



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

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

Option : CONCEPTION DES OUVRAGES HYDROTECHNIQUES

THEME :

**PROTECTION DE LA VILLE EL SAROUEL (W.ANNABA)
CONTRE LES INONDATIONS**

**Présenté par :
OUKALI SOHEIB.**

Devant les membres du jury

Nom et Prénoms	Grade	Qualité
A. ZEROUAL	M.C. A	Président
S. TOUMI	M.C. B	Examineur
D.E. BOURI	M.C. B	Examineur
N. LAUCHE	M.C. B	Examineur
A. KHEDIMALLAH	M.C. B	Promoteur

Session : Septembre 2024

Dédicaces

C'est avec un immense honneur que je dédie ce travail à :

À ma très chère mère

À mon très cher père

À mes très chers frères

À l'ensemble de ma famille

À tous mes camarades de groupe :

Ouvrage hydraulique

À tous mes amis rencontrés au cours de ma vie

Mohamed Acheraf Othmane Abderrazak et

Oukali Soheib

Remerciements

Nous souhaitons tout d'abord exprimer notre gratitude envers le dieu, ﷻ ﷻ ﷻ tout-puissant, pour nous avoir dotés de la volonté et de la patience nécessaires à l'accomplissement de ce modeste projet.

J'ai également à remercier notre promoteur, Monsieur khedimallah Abderrahmane, pour le temps qu'il nous a accordé et l'assistance qu'il nous a fournie, malgré ses nombreuses obligations. Je désire également exprimer ma reconnaissance à Mr A. Zeroual pour l'honneur qu'elle m'a fait en acceptant de présider le jury de cette thèse. Par ailleurs, je souhaite témoigner ma sincère gratitude à Mr S. Toumi, mr D. Bourri, mr N. Laouche qui sont bien voulu examiner mon travail.

J'ai adressé mes remerciements les plus chaleureux à tous les enseignants du département d'Ouvrage hydraulique qui ont participé à notre formation.

Enfin, je remercie toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce projet, que ce soit par leur amitié, leurs conseils ou leur soutien moral.

ملخص

أصبحت الفيضانات في المناطق الحضرية موضوعاً رئيسياً يشغل الرأي العام ويثير مخاوف صانعي القرار والجهات الفاعلة المختلفة. في هذا السياق، أجرينا في هذه الدراسة بحثاً معمقاً يهدف إلى حماية مدينة السرويل، الواقعة في بلدية البوني، ولاية عنابة، من الفيضانات الناتجة عن تدفق الأودية. الهدف الرئيسي لهذه الدراسة هو تهيئة الأودية لتقليل مخاطر الفيضانات. في البداية، حددنا منطقة الدراسة من أجل وضع خطة إعادة تأهيل مناسبة. بعد ذلك، قمنا بإجراء دراسة هيدرولوجية لتحديد تدفقات السيول وتقييم المخاطر. تم تحديد المشاكل والمخاطر الرئيسية المتعلقة بالمجاري المائية، مما سمح لنا باقتراح حلول مناسبة. شملت الدراسة أيضاً تحليلاً شاملاً للمشروع، بما في ذلك تصميم المنشآت الأساسية والثانوية الضرورية. وأخيراً، وبالاعتماد على أدوات مثل استنطنا نمذجة سيناريوهات الفيضانات وتحديد المناطق الأكثر عرضة، للخطر. يهدف المشروع إلى تقديم حل قابل للتنفيذ ومتكامل في البيئة الحضرية، مما يضمن حماية فعالة لمدينة السرويل. كما قمنا بتحديد التكلفة التقديرية لتنفيذ هذا المشروع.

الكلمات المفتاحية: الحماية من الفيضانات، الدراسة الهيدرولوجية، تدفقات السيول، النمذجة، المناطق المعرضة للفيضانات، مخاطر الفيضانات، تكلفة التنفيذ

Résumé

Les inondations en milieu urbain constituent désormais un sujet d'actualité majeur et suscitent des inquiétudes constantes parmi les décideurs et divers intervenants. Dans ce cadre. Dans ce travail, nous avons mené une étude approfondie visant à protéger la ville d'El Sarouel, située dans la commune d'El Bouni, wilaya d'Annaba, contre les inondations provoquées par les crues des cours d'eau. L'objectif principal de cette étude est d'aménager ces cours d'eau afin de minimiser les risques d'inondations, Nous avons d'abord défini la zone d'étude afin de planifier une réhabilitation appropriée. Par la suite, une étude hydrologique a été réalisée pour déterminer les débits de crue et évaluer les risques. Les principaux problèmes et dangers liés au cours d'eau ont été identifiés, permettant ainsi de proposer des solutions adaptées. L'étude a également inclus une analyse complète du projet, comprenant la conception des installations de base et secondaires nécessaires. Enfin, en nous appuyant sur des outils comme HEC-RAS, nous avons pu modéliser les scénarios d'inondation et délimiter les zones les plus à risque. Le projet vise à une solution réalisable et intégrée dans l'environnement urbain, assurant ainsi une protection efficace de la ville d'El Sarouel. Nous avons également déterminé le coût estimatif pour la mise en œuvre.

Les mots clés : Protection contre les inondations, Étude hydrologique, Débits de crue ; Modélisation HEC-RAS, Zones inondables, Risques d'inondation, Coût de mise en œuvre

Abstract:

Urban flooding has become a major issue of concern and raises constant worries among policymakers and various stakeholders. In this context, we conducted an in-depth study aimed at protecting the city of El Sarouel, located in the commune of El Bouni, wilaya of Annaba, against floods caused by the watercourses. The main objective of this study is to manage these watercourses to minimize the risks of flooding. We first defined the study area to plan an appropriate rehabilitation. Subsequently, a hydrological study was carried out to determine the flood flows and assess the risks. The main problems and dangers related to the watercourses were identified, allowing us to propose suitable solutions. The study also included a comprehensive analysis of the project, including the design of essential and secondary installations. Finally, by using tools such as HEC-RAS, we were able to model flooding scenarios and delineate the areas most at risk. The project aims at a feasible solution integrated into the urban environment, thereby ensuring effective protection for the city of El Sarouel. We also determined the estimated cost for the implementation of this project.

Keywords: Flood protection; Hydrological study; Flood flows; HEC-RAS modeling; Flood-prone areas; Flood risks.

Sommaire

CHAPITRE I : Recherche bibliographique sur le risque des inondations

I.1 Introduction	2
I.2 Les inondations :	2
I.2.1 Définition des inondations	2
I.2.2 Classification générale des inondations :	2
I.3 Le risque :	4
I.3.1 Définition de risque	4
I.3.2 Le risque des inondations	5
I.3.3 L'aléa :	6
I.3.4 La vulnérabilité :	8
I.4 L'Étendue des inondations :	10
I.4.1 Les inondations à l'échelle mondiale :	10
I.4.2 Les inondations en Algérie	11
I.4.3 Les inondations à Annaba :	11
I.5 Conclusion :	12

CHAPITRE II : : DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE

II.1 Introduction	13
II.2 Situation géographique et administrative de la wilaya de Annaba	13
II.2.1 Situation géographique :	13
II.2.2 Situation administrative :	13
II.3 Situation géographique et administrative de la commune d'El Bouni	13
II.3.1 Situation géographique :	13
II.3.2 Situation administrative :	14
II.4 La situation géographique privilégiée de la zone d'étude:	15
II.5 Contexte géologiques	16
II.6 Sismicité	16
II.7 La topographie	17
II.8 Relief :	17
II.9 Contexte Climatologique	17
II.9.1 La Température	17

II.9.2 Le vent.....	18
II.9.3 Humidité relative:.....	18
II.9.4 Insolation.....	19
II.9.5 Précipitations météorologiques :	19
II.10 Conclusion.....	20

CHAPITRE III : Etude du bassin versant

III.1 Introduction.....	21
III.2 Analyse du bassin versant	21
III.2.1 Qu'est-ce qu'un bassin versant ?.....	21
III.2.2 Les caractéristiques du bassin versant	21
III.2.3 Les altitudes caractéristiques :	24
III.2.4 Les pentes :	33
III.3 réseau hydrographique :	35
III.3.1 Définition :	35
III.3.2 Hiérarchisation du réseau :.....	35
III.3.3 La longueur totale des cours d'eau et cours d'eau principale :	36
III.3.4 Densité de drainage.....	37
III.3.5 Pente moyenne du cours d'eau	37
III.4 Temps de concentration :	38
III.4.1 Formule SCS (Soil Conservation Service).....	38
III.4.2 Formule de Giandotti	38
III.4.3 La formule de Kirplich.....	39
III.5 Vitesse moyenne de ruissellement Vr :	39
III.6 Conclusion.....	40

CHAPITRE IV : Etude Hydrologique

IV.1 Introduction :	41
IV.2 Analyse des données pluviométriques :	41
IV.2.1 Pluies maximales journalières :.....	41
IV.2.2 Les précipitations maximales journalières :	41
IV.2.3 Contrôle de la série de valeurs :	42
IV.2.4 Les caractéristiques empiriques de la série :	44
IV.2.5 Choix de la loi d'ajustement :	45
IV.3 Conception du hyétoqramme de projet :	49

IV.4 Etude des crues	52
IV.4.1 Diverses approches pour l'évaluation des crues :	52
IV.4.2 Comparaison	59
IV.4.3 L'hydrogramme des crues	59
IV.5 Conclusion :	68

CHAPITRE V : Modélisation de Réseau Hydrographique

V.1. Introduction :	69
V.2. Présentation du logiciel CIVIL 3D :	69
V.2.1. Définition du logiciel CIVIL 3D :	69
V.2.2. La méthodologie de travail avec CIVIL 3D :	69
V.3. La méthodologie de travail avec HEC-RAS :	72
V.3.1. Définition du logiciel HEC-RAS 6.4.1 :	72
V.3.2. L'environnement du logiciel HEC-RAS :	72
V.3.3. Les étapes de travail avec HEC-RAS :	73
V.4. Simulation hydraulique de réseau hydrographique EL SAROUEL	76
V.5. Résultats de la simulation hydraulique par le logiciel HEC- RAS :	78
V.6. Conclusion	79

CHAPITRE VI : Aménagement du cours d'eau

VI.1. Introduction :	80
VI.2. Techniques d'aménagement :	80
VI.2.1. Protection directe	80
VI.2.2. La protection indirecte :	81
VI.3. Généralités sur les écoulements à surface libre :	81
VI.3.1. Définition :	81
VI.3.2. Canaux à ciel ouvert	81
VI.3.3. Différents types de canaux :	82
VI.4. Choix de la variante d'aménagement	82
VI.4.1. Élaboration d'un canal en béton armé :	82
VI.4.2. Les avantages et les inconvénients des matériaux employés dans les constructions Béton armé :	82
VI.4.3. Choix de la revanche du canal :	83
VI.4.4. Choix de la pente :	83
VI.4.5. Le coefficient de rugosité :	83

VI.4.6. Débit de crue statistique :	83
VI.5. Choix de la section type pour les différents canaux de l'aménagement projeté :	83
VI.6. Calcul hydraulique et dimensionnement des sections types des canaux projetés :	84
VI.6.1. FORMULE DE MANNING-STRICKLER :	84
VI.6.2. Dimensionnement	85
VI.6.3. Principe de calcul :	90
VI.6.4. Vitesse d'érosion	90
VI.7. Résultats de la simulation hydraulique par le logiciel HEC- RAS après l'aménagement :	91
VI.8. Analyse des résultats de calcul :	94
VI.9. Dimensionnement des infrastructures de passage :	96
VI.9.1. Choix de l'ouvrage de passage (franchissement) :	96
VI.9.2. Élaboration des buses et des dalots	98
VI.10. Conclusion :	98

CHAPITRE VII:Organisation de chantier

VII.1. Introduction :	99
VII.2. Organisation de chantier :	99
VII.3. Les intervenants sur le chantier :	99
VII.4. Travaux préparatoires et installation de l'entreprise :	100
VII.4.1. Installations destinées au personnel :	100
VII.4.2. Installations destinées au stockage des matériaux :	100
VII.4.3. Installations destinées à la réparation des engins :	100
VII.4.4. Installations destinées à la préfabrication :	100
VII.5. Réalisation des travaux :	100
VII.5.1. Travaux de terrassement :	100
VII.5.2. Travaux d'excavation :	101
VII.6. Les Moyens de chantier :	101
VII.6.1. Moyens Humains :	101
VII.6.2. Moyens Matériels :	101
VII.7. Devis quantitatif et estimatif du projet :	102
VII.8. Conclusion.....	103

Liste des tableaux

CHAPITRE II :

Tableau II-1 Températures moyennes mensuelles en C° (2001-2010).	18
Tableau II-2 : Vitesses moyennes mensuelles des vents en m/s.	18
Tableau II-3 : Humidité relative moyenne mensuelle en % (2001-2010).	19
Tableau II-4 : moyenne des insolation totales en heures à la station des salines 2001-2010.	19
Tableau II-5 : Stations Pluviométriques	19
Tableau II-6 : Série d'observations des précipitations moyennes annuelles du poste pluviométrique de " Pont Bouchet " (sans lacunes)	20

CHAPITRE III :

Tableau III-1 : Surface du bassin versant de EL SAROUEL et leur sous bassins	22
Tableau III-2 : Périmètre du bassin versant d'EL SAROUEL et leur sous bassins	23
Tableau III-3 indice de compacité de Gravelius des sous bassins.....	23
Tableau III-4 : Rectangle équivalent du bassin versant d'EL SAROUEL et leur sous bassins	24
Tableau III-5 : La répartition altimétrique du sous bassin versant d'EL SAROUEL	25
Tableau III-6 : La répartition altimétrique du sous bassin versant d'EL SAROUEL	25
Tableau III-7 : La répartition altimétrique du sous bassin versant d'EL SAROUEL	26
Tableau III-8 : La répartition altimétrique du sous bassin versant d' EL SAROUEL	27
Tableau III-9 : La répartition altimétrique du sous bassin versant d'EL SAROUEL	28
Tableau III-10 : La répartition altimétrique du sous bassin versant d'EL SAROUEL	29
Tableau III-11 : La répartition altimétrique du sous bassin versant d' EL SAROUEL	30
Tableau III-12 : La répartition altimétrique du sous bassin versant d' EL SAROUEL	31
Tableau III-13 Les altitudes maximale et minimale	32
Tableau III-14 : L'altitude moyenne du bassin versant d'ESSEROUEL et ses sous bassins .	33
Tableau III-15 : Pente moyenne du bassin versant d'ESSEROUEL et ses sous bassins	34
Tableau III-16 : Indice de pente globale du bassin versant de EL SAROUEL et ses sous bassins	34
Tableau III-17 : La longueur totale des cours d'eau et cours d'eau principale	36
Tableau III-18 : Densité de drainage du bassin versant d'ESSEROUEL et ses sous bassins .	37
Tableau III-19 : Pente moyenne du cours d'eau du bassin versant d'EL ESAROUEL Et ses sous bassins	37
Tableau III-20 : Temps de concentration du bassin versant EL SAROUEL et ses sous bassins en heures.....	39
Tableau III-21 Vitesse moyenne de ruissellement V_r	40

