegs d'ordre 1

La fréquence de talwegs d'ordre 1 est le rapport de nombre de talwegs d'ordre 1 a la surface. Elle est exprimée par la relation (II.13)

$$F_1 = \frac{N_1}{S} \quad (II.13)$$

- F_1 : Fréquence des talwegs d'ordre 1 ;
- N_1 : Nombre de talwegs d'ordre 1 ;
- S : Surface du bassin versant en $[km^2]$;
- $F_1 = 10.1 km^{-2}$.

II.3.4.4 Coefficient de torrentialité

Il désigne le produit de la densité du drainage par la fréquence de cours d'eau (talwegs) d'ordre élémentaire (d'ordre 1). Il se calcule comme suit :

$$C_t = D_d \times F_1 \quad (II.14)$$

- C_t : Coefficient de torrentialité $[km^{-3}]$;
- D_d : Densité du drainage en $[km/km^2]$;
- F_1 : Fréquence des talwegs d'ordre 1
- $C_t = 26,52 km^{-3}$.

II.3.4.5 Temps de concentration du bassin versant " Tc "

Le temps de concentration est utilisé pour mesurer la réponse d'un bassin versant à un événement pluvieux (réponse hydrologique). Il est défini comme le temps nécessaire à une goutte d'eau de pluie pour parcourir la distance depuis le point le plus éloigné de l'exutoire d'un bassin jusqu'à celui-ci.

- **Longueur du cours d'eau (talweg) principal " L_p "**

Est représentée par la distance curviligne depuis l'exutoire jusqu'à la ligne du partage des eaux, en suivant toujours le segment d'ordre le plus élevé lorsqu'il y a un embranchement et par extension du dernier jusqu'à la limite topographique du bassin versant. Si les deux segments à l'embranchement sont de même ordre, on suit celui qui draine la plus grande surface.

La longueur totale de cours d'eau principal (talweg) $L_p = 7.837\text{km}$.

- **Pente moyenne de cours d'eau (talweg) principal**

La pente moyenne du cours d'eau (talweg) détermine la vitesse avec laquelle l'eau se rend à l'exutoire du bassin donc le temps de concentration. Cette variable influence donc le débit maximal observé. Une pente abrupte favorise et accélère l'écoulement superficiel, tandis qu'une pente douce ou nulle donne à l'eau le temps de s'infiltrer, entièrement ou en partie, dans le sol.

Le calcul des pentes moyennes et partielles de cours d'eau s'effectue à partir du profil longitudinal de cours d'eau principal et de ses affluents. La méthode la plus fréquemment utilisée pour calculer la pente longitudinale du cours d'eau consiste à diviser la différence d'altitude entre les points extrêmes du profil par la longueur totale du cours d'eau.

$$I_{moy} = \frac{H_{max} - H_{min}}{L_p} \quad (\text{II.15})$$

- I_{moy} : Pente moyenne de cours d'eau (talweg) principal [m/m] ;

- H_{max} : Altitude maximale [m] ;

- H_{min} : Altitude minimale [m] ;

- L_p : Longueur du talweg principal [m] ;

- $I_{moy} = 0,1027$ m/m.

Plusieurs formules sont utilisées pour calculer le temps de concentration, parmi lesquelles on trouve :

Formule de GIANDOTTI

Cette relation a été développée en 1937, elle est exprimée par la formule :

$$T_c = \frac{a \times \sqrt{S} + b \times L_p}{c \times \sqrt{H_{max} - H_{min}}} \quad (\text{II.16})$$

- T_c : Temps de concentration [h] ;

- S : Surface du bassin versant [km²] ;

- L_p : Longueur de cours d'eau (talweg) principal [km] ;

- H_{moy} : Altitude moyenne du bassin versant [m] ;

- H_{min} : Altitude minimale du bassin versant [m] ;

- a = 4 ; b = 1.5 ; c = 0.8 (pour les grands et moyens bassins d'Afrique du Nord) ;
- $T_c = 2.25$ h.

Formule de KIRPICH

$$T_c = \frac{0.0195}{60} \times L_p^{0.77} \times I_{moy}^{-0.385} \quad (II.17)$$

- T_c : Temps de concentration [h] ;
- L_p : Longueur de cours d'eau (talweg) principal [m] ;
- I_{moy} : Pente moyenne de cours d'eau (talweg) principal [m/m] ;
- $T_c = 0.78$ h.

Formule de SOGREAH

$$T_c = \left(\frac{S \times L_p}{10 \times I_{moy}^{3/2}} \right)^{1/4} \quad (II.18)$$

- T_c : Temps de concentration [h] ;
- L_p : Longueur de cours d'eau (talweg) principal [m] ;
- I_{moy} : Pente moyenne de cours d'eau (talweg) principal [m/m] ;
- $T_c = 2,05$ h.

Formule de BEFFANI A.N

Exprimée par la relation :

$$T_c = \frac{L_p}{0.75 \times S^{1/5} \times I_{moy}^{1/3}} \quad (II.19)$$

- T_c : Temps de concentration [h] ;
- L_p : Longueur de cours d'eau (talweg) principal [km] ;
- S : Surface du bassin versant [km²] ;
- I_{moy} : Pente moyenne de cours d'eau (talweg) principal [m/km] ;
- $T_c = 1.43$ h.

Formule de TURAZZA-PASSINI

$$T_c = \frac{6.48}{60} \times \frac{\sqrt[3]{S \times L_p}}{\sqrt{I_{moy}}} \quad (II.20)$$

- T_c : Temps de concentration [h] ;
- S : Surface du bassin versant [km²] ;
- L_p : Longueur de cours d'eau (talweg) principal [km] ;
- I_{moy} : Pente moyenne de cours d'eau (talweg) principal [m/m] ;
- $T_c = 1,40$ h.

Le comparatif des résultats de différentes formules est inséré dans le tableau suivant :

Tableau (II.16): Comparaison des résultats des formules.

Temps de concentration	
Formule de GIANDOTTI	2,25134208
Formule de KIRPICH :	0,77781502
Formule de SOGREAH	2,05236974
Formule de BEFFANI A.N	1,43132362
Formule de TURAZZA-PASSINI	1,4026077
Moyenne	1,58309163

Le bassin versant Oued Bouinan est d'une petite superficie, subséquemment on opte pour le temps de concentration "T_c" obtenu par la moyenne des formules.

II.3.4.6 Vitesse du ruissellement

Prenant le temps de concentration obtenu par la formule développée par la moyenne des formules. Pour notre bassin versant objet d'étude, la vitesse du ruissellement "V_r" s'exprime par la formule suivante :

$$V_r = \frac{L_p}{T_c} \quad (II.21)$$

- L_p : Longueur du cours d'eau (talweg) principal [Km] ;
- T_c : Temps de concentration [h] ;
- V_r = 4,95 km/h ou (1.37 m/s).

II.3.5 Récapitulatif des caractéristiques de bassin versant

Tableau (II.17): Récapitulatif des caractéristiques morpho métriques et hydrographiques du bassin versant Oued Bouinan.

Désignation		Symboles	Unités	Valeurs
Superficie		S	Km ²	9,203
Périmètre		P	km	16,9
Longueur du Talweg principal		L _p	km	7,837
Indice de compacité		K _c	/	1,5598399
Rectangle équivalent	Longueur	L _r	km	7,5327599
	Largeur	l _r		1,3781116
Coefficient d'allongement		E	/	2,483072575
Altitudes	Maximale	H _{max}	m	880,65
	Moyenne	H _{moy} (Alt _{moy})	m	251,80309
	Minimale	H _{min}	m	75,56
	Médiane 50 %	H _{50%}	m	240
	Altitude 95 %	H _{95%}	m	110
	Altitude 5 %	H _{5%}	m	690

Tableau (II.17): Récapitulatif des caractéristiques morpho métriques et hydrographiques du bassin versant Oued Bouinan (suite).

Désignation	Symboles	Unités	Valeurs
Indice de pente moyenne	I_{moy}	m/km	106,8784897
Indice de pente globale	I_g	m/km	76,99701153
Dénivelée spécifique	D_s	m	233,5815738
Pente moyenne de BV	P_{moy}	m/km	180,617
Densité du drainage	D_d	km/km ²	2,62427932
Fréquence de talwegs d'ordre 1	F_1	Km ⁻²	10,1054004
Coefficient de torrentialité	C_t	Km ⁻³	26,5193933
Pente moyenne du cours d'eau (talweg) principal	I_{moy}	m/m	0,10272936
Temps de concentration	T_c	h	1,58309163
Vitesse du ruissellement	V_r	Km/h	4,950439916

II.4 Conclusion:

L'Oued BOUINAN est situé à la commune de Bouinan au centre de la wilaya de Blida, le bassin versant d'Oued BOUINAN à une superficie de 9,203 km², un périmètre 16,9 km, une forme allongée est caractérisée par un temps 1.58 h son relief est assez fort avec une vitesse de ruissèlement fort égale à 4,95 km/h.

Après avoir défini les différentes caractéristiques de la zone d'étude soient : climatique géographique et hydrographique ; on va maintenant commencer notre étude en se basant sur ces derniers résultats.

Chapitre III:
Traitement statistique
des données et étude
des apports

III.1 Introduction

L'étude hydrologique a pour objet principal de caractériser le comportement hydrologique de l'oued et les débits de référence à prendre en compte pour faciliter l'étude du projet d'aménagement de l'oued, dans le but d'éviter une surestimation du débit à évacuer.

En conséquence, les éléments suivant sont traités:

- Collecte et analyse des données hydrologique à l'échelle du bassin versant (station pluviométrique, estimation des pluies et des débits liquides par des méthodes appropriées).
- Détermination sur la base d'une méthodologie appropriée, des débits de crues pour différentes périodes de retour (T=5ans, T=10ans, T=20ans, T=50ans et T=100ans).

III.2 Série pluviométrique de Soumaa

Dans l'étude d'un projet d'aménagement, l'analyse des données pluviométriques disponibles est la première étape à considérer. Pour cela on a besoin d'une série pluviométrique :

- Qui comporte le maximum de valeurs de précipitation journalières pour la plus longue période possible ;
- Qui sera très proche de la zone objet d'étude.

Notre étude sera basée sur les données enregistrées au niveau de la station pluviométrique de Soumaa. Le pluviomètre de la station a fonctionné pendant 27 ans de 1993 à 2019. La série pluviométrique de la station Soumaa est donnée dans le tableau suivant :

Tableau (III.1): Série pluviométrique de la station Soumaa.

Station : Soumaa ; Code ANRH : 021234 ; Coordonnées : X= 517.45 m ; Y=355.9m ; Z= 177 m ; Période : 1993-2019							
OBS	Année	P _{an} (mm)	P _{j,max} (mm)	Obs	Année	P _{an} (mm)	P _{j,max} (mm)
Obs1	1993	524,6	68,6	Obs16	2008	811,7	72
Obs2	1994	904,5	53,3	Obs17	2009	748,8	41
Obs3	1995	859,5	94,4	Obs18	2010	790,8	49,4
Obs4	1996	396	53,1	Obs19	2011	867,3	68,6
Obs5	1997	889,9	68,5	Obs20	2012	793,5	108
Obs6	1998	549,5	33,7	Obs21	2013	588,3	50
Obs7	1999	489,4	39,5	Obs22	2014	610,1	47
Obs8	2000	608,9	39,2	Obs23	2015	626,5	48,5
Obs9	2001	487,8	35,3	Obs24	2016	687,2	60
Obs10	2002	957,8	60,5	Obs25	2017	882,2	81
Obs11	2003	773,8	63,4	Obs26	2018	660,8	71
Obs12	2004	652,2	54,1	Obs27	2019	646,2	63
Obs13	2005	760,8	89,5				
Obs14	2006	678,1	39,2				
Obs15	2007	636,8	49,1				

III.2.1 Traitement des données de la pluviométrie

Les données pluviométriques permettent d'évaluer le facteur pluviomètre au niveau du bassin versant de Bouinan.

Le traitement des données passe par les étapes suivantes :

- Présentation de la série de précipitation par ordre croissant.
- Calcul des caractéristiques empirique de la série des donner.
- Calcul de la fréquence expérimentale.
- Ajustement graphique de la loi choisie.
- Calcul des quantiles et son intervalle de confiance. [4]

III.2.2 Présentation des caractéristiques de la série

Les caractéristiques empiriques de la série de donnée ont été obtenues par le logiciel HYFRAN et sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau (III.2): Caractéristiques de la série pluviométrique de la station de Soumaa.

Nombre d'observations	27
Minimum	33,7
Maximum	108
Moyenne	59,3
Ecart-type	18,6
Médiane	54,1
Coefficient de variation (C_v)	0,314
Coefficient d'asymétrie (C_s)	0,875
Coefficient d'aplatissement (C_k)	3

La représentation des observations sur des papiers normaux et leur histogramme sont présentées dans les figures (III.1) et (III.2) respectivement :

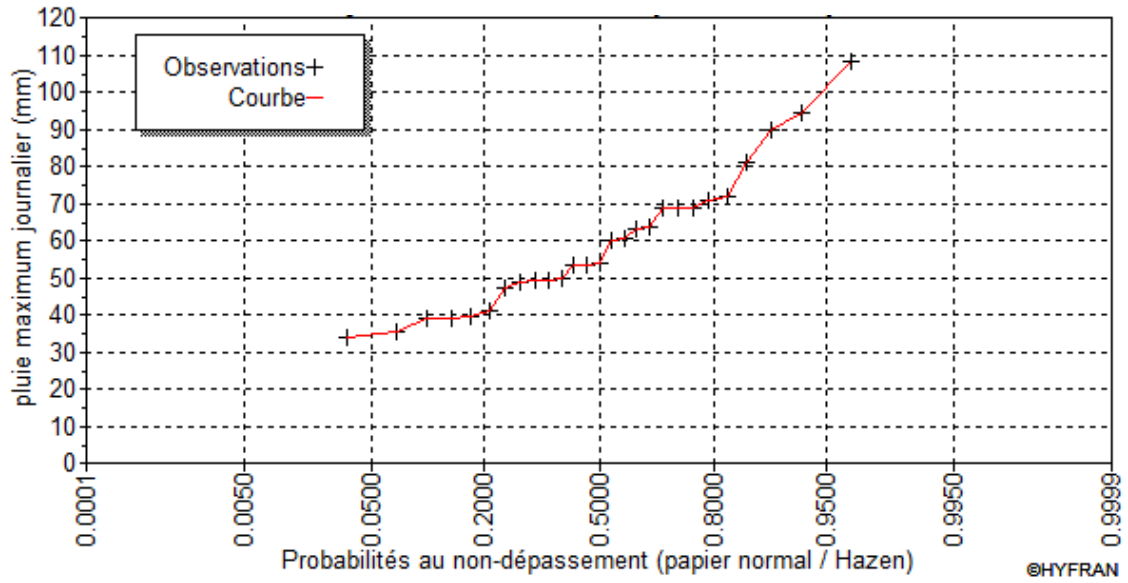


Figure (III.1) : Représentation des observations sur papier normal

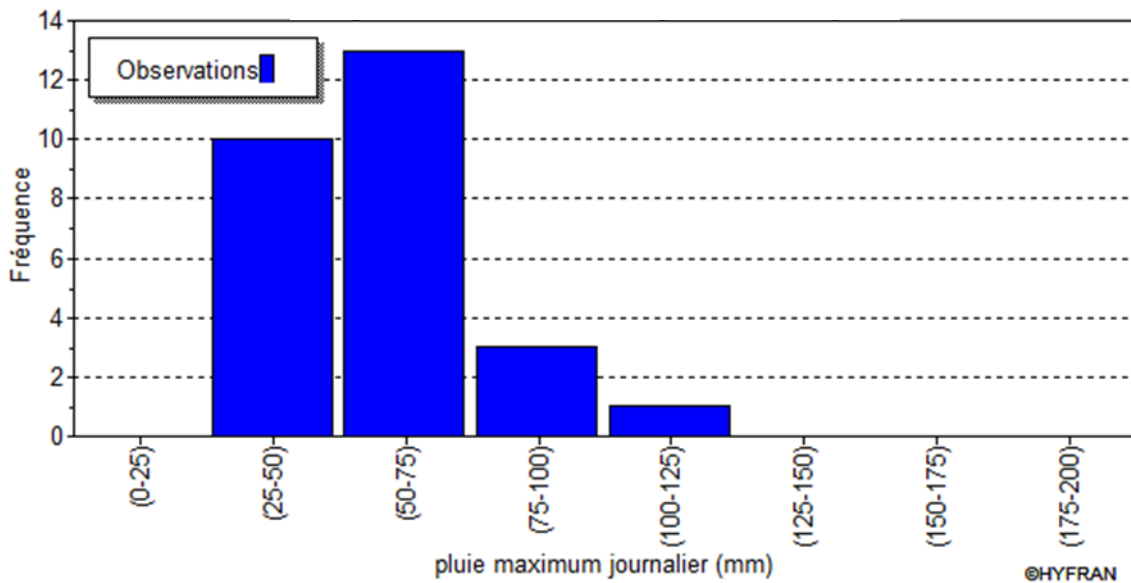


Figure (III.2): Histogramme des observations.

III.2.3 Choix de la loi d'ajustement

Comme il existe plusieurs méthodes d'ajustement des séries pluviométriques, l'efficacité d'une méthode d'estimation dépend de la loi de probabilité, de la taille de l'échantillon et de certaines caractéristiques de l'échantillon. Toutefois, de nombreuses études comparatives, autant empiriques que théoriques, ont été menées afin de déterminer dans quelles circonstances une méthode d'estimation est la plus efficace pour une loi donnée.

Dans notre travail, on choisit les deux lois suivantes :

- La loi de GALTON (log-normal).
- La loi de GUMBEL.

L'ajustement des pluies maximales journalières sera traité par logiciel Hyfran.

La vérification de l'homogénéité de la série est indispensable avant de passer à l'ajustement. Un échantillon est dit homogène si les données dans les sous échantillons sont égales pour une période de retour donnée. D'après le test d'homogénéité de Wilcoxon intégré au logiciel Hyfran, la série des pluies maximales journalières est homogène. [2]

III.2.3.1 Ajustement de la série pluviométrique à la loi de GALTON

Le procédé d'ajustement est établi avec une représentation sur du papier log normale. La loi de GALTON a une fonction de répartition qui s'exprime selon la fonction suivante :

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u e^{-0.5u^2} du \quad (III.1)$$

Ou : (U : variable réduite de gaussie)

$$U = \frac{\ln X_i - \ln \bar{X}}{\sigma} \quad (III.2)$$

L'équation de la droite de GALTON est la suivante :

$$\ln X(p\%) = \ln(\bar{X}) + \sigma * \ln u(p\%) \quad (III.3)$$

$$\ln \bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{27} \ln X_i}{N} \quad (III.4)$$

- \bar{X} : La moyenne de l'échantillon ;
- σ = L'écart-type de l'échantillon.

Avant de procéder à l'ajustement il faut suivre les étapes suivantes :

- classer les valeurs des précipitations par ordre croissant avec attribution d'un rang 1.2.3.4.5.....n.
- calculer pour chaque valeur de précipitation la fréquence expérimentale par la formule de HAZEN :

$$F(x) = \frac{m-0.5}{n} \quad (III.5)$$

Avec :

- m : Rang de précipitation ;
- n : Nombre d'observations (27).

- Calculer la variable réduite de GALTON donnée par la formule suivante :

$$U = \frac{\ln X_i - \ln \bar{X}}{\sigma}$$

GALTON (log-Normale) (Maximum des vrais semblances) :

Nombre d'observation : n = 27

q=F(x) (probabilité au non dépassement)

T= 1/(1-q).