CHAPITRE IV :

Tableau IV:1 Séries des Pluies Maximales Journalières (1977-2020) à la station de pont bouchet[Source ANRH ALGER]	42
Tableau IV:2 . Calcul des paramètres du test de la médiane.....	43

Tableau IV:3 Les caractéristiques empiriques de la série HEC-SSP	44
Tableau IV:4: Résultats de l'ajustement à la loi de log-normale	46
Tableau IV:5 : Résultats de l'ajustement à la loi de GUMBEL	48
Tableau IV:6 : Pluie de courte durée pour les sous bassins	50
Tableau IV:7: Intensité de courte durée pour les sous bassins.....	50
Tableau IV:8: Les débits max par la formule de Mallet et Gauthier.....	53
Tableau IV:9 : Les débits max par la formule de Professeur M. Meddi & al. 2017	54
Tableau IV:10 CN des conditions normales du sol (Chow, 1988).....	57
Tableau IV:11: Les débits max par la Méthode SCS	59
Tableau IV:12 les débits de montée et de décrue SB1	60
Tableau IV:13 les débits de montée et de décrue SB2	61
Tableau IV:14 les débits de montée et de décrue SB3	62
Tableau IV:15 les débits de montée et de décrue SB4	63
Tableau IV:16 les débits de montée et de décrue SB5	64
Tableau IV:17 les débits de montée et de décrue SB6	65
Tableau IV:18 les débits de montée et de décrue SB7	66
Tableau IV:19 les débits de montée et de décrue SB8	67

CHAPITRE VI :

Tableau VI:1: Revanches utilisées (Degoutte,2012).	83
Tableau VI:2. Dimensions de l'aménagement en béton armé du tronçon de canal 1 var1.....	86
Tableau VI:3. Dimensions de l'aménagement en béton armé du tronçon de canal 2 var1.....	86
Tableau VI:4. Dimensions de l'aménagement en béton armé du tronçon de canal3 var1.....	86
Tableau VI:5. Dimensions de l'aménagement en béton armé du tronçon de canal5 var1.....	86
Tableau VI:6. Dimensions de l'aménagement en béton armé du tronçon de canal6 var1.....	86
Tableau VI:7. Dimensions de l'aménagement en béton armé du tronçon de canal 7 var1.....	87
Tableau VI:8. Dimensions de l'aménagement en béton armé du tronçon de canal 8 var1.....	87
Tableau VI:9. Dimensions de l'aménagement en béton armé du tronçon de canal 9 var1.....	87
Tableau VI:10. Dimensions de l'aménagement en béton armé du tronçon de canal 10 var1.	87
Tableau VI:11. Dimensions de l'aménagement en béton armé du tronçon de canal 11 var1.	87
Tableau VI:12. Dimensions de l'aménagement en béton armé du tronçon de canal 1 var2...	88
Tableau VI:13. Dimensions de l'aménagement en béton armé du tronçon de canal 2 var2...	88
Tableau VI:14. Dimensions de l'aménagement en béton armé du tronçon de canal 3 var2...	88
Tableau VI:15. Dimensions de l'aménagement en béton armé du tronçon de canal 5 var2...	88
Tableau VI:16. Dimensions de l'aménagement en béton armé du tronçon de canal 6 var2...	89
Tableau VI:17. Dimensions de l'aménagement en béton armé du tronçon de canal 7 var2...	89
Tableau VI:18. Dimensions de l'aménagement en béton armé du tronçon de canal 8 var2...	89
Tableau VI:19. Dimensions de l'aménagement en béton armé du tronçon de canal 9 var2...	89
Tableau VI:20. Dimensions de l'aménagement en béton armé du tronçon de canal 10 var2.	89
Tableau VI:21. Dimensions de l'aménagement en béton armé du tronçon de canal 11 var2.	90
Tableau VI:22. Valeurs de vitesse moyenne limite d'érosion pour les lits consolidés (Degoutte, 2012).....	90
Tableau VI:23. Pré-dimensionnement des buses et des dalots projetés :.....	97
Tableau VI:24 . Photo d'un dalot.....	98

CHAPITRE VII :

Tableau VII :1. Devis quantitatif et estimatif du projet.....	102
--	-----

Table des figures

CHAPITRE I :

Figure I-1: Modèle Conceptuel du Risque	5
Figure I-2 Type de catastrophes naturelles survenues dans le monde de 1990 à 2007 ; (CRED, 2007).....	10

CHAPITRE II :

Figure II.1 Carte de situation géographique de la plaine de ANNABA"	14
Figure II.2 : Présentation de la Situation géographique de la zone d'étude. Source (google earth.2024).....	15
Figure II.3 : situation géographique et esquisse géologique du territoire de la wilaya d'annaba. Source (LAMROUS, 2001)	16
Figure II.4 : carte de zonage sismique du territoire nationale. Source : (RPA 99 version 2003)	17

CHAPITRE III :

Figure III-1: Délimitation des sous bassins sous Arc GIS de la zone d'étude	22
Figure III-2: Courbe hypsométrique de sous bassin numéro un (1).....	25
Figure III-3: Courbe hypsométrique de sous bassin numéro (2).....	26
Figure III-4: Courbe hypsométrique de sous bassin numéro (3).....	27
Figure III-5: Courbe hypsométrique de sous bassin numéro (4).....	28
Figure III-6: Courbe hypsométrique de sous bassin numéro (5).....	29
Figure III-7: Courbe hypsométrique de sous bassin numéro (6).....	30
Figure III-8: Courbe hypsométrique de sous bassin numéro (7).....	31
Figure III-9: Courbe hypsométrique de sous bassin numéro (8).....	32
Figure III-10 classification de réseau hydrographique sous Arc GIS.....	36

CHAPITRE IV :

Figure IV-1 Les Pluies Maximales Journalières de station Pont Bouchet traiter par hec-ssp. 45	
Figure IV-2 Ajustement à la loi de GALTON	47
Figure IV-3: Ajustement à la loi de GUMBEL	48
Figure IV-4 : Courbes hauteur- Durée - Fréquence.....	50
Figure IV-5 : Courbes Intensité – Durée – Fréquence.....	52
Figure IV-6 : Variables dans la méthode SCS des abstractions de pluie : Ia = abstraction initiale, Pe = excès de pluie, Fa = abstraction continue, et P = précipitation totale.	54
Figure IV-7: Hydrogramme de crue SB1	61
Figure IV-8: Hydrogramme de crue SB2	62
Figure IV-9: Hydrogramme de crue SB3	63
Figure IV-10: Hydrogramme de crue SB4	64
Figure IV-11: Hydrogramme de crue SB5	65
Figure IV-12: Hydrogramme de crue SB6	66

Figure IV-13: Hydrogramme de crue SB7	67
Figure IV-14: Hydrogramme de crue SB8	68

CHAPITRE V :

Figure V-1 : Transformer des levés topographiques en contours et en Modèle Numérique de Terrain (MNT).....	70
Figure V-2 : Créer les Axes du Cours d'Eau (Oued) et les rives	71
Figure V-3 : Logiciel HEC-RAS de Hydrologic Engineering Center.....	72
Figure V-4 : créer un espace de travail dans HEC-RAS	73
Figure V-5 : importer géométric data	73
Figure V-6 : La sélection des valeurs de rugosité de Manning et Downstream Reach Lengths	74
Figure V-7 : entrer les débits et les condition limites	75
Figure V-8 : lancer la simulation	75
Figure V-9 Tracé de l'Oued et les sections en travers	76
Figure V-10 : Le profil pour la section en travers	77
Figure V-11 : entrer les débits et les condition limites du réseau hydrographique d' EL SAROUEL	77
Figure V-12 : Interface graphique de logiciel HEC-RAS après la simulation	78
Figure V-13 : Profils des sections en travers après la simulation.....	79

CHAPITRE VI :

Figure VI-1 : Profils des sections en travers après la simulation après l'aménagement de forme trapézoïdale	92
Figure VI-2 : Profils des sections en travers après la simulation après l'aménagement de forme rectangulaire	93
Figure VI-3 Profile en long après la simulation de canal 8.....	93
Figure VI-4 : Visualisation en 3D des zones inondables pour la crue centennale pour le canal 8.....	94
Figure VI-5: Bénéfices et limites des diverses solutions envisagées	97

Liste Des Planches

- 1) Plan de masse de l'agglomération de EL SAROUEL EI BOUNI W-ANNABA
- 2) Plan d'aménagement de EL SAROUEL EI BOUNI W-ANNABA.
- 3) Profil en long des canal 1
- 4) Profils type du canal aménagée 5.

INTRODUCTION GENERALE

En Algérie, le risque d'inondation constitue l'un des principaux défis auxquels sont confrontées les agglomérations situées en bordure des versants dans les zones de basse plaine, notamment aux embouchures des oueds.

L'inondation se définit comme une submersion, qu'elle soit rapide ou progressive, capable d'affecter d'importantes surfaces tant naturelles qu'urbaines, résultant du débordement des eaux lors d'une crue. Par essence, une crue se caractérise par une élévation rapide et temporaire du débit d'un cours d'eau, laquelle peut être décrite à travers trois paramètres : la hauteur, le débit et la vitesse du courant.

Les crues surviennent lorsque le sol et la végétation ne parviennent pas à absorber l'intégralité de l'eau de ruissellement, entraînant ainsi une montée du niveau du lit du cours d'eau. Dans la majorité des cas, ce dernier ne déborde pas, mais il arrive que l'eau ruisselle en quantités excédant la capacité des lits des cours d'eau ou des bassins, qu'ils soient naturels ou artificiels.

Le cours d'eau déborde, entraînant ainsi une inondation. Les crues soudaines, qui peuvent se produire à l'automne dans les zones méditerranéennes, résultent souvent de fortes précipitations concentrées sur une surface restreinte. De plus, les pratiques agricoles intensives réduisent la capacité du sol à retenir l'eau, ce qui augmente le ruissellement.

L'activité humaine a exacerbé les inondations en dégradant l'environnement naturel autour de certains cours d'eau, notamment par l'imperméabilisation des bassins versants. Il est bien établi que l'imperméabilisation des sols due aux constructions et infrastructures accroît les coefficients de ruissellement, ce qui accélère l'écoulement des eaux et intensifie les débits en aval. Dans ce contexte, l'incapacité des réseaux d'assainissement est considérée comme l'une des causes majeures de ce phénomène.

Bien que l'impact de ces inondations soit généralement localisé et que le nombre de victimes soit souvent limité, il varie considérablement en fonction de la densité des habitations, de leur emplacement et du type de construction utilisé.

L'analyse de ces phénomènes représente une tâche complexe, influencée par divers paramètres considérés comme aléatoires. Parmi ces facteurs, les précipitations et les débits jouent un rôle prépondérant dans l'évolution hydrologique de ces événements.

La ville d'EL SAROUEL, située au pied du versant sud du bassin de oued Boudjmaa, dans le nord-est de l'Algérie, est confrontée à ce type de risque depuis plusieurs années. Une série d'épisodes pluvieux exceptionnels a conduit à des crues et des inondations. Les

conséquences ont parfois été désastreuses, ce qui amène cette étude à tenter de caractériser le bassin versant de cette ville. En effet, il est essentiel d'aborder les problématiques liées aux crues en ayant une compréhension globale des caractéristiques de son bassin. Par la suite, il sera envisagé de simuler la crue centennale à l'aide du logiciel HEC-RAS afin d'évaluer la hauteur d'eau et d'identifier les débordements .



Chapitre I

RECHERCHE
BIBLIOGRAPHIQUE SUR
LE RISQUE DES
INONDATIONS



CHAPITRE I : Recherche bibliographique sur le risque des inondations

I.1 Introduction

Le terme « inondation » est d'acception plutôt topographique ou géomorphologique. Il désigne le débordement d'un cours d'eau hors de son lit habituel entraînant la submersion d'espaces habituellement exondés. Il s'applique aussi au remplissage d'une cuvette topographique par les eaux de ruissellement local. On parle alors d'inondation pluviale. Ces phénomènes se distinguent par la vitesse de l'eau, le volume d'eau écoulé et la hauteur d'eau. Ces paramètres sont essentiels pour comprendre les dommages et instaurer des politiques de prévention efficaces et adaptées. La diversité du risque inondation à l'échelle internationale et nationale se manifeste par des catastrophes plus ou moins graves. Les dommages dus aux inondations sont croissants et préoccupent assureurs et gestionnaires du risque. Au-delà du débat sur les effets du réchauffement climatique sur la fréquence et l'intensité des crues, on constate une augmentation quasi générale du risque par augmentation des enjeux dans les zones exposées.

I.2 Les inondations :

I.2.1 Définition des inondations

Une inondation se définit comme une immersion temporaire d'une zone terrestre par de l'eau, qui ne serait normalement pas inondée. Peu importe sa source, il s'agit de la catastrophe naturelle la plus courante, représentant la moitié des événements catastrophiques à l'échelle mondiale. L'inondation peut également être considérée comme une submersion, qu'elle soit d'origine naturelle ou artificielle, résultant de fortes précipitations.