Les résultats d'ajustement obtenus par la loi de GALTON sont représentés dans le tableau et le graphique suivant :

Tableau (III.3): Résultats de l'ajustement à la loi de GALTON

T	q	XT	Ecart-type	Intervalle de confiance (95%)
10000	0,9999	175	29,2	118-232
2000	0,9995	154	23,1	108-199
1000	0,999	145	20,6	104-185
200	0,995	124	15,2	93,9-154
100	0,99	115	13,1	89,1-140
50	0,98	106	11	84,1-127
20	0,95	93,3	8,44	76,8-110
10	0,9	83,6	6,63	70,6-96,6
5	0,8	73,2	4,99	63,4-82,9
3	0,6667	64,6	3,94	56,9-72,3
2	0,5	56,7	3,31	50,2-63,2
1,4286	0,3	48,4	3,01	42,5-54,3
1,25	0,2	43,9	3	38,1-49,8
1,1111	0,1	38,4	3,05	32,5-44,4
1,0526	0,05	34,4	3,11	28,3-40,5
1,0204	0,02	30,4	3,17	24,2-36,6
1,0101	0,01	28	3,19	21,8-34,3
1,005	0,005	26	3,19	19,7-63,2
1,001	0,001	22,2	3,16	16-28,4
1,0005	0,0005	20,9	3,14	14,8-27,1
1,0001	0,0001	18,4	3,06	12,4-24,4

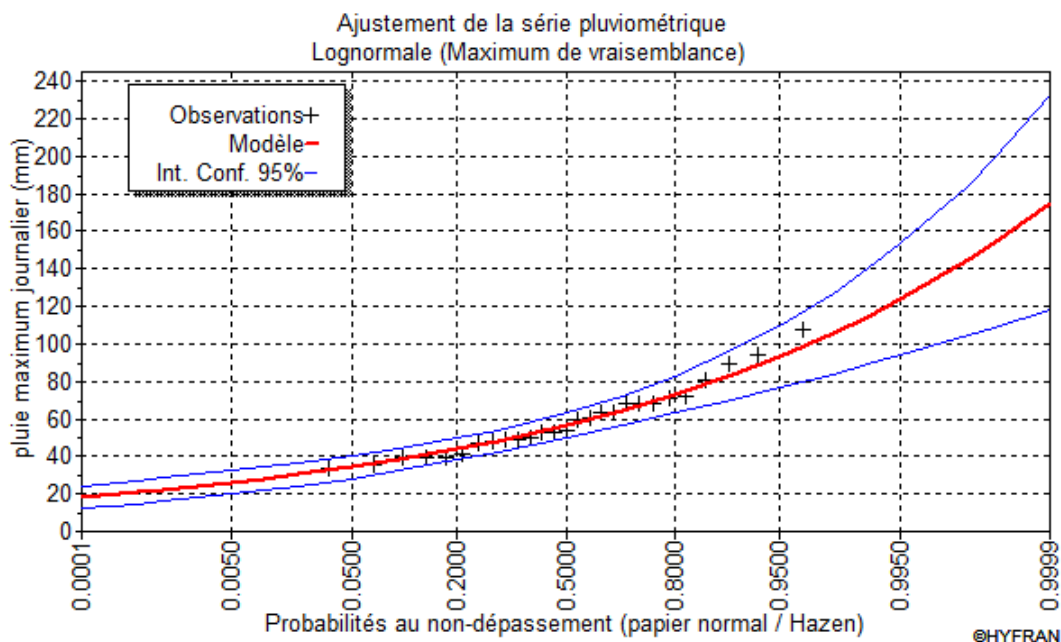


Figure (III.3) : Ajustement à la loi de GALTON (log normal).

Tableau (III.4): comparaison des Caractéristiques de l'échantillon.

GALTON (maximum de vraisemblance)	Caractéristique de la loi	Caractéristiques de l'échantillon
Minimum	0	33,7
Maximum	Aucun	108
Moyenne	59,4	59,3
Ecart-type	18,4	18,6
Médiane	56,7	54,1
Coefficient de variation (C_v)	0,31	0,314
Coefficient d'asymétrie (C_s)	0,96	0,875
Coefficient d'aplatissement (C_k)	4,68	3

Tableau (III.5): Résultat d'ajustement par la loi de Galton pour les périodes de retour Appropriées.

Période de retour (ans)	5	10	20	50	100
Fréquence	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99
Valeur du P_j .max (mm)	73,2	83,6	93,3	106	115

III.2.3.2 Ajustement de la série pluviométrique à la loi de GUMBEL

Le procédé d'ajustement est identique à celui établi pour la loi de GALTON. Seule la représentation graphique change ou elle est faite sur du papier (Gumbel/Hazen). La loi de GUMBEL a une fonction de répartition qui s'exprime selon la formule suivante :

$$F(x) = e^{-e^{-y}} \quad (III.6)$$

Tel que :
$$y = a(x - x_0) \tag{III.7}$$

- $1/\alpha$: La pente de la droite de Gumbel ;
- y : Variable réduite de GUMBEL ;
- x : Précipitation maximale journalière (mm) ;
- x_0 : Ordonnée à l'origine en (mm).

On peut écrire :

$$Y = -\ln(-\ln(F(x))) \tag{III.8}$$

Avant de procéder à l'ajustement il faut suivre les étapes suivantes :

- Classement des valeurs par ordre croissant en leur affectant un numéro d'ordre.
- Calculer la fréquence expérimentale en utilisant la formule de cumule qui s'applique Pour les lois normales et quasi normales :

$$F(x) = \frac{m - 0.5}{n}$$

- m : rang de précipitation ;
- n : nombre d'observation (27).

- Calculer la variable de GUMBEL pour chaque valeur observée.

$$Y = -\ln(-\ln(F(x)))$$

Gumbel (Méthode des moments) :

Nombre d'observation : $n = 27$

$q = F(X)$ (probabilité au non dépassement).

$T = 1 / (1 - q)$ (période de retour).

Les résultats d'ajustement obtenus par la loi de Gumbel sont représentés dans le tableau et le graphique suivant :

Tableau (III.6) : Résultat de l'ajustement à la loi de GUMBEL.

T	q	XT	Ecart-type	Intervalle de confiance (95%)
10000	0,9999	185	27,4	131-238
2000	0,9995	161	22,7	117-206
1000	0,999	151	20,7	111-192
200	0,995	128	16	96,3-159
100	0,99	118	14	90,1-145
50	0,98	108	12,1	83,9-131
20	0,95	94	9,44	75,5-113
10	0,9	83,6	7,48	68,9-98,2

Tableau (III.6): Résultat de l'ajustement à la loi de GUMBEL.

T	q	XT	Ecart-type	Intervalle de confiance (95%)
5	0,8	72,7	5,53	61,8-83,5
3	0,6667	64	4,18	55,8-72,2
2	0,5	56,2	3,29	49,8-62,7
1,4286	0,3	48,2	3,02	42,3-54,1
1,25	0,2	44	3,21	37,7-50,3
1,1111	0,1	38,8	3,72	31,5-46,1
1,0526	0,05	35	4,22	26,7-43,3
1,0204	0,02	31,1	4,8	21,7-40,5
1,0101	0,01	28,8	5,18	18,6-38,9
1,005	0,005	26,7	5,52	15,9-37,5
1,001	0,001	22,9	6,18	10,8-35
1,0005	0,0005	21,5	6,43	8,89-34,1
1,0001	0,0001	18,7	6,93	5,12-32,2

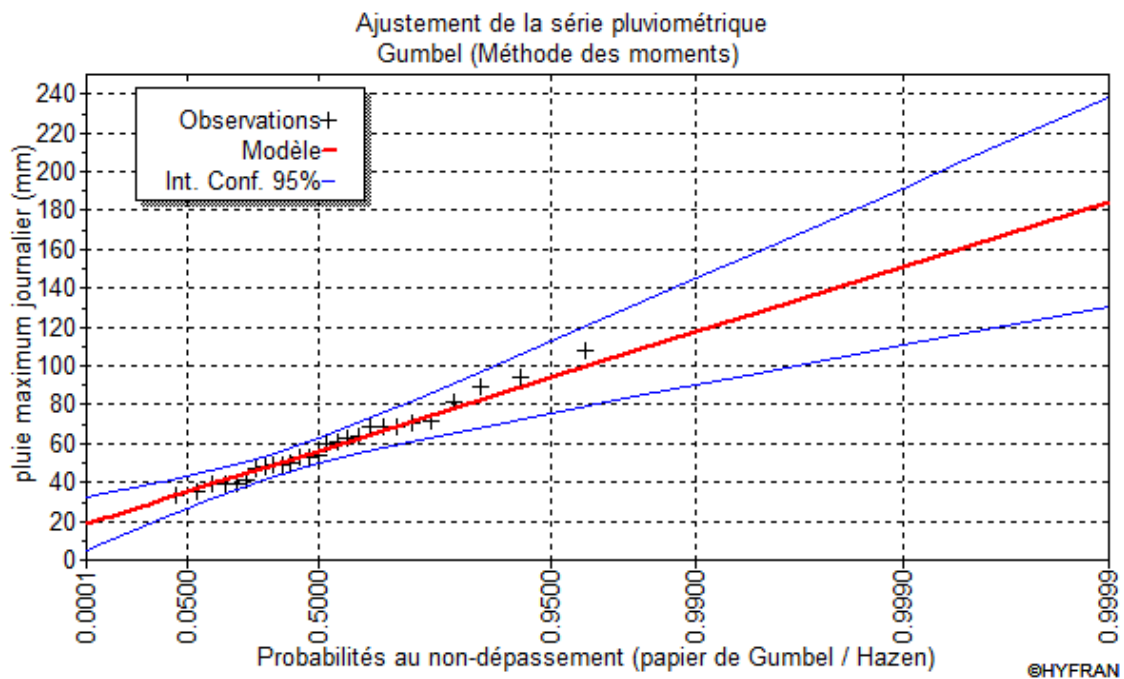


Figure (III.4) : Ajustement pas la loi de Gumbel.

Tableau (III.7): Comparaison des caractéristiques de loi et de l'échantillon.

Gumel (méthode des moments)	Caractéristique de la loi	Caractéristiques de l'échantillon
Minimum	Aucun	33,7
Maximum	Aucun	108
Moyenne	59,3	59,3
Ecart-type	18,6	18,6
Médiane	56,2	54,1
Coefficient de variation (C_v)	0,314	0,314
Coefficient d'asymétrie (C_s)	1,14	0,875
Coefficient d'aplatissement (C_k)	2,4	3

Tableau (III.8): Résultat d'ajustement par la loi de Gumbel pour les périodes de retour Appropriées.

Période de retour (ans)	5	10	20	50	100
Fréquence	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99
Valeur du Pj.max (mm)	72,7	83,6	94	108	118

Comparaison entre deux lois d'ajustement :

La figure suivante montre la comparaison entre les deux lois d'ajustement. (Loi de Gumbel qu'est présenté par la couleur blue et loi de Galton en couleur vert).

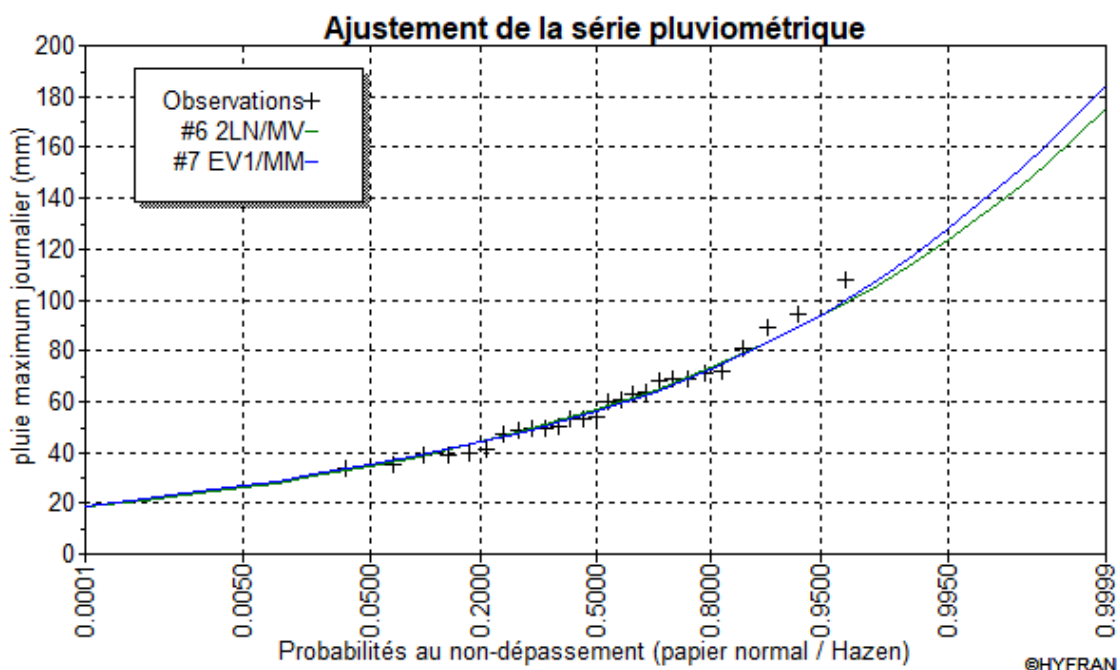


Figure (III.5): Comparaison entre deux lois d'ajustement.

Tableau (III.9): Comparaison entre deux lois d'ajustement :

Période de retour (ans)	5	10	20	50	100
Fréquence	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99
Valeur du $P_{j,max}$ (mm) (GUMBEL)	72,7	83,6	94	108	118
Valeur du $P_{j,max}$ (mm) (GALTON)	73,2	83,6	93,3	106	115

En se référant aux graphes et au tableau (III.9), obtenus par ces deux lois celui de GUMBEL et GALTON, nous avons remarqué que l'ajustement par ces deux lois donne des résultats très proche ; Alors on opte pour la loi de GUMBEL.

III.3 Les pluies de courte durée

Nous passons des pluies journalières maximales aux pluies de courte durée de même Fréquence en utilisant la relation suivante :

$$P_t = P_{j,max} \times \left(\frac{t}{24}\right)^\beta \quad (III.9)$$

Où :

- P_t : pluie de courte durée de fréquence donnée, (mm) ;
- $P_{j,max}$: pluie journalière maximale de même fréquence, (mm) ;
- t : Temps en heure [h].
- β : Exposant climatique calculé par la formule :

$$\beta = 1 + \frac{\ln\left(\frac{P_{j,max}}{24}\right) - \ln(25)}{\ln(24) - \ln(0.5)} \quad (III.10)$$

L'intensité maximale de pluies est donnée par la formule suivante :

$$I_t = \frac{P_t}{t} \quad (III.11)$$

- I_t : Intensité maximale [mm/h] ;
- t : Durée par heure [h] ;
- P_t : Pluie de courte durée [mm].

Les pluies de courte durée et les intensités maximales pour différentes durées et différentes périodes de retour sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau (III.10): Pluies et intensités maximales de durée t (h) et de périodes retour T (ans).

PDR	5 ans		10 ans		20 ans		50 ans		100 ans	
β	0,38									
$P_{j,max}$	72,2		83,6		94		108		118	
t(h)	P_t	I_t	P_t	I_t	P_t	I_t	P_t	I_t	P_t	I_t
0,5	16,7	33,4	19,2	38,4	21,59	43,18	24,81	49,61	27,1	54,205
1	21,73	21,73	24,99	24,99	28,1	28,1	32,28	32,28	35,27	35,27
1,58	25,85	16,36	29,73	18,82	33,43	21,16	38,41	24,31	41,97	26,56
2	28,28	14,14	32,52	16,26	36,56	18,28	42,01	21	45,9	22,949
3	32,99	11	37,93	12,64	42,65	14,22	49,01	16,34	53,54	17,848
4	36,8	9,2	42,32	10,58	47,58	11,9	54,67	13,67	59,73	14,932
5	40,06	8,011	46,06	9,212	51,79	10,36	59,5	11,9	65,01	13,003
6	42,93	7,155	49,37	8,228	55,51	9,251	63,77	10,63	69,68	11,613
7	45,52	6,503	52,34	7,478	58,86	8,408	67,62	9,66	73,88	10,555
8	47,89	5,986	55,07	6,884	61,92	7,74	71,14	8,893	77,73	9,716
9	50,08	5,564	57,59	6,399	64,75	7,195	74,4	8,266	81,29	9,0317
10	52,13	5,213	59,94	5,994	67,4	6,74	77,44	7,744	84,61	8,4606
11	54,05	4,913	62,15	5,65	69,88	6,353	80,29	7,299	87,73	7,9751
12	55,87	4,655	64,24	5,353	72,23	6,019	82,99	6,916	90,68	7,5563
13	57,59	4,43	66,23	5,094	74,46	5,728	85,55	6,581	93,48	7,1905
14	59,24	4,231	68,12	4,865	76,59	5,471	88	6,286	96,15	6,8676
15	60,81	4,054	69,93	4,662	78,63	5,242	90,34	6,022	98,7	6,58
16	62,32	3,895	71,66	4,479	80,58	5,036	92,58	5,786	101,2	6,3219
17	63,77	3,751	73,33	4,314	82,46	4,85	94,74	5,573	103,5	6,0887
18	65,17	3,621	74,94	4,163	84,27	4,681	96,82	5,379	105,8	5,8767
19	66,52	3,501	76,5	4,026	86,01	4,527	98,83	5,201	108	5,683
20	67,83	3,392	78	3,9	87,71	4,385	100,8	5,039	110,1	5,5051
21	69,1	3,291	79,46	3,784	89,35	4,255	102,7	4,888	112,2	5,341
22	70,34	3,197	80,88	3,676	90,94	4,134	104,5	4,749	114,2	5,1892
23	71,53	3,11	82,26	3,576	92,49	4,021	106,3	4,62	116,1	5,0481
24	72,7	3,029	83,6	3,483	94	3,917	108	4,5	118	4,9167

Ci-après les deux graphiques représentant les courbes des pluies à courte durée et d'intensité pour différentes période de retour.

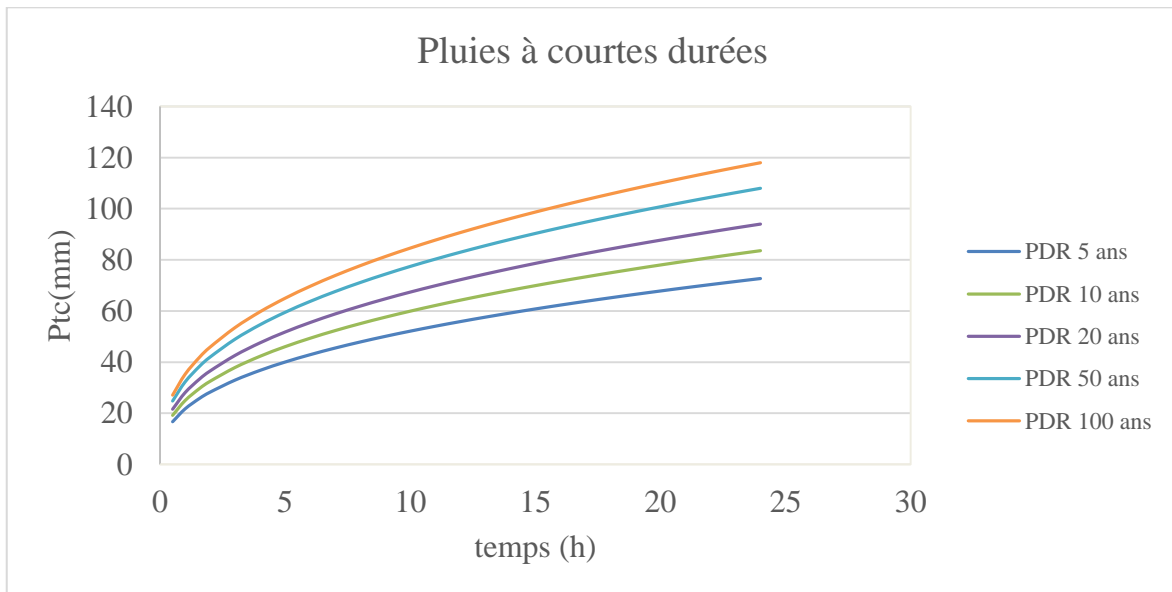


Figure (III.6) : Courbes de pluies fréquentielles

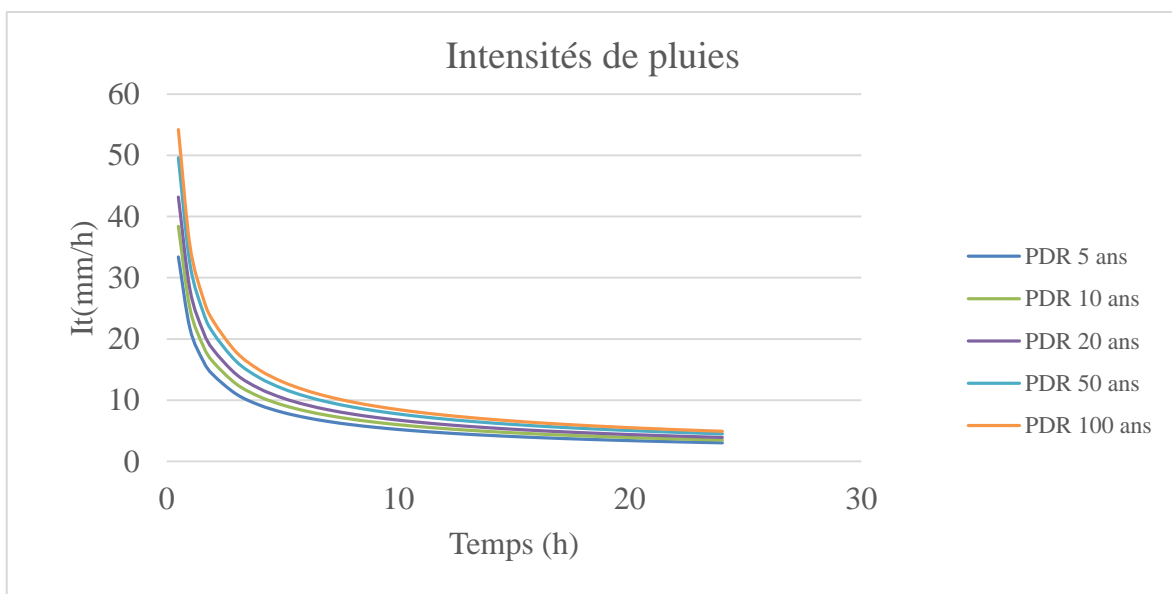


Figure (III.7) : Courbes d'intensité pour différentes durées et fréquences.