I.2.2 Classification générale des inondations :

I.2.2.1 Inondations d'origines météorologiques directes :

Nous mentionnons les principales inondations d'origine climatique Voici les suivants :

(a) . Les inondations dues à des crues torrentielles ou éclair

Les inondations trouvent leur origine dans une élévation soudaine des niveaux d'eau (de plusieurs mètres en quelques heures) des torrents ou des rivières, provoquée par des pluies intenses. Elles résultent d'un écoulement rapide des eaux pluviales, en raison de la forte inclinaison des cours d'eau et de l'intensité des précipitations. Leur prévision est difficile, souvent impossible, plusieurs jours à l'avance. Ces phénomènes touchent particulièrement les zones montagneuses et peuvent être extrêmement destructeurs et mortels. Ils sont engendrés

par des pluies convectives qui affectent parfois uniquement une portion du bassin versant, et se caractérisent par une évolution très rapide. L'augmentation du niveau des eaux est brutale, laissant peu de temps pour avertir les habitants des rives. Dans les pays développés, ce sont ces crues rapides qui sont principalement responsables des décès par noyade. Ce type de crue influence également le fonctionnement des systèmes d'assainissement pluvial (Y.DAHDOUN ; 2018)

- **Par débordement direct** : Le cours d'eau dépasse son lit mineur pour envahir son lit majeur.
- **Par débordement indirect** : Les eaux s'élèvent par effet de siphon à travers les nappes alluviales et les réseaux d'assainissement.

(b) .Par accumulation d'eau ruisselée :

Lorsqu'il y a une capacité insuffisante d'infiltration, d'évacuation des sols ou du réseau de drainage lors des pluies anormales, des pluies intenses, du fait de l'imperméabilisation des sols et de la conception de l'urbanisation et des réseaux d'assainissement) (H.Oumarou et A.Oumarou ; 2017) .

(c) . Les inondations par remontée de nappe :

Le risque d'inondation lié à une crue peut être amplifié par la remontée des eaux des nappes phréatiques. Dans certaines régions et sous des conditions spécifiques, une élévation anormale du niveau de ces nappes engendre un phénomène particulier d'inondation, désigné sous le terme « inondation par remontée de nappe ». Ce phénomène est souvent constaté dans les zones de convergence des écoulements, en raison de la présence d'un substratum imperméable. L'excès d'eau ne peut que remonter à la surface, ce qui entraîne la formation de zones hydromorphes telles que des étangs, des mares temporaires et des marécages dans certaines dépressions. (Y.DAHDOUN ;2018)

(d) .Les inondations de plaine :

Surviennent à la suite de précipitations océaniques prolongées, mais de faible intensité, qui affectent des bassins versants de taille moyenne à grande (supérieure à 500 km²) où le ruissellement met du temps à se manifester. Le cours d'eau déborde progressivement de son lit mineur pour envahir le lit majeur et submerger la plaine. Ce phénomène peut persister pendant plusieurs semaines. (Bachi .M, 2011)

(e) . Inondations d'origines non météorologiques

Les inondations induites par d'autres aléas naturels. Les inondations d'origine non climatique sont très diverses. Elles peuvent être considérées comme des effets induits d'autres phénomènes naturels. Le tsunami est le cas typique d'une inondation sans crue. L'inondation des zones côtières est très brutale et liée à un phénomène géophysique sous-marin (éruption volcanique, séisme, mouvement de terrain...). La gravité de l'inondation est mesurée par le run top : c'est-à-dire la hauteur d'eau maximale atteinte par la vague à la côte qui peut atteindre plusieurs dizaines de mètres et par l'étendue des zones touchées. Le tsunami du 26 décembre 2004 qui a fait plus de 230 000 morts sur le pourtour de l'océan Indien était lié à un séisme sous-marin de magnitude 9,2. Les tsunamis sont les plus fréquents autour de la ceinture péripacifique mais ils affectent aussi la Méditerranée. Les inondations causées par la

submersion marine La submersion marine désigne une inondation passagère des zones littorales, résultant de l'intrusion d'eau salée en provenance de la mer. Ce phénomène se manifeste généralement à la suite d'événements météorologiques ou océanographiques exceptionnels, tels qu'une marée exceptionnellement haute, le phénomène de surcote, ou encore l'élévation du niveau de la mer provoquée par une fonte significative des glaciers (Chabane, et al., 2016).

I.2.2.2 Inondations d'origines anthropiques (risque technologique)

- **Inondation par rupture d'ouvrage ou d'embâcle**

Les ruptures de barrage ont lieu au moins une fois par an dans le monde. Les causes en sont soit un défaut de conception de l'ouvrage (sous-dimensionnement, mauvaises fondations...) mise en évidence par un événement naturel qui va fragiliser l'ouvrage soit un événement extérieur qui va entraîner la rupture de l'ouvrage. Les barrages sont très hétérogènes dans leur conception, leur taille et leur utilisation. Certains sont en terre comme celui qui s'est rompu en août 2008 dans le Colorado entraînant l'évacuation préventive de centaines de touristes dans le Grand Canyon. En, mai 2008 de fortes pluies dans le nord-est du Brésil ont provoqué la rupture d'un barrage dans l'État du Piauí. L'onde de submersion a détruit au moins 500 maisons et fait deux disparus. Près de 2500 familles qui vivaient à proximité du barrage avaient été évacuées une semaine auparavant en raison des risques de rupture de l'ouvrage. En France, les grands barrages (plus de 15 m de hauteur) sont conçus de façon à pouvoir résister à des crues de période de retour millénaire. Les causes des ruptures sont liées à des défauts de conception ou de fonctionnement ou des accidents naturels : crue dépassant la crue de projet, glissement de terrain dans le lac réservoir, séisme mais aussi un acte de malveillance comme un attentat. La vidange brutale d'un lac de réservoir de barrage entraîne une onde de submersion qui se propage très rapidement à l'aval. Si la rupture est brutale, elle laisse peu de chance de survie aux personnes situées dans la zone de proximité immédiate. Le risque de rupture est encore peu connu du public en France mais commence à être pris en considération dans les plans particuliers d'intervention (PPI).

I.3 Le risque :

I.3.1 Définition de risque

Le concept de risque est étroitement lié à celui de catastrophe. Il y a en effet risque lorsque des enjeux humains ou matériels se trouvent placés dans une situation de danger qui peut aboutir à une catastrophe.

Le risque est donc la conjonction d'une menace potentielle, l'aléa, et de l'exposition d'enjeux. Mais l'exposition ne suffit pas : il faut en outre que ces enjeux soient vulnérables.

$$\text{Risque} = \text{aléa} + \text{vulnérabilité}$$

Cette équation, qui n'a en fait aucune valeur mathématique, est aujourd'hui la définition la plus consensuelle du risque. Elle signifie que le risque est le produit de la rencontre entre une source de danger et une société : la survenance d'un séisme dans un désert n'est pas un risque. (S.beucher et al. ; 2008).

I.3.2 Le risque des inondations

Le risque d'inondation est le fruit d'interactions complexes entre la ville et ses fleuves, et se caractérise par sa variabilité spatio-temporelle. L'analyse géohistorique et systémique menée à partir de sources d'archives permet de comprendre les interactions entre l'urbanisation (Combe, C. 2007).

Le risque d'inondation est la conséquence de deux composantes : que sont la vulnérabilité et l'aléa.

Il y a risque lorsque nous sommes sur une parcelle avec une occupation du sol incompatible avec l'aléa. Le risque étant déterminé par le croisement entre l'aléa et la vulnérabilité, il faut être capable de les comparer. Ceci est possible avec les modèles hydrologiques en débit, durée et fréquence qui permettent de traduire dans la même unité les deux facteurs.

Si la vulnérabilité est plus faible que l'aléa, nous considérons la parcelle comme ne présentant pas le risque. Elle est correctement protégée, voire surprotégée. Dans le cas contraire, nous aurons une parcelle à risque qu'il faudra protéger ou évacuer.

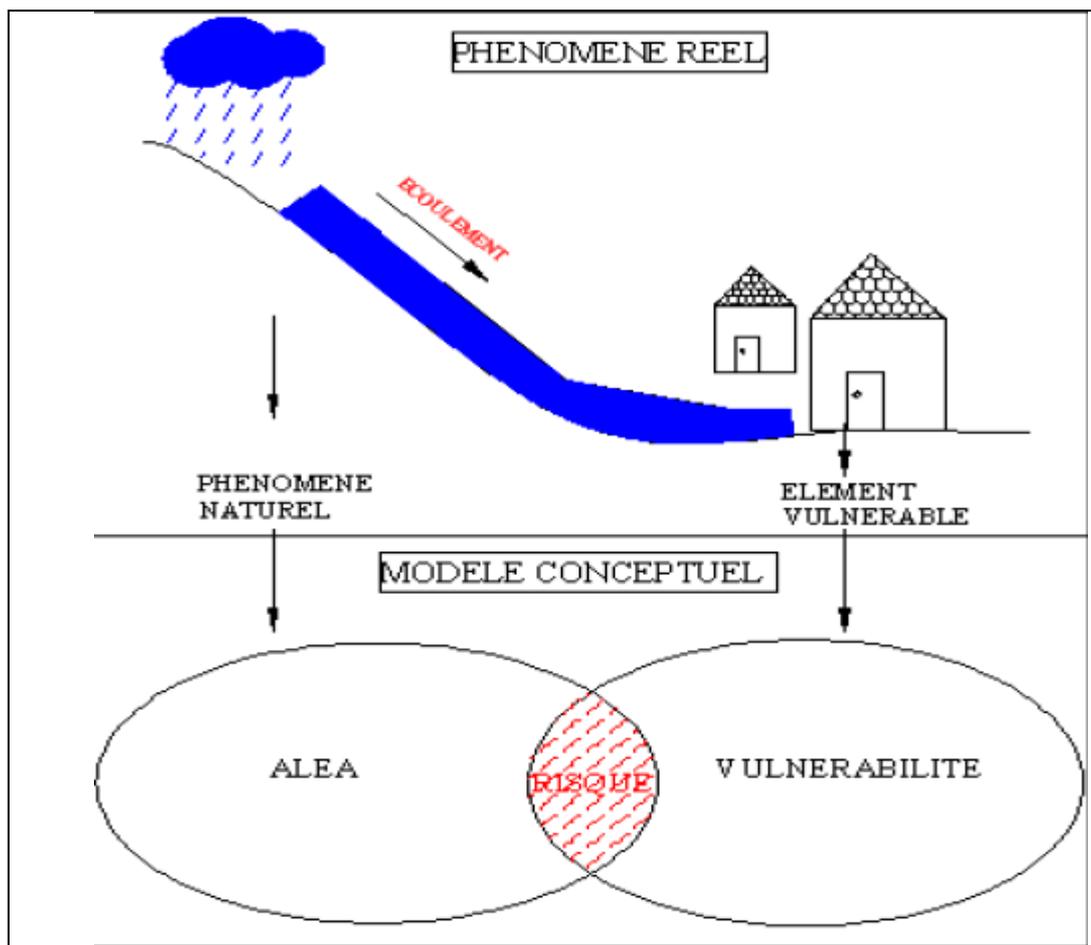


Figure I.1: Modèle Conceptuel du Risque

I.3.3 L'aléa :

I.3.3.1 Définition globale de l'aléa :

L'aléa est défini comme la source de danger. Il est défini par sa nature, sa fréquence et son intensité. En soi, l'aléa est un élément neutre : il n'est ni bon ni mauvais. Mais, en présence d'enjeux, il peut constituer une menace. On notera du reste que, selon la façon dont une société fait face à l'aléa, selon son adaptation à celui-ci, il peut devenir une ressource. L'incendie peut ainsi avoir des vertus bénéfiques pour le milieu naturel ; la crue d'un fleuve peut être source du dépôt de limons fertiles, etc. L'aléa peut avoir différentes origines. Un aléa naturel est par exemple considéré comme produit par le milieu naturel. Il existe également des aléas dits anthropiques, économiques, sanitaires, etc. Dans les années 1950, les géographes américains ont défini l'aléa comme le produit des interactions entre la société et son environnement. L'aléa est modifié par l'action anthropique, mais, dans le même temps, il contribue à modifier la société par les adaptations qu'il entraîne.

I.3.3.2 Composante spatio-temporelle de l'aléa cas de l'inondation :

Composante spatio-temporelle de l'aléa se réfère à l'intensité du phénomène. Sur le plan spatial, l'aléa peut être spécifiquement défini par des éléments tels que les zones inondées, les niveaux d'eau, la durée des submersions, ainsi que les vitesses et débits observés dans la plaine. Un indicateur fréquemment utilisé pour mesurer l'intensité de l'aléa est le débit de pointe, qui représente le débit maximal instantané circulant dans la plaine au moment culminant de la crue. Ce débit varie en fonction de la localisation au sein de la plaine inondable, ce qui souligne l'importance de la composante spatiale de l'aléa.

De plus, le temps de concentration est souvent employé pour caractériser l'aléa. Ce dernier est théoriquement défini pour un bassin versant comme le temps requis pour qu'une goutte d'eau, tombée au point le plus éloigné de l'exutoire, y parvienne. Ce temps dépend notamment de la capacité d'infiltration des sols, ainsi que de l'occupation du sol et des caractéristiques morphologiques et climatiques du bassin versant. En règle générale, pour des bassins versants présentant des caractéristiques similaires, un temps de concentration réduit est lié à un débit de pointe plus élevé. (Defrance. D, 2009).

Selon leur intensité et leur fréquence, les niveaux d'aléa peuvent être classés comme suit :

- **Aléa majeur** : événement très exceptionnel, avec des risques de dommages extrêmement graves et immédiats, menaçant directement des vies humaines.
- **Aléa fort** : les risques de dommages sont considérables. En général, il n'existe pas de mesures de protection efficaces et économiquement viables.
- **Aléa moyen** : zone affectée par des manifestations physiques encore très nuisibles, où des mesures de protection sont généralement envisageables.
- **Aléa faible** : zone touchée par des manifestations très limitées.