III.4 Apport annuel

La détermination des apports annuels est orientée de préférence aux observations hydrométriques, quand elles existent sur le bassin versant propre du site étudié ou par analogie avec un bassin voisin. A défaut de ces dernières, des modèles et des formules empiriques basés sur la pluviométrie devront être appliqués, ces modèles dépendent de la précipitation et du déficit. [4]

III.4.1 Estimation de l'apport moyen annuel interannuelle

L'apport moyen interannuel est estimé par l'utilisation des formules empiriques, des différents auteurs, suivantes :

Formule DE COUTAGNE (1948)

Les relations de Coutagne déterminent la lame d'eau d'écoulement. Coutagne propose 3 types de relations non linéaires, qui suivent :

Formule de COUTAGNE II

La relation qui prend en compte la pluie annuelle, elle est donnée par la formule :

$$L_e = 1,024 \times (P_A - 0.26)^2 \quad (\text{III.12})$$

- L_e : lame d'eau (m) ;

- P_A : pluies annuelles en m.

Formule de COUTAGNE III

La relation qui prend en compte la pluie annuelle et la surface de bassin versant, elle est donnée par la formule :

$$L_e = (0,164 - 0,00145\sqrt{S}) \times P_A \quad (\text{III.13})$$

- L_e : lame d'eau (m) ;

- P_A : pluies annuelles en m ;

- S : superficie de bassin (Km^2).

Formule de COUTAGNE I

La relation qui prend en compte la zone géographique, les pluies annuelles et la pluie minimale pour provoquer le ruissellement, elle est donnée par la formule :

$$L_e = \lambda(P_A - P_0) \quad (\text{III.14})$$

- L_e : lame d'eau (m) ;

- P_0 : pluies minimale, donnant naissance au ruissèlement en m ;

- P_A : pluies annuelles en m ;

- λ : Coefficient, variant en fonction des zones géographique et des pluies annuelles.

Pour le nord de l'Algérie, pour une pluviométrie annuelle allant de 409 jusqu'à 826 mm Gautier en 1948, (Saidi, 1990) donne $\lambda=0.75$ et $P_0=400\text{mm}$.

Coutagne en 1948 préconise de prendre : $\lambda=0.736$ et $P_0=404$ mm.

Pour une pluviométrie annuelle supérieure à 450 mm, Samie (Samie 1967) donne : $\lambda=0.694$ et $P_0=434$ mm. On prend $\lambda=0.736$ et $P_0=404$ mm de Coutagne.

Formule de SAMIE II

$$L_e = P_{\text{moy}}^2 \times (293 - 2,2 \times \sqrt{S}) \quad (\text{III.15})$$

Avec :

- P_{moy} : Pluie moyenne annuelle (mm) ;
- S : Superficie du bassin versant (Km²) ;
- L_e : lame d'eau écoulée (mm).

Formule de L'ANRH

$$A_0 = 0,915 \times P_{\text{moy}}^{2,684} \times S^{0.842} \quad (\text{III.16})$$

Avec :

- S : Superficie du bassin versant (Km²) ;
- L_e : Lame d'eau écoulée (mm) ;
- P_{moy} : Pluie moyenne annuelle (mm).

$$L_e = \frac{A_0}{S} \quad (\text{III.17})$$

Tableau (III.11): Récapitulatif des résultats des apports

Formules	Lame d'eau « L_e » (mm)	A_0 (hm ³)
COUTAGNE III	111,6	1,0272
COUTAGNE I	217,39	2,0007
SAMIE	140.05	1,2889
L'ANRH	246,8	2,2711
Moyenne	180,7	1,6634

D'après ces résultats, on opte pour l'apport moyen annuel donné par la moyenne de ces quatre formules.

III.5 Caractéristique de l'écoulement

III.5.1 Module de L'écoulement

Le module de l'écoulement est donné par cette formule : [4]

$$M_e = \frac{A_0}{T} \quad (\text{III.18})$$

- M_e : Module de l'écoulement [l/s] ;
- A_0 : Apport moyen annuel [l] ;
- T : Temps d'une année en seconde [s] (31536000 s).

III.5.2 Module de l'écoulement spécifique ou relatif

$$M_0 = \frac{M_e}{S} \quad (\text{III.19})$$

- M_0 : Module de l'écoulement spécifique ou relatif [l/s/km²] ;
- M_e : Module de l'écoulement [l/s] ;
- S : Superficie du bassin versant [km²].

III.5.3 *Lame d'eau écoulée*

La lame d'eau est une mesure d'écoulement des précipitations atmosphériques au sein du bassin versant d'un cours d'eau, elle est donnée par la relation suivante :

$$L_e = \frac{A_0}{S}$$

- L_e : Lame d'eau écoulée [mm] ;
- A_0 : Apport moyen annuel [km^3] ;
- S : Superficie du bassin versant [km^2].

III.5.4 *Coefficient de l'écoulement*

Il est donné par la relation suivante :

$$C_e = \frac{L_e}{P_{\text{moy}}} \quad (\text{III.20})$$

- C_e : Coefficient d'écoulement ;
- L_e : Lame d'eau écoulée [mm] ;
- P_{moy} : Pluie moyenne annuelle [mm].

III.5.5 *Coefficient de variation*

Pour le calcul du coefficient de variation C_v , sans série d'observation des raisons de manque de donnée pour, on doit utiliser les formules empiriques :

Formule de l'Antonov

$$C_v = \frac{0,7}{(S+1000)^{0,097}} \quad (\text{III.21})$$

- C_v : coefficient de variation ;
- S : Superficie du bassin en [km^2].

Formule d'OURKGUIP-ROVODKHOZ

$$C_v = \frac{0,7}{M_0^{-0,127}} \quad (\text{III.22})$$

- M_0 : Module de l'écoulement spécifique [l/s/km^2].

Formule de SOKOLOVSKY

$$C_v = \alpha - 0.063 \times \log(S + 1) \quad (\text{III.23})$$

Avec :

$$\alpha = 0.78 - 0.29 \times \log M_0 \quad (\text{III.24})$$

- S : Superficie du bassin versant [km^2] ;
- α : Paramètre de SOKOLOVSKY ;
- M_0 : Module de l'écoulement spécifique [l/s/km^2].

Formule de KRISTEKLY MENKEL

$$C_v = \frac{0.83}{M_0^{0.27} \times S^{0.06}} \quad (III.25)$$

- S : Superficie du bassin en [km²] ;
- M₀ : Module de l'écoulement spécifique [l/s/km²].

Les résultats de calcul des paramètres d'écoulement sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau (III.12): Résultats des paramètres d'écoulement.

Formules	volume A ₀ (Hm ³)	Module d'écoulement Me(l/s)	Module d'écoulement spécifique M ₀ (l/s/km ²)	Lame d'eau écoulée Le(mm)	d'écoulement Ce	coefficient de variation Cv				
						ANTONOV	OURKGUIP ROVODKHOZ	SOKOLOVSKY	KRISTEKLY MENKEL	Moyenne
Formule de COUTAGNE III	1,03	32,661	3,549	111,92	0,16	0,3579	0,8222	0,5569	0,5161	0,5633
Formule de COUTAGNE I	2,0007	63,442	6,8936	217,397	0,311	0,3579	0,8945	0,4733	0,4314	0,5393
Formule de SAMIE	1,29	40,906	4,4448	140,172	0,2	0,3579	0,846	0,5286	0,4856	0,5545
Formule de l'ANRH	2,27	71,981	7,8215	246,659	0,353	0,3579	0,909	0,4574	0,4169	0,5353

III.6 Etude des crues

Pour notre étude on utilisera la méthode empirique, les principales lois employées sont : la formule de MALLET-GAUTHIER, la formule de GIANDOTTI, la formule de FULLER 2, la formule de L'ANARH-SOGREAH et la formule Rationnelle. [13]

III.6.1 Formules empiriques pour la détermination de crues

Formule de MALLET-GAUTHIER

$$Q_{max} = 2 \times K \times \log(1 + A \times P_{moy}) \times \frac{S}{\sqrt{L}} \times \sqrt{1 + 4 \times \log T - \log S} \quad (III.26)$$

Avec :

- Q_{max} : Débit de pointe pour la période de retour T [m³ /s] ;
- P_{moy} : Pluie moyenne annuelle en [m] ;
- T : Période de retours en [ans] ;
- L : Longueur du cours d'eau (talweg) principal en [km], (L = 7,837 km) ;
- S : Superficie de B.V en [km²] ; (9,203 km²)

- A : constante relative au bassin, variant entre 20 et 30, valeur généralement admise en Algérie par L'ANRH, (A=20) ;
- K : Paramètre régional variant de 0,5 pour les grands bassins versants à faible pente jusqu'à 5 pour les petits bassins versants à forte pente (On prend K = 3 pour le bassin versant étudié).

Formule de GIANDOTTI

Dans leur étude sur les problèmes de l'eau en Algérie ils ont établi une formule exprimant le débit maximum en crue en fonction des précipitations. De la surface du bassin versant et d'un coefficient K caractéristiques géographique et climatique du bassin versant.

$$Q_{\max} = \frac{S \times C \times P_{tc \ p\%} \times \sqrt{H_{\text{moy}} - H_{\text{min}}}}{4\sqrt{S} + 1,5L} \quad \text{(III.27)}$$

Avec :

- S : surface en km² ;
- H_{moy} : altitude moyenne en m ;
- H_{min} : altitude minimale en m ;
- L : longueur du cours d'eau principale en km ;
- C : Coefficient topographique variant entre 0,066 et 0,166 ;
- P_{tc.p%} : lame d'eau précipitée pour une probabilité donnée et d'une durée égale au temps de concentration des eaux ;

Pour des bassins de topographie moyen accidenté c=0,066.

Formule de FULLER 2

$$Q_{\max} = \frac{4}{3} \times \frac{N}{100} \times S^{0,8} \times (1 + 2,667 \times S^{-0,3}) \times (1 + C \times \log T) \quad \text{(III.28)}$$

- Q_{max} : Débit de pointe de période de retour T en [m³ /s] ;
- T : Période de retour en [ans] ;
- S : Superficie du bassin versant en [km²] ;
- C : Paramètre régional dépendant du climat. Dans notre cas C = 0.8 (voir le tableau (III.13)).
- N : Paramètre régional dépendant du relief. Dans notre cas N = 85 (voir le tableau (III.14)).

Tableau (III.13): Paramètre régional du climat variant tabulé.

Valeur de C	Régions
0,7 à 0,8	Régions humides
0,8 à 2	Régions arides
3 à 3,5	Oueds Sahariens

Tableau (III.14): Paramètre régional du relief variant tabulé.

Valeur de N	Régions
80	Plaines
85	Reliefs accidentés
100	Montagnes

Formule RATIONNELLE

$$Q = C \times I \times S \tag{III.29}$$

Avec :

- Q : débit m³/s ;
- S : Surface du bassin versant en Km².
- I : Intensité d'une averse en (mm/h) déterminé selon la relation suivante :

$$I = 0,278 \times \frac{P_{tc}}{T_c} \tag{III.30}$$

- T_c : Temps de concentration du bassin versant en heures ;
- P_{tc} : Pluie pendant le temps de concentration. Elle est déduite des courbes Intensité-Durée-Fréquence ou d'une formule de réduction des pluies en 24 heures ;
- C : Coefficient du ruissellement. Il est en fonction de la nature des terrains et de la couverture superficielle du bassin versant.

Le coefficient du ruissellement "C" a été déterminé à partir des données des plus grandes crues, enregistrées dans des cours d'eau de différentes régions d'Algérie il est calculé par :

$$C = 1 - e^{-\frac{P_{j,max}(T)}{P_0}} \tag{III.31}$$

- P_{j,max} (T) : Pluie maximale journalière de période de retour T en [mm] ;
- P₀ : Pertes maximales possibles en [mm] (infiltration, rétention dans les dépressions et évaporation). La valeur du paramètre est donnée dans le tableau (III.15) selon sa localisation dans la figure (III.8).

Tableau (III.15): Valeurs du paramètre P₀ (Boutoutaou Dj. 2008).

Bassins versants	01-02-04-09-11	05-06-07-08	03-10-12-14-15	16	13
P ₀ (mm)	100	90	120	115	60

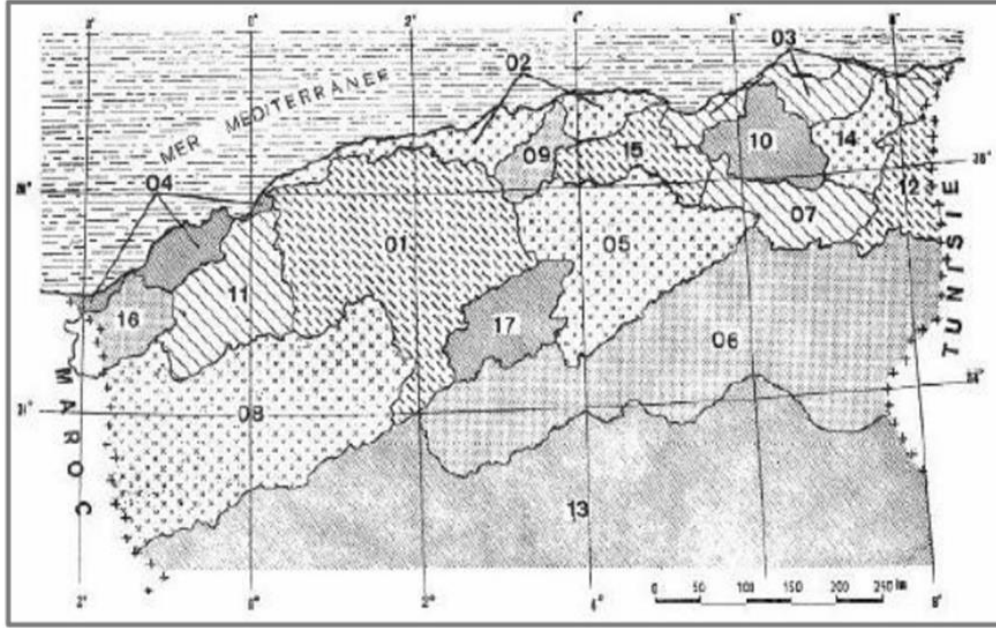


Figure (III.8): carte de localisation des bassins hydrographiques en Algérie.

FORMULE DE L'ANARH-SOGREAH

Cette méthode ANRH-SOGREAH (1989) se base sur une liaison équi-fréquentielle pluie-débit, donnée par la formule suivante :

$$Q_T = C_R(P_T - P_0) \tag{III.32}$$

Avec :

- Q_T : Débit maximum en période de crue de fréquence T en [m³ /s] ;
- C_R : Paramètre du ruissellement en [km² /heure], calculé par la formule :

$$C_R = \frac{S}{6} \times T_B^{-0,77} \tag{III.33}$$

- P_T : Pluie journalière maximale de même fréquence en [mm] ;
- P_0 : Seuil du ruissellement journalier statistique, il varie entre 20 et 35 mm pour les petits bassins algériens ; Nous optons pour une valeur de 20 mm ;
- S : La superficie du bassin versant en [km²] ;
- T_B : Le temps de base en [heure], se calcule par la formule suivante :

$$T_B = T_{B0} + \frac{L^{1,7} \times (P_a \times \sqrt{I})^{0,577}}{1000} \tag{III.34}$$

- L : Longueur du cours d'eau (talweg) principal en [km] ;
- T_{B0} : Constante régionale, pour les bassins septentrionaux elle est égale à 2.33 et, égale à 0.78 pour les hauts plateaux ;
- P_a : Les précipitations annuelles en [mm] ;
- I : Pente moyenne du cours d'eau (talweg) principal (I = 10,27 %).

Les débits de crues des différentes périodes de retour sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau (III.16): résumer de calcul avec différent formule des Débit de différentes fréquences (Oued Bouinan).

Période de retour T [ans]	5	10	20	50	100
Pluies journalières max. fréq. $P_{j,max.(F)}$ (mm)	72,7	83,6	94	108	118
β	0,38				
P_{tc} (mm)	25,85	29,73	33,43	38,41	41,97
I	4,55	5,23	5,88	6,76	7,38
C_r	0,21				
Q_{max} GIANDOTTI(m ³ /s)	8,72	10,03	11,27	12,95	14,15
Q_{max} rationnelle (m³/s)	21,63	27,27	32,99	41,07	47,08
Q_{max} MALLET-GAUTHIER (m ³ /s)	26,02	31,06	35,39	40,41	43,83
Q_{max} FULLER 2(m ³ /s)	24,73	28,55	32,37	37,42	41,24
ANRH Sogreah(m ³ /s)	10,89	13,14	15,29	18,18	20,25
Moyenne des Q_{max}	18,40	22,01	25,46	30,01	33,31

Le débit de crue calculé par les différentes formules empiriques pour la période de retour centennale, a donné des valeurs comprises entre 14,15 et 47,08 m³/s pour la période de retour de 100 ans.

III.7 Hydrogrammes de crue

Les hydrogrammes de crue sont déterminés par la méthode de SOKOLOVSKY, cette dernière les assimile à partir de deux équations paraboliques, l'une pour la montée des crues, l'autre pour la descente (la décrue). [13]

- Calcul du débit instantané au moment de la montée :

$$Q_m(t) = Q_{max} \times \left(\frac{t}{t_m}\right)^m \quad (III.35)$$

- Calcul du débit instantané au moment de la décrue :

$$Q_d(t) = Q_{max} \times \left(\frac{t_b-t}{t_d}\right)^n \quad (III.36)$$

Avec :

- $Q_m(t)$: Débit instantané au moment de la montée en [m³/s] ;
- $Q_d(t)$: Débit instantané au moment de la décrue en [m³/s] ;
- Q_{max} : Débit maximum de crue (de pointe) en [m³/s] ;
- m : Exposant de la parabole, pour les crues pluviales m = 2 ;
- n : Exposant de la parabole, pour les crues pluviales n = 3 ;
- t_m : Temps de montée en [h] ;
- t_d : Temps de décrue en [h];
- t_b : Temps de base en [h].

On a $t_m = t_c$; $t_d = y t_m$ et $t_b = t_m + t_d$;

- y : Dépend de la capacité de régulation du bassin, pour les petits bassins peu perméables on prend $y = 2$;

Donc : $t_d = (2 \times t_m)$.

le temps de montée et de décrue et les débits de crues des différentes périodes de retour, sont présentés dans les tableaux (III.18) et (III.19) respectivement

Tableau (III.17): Temps de montée et de décrue du bassin versant Bouinan.

Temps de la crue (h)	
Temps de montée (t_m)	1,58
Temps de décrue (t_d)	3,16
Temps de base (t_b)	4,74

Tableau (III.18): Les débits de crues des différentes périodes de retour.

Qmax(m ³ /s)	21,63	27,27	32,99	41,07	47,08
Temps (h)	5	10	20	50	100
0,1	0,086644768	0,1092373	0,1321503	0,1645169	0,18859157
0,3	0,779802916	0,98313572	1,18935267	1,48065214	1,69732415
0,5	2,166119212	2,73093254	3,30375741	4,11292261	4,7147893
0,7	4,245593655	5,35262778	6,47536452	8,06132831	9,24098702
0,9	7,018226246	8,84822144	10,704174	13,3258693	15,2759173
1,1	10,48401698	13,2177135	15,9901859	19,9065454	22,8195802
1,3	14,64296587	18,461104	22,3334001	27,8033568	31,8719756
1,5	19,4950729	24,5783929	29,7338167	37,0163035	42,4331037
1,58	21,63	27,27	32,99	41,07	47,08
1,7	19,25821462	24,2797741	29,3725613	36,5665684	41,9175564
1,9	15,70183075	19,7960668	23,9483771	29,8138784	34,1767079
2,1	12,61267056	15,9014113	19,2368008	23,9483301	27,4528215
2,3	9,957830983	12,5543251	15,1876488	18,9074488	21,6742803
2,5	7,704408941	9,71332556	11,7507374	14,6287598	16,7694671
3	3,611129112	4,55272727	5,50768143	6,85663766	7,86000733
3,5	1,306954075	1,64774099	1,99336176	2,48158132	2,84472482
4,2	0,107938543	0,13608341	0,16462749	0,2049485	0,23493974
4,5	0,009476086	0,01194697	0,01445289	0,01799273	0,02062571
4,733	0	0	0	0	0

L'hydrogramme de crue est représenté dans la figure suivante :

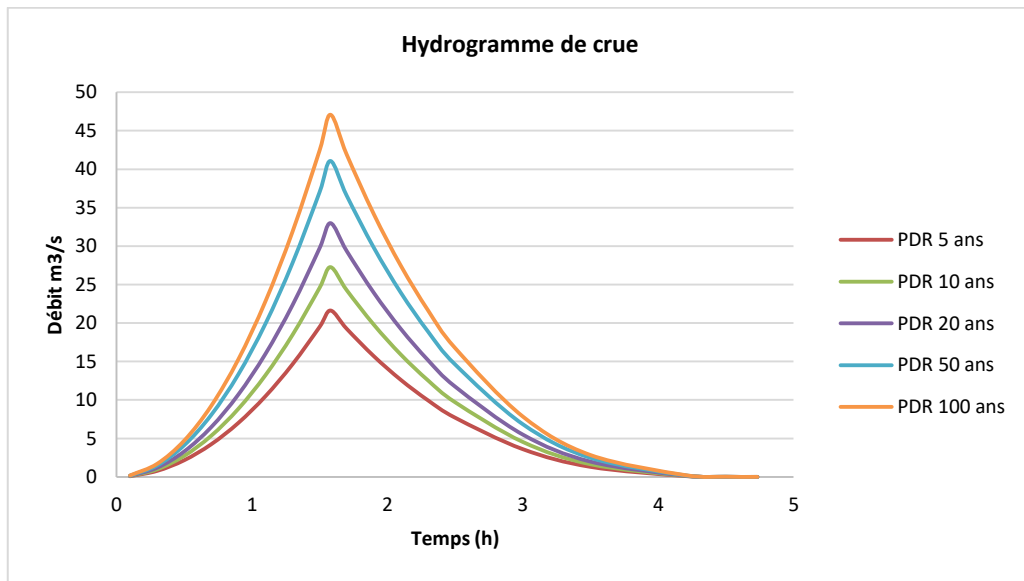


Figure (III.9): L'hydrogramme de crue.

III.8 Conclusion:

L'étude effectuée, afin d'assurer une bonne protection de la zone avale d'oued BOUINAN contre les inondations, est consacrée pour :

- L'estimation des apports annuels ;
- La détermination des différents paramètres d'écoulement ;
- L'évaluation des crues par différentes méthodes.

L'analyse des apports annuels du bassin versant montre que la valeur du débit est égale à $0,072\text{m}^3/\text{s}$ (module d'écoulement (m^3/s)) avec une lame d'eau écoulée de 246,659 mm et un débit spécifique de $7,82\text{ l/s/km}^2$.

Le débit de crue est calculé par cinq (05) relations différentes, on a adopté la plus importante valeur soit $47,08\text{ m}^3/\text{s}$.

Chapitre IV :
Modélisation et
simulation des crues
avec HEC-RAS

IV.1 Introduction

Le processus de modélisation des rivières est une tâche très complexe qui nécessite une compréhension globale de la topographie et des mouvements de l'eau.

Pour résoudre efficacement un modèle hydraulique, des données spécifiques sont nécessaires, notamment les dimensions du cours d'eau (longueur, largeur, forme et morphologie), des informations hydrauliques (niveaux d'eau, vitesse, débit amont et aval) et la rugosité du lit et des berges du fleuve divers points de calcul.

La modélisation hydraulique consiste à simplifier un système réel d'eau à écoulement libre pour représenter avec précision l'écoulement dans des canaux à géométrie simple. Dans de tels cas, les modèles physiques, également appelés modèles réduits, donnent des résultats satisfaisants. Cependant, lorsqu'il s'agit de cours d'eau naturelle, un logiciel hydraulique comme HEC-RAS est indispensable. HEC-RAS est un programme informatique spécialement conçu pour effectuer des calculs hydrauliques de canaux naturels et construits.

L'étude hydraulique sans aménagement est effectuée afin de connaître le comportement naturel de notre Oued, son interaction avec les crues (principalement la centennale) et les zones qui présentent un risque d'inondation en mettant en équation les résultats des calculs faits dans les chapitres précédents, dans le but est de dimensionner le canal.

IV.2 Modélisation

IV.2.1 Présentation du logiciel HEC-RAS

Le logiciel HEC-RAS, Hydrologic Engineering Center River Analysis System (Système d'analyse des rivières du centre d'ingénierie hydrologique) est un outil répandu dans le monde pour la modélisation hydraulique destiné à simuler l'écoulement dans les cours d'eau et les canaux, il permet d'évaluer les débits et les hauteurs d'eau sur l'ensemble des sections d'une rivière. Développé par le corps des ingénieurs de l'armée américaine.

HEC-RAS est conçu pour effectuer des calculs hydrauliques pour un réseau complet de canaux naturels et construit (artificiels). [10]

IV.2.2 L'Environnement HEC-RAS

L'environnement de logiciel HEC-RAS est présenté sous forme de projets, chaque projet contient plusieurs fichiers dans chacun porte le nom de projet et possède sa propre extension et présente son propre jeu de données, ces fichiers sont présentés comme suit : [5]

- **Le fichier de projet (*.prj)** : C'est le fichier principal qui contient les informations descriptives de projet et les configurations par défaut ou choisis par l'utilisateur.

- **Le fichier de géométrie (*. G--)** : Il comporte la géométrie de cours d'eau étudié ils y intègrent tous les informations relatives à la géométrie (schéma, sections en travers, rugosité, ouvrage...etc.).
- **Le fichier (flow) débit (*. F--)** : Ce fichier est utilisé pour stocker les données de débits, il peut comporter plusieurs profils ou chaque profil regroupe de conditions particulières de débit.
- **Le fichier Plan (*. P--)** : Chaque fichier plan contient par combinaison des données particuliers, ce fichier aide l'utilisateur à simuler plusieurs scénarios avec les mêmes données.
- **Le fichier exécution (*. R--)** : Ce fichier se crée automatiquement à l'exécution de chaque simulation et contient les données relatives à la simulation.
- **Le fichier (output) résultat (*. O--)** : Il regroupe les résultats de la simulation Tous les fichiers HEC-RAS prennent la numérotation de 0 à 99, leur nom est ceux définis par l'utilisateur et ne doivent pas modifiés.

Au premier démarrage de HEC-RAS la fenêtre principale apparaît, la description des principaux boutons est illustrée comme suit :

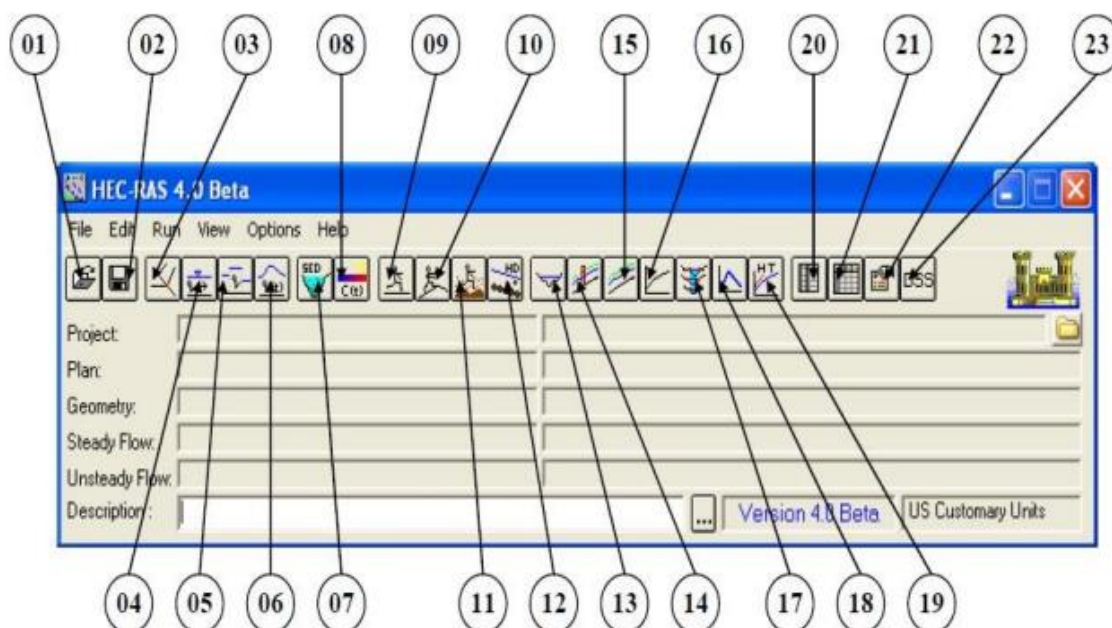


Figure (IV.1): fenêtre principale de HEC-RAS.

1. Ouvrir un projet existant ;
2. Enregistrer un travail ;
3. Fenêtre de géométrie ;
4. Introduire les données de régime stationnaire ;

5. Introduire les données de régime quasi-stationnaire (version 4.0 Béta) ;
6. Introduire les données de régime non-stationnaire ;
7. Introduire les données de transport solide ;
8. Introduire les données de qualité d'eau ;
9. Lancer la simulation de régime stationnaire ;
10. Lancer la simulation de régime non stationnaire ;
11. Lancer le calcul de transport solide ;
12. Exécuter le calcul de la conception hydraulique ;
13. Détails des sections en travers ;
14. Affichage des caractéristiques de l'écoulement ;
15. Affichage générale de profile ;
16. Courbes d'estimation ;
17. Vues 3D ;
18. Hydrographe de crue ;
19. Affichage de propriétés hydrauliques ;
20. Affichage des résultats détaillés ;
21. Affichage global des résultats ;
22. Rapport d'erreurs ;
23. Données DSS.

IV.2.3 Les équations utilisées par le logiciel

Le logiciel HEC-RAS utilise les équations de Saint-Venant 1D ("shallow water equations" en anglais) pour relier les hauteurs d'eau et les débits. Ces équations se déduisent des équations de Navier-Stokes grâce à des simplifications liées au modèle de la rivière.

La ligne d'eau est calculée d'une section à une autre en résolvant l'équation de l'énergie par une méthode itérative. Elle est obtenue à partir de l'équation de quantité de mouvement, et représente la conservation de la charge hydraulique de Bernoulli. L'équation résolue est la suivante : [12]

$$H_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 \times V_1^2}{2 \times g} = H_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 \times V_2^2}{2 \times g} + \Delta H \quad (\text{IV.1})$$

Avec :

- Z : cote du fond du lit ;
- Y : hauteur d'eau à la section ;
- α : coefficient de pondération de la vitesse ;
- V : vitesse moyenne sur la section ;
- g : accélération de la pesanteur ;

- ΔH : Perte de charge.

Le coefficient de perte de charge sera calculé à l'aide de la formule suivante :

$$\Delta H = L \times I + C \times \left| \frac{\alpha_2 \times V_2^2}{2 \times g} - \frac{\alpha_1 \times V_1^2}{2 \times g} \right| \quad (IV.2)$$

- L : longueur de la distance entre deux sections ;

- I : angle de frottement représentatif entre deux sections ;

- C : coefficient de perte d'expansion ou de contraction.

La figure ci-dessous illustre l'apport de chaque terme de l'équation (IV.2) :

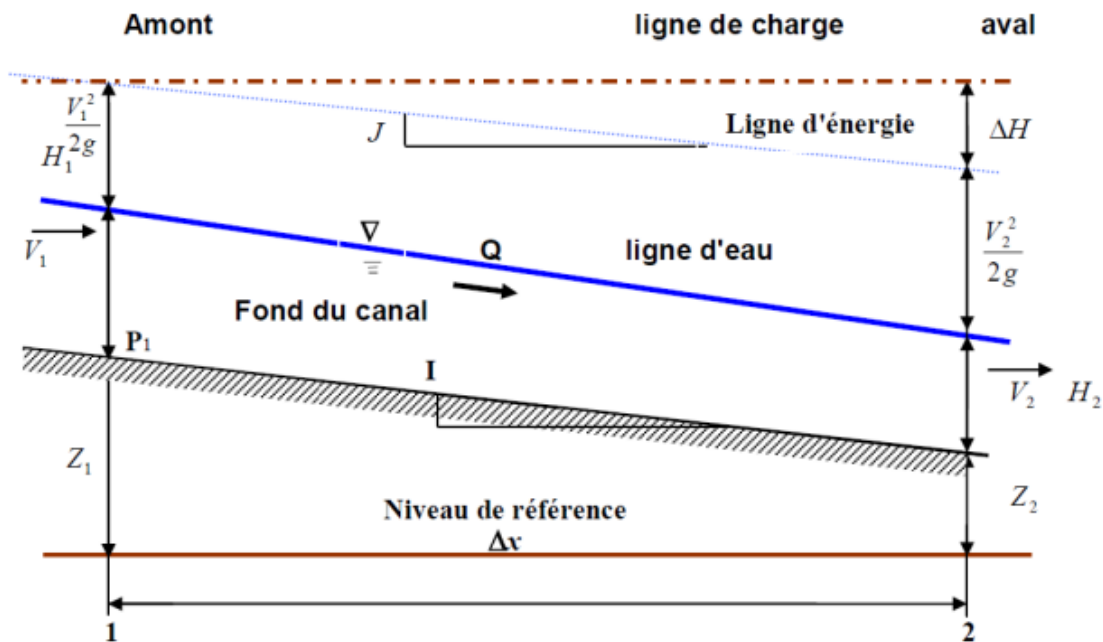


Figure (IV.2): Conservation de la charge entre deux sections.

IV.2.4 Subdivision d'une section en travers pour le calcul du débit

La détermination du transport total et du coefficient de vitesse pour une section de calcul exige que l'écoulement soit subdivisé en unités pour lesquelles la vitesse est uniformément distribuée. [12]

L'approche utilisée dans HEC-RAS est de subdiviser l'écoulement dans les surfaces des rives en utilisant les points d'arrêt des valeurs de la rugosité n comme base de la subdivision (endroits où est observé le changement des valeurs du coefficient de rugosité n) comme la montre figure (IV.3) . Le flux est calculé dans chaque subdivision sous la forme suivante en fonction de n (Equation de Manning) :

$$Q = K \times I^{\frac{1}{2}} \quad (IV.3)$$

Avec :

$$K = \frac{1}{n} \times S \times R_h^{\frac{2}{3}} \quad (IV.4)$$

Où :

- K : flux pour la subdivision
- n : coefficient de rugosité de Manning pour une subdivision
- S : surface d'écoulement pour une subdivision
- Rh : rayon hydraulique pour une subdivision (surface/périmètre mouillé).

Le découpage de la section pour le calcul de frottement dans HEC-RAS est comme suit :

Il découpe chaque section en plusieurs domaines verticaux et pour chaque domaine on introduit leur coefficient de frottement. Le découpage se fait comme sur l'image qui suit :

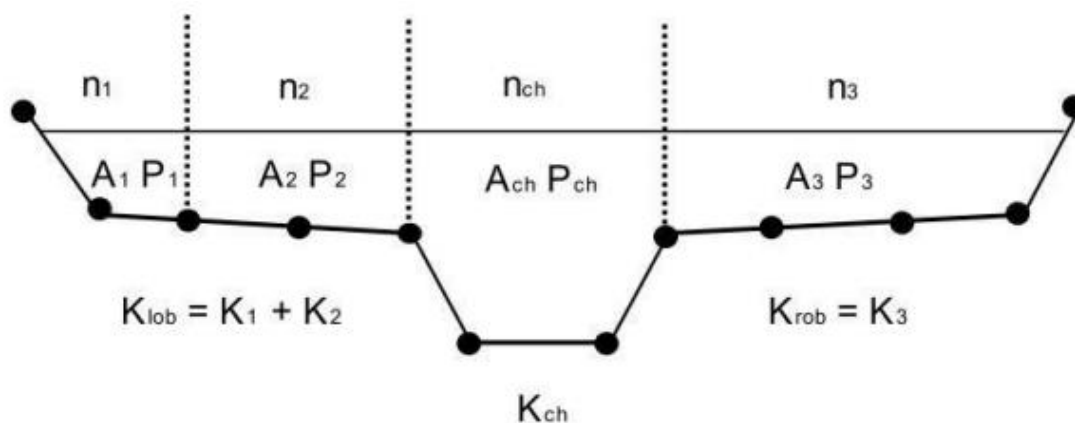


Figure (IV.3): Méthode de subdivision du débit par le modèle HEC-RAS.

IV.2.5 Banque de données nécessaires à l'application du modèle HEC-RAS

Afin d'étudier le comportement hydraulique d'un cours d'eau sur HEC-RAS, il faut créer ce que l'on appelle un Projet qui constitue un ensemble de fichiers dans lequel on introduit les informations nécessaires pour la simulation telles que les données géométriques relatives à chaque section :

- Le profil en travers défini par une série de couples distance-altitude (X – Y) ;
- Les trois distances principales à la section suivante : rive gauche, droite et axe du lit mineur;
- Les coefficients de rugosité des lits majeur et mineur ;
- Les coordonnées dans le plan "X" des limites gauche et droite du lit principal (mineur) de la rivière ;
- Les coefficients de contraction et d'expansion.

Ainsi que :

- Les données hydrométriques à savoir, le débit et les conditions aux limites

- Les conditions de simulation ;
- Les résultats de la simulation. [12]

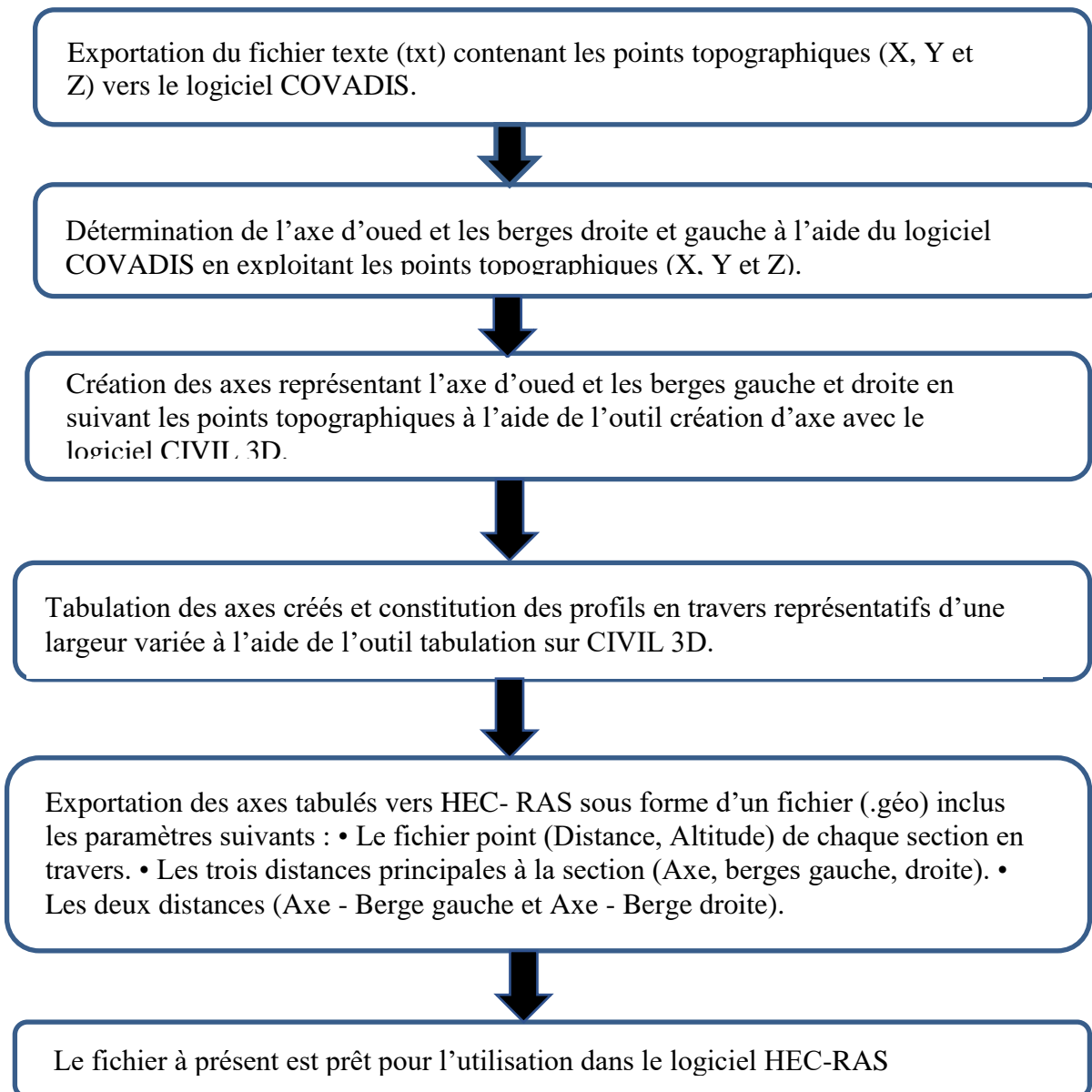
IV.2.6 Application de HEC-RAS

A. Modélisation de la géométrie

Afin de faciliter la mise en œuvre du modèle géométrique de la rivière sur HEC-RAS, le programme accepte plusieurs extensions de fonctionnalité avec d'autres logiciels, dans notre étude on a choisi le module CIVIL 3D de l'AutoCAD (le logiciel AutoCAD CIVIL 3D).