I.3.3.3 Analyse de L'ALÉA (inondation) :

L'aléa se réfère à l'inondation elle-même, représentant la contrainte hydraulique naturelle qui impacte chaque maille en raison du fonctionnement hydrologique du bassin versant et de l'hydraulique du cours d'eau, entraînant des inondations par débordement du lit. L'évaluation de l'aléa constitue la phase la plus courante dans la majorité des études relatives au risque d'inondation, s'appuyant sur une modélisation hydrologique et hydraulique des crues, pouvant revêtir diverses formes (crue historique, crue de référence, etc.). Cette évaluation met en évidence une variable unique à chaque point, qui est définie comme une période moyenne de retour, mesurée en années. L'objectif de l'évaluation de l'aléa est de quantifier cette variable mathématique équivalente, Quatre paramètres principaux sont requis pour quantifier l'aléa :

- La période de retour des crues, qui est proportionnelle à l'intensité et à l'importance des débits.
- La hauteur et la durée de submersion
- La vitesse du courant
- Le volume des matières transportées

(a) **La notion de période de retour est souvent associée aux crues** : telles que les crues décennales, centennales ou millénales. On peut les classer par ordre croissant

- Les crues fréquentes, avec une période de retour variant entre un et deux ans.
- Les crues moyennes, dont la période de retour se situe entre dix et vingt ans.
- Les crues exceptionnelles, ayant une période de retour d'environ cent ans.
- La crue maximale vraisemblable, qui remplit l'intégralité du lit majeur.

Les événements les plus couramment représentés sur les cartes d'aléa sont la crue décennale (Q10) et la crue centennale (Q100), ou le plus fort événement connu, si sa fréquence dépasse cent ans. Pour évaluer l'aléa, on utilise la théorie mathématique des probabilités afin de déterminer une loi théorique qui peut modéliser la fonction de distribution du phénomène étudié.

(b) **La hauteur et la durée de la submersion** :

La hauteur de la submersion peut avoir des conséquences significatives sur les constructions, surtout lorsqu'elle dépasse le niveau de référence. La structure porteuse d'un bâtiment peut subir des dommages. Lorsque la durée de la submersion est prolongée (supérieure à 24 ou même 48 heures), des problèmes sanitaires peuvent survenir, l'eau étant souvent polluée, contaminée par les égouts ou parfois par du mazout provenant des cuves. En ce qui concerne l'homme, on considère généralement que des hauteurs d'eau dépassant 50 cm sont dangereuses. Par exemple, une voiture commence à flotter à partir de 30 cm d'eau.

(c) **La vitesse du courant** :

La vitesse d'écoulement est influencée par la pente du lit et sa rugosité. Elle peut atteindre plusieurs mètres par seconde. Le risque associé à l'écoulement dépend du rapport entre la hauteur et la vitesse. Par exemple, dès que la vitesse du courant atteint 0,50 m/s, elle devient périlleuse pour l'homme, entraînant un risque d'être emporté par le flux ou de subir des blessures causées par des objets transportés à grande vitesse.

(d) Le volume de matière transportées :

Ce volume est généralement désigné sous le terme de « transport solide ». Il englobe divers matériaux (argiles, limons, sables, graviers, galets, blocs, etc.) présents dans les cours d'eau, dont le transport peut se faire soit par suspension dans l'eau, soit par déplacement sur le fond du lit, en raison des forces générées par le courant.

I.3.4 La vulnérabilité :**I.3.4.1 Définition de la vulnérabilité :**

La vulnérabilité constitue un concept complexe, intégrant divers paramètres géographiques et socioéconomiques. La littérature propose plusieurs définitions, parmi lesquelles deux officielles se distinguent :

- La définition du MEDD (Ministère de l'Écologie et du Développement Durable français) stipule que « la vulnérabilité est le niveau des conséquences prévisibles d'un phénomène naturel sur les enjeux ».

- La définition de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) précise que « la vulnérabilité est la susceptibilité des ressources à être affectées par des aléas ».

Les enjeux, qui englobent les éléments à risque tels que les personnes, les biens, les activités et le patrimoine, confèrent à la vulnérabilité une dimension à la fois quantitative et qualitative.

La notion de vulnérabilité peut être synthétisée en quatre points (HENRY 2004) :

- La perception sociale de l'aléa.
- L'aléa et ses conséquences prévisibles sur les enjeux.
- Les mesures prises pour atténuer l'impact de l'aléa.
- Les enjeux.

I.3.4.2 Analyse de la vulnérabilité :

Les inondations peuvent engendrer des conséquences désastreuses tant sur le plan humain que matériel. En plus des considérations économiques qui permettent d'évaluer le coût des dommages causés par ce phénomène d'inondation, il est essentiel de prendre en compte d'autres aspects. La vulnérabilité se définit comme l'ensemble des conditions et des processus découlant de facteurs physiques, sociaux, économiques et environnementaux, qui accroissent la sensibilité des enjeux d'une région face aux effets des aléas. Elle est intimement liée à l'usage du sol et à sa capacité (ou non) à résister aux inondations. La vulnérabilité dépend de la perception locale du risque et est directement influencée par l'occupation du sol. L'évaluation de la vulnérabilité révèle une grande disparité entre les différentes zones géographiques. La variable qui prend une valeur unique à chaque point est appelée TOP13 ; elle est définie comme une période de retour moyenne, mesurée en années. Il est crucial de mener des enquêtes locales pour valider les objectifs de protection. L'évaluation de la vulnérabilité vise à quantifier cette variable mathématique équivalente .

I.3.4.3 Atténuation DE LA VULNÉRABILITÉ

Les initiatives visant à réduire la vulnérabilité peuvent être envisagées sur plusieurs échelles temporelles :

- À long terme : Planification de l'utilisation des sols ;
- À moyen terme : Mesures de construction ;
- À court terme : Mesures d'urgence.

Pour prévenir l'accroissement de la vulnérabilité, il est essentiel de prêter une attention particulière aux éléments suivants :

(a) L'impact des facteurs anthropiques :

Les facteurs d'origine humaine aggravent la situation et jouent un rôle crucial dans l'augmentation des débits des crues des rivières.

(b) L'urbanisation et l'implantation d'activités dans les zones sujettes aux inondations :

Ces éléments sont la principale cause de l'aggravation du phénomène. Parallèlement, l'élévation du niveau de vie et le développement des infrastructures ont considérablement augmenté la valeur des biens et la vulnérabilité des activités exposées.

(b) La réduction des zones d'expansion des crues :

Cette diminution, souvent due à l'urbanisation et parfois accentuée par la construction de digues ou de remblais, entraîne une perte de l'effet naturel d'écrêtement des crues, ce qui est bénéfique pour les zones habitées en aval.

(c) L'aménagement parfois imprudent des cours d'eau :

De nombreuses rivières ont été modifiées localement sans tenir compte des répercussions en amont ou en aval. Ces aménagements inappropriés (comme la suppression de méandres ou l'endiguement) peuvent entraîner des conséquences néfastes, telles que l'accélération des crues en aval et la dégradation de l'environnement naturel.

(d) L'insuffisance des dispositifs de protection :

L'efficacité des dispositifs de protection (tels que les digues et les déversoirs) peut être limitée. Une mauvaise utilisation et un manque d'entretien peuvent parfois rendre la plaine alluviale plus vulnérable que si elle n'était pas protégée.

(e) L'utilisation ou l'occupation des sols sur les pentes des bassins versants :

Toute modification de l'occupation des sols, telle que le déboisement, l'élimination des haies, les pratiques agricoles ou l'imperméabilisation, entrave le processus de régulation des crues et la pénétration des eaux. Cela entraîne une augmentation du ruissellement, un écoulement plus rapide et une concentration accrue des eaux. De plus, l'orientation des cultures est cruciale dans le phénomène de ruissellement, tant en ce qui concerne la quantité d'eau évacuée que celle des matériaux transportés. Il est préférable de cultiver dans un sens parallèle aux courbes de niveau.

I.4 L'Étendue des inondations :

I.4.1 Les inondations à l'échelle mondiale :

Les inondations ont été les catastrophes les plus fréquentes au cours des deux dernières décennies. Elles constituent 34 % des catastrophes naturelles enregistrées à l'échelle mondiale entre 1990 et 2007 (CRED, 2007).

L'inondation peut représenter un danger important avec des conséquences humaines et matérielles extrêmement néfastes. D'après l'enquête annuelle du Centre de recherche sur l'épidémiologie des désastres (CRED), le nombre de victimes des catastrophes a augmenté de manière significative, passant de 135 millions en 2006 à près de 200 millions en 2007. Sur ce nombre total, la plupart (164 millions) ont été affectés par des inondations. De 2000 à 2006, cet aléa touchait en moyenne 95 millions de personnes chaque année.

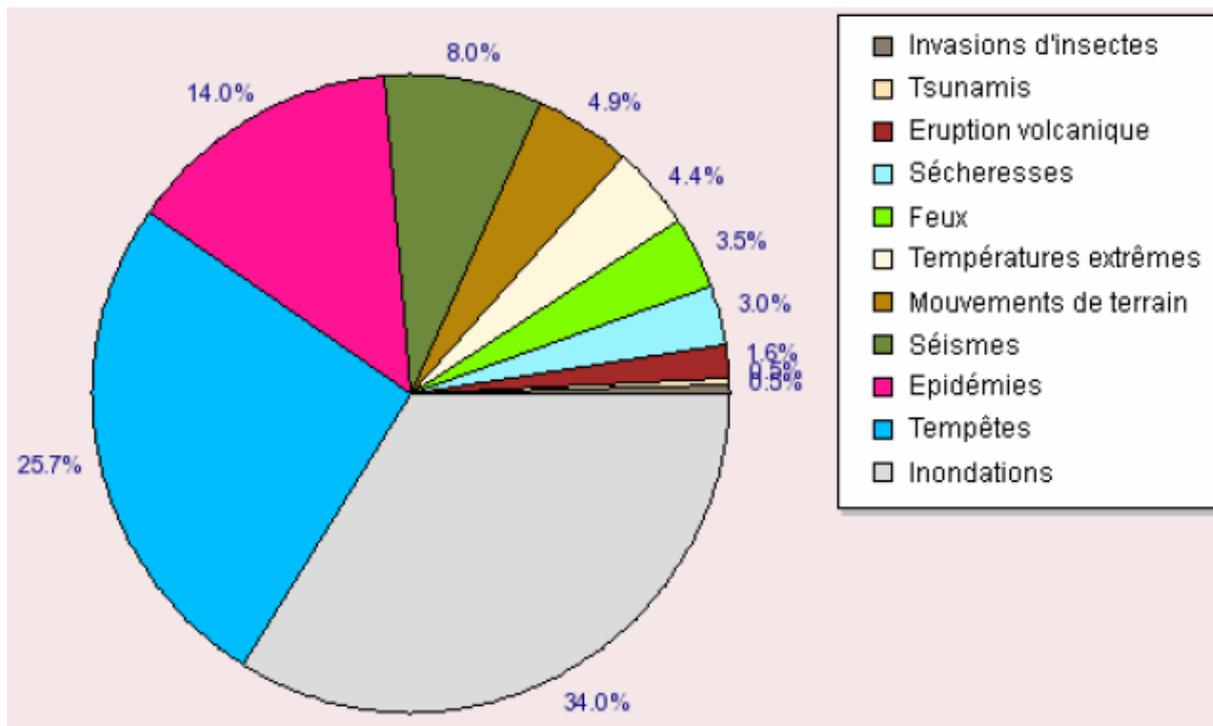


Figure I.2 :Type de catastrophes naturelles survenues dans le monde de 1990 à 2007 ; (CRED, 2007)

En 2019, les inondations ont représenté 43,5 % de l'ensemble des décès attribués aux catastrophes naturelles, les plaçant ainsi en tête des causes de mortalité liées à ces événements. Par ailleurs, le nombre d'incidents liés aux inondations a connu une hausse par rapport aux années antérieures (CRED, 2019). L'impact sur la population des inondations est généralement plus significatif que celui des autres types de catastrophes, car elles perturbent également les activités humaines et l'économie (CRED, 2019).

I.4.2 Les inondations en Algérie

Les inondations affectent la région méditerranéenne, entraînant de nombreux dommages et parfois des morts (Defrance. D et al, 2012). L'Algérie fait face aux crues et aux inondations, qui sont plus fréquentes que les tremblements de terre et les mouvements de terrain. Ces phénomènes engendrent des catastrophes et causent de graves dommages à l'échelle humaine et matérielle. Ces inondations, qui varient selon le temps et l'espace, sont intenses, parfois rapides et soudaines (flash flooding) et surtout imprévisibles. Les crues d'oueds et les tempêtes de pluie entraînent des inondations dans toutes les régions du pays.

Les crues et les inondations, qui se produisent de manière catastrophique en Algérie, représentent une contrainte importante pour le développement économique. Le développement économique et social de l'Algérie est fortement limité par les phénomènes de crues et d'inondations qui se manifestent de manière catastrophique (Lahlah, 2000). Par leur topographie, de nombreuses régions sont exposées à ces catastrophes hydrologiques, tant au Nord qu'au Sud (Touaïbia, 2000).

I.4.3 Les inondations à Annaba :

Plusieurs aléas hydrométéorologiques ont marqué la mémoire des Annabis, entraînant des dommages humains et matériels importants. Des inondations de grande ampleur ont été enregistrées, bien que peu documentées, en 1907, 1958, 1967, 1973, 1982, 1996, 2005, 2009, 2011 et 2015.

Elles sont les plus sérieuses celles de novembre 1982. Outre les 26 morts, les dommages ont été considérables. Des baraques (gourbis) étaient emportées par les eaux sur le trajet des oueds Sidi Harb et Forcha. La violence de la crue était si grande que les dégâts aux maisons et au réseau de communication étaient incalculables.

Les grandes crues ont toujours eu lieu à Annaba entre octobre et avril et se distinguent par une période de submersion qui varie dans le temps (plus 2 jours). Les crues (débordements d'oueds), les ruissellements urbains et sans doute la remontée de la nappe phréatique (à l'aval de Kef N'Sour et dans le bassin de l'oued Boudjemaa) sont les principales causes des inondations dans la ville d'Annaba et sa périphérie. La concomitance des ondes de crue des différents affluents du versant Sud de l'Edough est souvent responsable de ces inondations. Cela est causé par des épisodes pluvieux abondants, généralisés et étalés dans le temps en amont des bassins (durée des averses largement supérieure au temps de concentration des eaux), ainsi qu'un ruissellement important (en raison de versants élevés à pentes fortes et d'un couvert végétal envahissant). Les crues majeures peuvent également entraîner des inondations aggravées par une remontée des eaux. par le réseau d'égouts .