L'application du modèle HEC-RAS a été faite sur un levé topographique d'Oued Bouinan sur une longueur de 380 m. Les sections géométriques introduites dans le modèle HEC-RAS sont extraites du logiciel AutoCAD CIVIL 3D. [13]

L'ensemble des tâches de cette partie est décrit dans le schéma suivant :



- Création d'un nouveau projet ".prj" sur HEC-RAS.

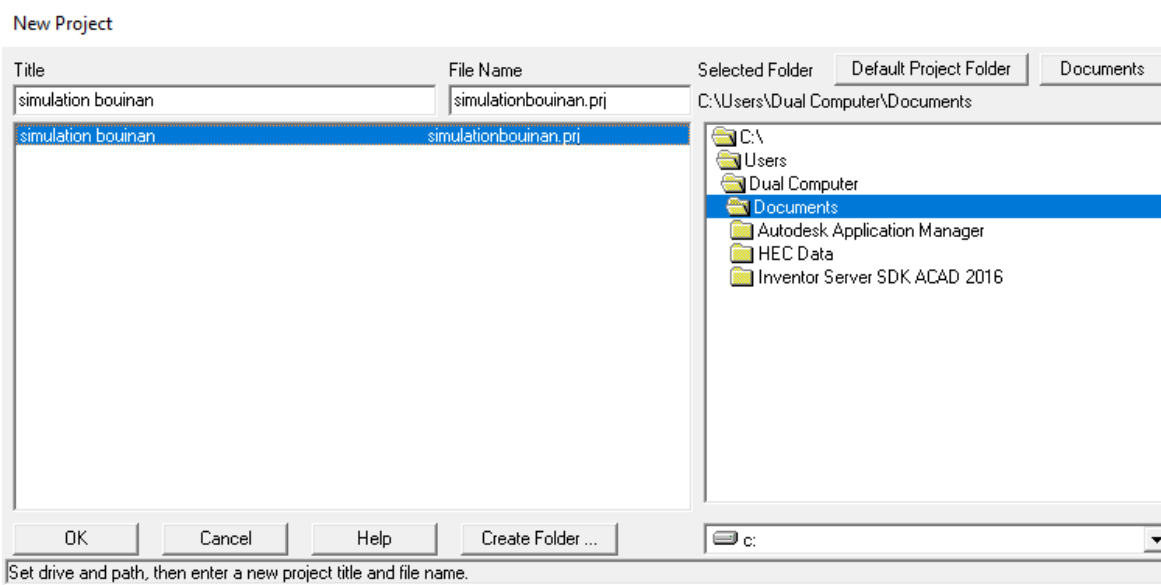


Figure (IV.4): Création d'un nouveau projet ".prj" sur HEC-RAS.

- Importer une géométrie Data.

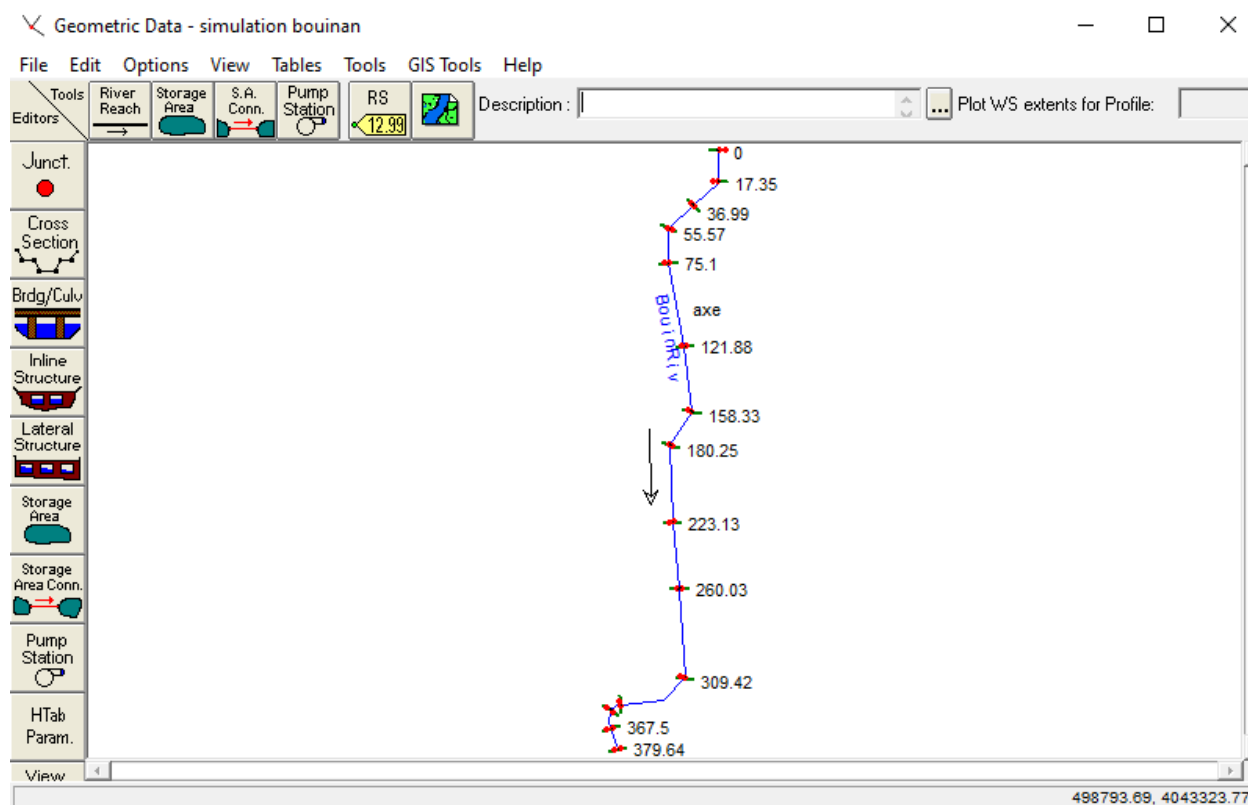


Figure (IV.5): Modèle géométrique du cours d'eau.

B. Choix du coefficient de frottement

Les valeurs du coefficient de frottement (Manning) de notre cours d'eau ont été fixées selon la nature du canal et le matériau qui constitue le canal. ($n=0,02$).

C. Modélisation de l'écoulement

La deuxième étape de la modélisation consiste à introduire les données suivantes :

- Le débit maximum pour différentes périodes de retour ;
- Les conditions aux limites de l'écoulement.

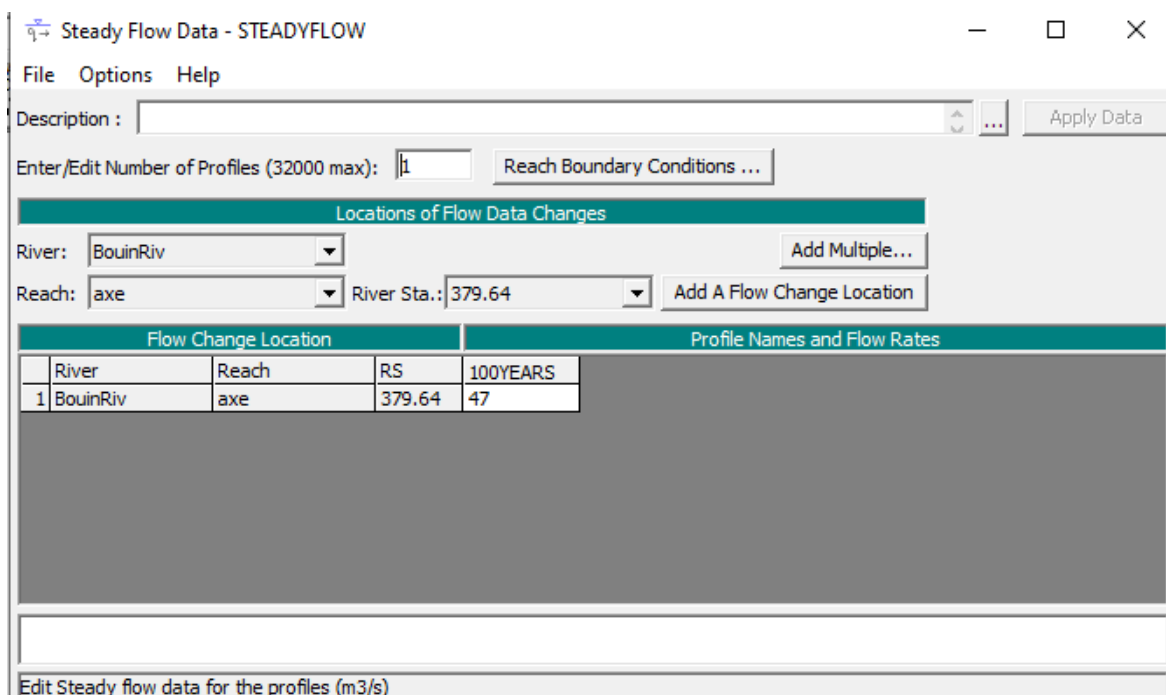


Figure (IV.6): données du débit pour les cinq (05) périodes de retours.

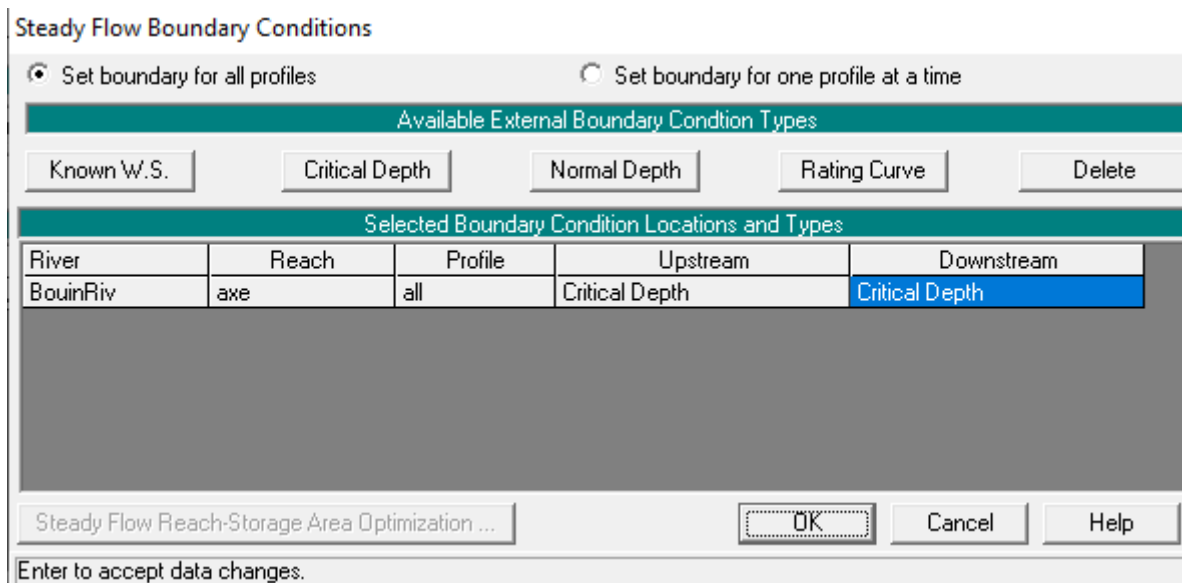


Figure (IV.7): Présentation de la fenêtre des conditions aux limites.

D. Lancement de la simulation

Après avoir défini la géométrie, les données hydrométriques nécessaires à la simulation et après avoir enregistré les fichiers correspondants, on choisit le type de régime supposé fluvial (Subcritique) pour notre cas et on peut passer à la simulation hydraulique.

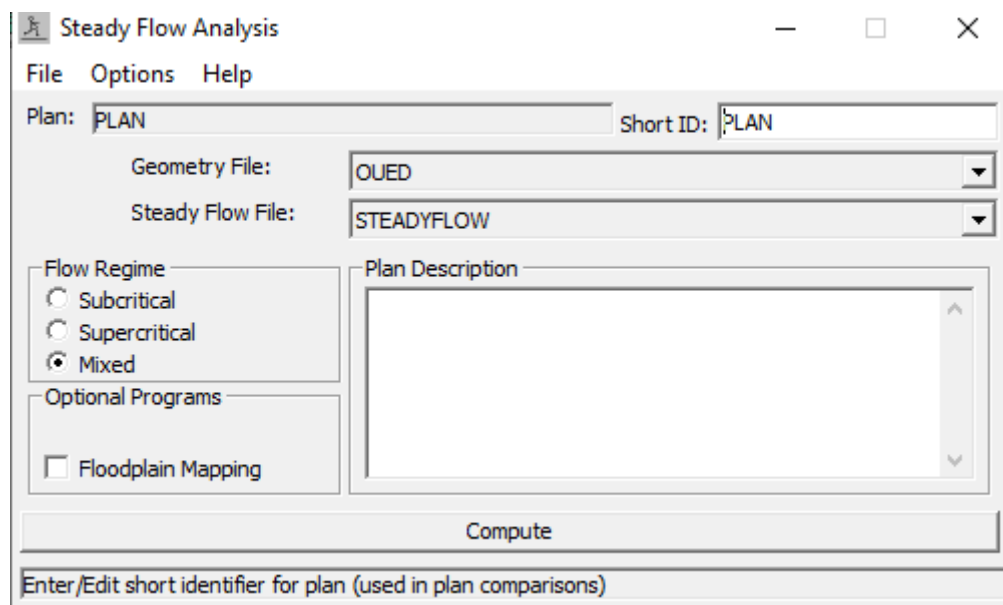


Figure (IV.8): Fenêtres de simulation pour le régime Fluvial.

E. Visualisation des résultats

La dernière étape consiste à visualiser les résultats de calcul par le logiciel sous forme de graphes et/ou tableaux.

IV.2.7 Résultat de simulation des profils en travers à l'état naturel

Le profil en travers d'un cours d'eau est représenté par une coupe perpendiculaire à l'axe du cours d'eau, définie par l'ensemble des points topographique, à partir de ces coupes on peut connaître l'état des berges d'un cours d'eau. On clique sur « View cross section » pour voir les sections (coupes) transversales comme il est illustré dans les figures suivantes :

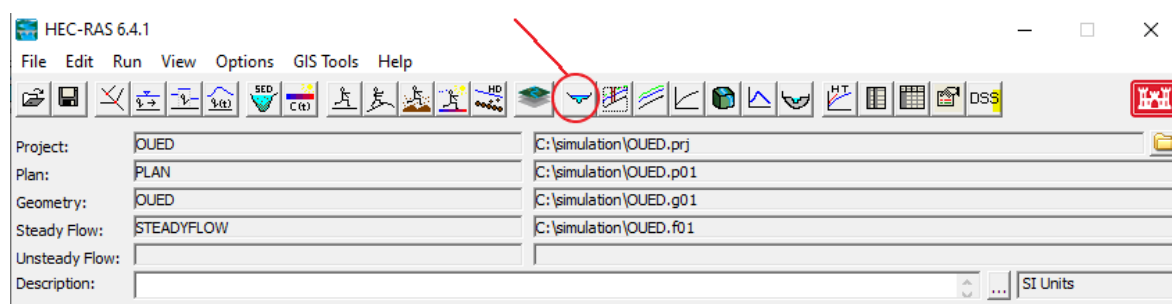


Figure (IV.9): Fenêtre principale du HEC-RAS et visualisation des coupes transversales.

- Les profils en travers de quelques stations sont présentés ci-dessus :

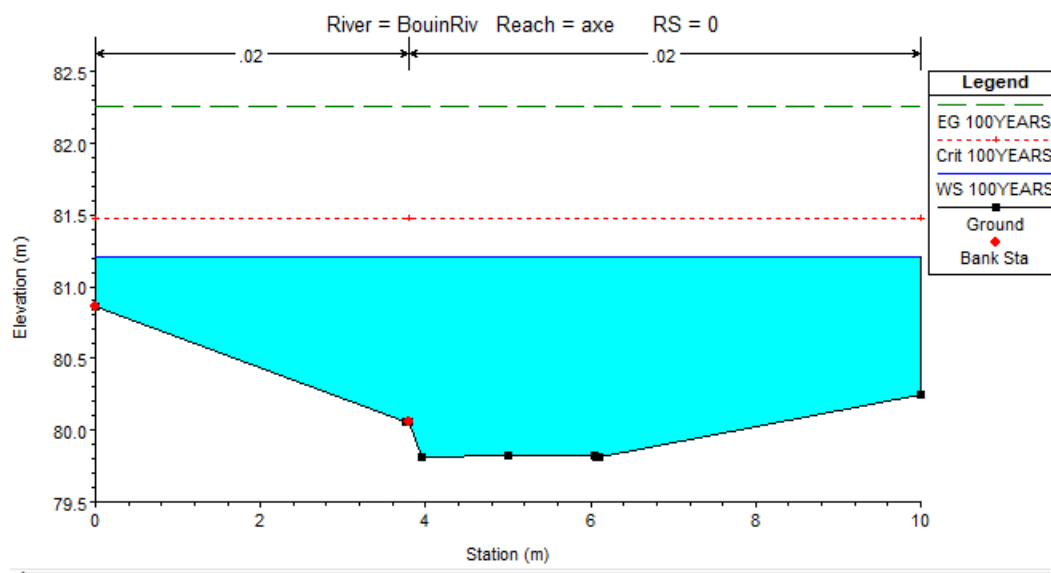


Figure (IV.10): Profil en travers de la station du Point kilométrique 0 d'Oued à l'état naturel.

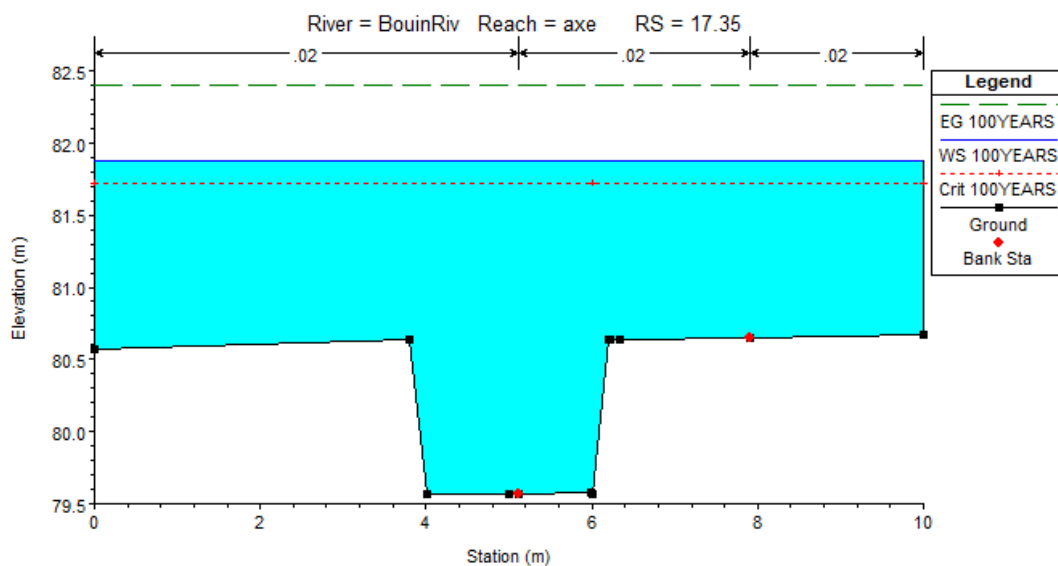


Figure (IV.11): Profil en travers de la station du Point kilométrique 17,35 d'Oued à l'état naturel.

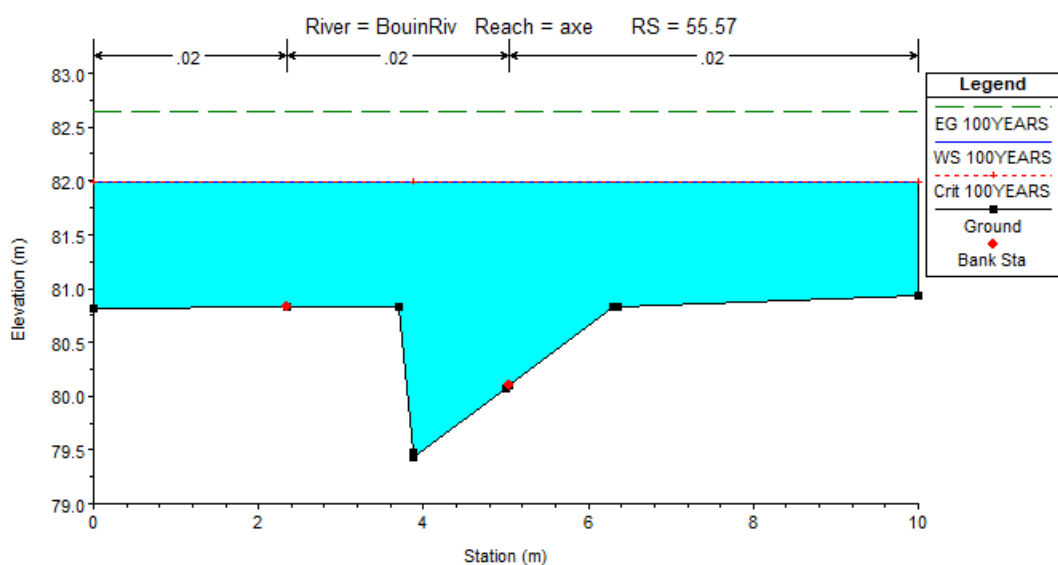


Figure (IV.12): Profil en travers de la station du Point kilométrique 55,57 d'Oued à l'état naturel.

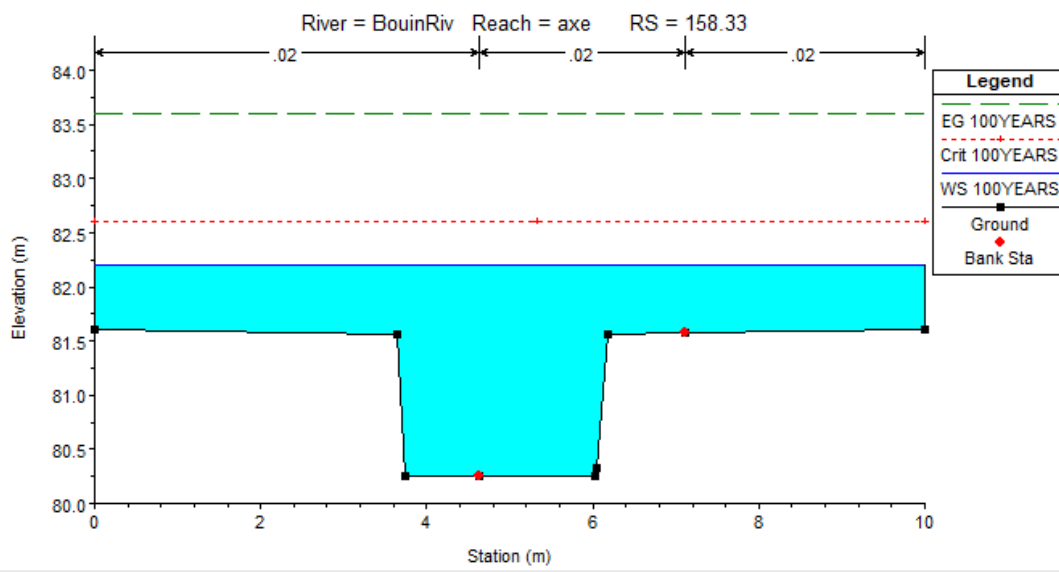


Figure (IV.13): Profil en travers de la station du Point kilométrique 158,33 d'Oued à l'état naturel.

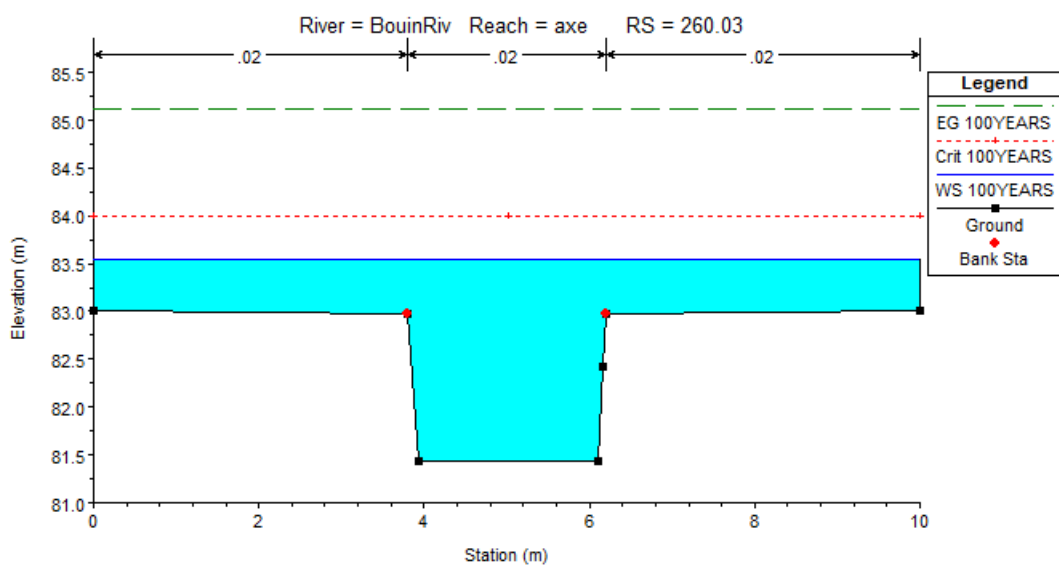


Figure (IV.14): Profil en travers de la station du Point kilométrique 260,03 d'Oued à l'état naturel.

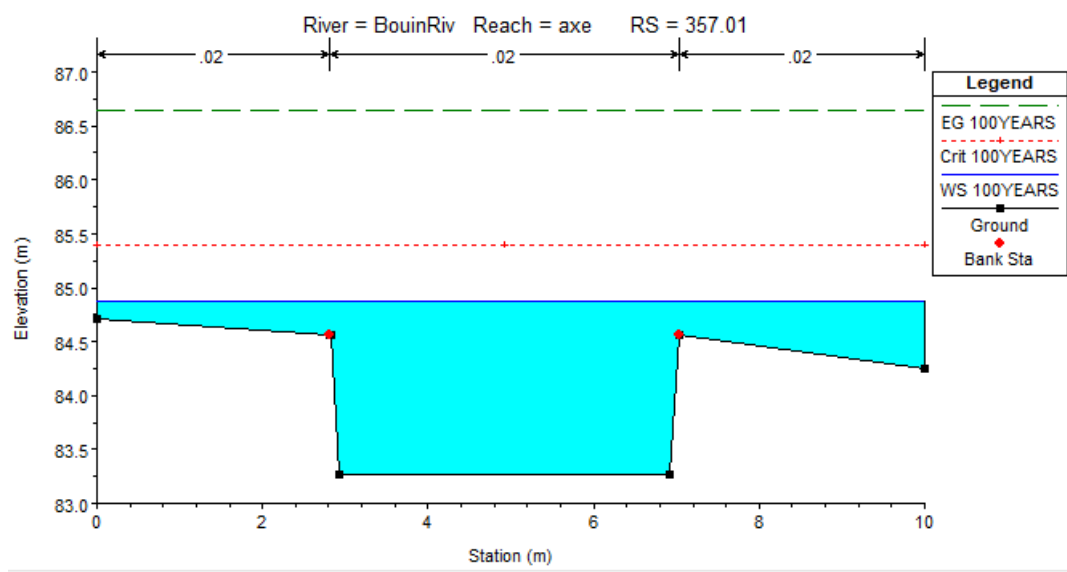
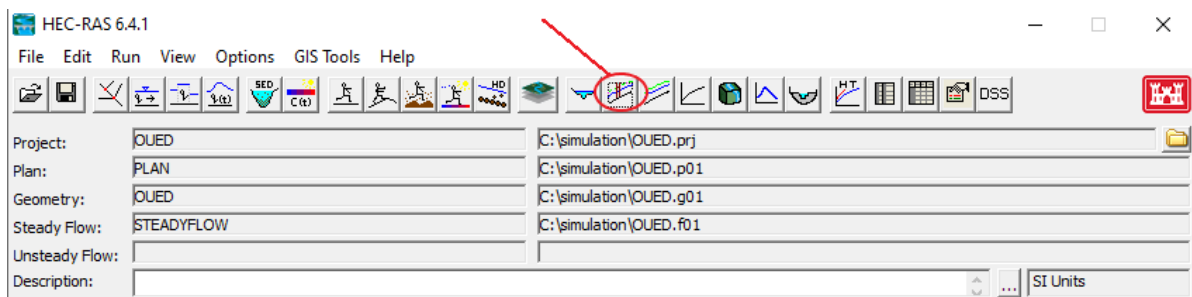


Figure (IV.15): Profil en travers de la station du Point kilométrique 357,01 d’Oued à l’état naturel.

D’après les figures précédentes on remarque qu’il y a des débordements importants dans tous le long de notre cours d’eau.

IV.2.8 Résultat de simulation des profils en long à l’état naturel

On clique sur « View profiles » et une fenêtre apparaîtra représente un profil en long bien détaillé.



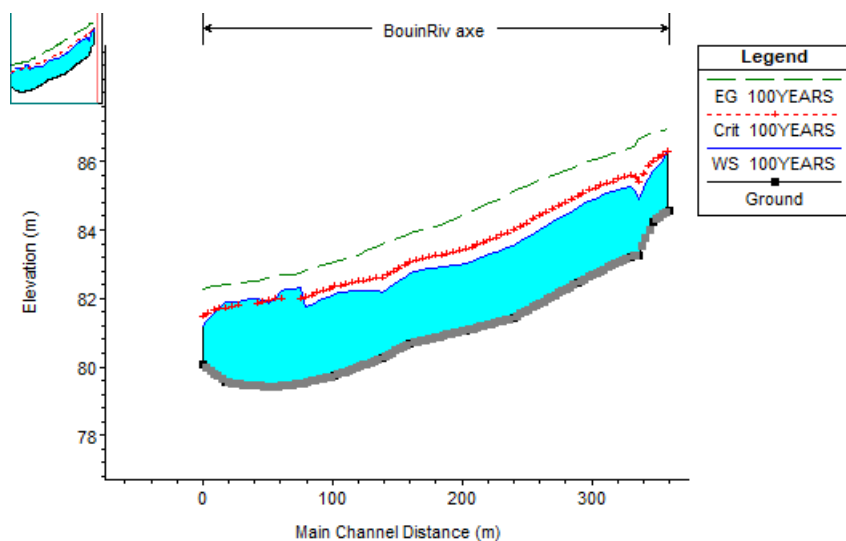


Figure (IV.16): Le profil en long d'Oued à l'état naturel donné par le modèle HEC-RAS

Les résultats sont donnés sous forme de tableaux récapitulatifs des paramètres hydrauliques pour chaque station du cours d'eau étudié, ces résultats fournissent quelques facteurs caractérisant le régime d'écoulement dans chaque section, entre autres les paramètres suivants :

Tableau (IV.1): Les résultats de la simulation d'Oued Bouinan à l'état naturel avec logiciel HEC-RAS

station	Débit totale (m ³ /s)	Cote minimale de section (m)	cote de d'eau niveau (m)	Cote de niveau pour écoulement critique (m)	Cote d'énergie (m)	Pente de la ligne d'énergie (m/m)	Vitesse de zone centrale de section (m/s)	Surface mouillée (m ²)	Largeur au miroir (m)	Nombre de Froude
379.64	47	84.58	86.27	86.27	86.96	0.004289	4.11	13.3	10	1.09
375.593	47	84.47	86.01	86.19	86.91	0.006313	4.78	11.66	10	1.31
371.546	47	84.36	85.86	86.1	86.87	0.007305	5.13	11.05	10	1.41
367.5	47	84.25	85.72	86.01	86.83	0.00821	5.41	10.59	10	1.5
364.003	47	83.92	85.49	85.86	86.78	0.009651	5.72	10	10	1.56
360.506	47	83.6	85.21	85.66	86.72	0.011883	6	9.36	10	1.59
357.01	47	83.27	84.87	85.4	86.65	0.0154	6.21	8.64	10	1.59
353.7	47	83.25	85.13	85.52	86.48	0.01115	5.73	9.89	10	1.39
350.39	47	83.23	85.26	85.57	86.37	0.010331	5.34	10.59	10	1.22
345.837	47	83.14	85.22	85.52	86.33	0.010511	5.34	10.54	10	1.26
341.285	47	83.06	85.18	85.47	86.27	0.010824	5.33	10.48	10	1.29
336.733	47	82.97	85.12	85.42	86.22	0.011282	5.33	10.38	10	1.33
332.181	47	82.89	85.06	85.36	86.17	0.011696	5.32	10.29	10	1.36
327.628	47	82.81	84.99	85.3	86.11	0.012206	5.3	10.17	10	1.4
323.076	47	82.72	84.91	85.23	86.06	0.012725	5.28	10.07	10	1.42
318.524	47	82.63	84.83	85.15	85.99	0.013257	5.24	9.96	10	1.45
313.972	47	82.55	84.74	85.08	85.93	0.013915	5.21	9.84	10	1.46

Chapitre IV : Modélisation et simulation des crues avec HEC-RAS

Tableau (IV.1): Les résultats de la simulation d'Oued Bouinan à l'état naturel avec logiciel HEC-RAS (suite)

station	Débit totale (m ³ /s)	Cote minimale de section (m)	cote de d'eau niveau (m)	Cote de niveau pour écoulement critique (m)	Cote d'énergie (m)	Pente de la ligne d'énergie (m/m)	Vitesse de zone centrale de section (m/s)	Surface mouillée (m ²)	Largeur au miroir (m)	Nombre de Froude
309.42	47	82.46	84.64	84.99	85.86	0.014694	5.15	9.71	10	1.47
304.481	47	82.35	84.53	84.89	85.79	0.014591	5.48	9.63	10	1.51
299.542	47	82.25	84.43	84.8	85.72	0.014175	5.71	9.62	10	1.52
294.603	47	82.15	84.32	84.71	85.64	0.013841	5.87	9.6	10	1.51
289.664	47	82.05	84.22	84.61	85.58	0.013739	5.99	9.56	10	1.5
284.725	47	81.94	84.11	84.52	85.5	0.013862	6.06	9.5	10	1.48
279.786	47	81.84	83.99	84.42	85.43	0.014242	6.12	9.41	10	1.47
274.847	47	81.74	83.88	84.31	85.35	0.014824	6.17	9.31	10	1.45
269.908	47	81.64	83.77	84.2	85.28	0.015552	6.2	9.2	10	1.43
264.969	47	81.53	83.65	84.1	85.19	0.016377	6.22	9.1	10	1.41
260.03	47	81.43	83.54	83.99	85.11	0.017243	6.23	9.02	10	1.39
255.417	47	81.39	83.47	83.92	85.02	0.016921	6.2	9.07	10	1.39
250.805	47	81.34	83.41	83.85	84.94	0.016637	6.18	9.11	10	1.39
246.192	47	81.29	83.34	83.78	84.86	0.01636	6.15	9.15	10	1.4
241.58	47	81.25	83.28	83.71	84.78	0.016113	6.14	9.18	10	1.4
236.967	47	81.2	83.21	83.64	84.7	0.015881	6.12	9.22	10	1.4
232.355	47	81.16	83.14	83.58	84.62	0.015659	6.11	9.25	10	1.41
227.742	47	81.11	83.08	83.51	84.54	0.015517	6.1	9.27	10	1.41
223.13	47	81.06	83.01	83.44	84.47	0.01541	6.1	9.28	10	1.42
218.365	47	81.02	82.98	83.39	84.38	0.014084	5.99	9.51	10	1.39
213.601	47	80.98	82.96	83.35	84.3	0.012869	5.88	9.75	10	1.37
208.836	47	80.94	82.94	83.31	84.22	0.011917	5.79	9.97	10	1.35
204.072	47	80.9	82.92	83.27	84.16	0.01118	5.72	10.15	10	1.34
199.307	47	80.86	82.89	83.23	84.09	0.010622	5.66	10.31	10	1.34
194.543	47	80.82	82.85	83.19	84.04	0.010361	5.63	10.4	10	1.35
189.778	47	80.78	82.82	83.14	83.99	0.010292	5.61	10.45	10	1.36
185.014	47	80.73	82.78	83.1	83.94	0.010376	5.59	10.47	10	1.37
180.25	47	80.69	82.74	83.06	83.89	0.010619	5.56	10.46	10	1.38
175.866	47	80.6	82.62	82.96	83.83	0.010539	5.73	10.35	10	1.39
171.482	47	80.52	82.5	82.87	83.78	0.010892	5.88	10.18	10	1.42
167.098	47	80.43	82.39	82.78	83.72	0.011735	6	9.95	10	1.47
162.714	47	80.34	82.29	82.69	83.66	0.01326	6.09	9.66	10	1.54
158.33	47	80.26	82.2	82.61	83.6	0.015541	6.08	9.33	10	1.63
153.773	47	80.19	82.2	82.58	83.5	0.01408	5.84	9.64	10	1.55
149.217	47	80.13	82.21	82.55	83.42	0.012826	5.61	9.94	10	1.47
144.661	47	80.06	82.21	82.52	83.34	0.011718	5.38	10.24	10	1.4
140.105	47	80	82.21	82.49	83.27	0.010759	5.18	10.54	10	1.32
135.548	47	79.93	82.2	82.45	83.2	0.009937	4.99	10.81	10	1.26

Tableau (IV.1): Les résultats de la simulation d'Oued Bouinan à l'état naturel avec logiciel HEC-RAS (suite)

station	Débit totale (m ³ /s)	Cote minimale de section (m)	cote de d'eau niveau (m)	Cote de niveau pour écoulement critique (m)	Cote d'énergie (m)	Pente de la ligne d'énergie (m/m)	Vitesse de zone centrale de section (m/s)	Surface mouillée (m ²)	Largeur au miroir (m)	Nombre de Froude
130.992	47	79.87	82.2	82.42	83.15	0.009293	4.83	11.06	10	1.2
126.436	47	79.8	82.17	82.38	83.1	0.009067	4.74	11.16	10	1.17
114.083	47	79.7	82.05	82.28	83.01	0.009612	4.81	10.95	10	1.2
106.286	47	79.66	81.97	82.22	82.97	0.009995	4.9	10.79	10	1.23
98.49	47	79.63	81.9	82.16	82.92	0.010346	4.99	10.64	10	1.26
90.6933	47	79.59	81.82	82.09	82.87	0.010679	5.06	10.52	10	1.29
82.8966	47	79.55	81.75	82.03	82.82	0.01098	5.12	10.41	10	1.31
75.1	47	79.51	82.31	81.97	82.72	0.002635	3.13	16.61	10	0.68
70.2175	47	79.49	82.28		82.71	0.002631	3.24	16.46	10	0.71
65.335	47	79.47	82.25		82.7	0.00277	3.34	16.11	10	0.74
60.4525	47	79.45	82.2	81.97	82.68	0.003103	3.4	15.57	10	0.77
55.57	47	79.43	81.99	81.99	82.64	0.005308	3.86	13.2	10	0.96
50.925	47	79.44	81.85	81.94	82.61	0.006161	4.35	12.41	10	1.05
46.28	47	79.44	81.96	81.9	82.56	0.004131	3.9	14.08	10	0.87
41.635	47	79.45	81.98	81.85	82.52	0.003635	3.68	14.8	10	0.78
36.99	47	79.45	82		82.49	0.003394	3.43	15.43	10	0.7
32.08	47	79.48	81.94		82.47	0.003487	3.69	14.93	10	0.79
27.17	47	79.51	81.89	81.78	82.45	0.00361	3.84	14.62	10	0.87
22.26	47	79.54	81.88	81.75	82.43	0.003644	3.75	14.68	10	0.89
17.35	47	79.57	81.88	81.71	82.4	0.003725	3.49	14.83	10	0.88
13.0125	47	79.69	81.7	81.7	82.37	0.004845	4.16	13.35	10	1.05
8.675	47	79.81	81.57	81.66	82.34	0.005496	4.37	12.52	10	1.15
4.3375	47	79.94	81.37	81.57	82.3	0.007188	4.39	11.25	10	1.31
0	47	80.06	81.21	81.48	82.25	0.008365	3.52	10.62	10	1.3

IV.3 Conclusion

Pour la crue centennale, les vitesses d'écoulement dans le tronçon considéré pour notre étude varie entre 3.13 et 6.23 m/s les vitesses supérieures peuvent entrainer une érosion du lit de l'oued et les berges, la vitesse d'écoulement moyenne est de 5.20 m/s la pente est non uniforme, la surface mouillée moyenne pour les sections en travers est de 10.93 m².

L'utilisation du modèle HEC-RAS, nous a permis d'avoir les niveaux de la ligne d'eau à plusieurs points du lit d'Oued Bouinan et de localiser les zones débordées.