En conclusion, l'inondation est perçue comme un phénomène climatique extrême. Souvent désignée comme un risque naturel, elle entraîne des conséquences significatives (pertes humaines, sociales, économiques et environnementales) tant pour les pays développés que pour les pays en développement, bien que l'ampleur de l'impact diffère d'un endroit à l'autre. La capacité à atténuer les effets des inondations varie également selon les pays, les régions, les communautés et les groupes de population (Beloulou, L, 2008).

Pour mieux appréhender les principales causes des inondations dans cette ville, les facteurs hydroclimatologiques (pluviométrie, bilans d'eau), physiographiques (géomorphologie, géologie) et autres caractérisant la région sont classiquement décrits dans les chapitres suivants. La synthèse des informations recueillies permettra de faire ressortir, du moins à grande échelle,

les facteurs favorisant le phénomène d'inondation et facilitera le choix des coefficients dans les formules de calcul de la crue du projet

I.5 Conclusion :

En effet, le risque inondation est le fruit d'un processus complexe où s'entremêlent facteurs naturels (crue) et surtout facteurs anthropiques.

Selon la définition proposée, Gilard et al. (1998) avancent une autre approche qui se concentre sur la comparaison entre l'aléa et la vulnérabilité, en soulignant la distinction entre ces deux concepts. Dans ce contexte, un risque est considéré comme positif lorsque l'aléa dépasse la vulnérabilité, tandis qu'il est jugé négatif lorsque la vulnérabilité est supérieure. La quête d'une solution ne doit donc pas se limiter à la réduction du risque, mais plutôt à l'identification d'un risque « négatif », c'est-à-dire un risque acceptable. L'analyse sociale et économique du risque acceptable devrait favoriser une recherche de protection plus judicieuse, dont les bénéfices sont multiples (Gilard et al., 1998). L'établissement d'un niveau de risque acceptable entraîne des aménagements réfléchis et proportionnés aux vulnérabilités identifiées, lesquelles dépendent de l'utilisation des sols (Oberlin, 1995). Les risques acceptés, qui correspondent aux situations où l'aléa dépasse les niveaux de protection structurelle mis en place. Ces risques ne seront tolérés par les individus que si une culture du risque est instaurée à leur niveau. Les différents seuils entre la prévention par des aménagements structurels et les mesures d'assurance, de prévision et de gestion de crise dépendent de la réalité des vulnérabilités existantes, et il est essentiel de diversifier ces mesures tout au long du cours d'eau.

Cette complexité des concepts d'aléa et de vulnérabilité illustre que la simple considération du risque comme un produit de deux facteurs est réductrice. Pour élaborer une politique de gestion précise et scientifique, il est nécessaire de décomposer ces deux facteurs en plusieurs éléments afin d'identifier ceux qui peuvent être maîtrisés pour réduire le risque.



Chapitre II

DESCRIPTION DE
LA ZONE D'ETUDE



II Chapitre : DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE

II.1 Introduction

L'analyse de la protection contre les inondations repose sur une vaste base de données intégrant les spécificités de chaque site de projet. Ces données, essentielles, constituent les éléments cruciaux pour la mise en œuvre de toute étude relative à la protection contre les inondations. Dans ce chapitre nous allons présenter la zone sur laquelle notre étude se déroule, une vue de littérature sur les situations géographique, climatique, géologique ...etc., afin de concevoir des solutions qui seront détaillées dans les chapitres suivants.

II.2 Situation géographique et administrative de la wilaya de Annaba

II.2.1 Situation géographique :

La wilaya de Annaba est une ville côtière située dans l'est de l'Algérie, à environ 600 km de la capitale. C'est la troisième ville principale du pays après Alger et Oran. Annaba s'étend sur une superficie de 1412 km², soit 0,06 % du territoire national, avec une côte méditerranéenne de 81 km.

Position stratégique :

Annaba se trouve au nord-est du pays, bordée par la mer Méditerranée sur une bande littorale de plus de 81 km. Ses limites sont les suivantes :

- Au nord : la mer Méditerranée,
- Au sud : la wilaya de Guelma,
- À l'est : la wilaya d'El Tarf,
- À l'ouest : la wilaya de Skikda.

Avec une population de 831 070 habitants en 2021 (ADE), Annaba bénéficie d'une position stratégique en tant qu'agglomération portuaire, facilitant son ouverture sur l'espace international et jouant un rôle de carrefour dans les échanges internationaux.

II.2.2 Situation administrative :

La wilaya d'Annaba, créée lors du découpage administratif de 1970, s'étend sur une superficie de 1412 km². Elle abrite actuellement 831 070 habitants et comprend 6 daïras regroupant 12 communes.

II.3 Situation géographique et administrative de la commune d'El Bouni

II.3.1 Situation géographique :

La commune d'El Bouni se trouve à 10 km au sud de la ville d'Annaba, dans l'est de la wilaya d'Annaba. Elle est délimitée par :

- Au nord : Annaba et Seraïdi,
- Au sud : Sidi Amar et El Hadjar,

- À l'est : Berrahal et Oued El Aneeb,
- À l'ouest : Seraïdi et Annaba.

II.3.2 Situation administrative :

Administrativement, la commune d'El Bouni est située dans la wilaya d'Annaba. El Bouni compte six agglomérations secondaires : Sidi Salem, Haï ELsarouel, Cité 1er Mai 1956, Oued Ennil, Ain Djebbarra et Chabbla .

Avec ses six agglomérations secondaires, El Bouni joue un rôle important dans la dynamique régionale de la wilaya d'Annaba.



Figure II.1 Carte de situation géographique de la plaine de ANNABA"

II.4 La situation géographique privilégiée de la zone d'étude:

La zone d'analyse est localisée dans la commune de EL BOUNI, au sein de la Wilaya de ANNABA, dans la région Nord-Est de l'Algérie.

L'aménagement fait l'objet de cette étude, traverse la ville de EL SAROUEL Elle se trouve dans la section orientale de la commune d'El Bouni, à distance de 6,1 km .

Soit en coordonnées Lambert :

- Latitude 36.834941° NORD
- Longitude 7.69952° EST



Figure II.2 : Présentation de la Situation géographique de la zone d'étude. Source (google earth.2024)

II.5 Contexte géologiques :

La géologie joue un rôle crucial en étudiant la nature du sol, ce qui nous permet d'avoir une idée préliminaire sur la manière dont les tranchées sont réalisées et les équipements utilisés, L'étude géologique et géotechnique vise à déterminer la nature des formes visibles et leur influence sur le comportement des constructions et du système d'assainissement en ce qui concerne leur stabilité. Les différentes formations géologiques de ce terrain sont sédimentaires et métamorphiques.

D'après les diverses cartes géologiques, notre région d'étude se trouve dans la partie géologique du Tell d'Algérie Nord Oriental. Cette région présente des formations métamorphiques à l'Ouest de la plaine d'Annaba, ainsi que des sédiments pour le reste de la région.

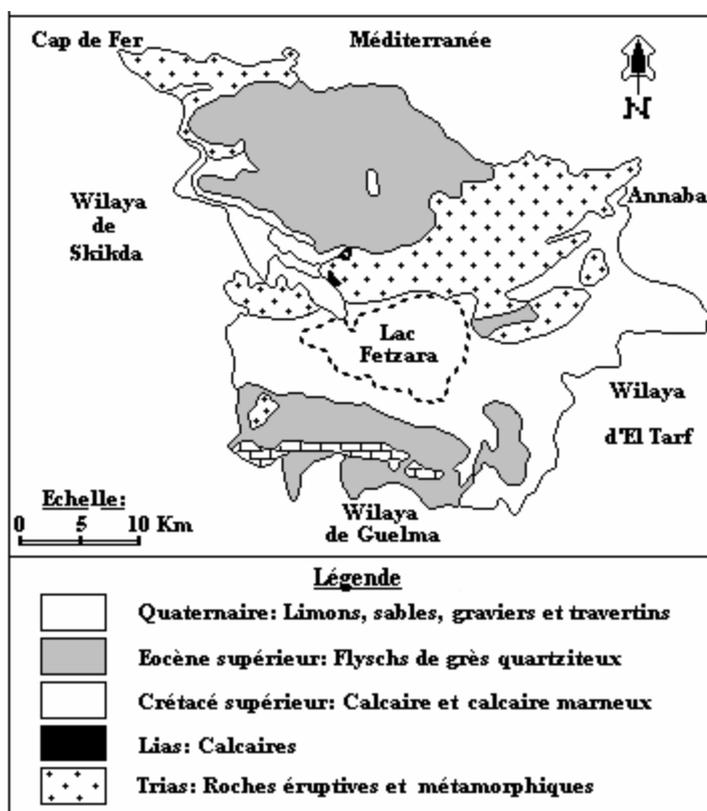


Figure II.3 : situation géographique et esquisse géologique du territoire de la wilaya d'annaba. Source (LAMROUS, 2001)

II.6 Sismicité

Sismicité L'Algérie, comme d'autres pays méditerranéens, est exposée à une activité sismique importante. Situé sur une zone de convergence entre la plaque africaine et la plaque eurasienne, le nord du pays est la région la plus risqué, et comme notre zone d'étude se situe au nord du pays elle est certainement à risque de sismicité. Selon les règles parasismiques algériennes de 1999, Le territoire algérien est divisé en quatre zones sismiques :

- Zone O : sismicité négligeable.
- Zone I : sismicité faible.

- Zone II : sismicité moyenne.
- Zone III : sismicité forte.

Notre zone d'étude est classée zone II : sismicité moyenne.

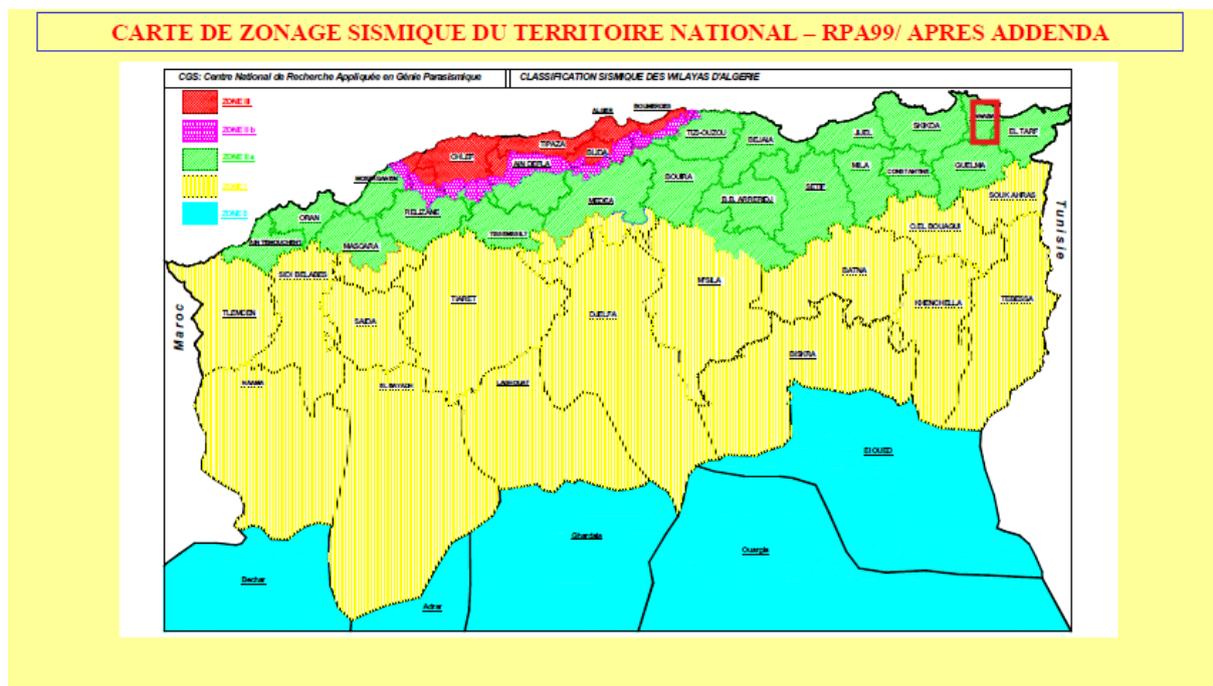


Figure II.4 : carte de zonage sismique du territoire nationale. Source : (RPA 99 version 2003)

II.7 La topographie

La région de bassin versant , à pentes fortes, parfois raides (grandes dénivelées), notamment sur les versants ; les altitudes dans le bassin versant vont de 45 à 181 mètres. Le relief le plus haut correspond au la route de Seraidi situé à l'extrême du massif d'Edough région et atteint 327 m.

II.8 Relief :

Son relief est constitué principalement de :

- Montagnes à vocation forestière : 52.16%
- Collines et piémonts : 25.82 %
- Plaines : 18.08%

II.9 Contexte Climatologique

Le ruissellement est affecté par la température de l'air en combinaison avec d'autres facteurs climatiques tels que les précipitations, l'insolation et le vent La région d'études est couverte par le réseau pluviométrique géré par l'ANRH, qui comprend un ensemble de stations hydrométriques et pluviométriques, nous avant ainsi obtenu un ensemble d'informations et de données.

II.9.1 La Température

La température de l'eau joue un rôle essentiel dans la régulation de l'écoulement des cours d'eau. Elle influence divers processus comme la concentration et l'évaporation de l'eau, ainsi que la viscosité et la densité de celle-ci, ce qui affecte également la croissance et la survie des

plantes et des algues aquatiques. Par ailleurs, le ruissellement est influencé par la température de l'air et elle constitue un élément clé dans la détermination du déficit d'écoulement.