Par conséquent l'implantation d'un canal qui permettra de drainer tous les apports est une évidence, afin de sécuriser la zone de tout débordement ainsi de protéger les berges lors de fortes crues.

Chapitre V : **Calcul Hydraulique**

V.1 Introduction

Après avoir localisé la partie en risques d'inondations générées par la crue centennale, cette partie sera consacrée au dimensionnement hydraulique du canal qui devra mettre fin aux débordements d'Oued Bouinan .

Ce chapitre nous amène à proposer le dimensionnement hydraulique de la section d'écoulement adéquate avec la proposition de plusieurs variantes d'aménagement..

V.2 Calcul hydraulique

La détermination de la section d'écoulement requise de cours d'eau est généralement une étape de conception, et la conception suit les procédures suivantes :

- Déterminer le débit à évacuer ;
- Déterminer les caractéristiques du terrain (type de sol, pente du cours d'eau, etc.) ;
- Déterminer les contraintes à respecter (pente, érosion, environnement, etc.) ;
- Identifier les solutions possibles ;
- Étude des possibilités ;
- Vérifier le respect des contraintes ;
- Évaluation des coûts ;
- Décider.

V.2.1 Principe de calcul

L'esprit de la détermination de la taille de la section transversale est de répondre aux conditions suivantes :

1. Minimiser la superficie occupée par la structure ;
2. Minimiser la profondeur d'excavation ;
3. Réduisez la section de l'ouvrage ;
4. La vitesse d'écoulement n'est ni trop faible ni trop élevée.

De manière générale, on essaie le plus souvent :

1. Répondez d'abord aux conditions 3 et 4 ;
2. Vérifiez la taille du canal pour répondre aux conditions 1 et 2.
3. Jouez sur la pente pour répondre à la condition. [12]

Les équations réduites de mouvement font intervenir des coefficients suivants :

Le nombre de Froude

Qui est le rapport entre les forces de gravité et celles d'inertie, il est exprimé par :

$$F = \frac{V}{\sqrt{(g \times D_h)}} \quad (V.1)$$

Où :

- V : représente la vitesse d'écoulement ;
- g : l'accélération de la pesanteur ;
- D_h : Diamètre hydraulique.
- Si $F = 1$: on dira que l'écoulement est en régime Critique ;
- Si $F > 1$: l'écoulement est en régime Torrentiel (Supercritique). Les forces d'inertie sont prépondérantes, et ceci se traduit par une importante vitesse d'écoulement ;
- Si $F < 1$: l'écoulement est en régime Fluvial (Subcritique). Dans ce cas, l'effet de la gravité est plus prononcé, ceci se traduit par une faible vitesse d'écoulement.

La vitesse critique : est souvent appelée célérité de l'onde gravitaire.

$$V_c = \sqrt{(g \times D_h)} \quad (\text{V.2})$$

Avec :

- g : l'accélération de la pesanteur ;
- D_h : Diamètre hydraulique.

Formule de Chézy

En écrivant que dans l'écoulement uniforme, les forces appliquées à la masse fluide comprise entre deux sections espacées d'une distance le sont en équilibre, on démontre que:

$$V = C \times \sqrt{(R_h \times I)} \quad (\text{V.3})$$

Avec :

- I : la pente ;
- V : la vitesse ;
- R_h : le rayon hydraulique ;
- C : est le coefficient de résistance selon Chézy.

Formule de Manning et Strickler

A partir de données expérimentales, Manning (1889) a développé une expression pour le coefficient de Chézy où le coefficient de frottement intervient sans dimension :

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

Où :

- n : est le coefficient de frottement de Manning
- α : est un coefficient d'unité qui vaut 1 en système international et 1,486 en système anglo-saxon.

En remplaçant le coefficient C dans la formule de Chézy, on obtient la formule de Manning

$$V = \frac{1}{n} \times R_h^{\frac{2}{3}} \times \sqrt{I} \quad (V.5)$$

Le coefficient de Strickler (1891) est : $K_s = 1/n$

L'équation de vitesse devient :

$$V = K_s \times R_h^{\frac{2}{3}} \times \sqrt{I} \quad (V.6)$$

Et le débit :

$$Q = S \times K_s \times R_h^{\frac{2}{3}} \times \sqrt{I} \quad (V.7)$$

Avec :

- : Section mouillée
- I : Pente de la canalisation
- R_h : Rayon hydraulique correspondant au rapport entre la surface mouillée et le périmètre mouillé.
- K_s : Coefficient de Manning Strickler qui correspond à un coefficient de rugosité pour les écoulements à surface libre.

Tableau (V.1): Valeurs estimées pour le coefficient de Manning Strickler en fonction de la nature des Parois

Nature des parois	n (Manning(s /m ^{1/3}))	K (Strickler (m ^{1/3} /s))
Béton lisse	0,011 à 0,013	77 à 91
Béton brut	0,013 à 0,016	62 à 77
Canal en terre, non enherbé	0,017	60
Canal en terre, enherbé	0,02	50
Rivière de plaine, sans végétation Arbustive	0,025 à 0,029	35 à 40
Rivière de plaine, large, végétation peu Dense	0,033	30
Rivière à berges étroites très végétalisées	0,067 à 0,1	10 à 15
Lit majeur en prairie	0,033 à 0,05	20 à 30
Lit majeur en vigne ou taillis	0,067 à 0,1	10 à 15
Lit majeur urbanisé	0,067 à 0,1	10 à 15
Lit majeur en forêt	>0,1	<10

V.2.2 Vitesses admissibles d'écoulement

Avant d'accepter le choix final de la taille du canal, il est nécessaire de vérifier si la vitesse normale d'écoulement est trop faible, provoquant une sédimentation des matières en suspension, ou trop importante, provoquant une érosion de la paroi de la canalisation.

Les dimensions du canal doivent être déterminées de telle sorte que la vitesse d'écoulement dans des conditions d'écoulement uniformes soit inférieure à la vitesse admissible.

La vitesse d'écoulement admissible suivante est acceptée :

- Pour les revêtements en béton : 4,5 m/s.
- Pour un revêtement en matelas Reno ou gabion : 6 m/s. [13]

V.2.3 Éléments géométriques

Les principaux éléments géométriques pour cinq (05) différents types de sections de canaux sont regroupés dans la figure suivant :

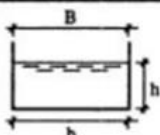
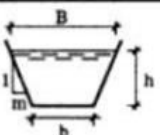
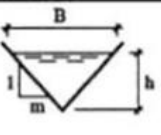
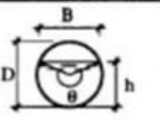
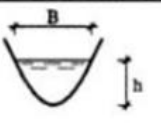
					
	Rectangle	Trapeze	Triangle	Cercle	Parabole
Surface S	$b h$	$(b + mh)h$	mh^2	$\frac{1}{8} (\theta - \sin \theta) D^2$	$\frac{2}{3} B h$
Périmètre mouillé P	$b + 2h$	$b + 2h\sqrt{1+m^2}$	$2h\sqrt{1+m^2}$	$\frac{1}{2} \theta D$	$B + \frac{8}{3} \frac{h^2}{B} *$
Rayon hydraulique R_h	$\frac{b h}{b + 2h}$	$\frac{(b + mh) h}{b + 2h\sqrt{1+m^2}}$	$\frac{mh}{2\sqrt{1+m^2}}$	$\frac{1}{4} \left[1 - \frac{\sin \theta}{\theta} \right] D$	$\frac{2B^2 h}{3B^2 + 8h^2} *$
Largeur B	b	$b + 2mh$	$2mh$	$(\sin \theta/2) D$ ou $2 \sqrt{h (D-h)}$	$\frac{3}{2} \frac{S}{h}$
Profondeur hydraulique D_h	h	$\frac{(b + mh) h}{b + 2mh}$	$\frac{1}{2} h$	$\left[\frac{\theta - \sin \theta}{\sin \theta/2} \right] \frac{D}{8}$	$\frac{2}{3} h$

Figure (V.1): Éléments géométriques de quelques sections de canaux (Image tirée du web).

V.3 Choix du profil transversal de la section du canal

La forme optimale d'un point de vue économique :

- La section semi-circulaire est la plus économique mais nécessite une plus grande profondeur. Aqueducs semi-bus (non enterrés) utilisés principalement pour l'irrigation ;
 - Les sections rectangulaires doivent être creusées sur un sol stable, car il existe un risque d'effondrement des murs si la profondeur est grande ;
 - La section trapézoïdale est souvent utilisée compte tenu des avantages qu'il offre, notamment:
 - Ce profil réduit la pression des terres de part et d'autre de la structure due à la pente des murs latéraux ;
 - Il assure la stabilité contre l'effondrement des remblais lors de la construction, ce qui n'est pas le cas des canaux rectangulaires ;
 - D'un point de vue purement hydraulique, la partie évasée du profil offre un canal pour un débit maximum par rapport aux profils rectangulaires, réduisant ainsi la profondeur d'eau.
- [13]

V.3.1 Section avantageuse

Le procédé de calcul des paramètres géométriques du canal est la méthode Newton-Raphson qui consiste à introduire les expressions de la surface mouillée " S_m ", le rayon hydraulique " R_h ", la largeur au radier " b ", les valeurs de coefficient de STRICKLER " K_s " et de la pente du fond du canal " I ", et enfin, on fait varier les valeurs de " h " et on aura des valeurs du débit " Q ", la valeur de " h " est obtenue quand le débit trouvé égal au débit max ($Q = Q_{max}$).

La formule utilisée pour le dimensionnement des canaux est celle de Manning-Strickler :

$$Q = S \times K_s \times R_h^{\frac{2}{3}} \times \sqrt{I}$$

- La section mouillée :

$$S_m = (bh + mh^2) \tag{V.8}$$

- Périmètre mouillé :

$$P_m = b + 2h\sqrt{1 + m^2} \tag{V.9}$$

- Largeur à la surface :

$$B = b + 2mh \tag{V.10}$$

- Largeur de base :

$$b = 2h(\sqrt{1 + m^2} - m) \tag{V.11}$$

Avec :

- S_m : Section mouillée [m^2] ;
- P_m : Périmètre mouillé [m] ;
- b : Largeur au radier [m] ;
- h : Profondeur hydraulique [m] ;
- m : Fruit du talus du canal, $m=1/\sqrt{3}$; Ou : $\alpha=60^\circ$ (la pente la plus avantageuse).

V.3.2 *Choix de la revanche du canal*

Afin d'assurer une capacité de transport optimale et d'éviter tout débordement potentiel, il est essentiel que la hauteur des berges du canal dépasse le minimum requis. Cette hauteur supplémentaire prend en compte des facteurs tels que les vagues, les perturbations de la surface de l'eau et la nécessité d'une revanche de sécurité. Par conséquent, lors des calculs pour chaque section, il est crucial d'intégrer cette revanche.

Tableau (V.2): la hauteur de revanche correspondante en fonction du débit de conception.

Débit (m^3/s)	<0,75	0,75 à 1,5	1,5 à 85	>85
Revanche(m)	0,45	0,60	0,75	0,90

Pour notre cas $Q=47,08 m^3/s$ donc on est dans l'intervalle de 1,5 à 85 m^3/s donc la hauteur de la revanche est 0,75 m.

V.3.3 *Les résultats de différents calculs des sections avantageuses*

V.3.3.1 *Variante 1 : un canal avec le béton*

Les résultats du calcul des caractéristiques du canal en béton avec la pente naturel 0.01 sont présentés dans le tableau suivant

Tableau (V.3): Section trapézoïdale en béton avec la pente de 0, 01.

h	b	m	B	S_m	P_m	R_h	I	n	K_s	V	Q	F_r
1	1,1547	0,577	2,3094	1,732	3,4641	0,5	0,01	0,014	71,42857	4,49972	7,79374	1,6589
1,1	1,2702	0,577	2,5403	2,096	3,8105	0,55	0,01	0,014	71,42857	4,79491	10,04908	1,68546
1,2	1,3856	0,577	2,7713	2,494	4,1569	0,6	0,01	0,014	71,42857	5,08128	12,67348	1,71008
1,3	1,5011	0,577	3,0022	2,927	4,5033	0,65	0,01	0,014	71,42857	5,35979	15,68899	1,73305
1,4	1,6166	0,577	3,2332	3,395	4,8497	0,7	0,01	0,014	71,42857	5,63124	19,11704	1,75459
1,5	1,7321	0,577	3,4641	3,897	5,1962	0,75	0,01	0,014	71,42857	5,8963	22,97855	1,77488
1,6	1,8475	0,577	3,695	4,434	5,5426	0,8	0,01	0,014	71,42857	6,15553	27,29392	1,79407
1,7	1,963	0,577	3,926	5,006	5,889	0,85	0,01	0,014	71,42857	6,40941	32,0831	1,81229
1,8	2,0785	0,577	4,1569	5,612	6,2354	0,9	0,01	0,014	71,42857	6,65836	37,36566	1,82964
1,9	2,1939	0,577	4,3879	6,253	6,5818	0,95	0,01	0,014	71,42857	6,90273	43,16074	1,8462
1,91	2,2055	0,577	4,411	6,319	6,6164	0,955	0,01	0,014	71,42857	6,92693	43,76916	1,84782
1,92	2,217	0,577	4,4341	6,385	6,6511	0,96	0,01	0,014	71,42857	6,95109	44,38292	1,84943
1,93	2,2286	0,577	4,4571	6,452	6,6857	0,965	0,01	0,014	71,42857	6,9752	45,00203	1,85103
1,94	2,2401	0,577	4,4802	6,519	6,7204	0,97	0,01	0,014	71,42857	6,99928	45,62651	1,85262

Tableau (V.3): Section trapézoïdale en béton avec la pente de 0,01 (suite).

h	b	m	B	S _m	P _m	R _h	I	n	K _s	V	Q	F _r
1,95	2,2517	0,577	4,5033	6,586	6,755	0,975	0,01	0,014	71,42857	7,02331	46,25637	1,85421
1,963	2,2667	0,577	4,5334	6,674	6,8	0,982	0,01	0,014	71,42857	7,05449	47,08328	1,85627
1,97	2,2748	0,577	4,5495	6,722	6,8243	0,985	0,01	0,014	71,42857	7,07125	47,53234	1,85737
1,98	2,2863	0,577	4,5726	6,79	6,8589	0,99	0,01	0,014	71,42857	7,09516	48,17848	1,85894
1,99	2,2979	0,577	4,5957	6,859	6,8936	0,995	0,01	0,014	71,42857	7,11903	48,83008	1,8605
2	2,3094	0,577	4,6188	6,928	6,9282	1	0,01	0,014	71,42857	7,14286	49,48717	1,86205
2,1	2,4249	0,577	4,8497	7,638	7,2746	1,05	0,01	0,014	71,42857	7,37901	56,36343	1,87726
2,2	2,5403	0,577	5,0807	8,383	7,621	1,1	0,01	0,014	71,42857	7,61144	63,8077	1,89187
2,3	2,6558	0,577	5,3116	9,163	7,9674	1,15	0,01	0,014	71,42857	7,84038	71,83788	1,90594
2,4	2,7713	0,577	5,5426	9,977	8,3138	1,2	0,01	0,014	71,42857	8,06602	80,47159	1,9195
2,5	2,8868	0,577	5,7735	10,83	8,6603	1,25	0,01	0,014	71,42857	8,28855	89,7262	1,93261
2,6	3,0022	0,577	6,0044	11,71	9,0067	1,3	0,01	0,014	71,42857	8,50813	99,61885	1,94528
2,7	3,1177	0,577	6,2354	12,63	9,3531	1,35	0,01	0,014	71,42857	8,72491	110,1664	1,95756
2,8	3,2332	0,577	6,4663	13,58	9,6995	1,4	0,01	0,014	71,42857	8,93904	121,3856	1,96946
2,9	3,3486	0,577	6,6973	14,57	10,046	1,45	0,01	0,014	71,42857	9,15062	133,293	1,98101
3	3,4641	0,577	6,9282	15,59	10,392	1,5	0,01	0,014	71,42857	9,35979	145,9047	1,99223

La figure suivante montre les caractéristiques géométriques de notre profil trapézoïdal avec la pente naturelle de 0,01 avec le béton.

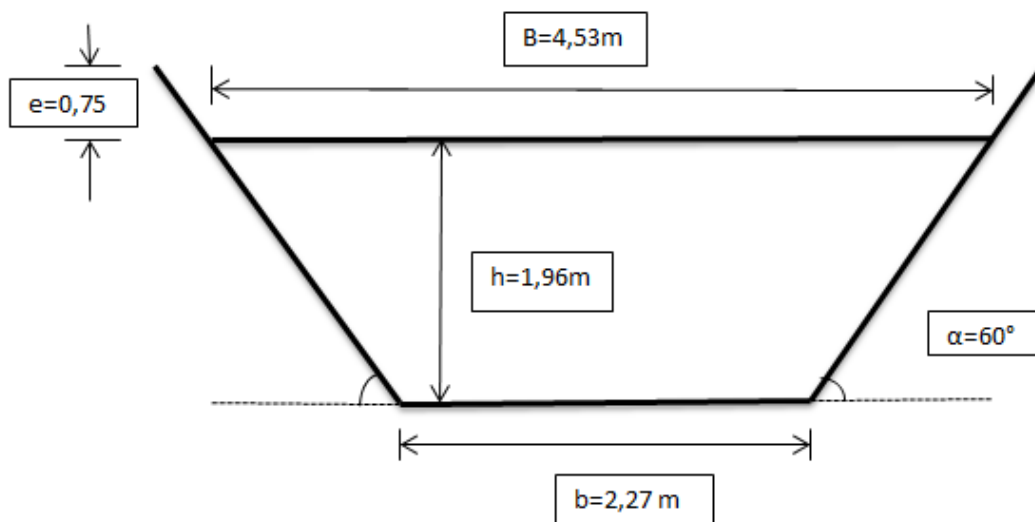


Figure (V.2): schéma des caractéristiques géométriques de notre profil trapézoïdal avec la pente naturelle de 0,01 avec le béton.

D'après le tableau (V.3), en remarque que la vitesse dépasse la vitesse admissible, il faut donc réduire la pente du canal à 0,003.

Les résultats du calcul de la nouvelle géométrie du canal avec la pente réduite (0.003) sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau (V.4): Sections trapézoïdales en béton avec la pente de 0,003

h	b	m	B	Sm	Pm	Rh	l	n	Ks	V	Q	Fr
1	1.1547	0.577	2.3094	1.732	3.4641	0.5	0.003	0.014	71.42857	2.4646	4.268807	0.90862
1.1	1.2702	0.577	2.5403	2.096	3.8105	0.55	0.003	0.014	71.42857	2.62628	5.504109	0.92317
1.2	1.3856	0.577	2.7713	2.494	4.1569	0.6	0.003	0.014	71.42857	2.78313	6.941551	0.93665
1.3	1.5011	0.577	3.0022	2.927	4.5033	0.65	0.003	0.014	71.42857	2.93568	8.593211	0.94923
1.4	1.6166	0.577	3.2332	3.395	4.8497	0.7	0.003	0.014	71.42857	3.08436	10.47084	0.96103
1.5	1.7321	0.577	3.4641	3.897	5.1962	0.75	0.003	0.014	71.42857	3.22954	12.58587	0.97214
1.6	1.8475	0.577	3.695	4.434	5.5426	0.8	0.003	0.014	71.42857	3.37152	14.94949	0.98265
1.7	1.963	0.577	3.926	5.006	5.889	0.85	0.003	0.014	71.42857	3.51058	17.57264	0.99263
1.8	2.0785	0.577	4.1569	5.612	6.2354	0.9	0.003	0.014	71.42857	3.64693	20.46601	1.00213
1.9	2.1939	0.577	4.3879	6.253	6.5818	0.95	0.003	0.014	71.42857	3.78078	23.64011	1.01121
2	2.3094	0.577	4.6188	6.928	6.9282	1	0.003	0.014	71.42857	3.9123	27.10524	1.01989
2.1	2.4249	0.577	4.8497	7.638	7.2746	1.05	0.003	0.014	71.42857	4.04165	30.87152	1.02822
2.2	2.5403	0.577	5.0807	8.383	7.621	1.1	0.003	0.014	71.42857	4.16896	34.94892	1.03622
2.3	2.6558	0.577	5.3116	9.163	7.9674	1.15	0.003	0.014	71.42857	4.29435	39.34723	1.04392
2.4	2.7713	0.577	5.5426	9.977	8.3138	1.2	0.003	0.014	71.42857	4.41794	44.0761	1.05135
2.41	2.7828	0.577	5.5657	10.06	8.3485	1.205	0.003	0.014	71.42857	4.43021	44.56754	1.05208
2.42	2.7944	0.577	5.5888	10.14	8.3831	1.21	0.003	0.014	71.42857	4.44245	45.06239	1.05281
2.43	2.8059	0.577	5.6118	10.23	8.4178	1.215	0.003	0.014	71.42857	4.45468	45.56065	1.05353
2.44	2.8175	0.577	5.6349	10.31	8.4524	1.22	0.003	0.014	71.42857	4.4669	46.06235	1.05426
2.45	2.829	0.577	5.658	10.4	8.487	1.225	0.003	0.014	71.42857	4.47909	46.56748	1.05497
2.46	2.8406	0.577	5.6811	10.48	8.5217	1.23	0.003	0.014	71.42857	4.49127	47.07607	1.05569
2.4601	2.8407	0.577	5.6814	10.48	8.522	1.23	0.003	0.014	71.42857	4.49139	47.08117	1.0557
2.5	2.8868	0.577	5.7735	10.83	8.6603	1.25	0.003	0.014	71.42857	4.53983	49.14506	1.05853
2.6	3.0022	0.577	6.0044	11.71	9.0067	1.3	0.003	0.014	71.42857	4.6601	54.56349	1.06547
2.7	3.1177	0.577	6.2354	12.63	9.3531	1.35	0.003	0.014	71.42857	4.77883	60.34064	1.0722
2.8	3.2332	0.577	6.4663	13.58	9.6995	1.4	0.003	0.014	71.42857	4.89611	66.48566	1.07872
2.9	3.3486	0.577	6.6973	14.57	10.046	1.45	0.003	0.014	71.42857	5.012	73.00757	1.08504
3	3.4641	0.577	6.9282	15.59	10.392	1.5	0.003	0.014	71.42857	5.12657	79.91529	1.09119

La figure suivante montre les caractéristiques géométriques de notre profil trapézoïdal avec la pente de 0,003 avec le béton.