Tableau II-1 Températures moyennes mensuelles en C° (2001-2010).

station	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	O
Séraïdi	20.2	17.2	11.8	8.8	7.8	8.2	10.9	12.3	17.5	22.1	24.7	15.6

Le tableau n° II.1 indique que la température moyenne annuelle s'établit à 14.8°C. Les mois les plus chauds de l'année correspondent à la période l'été , incluant juin, juillet, août et septembre, durant laquelle les températures moyennes dépassent les 20°C. En revanche, de novembre à mars, les températures mensuelles demeurent inférieures à la moyenne annuelle

II.9.2 Le vent

Le vent est l'un des éléments les plus caractéristiques du climat, mais son observation et son étude sont parmi les plus difficiles. Dans notre zone, nous disposons de seulement deux stations anémométriques : celle de Seraïdi, située en montagne et dominant Annaba, et celle de l'aéroport de Annaba, Les Salines, en plaine. La première station est opérationnelle depuis novembre 1950, tandis que la deuxième fonctionne depuis 1942.

Le vent le plus dominant dans le bassin est celui qui traverse perpendiculairement l'Atlas Saharien et l'Atlas Tellien, se réchauffant par compression adiabatique sur les versants descendants. Ce vent, appelé « Sirocco », est chaud et desséchant. Il souffle plus fréquemment vers le nord, en particulier sur la zone littorale, réduisant fortement l'humidité relative. La caractéristique du régime des vents est donnée d'après renseignement obtenus à la station météorologique de séraïdi ou les données des observations sont les plus complètes

Tableau II-2 : Vitesses moyennes mensuelles des vents en m/s.

station	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	O
Séraïdi	2.6	2.3	1.9	2.0	1.3	1.07	0.8	1.04	1.6	1.7	2.3	3.1

Les vitesses moyennes mensuelles observées se situent en 2 m/s, avec des valeurs minimales de 0.8 m/s et des valeurs maximales atteignant 3.1 m/s, selon les données recueillies par la station séraïdi pour la période allant de 2001 à 2010.

II.9.3 Humidité relative :

L'humidité relative ou mesure d'humidité fait référence à la quantité de vapeur d'eau présente dans l'air. Tableau (II.3) Indique l'humidité de l'air observée (en pourcentage) pour la station. Climatologie de SERAIDI.

Tableau II-3 : Humidité relative moyenne mensuelle en % (2001-2010).

station	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JT	O
Séraidi	79.2	79.9	72.6	74.7	67.4	61.6	57	58	74.3	74.9	79.6	79.7

II.9.4 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-4: moyenne des insolations totales en heures à la station des salines 2001-2010.

Station	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JT	O
Séraidi	4.8	5.6	6.2	7.2	8.2	10.4	11.5	10.4	8.5	6.8	5.5	4.8

II.9.5 Précipitations météorologiques :

L'analyse du bilan moyen de l'écoulement ainsi que de la richesse des cours d'eau requiert une compréhension approfondie de l'ensemble des modules pluviométriques. Dans la région étudiée, on dénombre quatre stations pluviométriques (Les Salines ; Berrahal ; Séraidi ; Pont Bouchet). Dont les données et les mesures, collectées sur une période de 44 ans (1977-2020), permettront de constituer une statistique de base.

Tableau II-5: Stations Pluviométriques

Stations	Code	Coordonnée (km)		Altitude (m)
		X	Y	Z
Les Salines	14-06-07	746.24	365.413	20
Berrahal	03-13-02	924	403.1	750
Séraidi	14-06-02	860.0	412.4	860
Pont Bouchet	14-06-31	950.5	402	08

- **Justification du choix du poste de mesure de la pluviométrie :**

Le choix du poste pluviométrique repose sur les critères suivants :

- La localisation géographique : le poste doit être situé à proximité de la zone d'étude.
- L'altitude du poste doit être conforme à une élévation acceptable Z (mNGA) par rapport aux altitudes de la zone d'étude.
- Le poste doit disposer d'une série de données longue et continue, sans interruptions.

Tableau II-6 : Série d'observations des précipitations moyennes annuelles du poste pluviométrique de " Pont Bouchet " (sans lacunes)

Année	Pluie moyenne annuelle (en mm)	Année	Pluie moyenne annuelle (en mm)
1977	457.5	1999	470.5
1978	589.2	2000	521.4
1979	520.3	2001	411.5
1980	468.9	2002	933.6
1981	665.4	2003	642.7
1982	526.2	2004	940.3
1983	824.6	2005	549.1
1984	900.2	2006	651.9
1985	433.7	2007	587
1986	737.4	2008	870.1
1987	366.1	2009	707.6
1988	487.8	2010	776.4
1989	489.5	2011	759.8
1990	653.6	2012	648.8
1991	622.9	2013	637.6
1992	632.1	2014	832.6
1993	488.8	2015	585.2
1994	531.7	2016	479.4
1995	726.8	2017	671.6
1996	389.5	2018	938.6
1997	748.6	2019	617.4
1998	687.3	2020	751.2

II.10 Conclusion

En conclusion, bien que la région de ANNABA soit soumise à un climat méditerranéen, les inondations qui se produisent sont sporadiques, souvent dévastatrices. À travers cette étude, il est évident que la zone de EL SAROUEL est traversée par une agglomération urbaine très dense sur une distance d'environ 3 kilomètres. À la suite de cette présentation, nous procéderons à une synthèse hydrologique du bassin versant dans le chapitre suivant.



Chapitre III

ETUDE DU
BASSIN VERSANT

CHAPITRE III : Etude du bassin versant

III.1 Introduction

L'étude d'un bassin versant pour l'aménagement d'une installation hydraulique se concentre sur la compréhension des caractéristiques du bassin d'un point de vue géographique. Cette étude inclut l'analyse des données de base du bassin versant, telles que sa superficie, sa forme, le relief environnant, afin de concevoir et de construire des installations hydrauliques visant à gérer les ressources en eau, à protéger contre les inondations.

III.2 Analyse du bassin versant

III.2.1 Qu'est-ce qu'un bassin versant ?

Le bassin versant, également connu sous le nom de bassin hydrographique, constitue l'unité fondamentale pour toute recherche hydrologique. Il est défini comme l'ensemble des terres où les eaux s'écoulent, s'infiltrent et circulent, alimentant ainsi le cours d'eau. Chaque goutte d'eau qui tombe sur ce territoire, délimité par des lignes de partage des eaux séparant les bassins voisins, converge vers le cours d'eau principal ou ses affluents, puis se dirige vers l'aval et son exutoire.

III.2.2 Les caractéristiques du bassin versant

Pour toute recherche hydrologique, il est essentiel de préciser dès le départ les divers paramètres géométriques du bassin (surface, périmètre) ainsi que les paramètres morphométriques (forme, altitude caractéristique, pente).

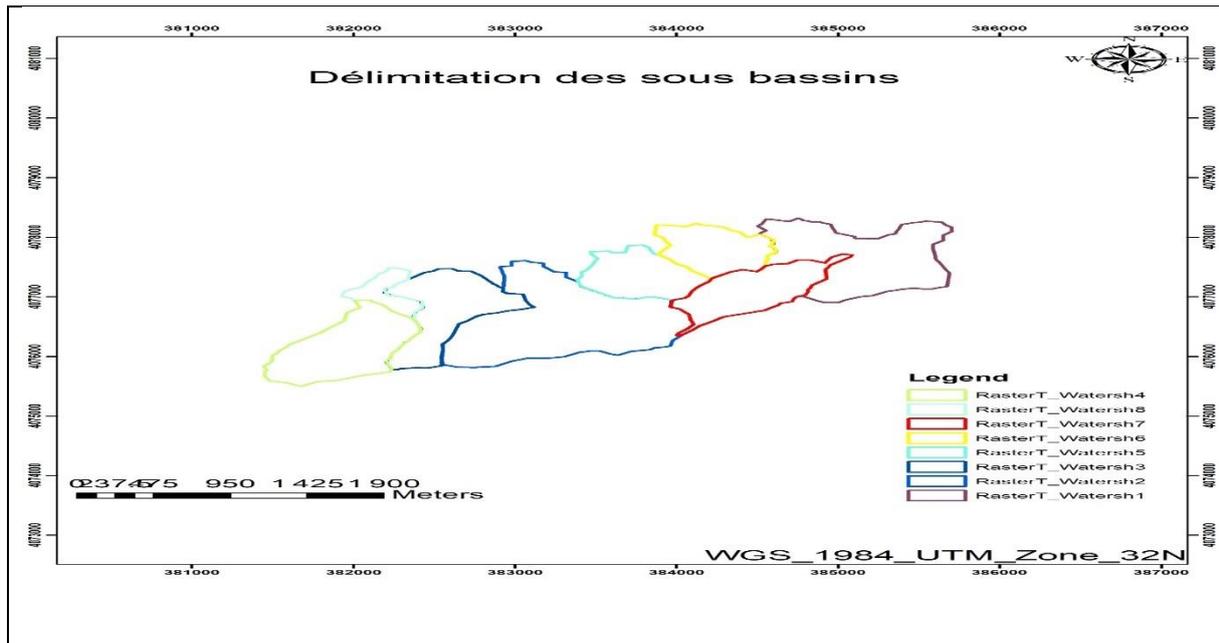


Figure III-1: Délimitation des sous bassins sous Arc GIS de la zone d'étude

III.2.2.1 Caractéristiques physiographiques géométriques

La détermination de la surface et du périmètre nécessite d'abord la délimitation du bassin par la ligne de partage des eaux. Cette délimitation a été réalisée à l'aide du logiciel Arc GIS10.8, tandis que les paramètres de longueur et de surface ont été évalués à l'aide du logiciel Arc GIS.

III.2.2.1.a Surface

La surface topographie est le facteur le plus crucial, car elle influence l'intensité de divers phénomènes hydrologiques, tels que les apports, les volumes de précipitations et les infiltrations. La nature des surfaces des bassins joue un rôle essentiel dans leur comportement hydrologique. La superficie du bassin étudié est estimée à

Tableau III-1: Surface du bassin versant de EL SAROUEL et leur sous bassins

Sous bassins	SURFACE
SB1	1,62
SB2	1,53
SB3	0,70
SB4	0,76
SB5	0,49
SB6	0,46
SB7	0,58
SB8	0,94

III.2.2.1.b Périmètre

Le périmètre du bassin versant correspond à la longueur de sa ligne de contour.

Tableau III-2: Périmètre du bassin versant d'EL SAROUEL et leur sous bassins

Sous bassins	Périmètre
SB1	7,21
SB2	6,01
SB3	4,66
SB4	3,86
SB5	2,90
SB6	2,90
SB7	4,13
SB8	5,21

III.2.2.2 Les caractéristiques morphométriques

La forme d'un bassin versant à une influence sur l'écoulement et surtout sur l'allure de l'Hydrogramme de crue, ainsi un bassin très allongé ne réagira pas de la même façon qu'un bassin de forme ramassée, si les autres conditions sont par ailleurs égales.

III.2.2.2.a Indice de compacité de Gravelius K_G :

En 1914, Gravelius a introduit le coefficient de compacité, qui est calculé en divisant le périmètre du bassin versant P par sa surface S . le coefficient de compacité s'exprime par :

$$K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi S}}$$

Avec :

- **K_G** : indice de compacité de Gravelius.
- **P** : périmètre du bassin versant.
- **S** : surface du bassin versant.

Tableau III-3 indice de compacité de Gravelius des sous bassins

Sous Bassins	Indice de compacité de Gravelius
SB1	1,59
SB2	1,37
SB3	1,57
SB4	1,24
SB5	1,17
SB6	1,20
SB7	1,52
SB8	1,51

Des indices de compacité nettement supérieurs à 1 suggèrent que les bassins présentent une forme étalée.

III.2.2.2.b Rectangle équivalent ou rectangle de Gravelius :

Le rectangle équivalent constitue un modèle développé par ROCHE. Il représente le bassin sous la forme d'un rectangle ayant une surface et un périmètre identiques à ceux du bassin versant examiné, avec une longueur L et une largeur l. L'exutoire est symbolisé par la largeur du rectangle, tandis que les courbes de niveaux sont représentées par des lignes parallèles. (Chachoua, 2010).

Il est décrit comme étant le rectangle avec le même coefficient de compacité (KG) et la même hypsométrie que le bassin versant analysé. Les dimensions de ce rectangle sont calculées à l'aide des équations suivantes :

$$L = \frac{KG\sqrt{S}}{1.12} \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{KG}\right)^2} \right) \qquad l = \frac{KG\sqrt{S}}{1.12} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{KG}\right)^2} \right)$$

Tableau III-4: Rectangle équivalent du bassin versant d'EL SAROUEL et leur sous bassins

Sous Bassins	la longueur du rectangle équivalent (Km)	la largeur du rectangle équivalent(Km)
SB1	3,11	0,52
SB2	2,39	0,64
SB3	2,00	0,35
SB4	1,40	0,54
SB5	0,95	0,52
SB6	1,00	0,46
SB7	1,74	0,34
SB8	2,20	0,43

III.2.3 Les altitudes caractéristiques :

III.2.3.1 La répartition altimétrique et les courbes hypsométrique :

Les données concernant la répartition du bassin versant par tranches d'altitudes, exprimées en kilomètres carrés et en pourcentage de la superficie totale, sont répertoriées dans le tableau ci-dessous avec leur courbe hypsométrique :

- **La répartition altimétrique et la courbe hypsométrique de sous bassin (1)**

Tableau III-5 : La répartition altimétrique du sous bassin versant d'EL SAROUEL

Altitude	SB1			
	S – part		S – cumul	
	S (Km2)	%	S (Km2)	%
46 - 60	0,862817	53,14	1,623685	100
60 - 80	0,18239	11,23	0,760868	46,86
80 - 100	0,139931	8,62	0,578478	35,63
100 - 110	0,11403	7,02	0,438547	27,01
110 - 130	0,24253	14,94	0,324517	19,99
130 - 150	0,077218	4,76	0,081987	5,05
150 - 181	0,004769	0,29	0,004769	0,29

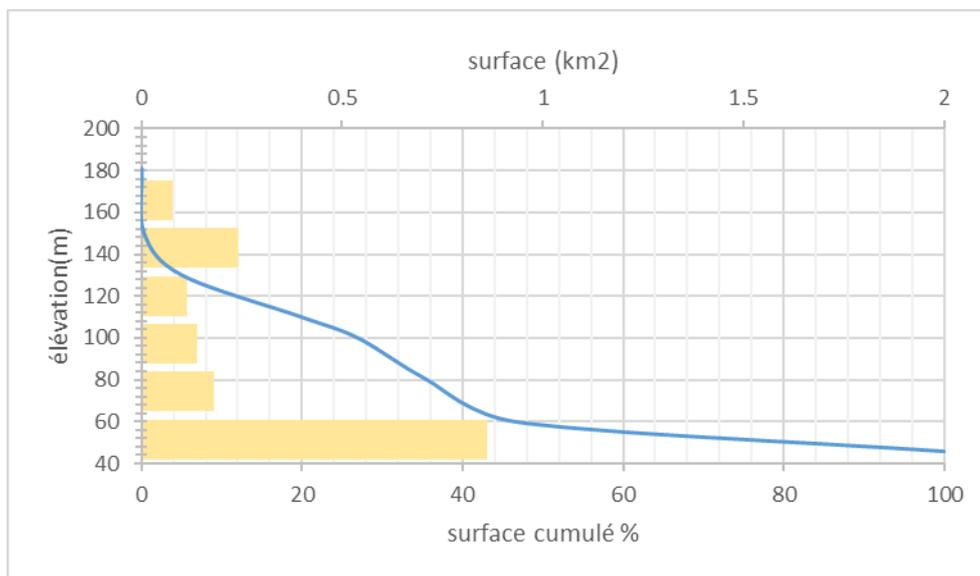


Figure III-2: Courbe hypsométrique de sous bassin numéro un (1)

- La répartition altimétrique et la courbe hypsométrique de sous bassin 2

Tableau III-6: La répartition altimétrique du sous bassin versant d'EL SAROUEL

Altitude	SB2			
	S – part		S – cumul	
	S (Km2)	%	S (Km2)	%
47 - 80	0,316276	20,69	1,528457	100
80 - 110	0,189004	12,37	1,212181	79,31
110 -140	0,325837	21,32	1,023177	66,94
140 - 170	0,196561	12,86	0,69734	45,62
170 - 200	0,187428	12,26	0,500779	32,76

200 - 230	0,16694	10,92	0,313351	20,50
230 - 275	0,146411	9,58	0,146411	9,58

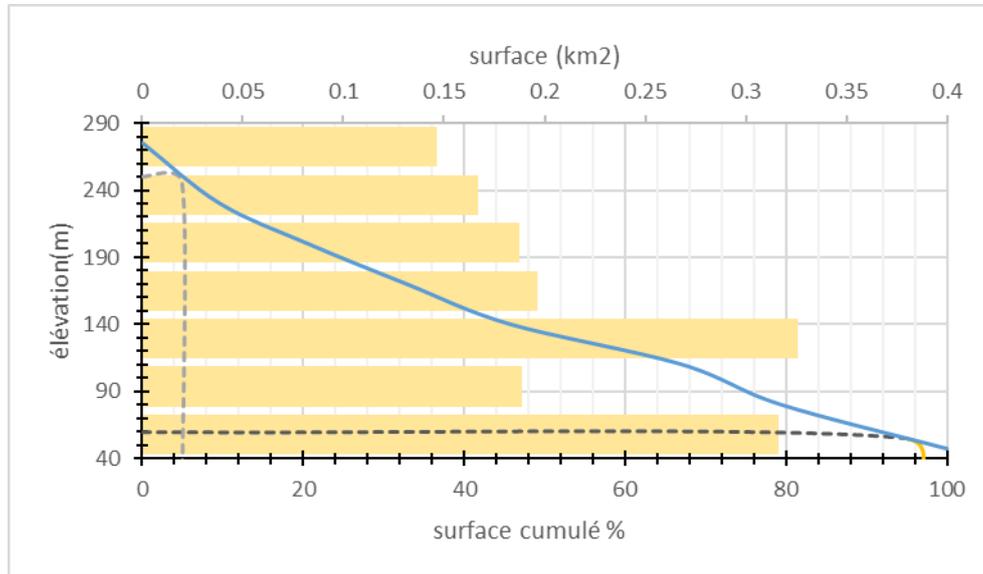


Figure III-3: Courbe hypsométrique de sous bassin numéro (2)

- La répartition altimétrique et la courbe hypsométrique de sous bassin 3

Tableau III-7: La répartition altimétrique du sous bassin versant d'EL SAROUEL

Altitude	Sb3			
	S – part		S – cumul	
	S (Km2)	%	S (Km2)	%
48 - 70	0,387491	55,39	0,699599	100,00
70 - 100	0,077741	11,11	0,312108	44,61
100 - 140	0,059292	8,48	0,234367	33,50
140 - 170	0,054574	7,80	0,175075	25,03
170 - 200	0,039296	5,62	0,120501	17,22
200 - 240	0,045132	6,45	0,081205	11,61
240 - 266	0,036073	5,16	0,036073	5,16

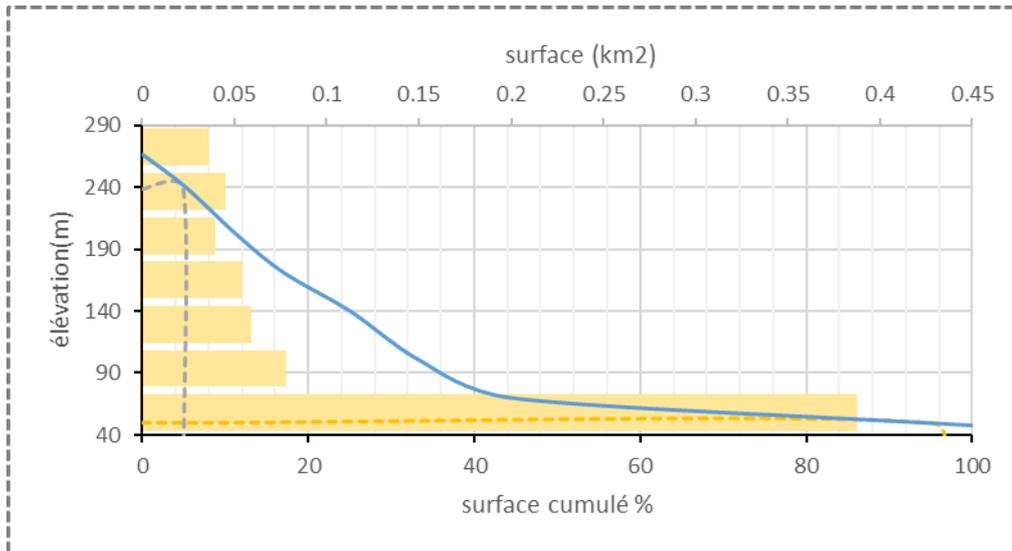


Figure III-4: Courbe hypsométrique de sous bassin numéro (3)

- **La répartition altimétrique et la courbe hypsométrique de sous bassin 4**

Tableau III-8 : La répartition altimétrique du sous bassin versant d' EL SAROUEL

Altitude	Sb4			
	S – part		S – cumul	
	S (Km2)	%	S (Km2)	%
53 - 90	0,141951	18,61	0,762606	100
90 - 130	0,141119	18,50	0,620655	81,39
130 - 170	0,136842	17,94	0,479536	62,88
170 - 210	0,093638	12,28	0,342694	44,94
210 - 250	0,102891	13,49	0,249056	32,66
250 - 290	0,102838	13,49	0,146165	19,17
290 - 327	0,043327	5,68	0,043327	5,68

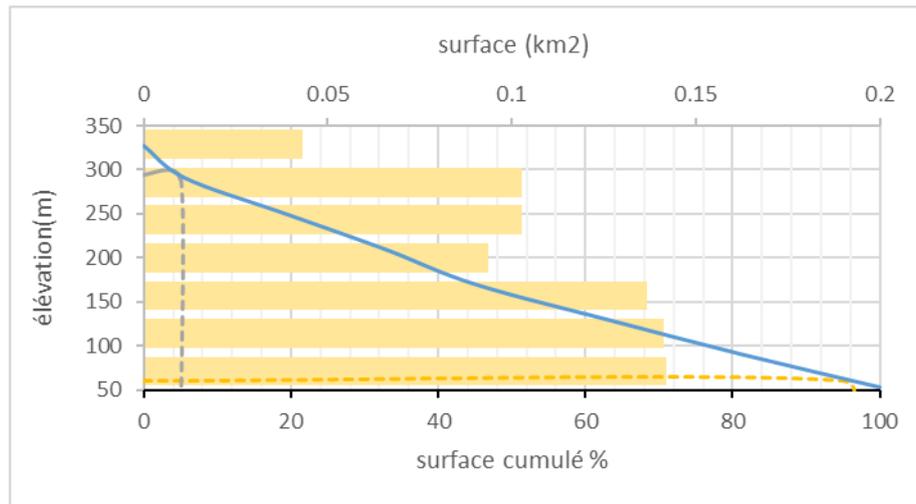


Figure III-5: Courbe hypsométrique de sous bassin numéro (4)

- La répartition altimétrique et la courbe hypsométrique de sous bassin (5)

Tableau III-9: La répartition altimétrique du sous bassin versant d'EL SAROUEL

Altitude	Sb5			
	S – part		S – cumul	
	S (Km2)	%	S (Km2)	%
45 - 60	0,265164	54,30	0,488352	100
60 - 70	0,033602	6,88	0,223188	45,70
70 - 80	0,025979	5,32	0,189586	38,82
80 - 100	0,056227	11,51	0,163607	33,50
100 - 110	0,044291	9,07	0,10738	21,99
110 - 120	0,054091	11,08	0,063089	12,92
120 - 127	0,008998	1,84	0,008998	1,84

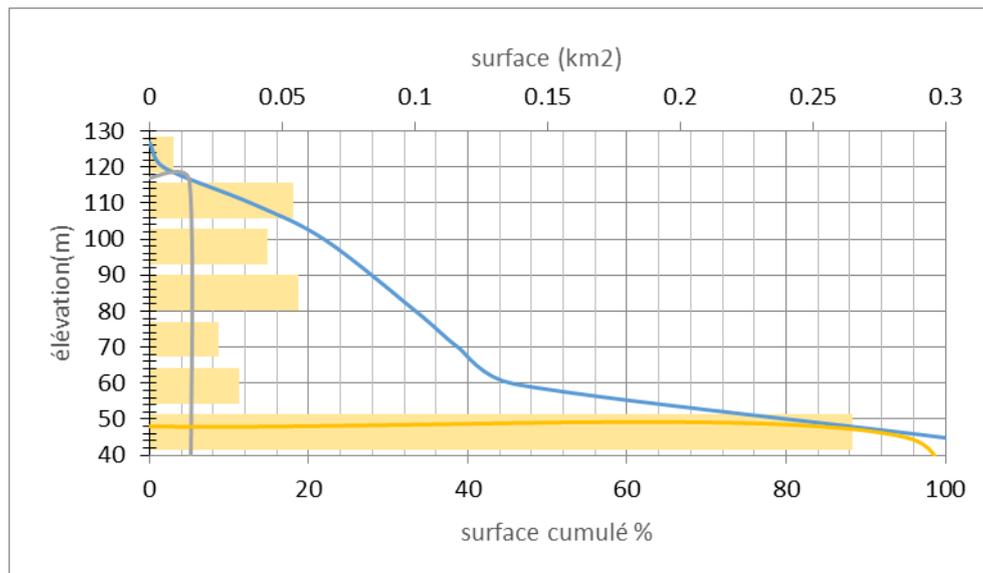


Figure III-6: Courbe hypsométrique de sous bassin numéro (5)

- La répartition altimétrique et la courbe hypsométrique de sous bassin (6)

Tableau III-10: La répartition altimétrique du sous bassin versant d'EL SAROUEL

Altitude	Sb6			
	S – part		S – cumul	
	S (Km2)	%	S (Km2)	%
45 - 50	0,34008	73,81	0,460734	100
50 - 60	0,072374	15,71	0,120654	26,19
60 - 70	0,028929	6,28	0,04828	10,48
70 - 80	0,009787	2,12	0,019351	4,20
80 - 90	0,004893	1,06	0,009564	2,08
90 - 100	0,003168	0,69	0,004671	1,01
100 - 109	0,001503	0,33	0,001503	0,33

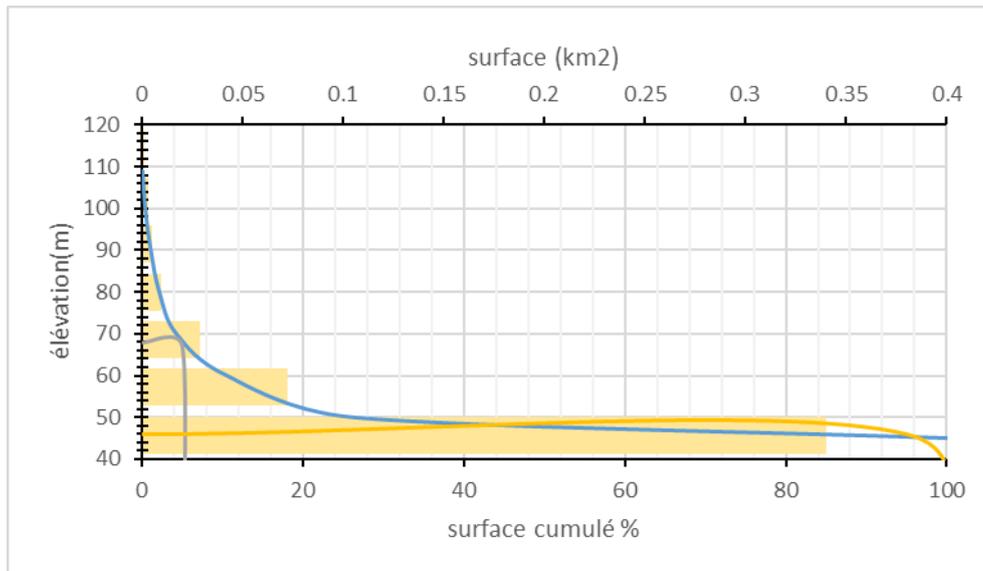


Figure III-7: Courbe hypsométrique de sous bassin numéro (6)

- La répartition altimétrique et la courbe hypsométrique de sous bassin (7)