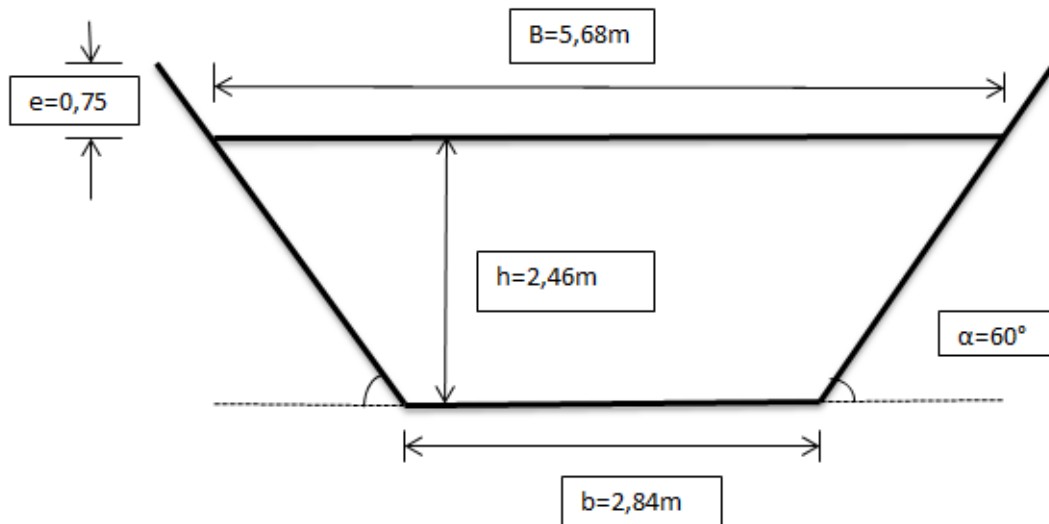


Figure (V.3) : schéma des caractéristiques géométriques de notre profil trapézoïdal avec la pente de 0,003 avec le béton.

Pour la réalisation de ce canal on propose de réaliser une grande chute de 4,47m ou bien pour faciliter la réalisation on réalise plusieurs chutes (18 chutes) de 25 cm.

Voici le schéma qui représente cette proposition :

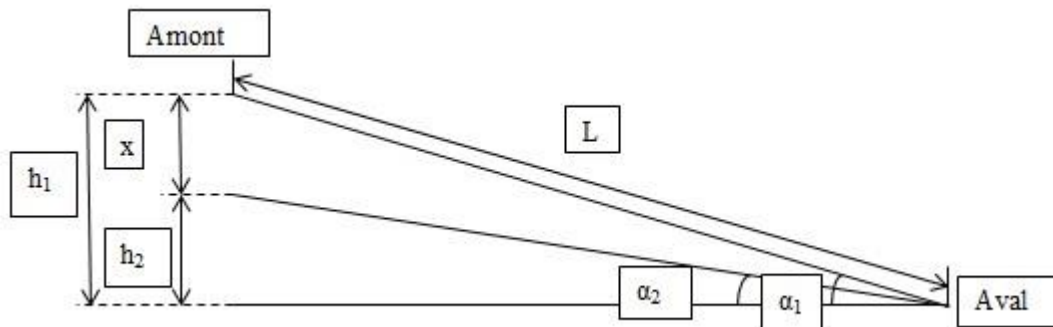


Figure (V.4) : schéma de proposition de la réalisation de chute.

- h_1 : la hauteur de canal.
- h_2 : la hauteur restante à ne pas creuser.
- x : la hauteur de la chute.
- L : la longueur de cours d'eau.
- α_1 : la pente naturelle (0,01).
- α_2 : la pente corrigée (0.003).

V.3.3.2 Variante 2: Un canal en gabion

Les résultats du calcul des caractéristiques du canal avec le gabion avec la pente naturel 0.01 sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau (V.5): Sections trapézoïdales en béton avec la pente de 0, 01 avec le gabion.

h	b	m	B	S _m	P _m	R _h	I	n	K _s	V	Q	F _r
1	1,1547	0,577	2,3094	1,7321	3,4641	0,5	0,01	0,028	35,7143	2,2499	3,897	0,82945
1,1	1,2702	0,577	2,5403	2,0958	3,8105	0,55	0,01	0,028	35,7143	2,3975	5,025	0,84273
1,2	1,3856	0,577	2,7713	2,4942	4,1569	0,6	0,01	0,028	35,7143	2,5406	6,337	0,85504
1,3	1,5011	0,577	3,0022	2,9272	4,5033	0,65	0,01	0,028	35,7143	2,6799	7,844	0,86652
1,4	1,6166	0,577	3,2332	3,3948	4,8497	0,7	0,01	0,028	35,7143	2,8156	9,559	0,87729
1,5	1,7321	0,577	3,4641	3,8971	5,1962	0,75	0,01	0,028	35,7143	2,9481	11,49	0,88744
1,6	1,8475	0,577	3,695	4,4341	5,5426	0,8	0,01	0,028	35,7143	3,0778	13,65	0,89704
1,7	1,963	0,577	3,926	5,0056	5,889	0,85	0,01	0,028	35,7143	3,2047	16,04	0,90615
1,8	2,0785	0,577	4,1569	5,6118	6,2354	0,9	0,01	0,028	35,7143	3,3292	18,68	0,91482
1,9	2,1939	0,577	4,3879	6,2527	6,5818	0,95	0,01	0,028	35,7143	3,4514	21,58	0,9231
1,91	2,2055	0,577	4,411	6,3187	6,6164	0,955	0,01	0,028	35,7143	3,4635	21,88	0,92391
1,92	2,217	0,577	4,4341	6,385	6,6511	0,96	0,01	0,028	35,7143	3,4755	22,19	0,92471
1,93	2,2286	0,577	4,4571	6,4517	6,6857	0,965	0,01	0,028	35,7143	3,4876	22,5	0,92551
1,94	2,2401	0,577	4,4802	6,5187	6,7204	0,97	0,01	0,028	35,7143	3,4996	22,81	0,92631
1,95	2,2517	0,577	4,5033	6,5861	6,755	0,975	0,01	0,028	35,7143	3,5117	23,13	0,92711
1,963	2,2667	0,577	4,5334	6,6742	6,8	0,9815	0,01	0,028	35,7143	3,5272	23,54	0,92813
1,97	2,2748	0,577	4,5495	6,7219	6,8243	0,985	0,01	0,028	35,7143	3,5356	23,77	0,92868
1,98	2,2863	0,577	4,5726	6,7903	6,8589	0,99	0,01	0,028	35,7143	3,5476	24,09	0,92947
1,99	2,2979	0,577	4,5957	6,8591	6,8936	0,995	0,01	0,028	35,7143	3,5595	24,42	0,93025
2	2,3094	0,577	4,6188	6,9282	6,9282	1	0,01	0,028	35,7143	3,5714	24,74	0,93103
2,1	2,4249	0,577	4,8497	7,6383	7,2746	1,05	0,01	0,028	35,7143	3,6895	28,18	0,93863
2,2	2,5403	0,577	5,0807	8,3831	7,621	1,1	0,01	0,028	35,7143	3,8057	31,9	0,94593
2,3	2,6558	0,577	5,3116	9,1625	7,9674	1,15	0,01	0,028	35,7143	3,9202	35,92	0,95297
2,4	2,7713	0,577	5,5426	9,9766	8,3138	1,2	0,01	0,028	35,7143	4,033	40,24	0,95975
2,5	2,8868	0,577	5,7735	10,825	8,6603	1,25	0,01	0,028	35,7143	4,1443	44,86	0,9663
2,51	2,8983	0,577	5,7966	10,912	8,6949	1,255	0,01	0,028	35,7143	4,1553	45,34	0,96695
2,52	2,9098	0,577	5,8197	10,999	8,7295	1,26	0,01	0,028	35,7143	4,1663	45,83	0,96759
2,53	2,9214	0,577	5,8428	11,087	8,7642	1,265	0,01	0,028	35,7143	4,1774	46,31	0,96823
2,5457	2,9395	0,577	5,879	11,225	8,8186	1,27285	0,01	0,028	35,7143	4,1946	47,08	0,96923
2,55	2,9445	0,577	5,889	11,263	8,8335	1,275	0,01	0,028	35,7143	4,1994	47,3	0,9695
2,56	2,956	0,577	5,9121	11,351	8,8681	1,28	0,01	0,028	35,7143	4,2103	47,79	0,97013
2,6	3,0022	0,577	6,0044	11,709	9,0067	1,3	0,01	0,028	35,7143	4,2541	49,81	0,97264
2,7	3,1177	0,577	6,2354	12,627	9,3531	1,35	0,01	0,028	35,7143	4,3625	55,08	0,97878
2,8	3,2332	0,577	6,4663	13,579	9,6995	1,4	0,01	0,028	35,7143	4,4695	60,69	0,98473
2,9	3,3486	0,577	6,6973	14,567	10,046	1,45	0,01	0,028	35,7143	4,5753	66,65	0,9905
3	3,4641	0,577	6,9282	15,588	10,392	1,5	0,01	0,028	35,7143	4,6799	72,95	0,99612

La figure suivante montre les caractéristiques géométriques de notre profil trapézoïdal avec la pente de 0,01 avec le gabion.

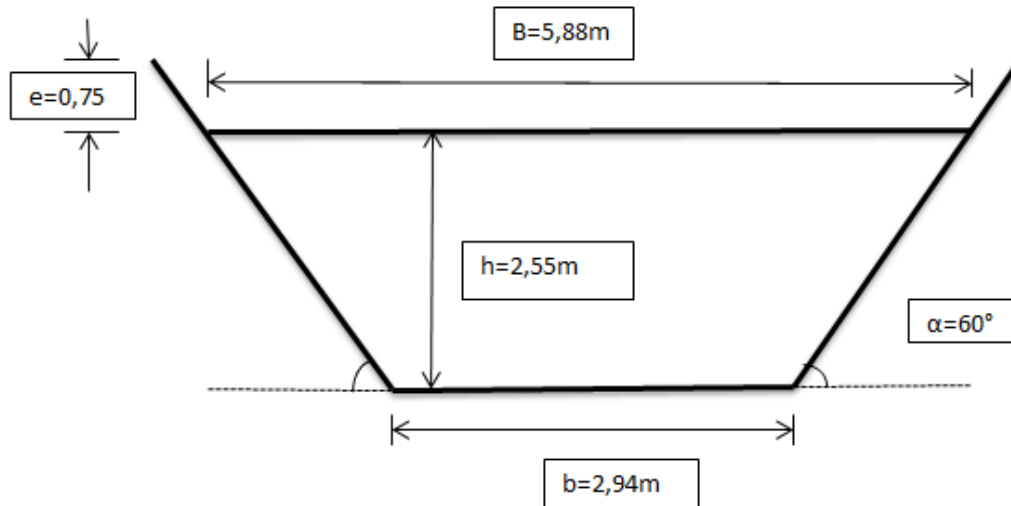


Figure (V.5) : schéma des caractéristiques géométriques de notre profil trapézoïdal avec la pente de 0,01 avec le gabion.

V.3.4 Interprétation des résultats

D'après les résultats de calcul hydraulique de la section adéquate du canal, nous remarquons que la vitesse dans la variante de la pente naturelle dépasse la valeur admissible et pour remédier à cela, la correction de la pente longitudinale s'impose avec la création de chutes d'une hauteur de 25cm afin atténuer ces vitesses et dissiper l'énergie excessive. Et cela valable pour la variante de la pente corrigée.

On propose deux variante pour la construction du ce canal :

La première variante est un canal trapézoïdal avec le béton (ayant une largeur à la base de 2,84m avec une hauteur de 2,46m. En tenant compte de la revanche ($e=0,75m$), la hauteur de canal sera de 3,21m avec la pente corrigée 0,003 m/m), cette variante présente des avantages et des inconvénients.

Avantages :

- Les matériaux de construction sont disponibles ;
- Une durée de vie importante ;
- Facilité de nettoyage.

Inconvénients :

- Nécessité de réaliser la fondation en béton ;
- Faible durabilité à l'érosion et à l'effritement ;
- Un coût de génie civil très élevé.

La deuxième variante est un canal trapézoïdal avec le gabion (ayant une largeur à la base de 2,94m avec une hauteur de 2,55m. En tenant compte de la revanche ($e=0,75m$), la hauteur de canal sera de 5,49m avec la pente naturelle 0,01m/m), cette variante présente des avantages et des inconvénients.

Avantages :

- Ils permettent de réduire la vitesse des courants d'eau grâce à leurs perméabilités ;
- Souplesse d'adaptation et facilité de mise en œuvre ;
- Augmentation de la section mouillée.

Inconvénients :

- L'amont et l'aval sont les points les plus sensibles de la ligne d'enrochement, si l'eau arrive à passer derrière les blocs amonts, tout l'ouvrage est menacé par l'érosion et peut aussi s'effondrer rapidement ;
- Pendant le curage, l'endommagement de certains éléments est inévitable ;
- Il demande une main d'œuvres qualifiées pour sa bonne exécution.

V.4 Critère de sélection de la variante d'aménagement

En réalité, il n'existe pas de méthodes standard pour choisir directement les paramètres optimaux des canaux, car chaque site présente des caractéristiques uniques nécessitant une approche spécifique. Plusieurs options sont envisagées et comparées en termes de coûts. Ensuite, la solution la plus économique est retenue, en prenant en compte les points suivants :

- Les canaux sont conçus en supposant un écoulement uniforme et en dimensionnant le canal pour les événements extrêmes ;
- Pour les débits faibles, un canal triangulaire est privilégié ;
- Pour les débits élevés, une section trapézoïdale est généralement utilisée ;
- L'alignement du canal est choisi pour minimiser sa longueur tout en respectant d'autres contraintes telles que le droit de passage, l'accessibilité, et l'équilibre des quantités de déblais et de remblais ;
- La pente du fond est généralement déterminée par la topographie du site, tandis que la forme et les dimensions du canal sont sélectionnées en fonction du débit à transporter, de la facilité et de l'économie de la construction, ainsi que de l'efficacité hydraulique.

Pour notre cas le choix de la variante d'aménagement sera pris en concertation avec les services concernés

V.5 Conclusion

Les calculs de dimensionnement ont permis d'avoir une structure hydraulique trapézoïdale on 'est calculer ces caractéristiques avec deux variante :

La variante 1 : avec le béton ayant une largeur à la base de 2,84m avec une hauteur de 2,46m. En tenant compte de la revanche ($e=0,75m$), la hauteur de canal sera de 3,21m (avec la pente corrigée).

La variante 2 : avec le gabion ayant une largeur à la base de 2,94m avec une hauteur de 2,55m. En tenant compte de la revanche ($e=0,75m$), la hauteur de canal sera de 5,49m.

Pour notre cas le choix de la variante d'aménagement sera pris en concertation avec les services concernés.

Conclusion générale :

Conclusion générale:

Le principal objectif de cette étude est de proposer un aménagement hydraulique adéquat pour oued Bouinan, afin de protéger la zone contre les inondations

L'étude hydrologique a montré que l'oued Bouinan contient un petit bassin versant couvrant une superficie de 9,203 km². Il est situé entre une altitude de 75,56 m et 880,65 m. Les caractéristiques physiques de ce bassin versant montrent qu'il a une forme allongée avec une longueur de cours d'eau de 7,837 km et un rectangle équivalent d'une longueur de 7,533 km et d'une largeur de 1,378 km.

D'après l'analyse de la série des données pluviométrique et climatologique, on trouve que : le débit de projet Q (100) de 47,08 m³ /s au niveau de l'exutoire de bassin d'oued.

L'utilisation de logiciel HEC-RAS, nous a acquiescé d'avoir les niveaux de la ligne d'eau à plusieurs points du lit d'oued Bouinan et de localiser les zones envahies par les inondations, on remarque qu'il y a des débordements importants dans tous le long de notre cours d'eau.

Pour la crue centennale, les vitesses d'écoulement dans le tronçon considéré pour notre étude varie entre 3.13 et 6.23 m/s les vitesses supérieures peuvent entrainer une érosion du lit de l'oued et les berges, la vitesse d'écoulement moyenne est de 5.20 m/s la pente est non uniforme, la surface mouillée moyenne pour les sections en travers est de 10.93 m².

En dernier lieu on a opté pour la conception d'un canal artificiel à section transversale trapézoïdale, car cette forme représente, d'une part, la section la plus avantageuse pour les écoulements à surface libre ; et d'autre part, elle offre l'avantage d'être technico-économique. Les calculs de dimensionnement ont permis d'avoir une structure hydraulique trapézoïdale on'est calculer ces caractéristiques avec deux variante en béton et en gabion

Pour notre cas le choix de la variante d'aménagement sera pris en concertation avec les services concernés

Bibliographie

- [1] Amin, Z. (2019, avril). Bassin versant et réseau hydrographique.
- [2] Bouhou, A., & L. L. (2022, 02 27). Etude d'aménagement de l'oued Illoula, commune d'Akbou wilaya de Bejaia. béjaia, hydraulique.
- [3] CHEBBAH.L, M. (n.d.). écoulement A surface libre et hydrologie. mila, Génie civil.
- [4] Eddine, T. S., & A. A. (2021). ÉTUDE DE L'AMÉNAGEMENT DE L'OUED SAF-SAF COMMUNE DE RAS EL OUED W. BORDJ BOU ARRÉRIDJ. Béjaia, hydraulique.
- [5] HEC-RAS. (2005, mars). Guide de laboratoire ; École supérieure de technologie. Département de Génie de la construction; Université du Québec.
- [6] Houssein-Eddine, S. (2016). Etude d'aménagement de l'Oued Biskra. ENP, 10 Avenue Hassan Badi, BP.186 EL HARRACH, ALGER, Hydraulique.
- [7] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Bouinan#:~:text=G%C3%A9ographie-,> L. (n.d.).
- [8] <https://fr.weatherspark.com/y/47103/M%C3%A9t%C3%A9o-moyenne-%C3%A0-Blida-Alg%C3%A9rie-tout-au-long-de-l'ann%C3%A9e.> (n.d.).
- [9] <https://www.grobec.org/definition.php>. (n.d.).
- [10] Manual, H.-R. H. (2023, 10 28).
- [11] ML, N. (n.d.). Chapitre II: Notion et définition de l'aménagement hydraulique. Msila, Université Mohamed Boudiaf - M'sila.
- [12] Rafik, R., & Lamine, T. M. (2020/2021). ÉTUDE DE L'AMENAGEMENT DE L'OUED TEKSIRIDEN COMUNE CHORFA W. BOUIRA. Béjaia, Hydraulique.
- [13] Rahim, M., & Thinhinane, A. (2022, 09 29). CONTRIBUTION À L'ÉTUDE D'AMÉNAGEMENT DE OUED TIFRIT, COMMUNE D'AKBOU, WILAYA DE BEJAIA. Béjaia, Hydraulique.
- [14] Rokia, C., Mohamed, D., & Seydou, D. (2019, mai). Généralités sur les cours d'eaux. Mali, Génie civil.
- [15] Support de cours Aménagement hydraulique, 3. a. (n.d.). cours Aménagement hydraulique. Tizi Ouzou, Hydraulique.