Tableau III-11: La répartition altimétrique du sous bassin versant d' EL SAROUEL

Altitude	Sb7			
	S – part		S – cumul	
	S (Km2)	%	S (Km2)	%
48 - 70	0,187686	32,14	0,583953	100
70 - 90	0,071585	12,26	0,396267	67,86
90 - 110	0,124542	21,33	0,324682	55,60
110 - 120	0,13368	22,89	0,20014	34,27
120 - 140	0,059834	10,25	0,06646	11,38
140 - 160	0,004047	0,69	0,006626	1,13
160 - 181	0,002579	0,44	0,002579	0,44

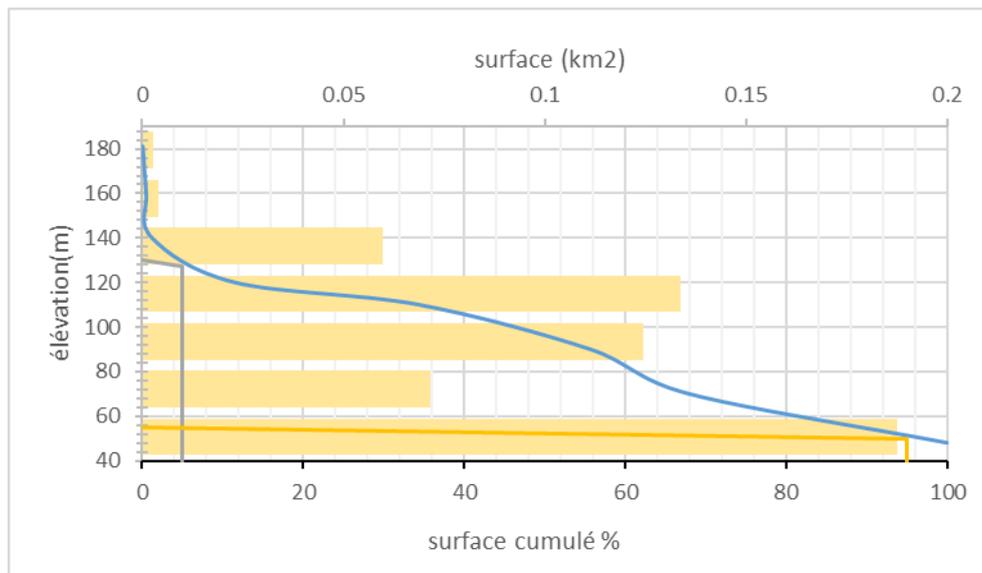


Figure III-8: Courbe hypsométrique de sous bassin numéro (7)

- La répartition altimétrique et la courbe hypsométrique de sous bassin (8)

Tableau III-12: La répartition altimétrique du sous bassin versant d' EL SAROUEL

Altitude	Sb8			
	S – part		S – cumul	
	S (Km2)	%	S (Km2)	%
49 - 80	0,278606	29,73	0,937055	100
80 - 120	0,140631	15,01	0,658449	70,27
120 - 160	0,147554	15,75	0,517818	55,26
160 - 200	0,099192	10,59	0,370264	39,51
200 - 240	0,099379	10,61	0,271072	28,93
240 - 280	0,108825	11,61	0,171693	18,32
280 - 327	0,062868	6,71	0,062868	6,71

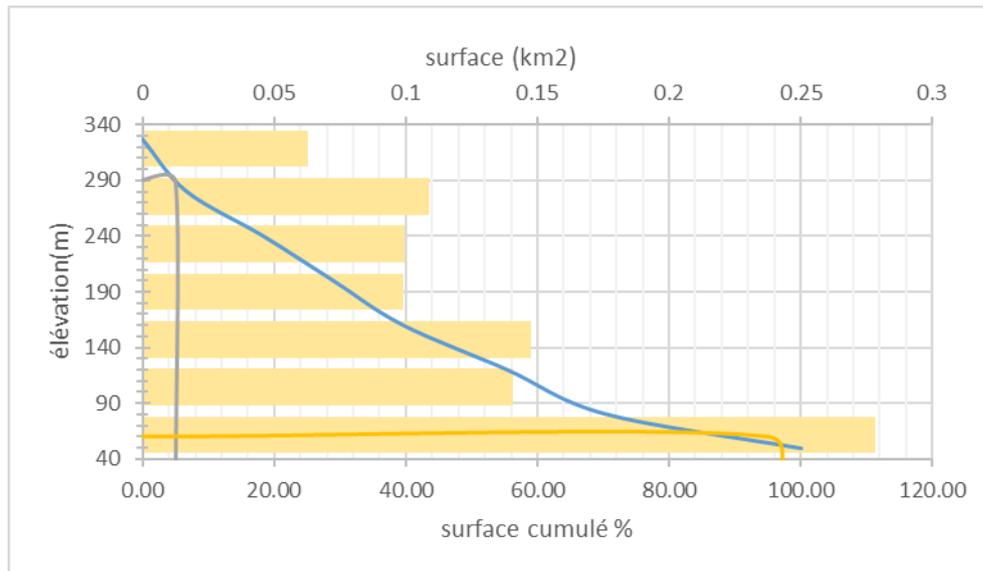


Figure III-9: Courbe hypsométrique de sous bassin numéro (8)

III.2.3.2 Les altitudes maximales et minimale

Le sommet le plus élevé du bassin est appelé l'altitude maximale, tandis que le point le plus bas est connu sous le nom d'altitude minimale, généralement situé à l'exutoire. Le bassin d' EL SAROUEL atteint une altitude de 327 m à son point culminant , alors que une altitude de 45 m, représente le point le plus bas.

Tableau III-13 Les altitudes maximale et minimale

Bassin	Hmin(m)	Hmax(m)
SB1	46	181
SB2	47	275
SB3	48	266
SB4	53	327
SB5	45	127
SB6	45	109
SB7	48	181
SB8	49	327

III.2.3.3 L'altitude moyenne :

La définition de l'altitude moyenne est la suivante :

$$H_{moy} = \frac{\sum_{i=1}^n H_i \cdot S_i}{S}$$

Avec :

- **HMoy** : l'altitude moyenne (m).
- **Si** : Surface cumulée entre deux courbes de niveaux (Km²).
- **Hi** : altitude moyenne entre deux courbes de niveaux (m).
- **S** : surface du bassin versant (Km²).

Tableau III-14: L'altitude moyenne du bassin versant d'ESSEROUEL et ses sous bassins

Bassin	HMoy (m)
SB1	76,23
SB2	141,82
SB3	102,01
SB4	168,88
SB5	71,87
SB6	51,27
SB7	91,54
SB8	149,17

III.2.4 Les pentes :

III.2.4.1 Pente moyenne :

Elle est considérée comme une variable indépendante, car elle fournit une indication précise sur la durée du ruissellement direct et a un impact direct sur le débit maximal lors d'une averse. Le calcul de la pente moyenne se fait selon la formule suivante :

$$I = \frac{H_{\max} - H_{\min}}{L}$$

Avec :

- **I** : pente moyenne du bassin (m/km).
- **L** : longueur du rectangle équivalent (m).
- **Hmax** : l'altitude maximale (m).
- **Hmin** : l'altitude minimale (m).

Tableau III-15: Pente moyenne du bassin versant d'ESSEROUEL et ses sous bassins

Bassin	Pente Moyenne I(m/Km)
SB1	43,37
SB2	95,39
SB3	108,89
SB4	195,66
SB5	86,68
SB6	64,14
SB7	76,24
SB8	126,30

III.2.4.2 Indice de pente globale :

L'indice de pente globale est calculé par la formule suivante :

$$I_g = \frac{D}{L}$$

Avec :

- **I_g** : Indice de pente globale (m/km).
- **L** : longueur du rectangle équivalent (km).
- **D** : la dénivelée (D = H5% - H95%).

Tableau III-16: Indice de pente globale du bassin versant de EL SAROUEL et ses sous bassins

Bassin	Dénivelée (D = H5% -H95%)	Indice de pente globale I _g (m/Km)
SB1	84	26,99
SB2	190	79,49
SB3	190	94,90
SB4	230	164,24
SB5	73	77,16
SB6	22	22,05
SB7	77	44,14
SB8	234	106,31

Selon la classification D'ORSTOM, $I_g > 100\text{m/Km}$ ce qui donne un fort relief.

III.3 Réseau hydrographique :

III.3.1 Définition :

Le réseau hydrographique se compose d'un ensemble de canaux et des rivières, affluents et sous-affluents permanents ou temporaires qui dirigent les eaux de surface vers le point de sortie du bassin versant. L'analyse du réseau hydrographique est précieuse pour comparer les différents bassins. Dans certains cas, il peut suffire d'examiner le talweg principal pour effectuer cette comparaison. Ce réseau se distingue par trois éléments : sa hiérarchisation, son étendue (nombre et longueur des cours d'eau) et son profil longitudinal.

III.3.2 Hiérarchisation du réseau :

Pour quantifier la ramification du réseau, chaque cours d'eau se voit attribuer un numéro en fonction de son importance. Cette numérotation, désignée comme l'ordre du cours d'eau, varie selon les auteurs. Nous adoptons la classification de Strehler :

- Un cours d'eau sans affluent est classé d'ordre 1.
- Lorsqu'un cours d'eau de même ordre n se rejoint avec un autre, le cours d'eau résultant est classé d'ordre $n+1$.
- Un cours d'eau qui reçoit un affluent d'ordre inférieur conserve son propre ordre, ce qui se traduit par : $n+n=n+1$ et $n+m=\max (n,m)$.

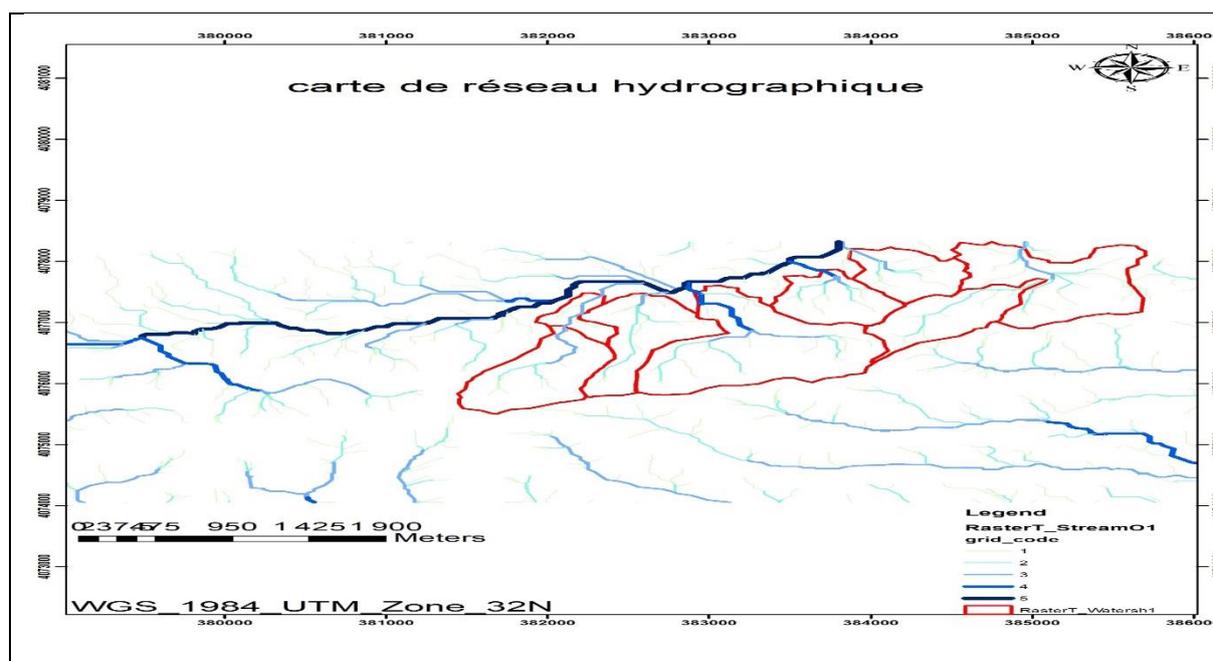


Figure III-10 classification de réseau hydrographique sous Arc GIS

III.3.3 La longueur totale des cours d'eau et cours d'eau principale :

On traite La longueur totale des cours d'eau et cours d'eau principale à l'aide de logiciel Arc Gis les résultats sont au tableau suivante :

Tableau III-17: La longueur totale des cours d'eau et cours d'eau principale

Bassin	longueur totale des cours d'eau LT(Km)	longueur des cours d'eau principale Lcp(Km)
SB1	8,938882	2,307002
SB2	7,449093	2,082364
SB3	4,334035	1,594651
SB4	3,23739	1,510421
SB5	2,93165	0,834441
SB6	2,426551	0,976526
SB7	2,912975	1,542707
SB8	4,366288	2,100353

III.3.4 Densité de drainage

Également appelée densité de talwegs, correspond à la dissection du relief. Elle est définie comme le rapport entre la longueur totale de tous les talwegs L_i du bassin versant et la surface totale A. Cette mesure reflète la dynamique du bassin, la stabilité du réseau hydrographique et le type de ruissellement de surface. Elle s'exprime en Km/Km².

$$Dd = \frac{L}{S}$$

Avec :

- **Dd** : densité de drainage (km-1).
- **L** : longueur totale des cours d'eau dans le bassin (km).
- **S** : superficie du bassin versant (km²).

Tableau III-18: Densité de drainage du bassin versant d'ESSEROUEL et ses sous bassins

Bassin	Densité de drainage Dd (Km/Km ²)
SB1	5,49
SB2	4,86
SB3	6,19
SB4	4,24
SB5	5,99
SB6	5,25
SB7	4,97
SB8	4,65

III.3.5 Pente moyenne du cours d'eau

La pente moyenne du cours d'eau influence la rapidité à laquelle l'eau atteint l'exutoire du bassin pendant le temps de concentration.

$$P_{moy} = \frac{2H_{moy}}{L}$$

Avec :

- **P_{moy}** : pente moyenne du cours d'eau.
- **H_{moy}**: l'altitude moyenne (m).
- **L** : longueur du cours d'eau principal.

Tableau III-19: Pente moyenne du cours d'eau du bassin versant d'EL ESAROUEL Et ses sous bassins

Bassin	Pente moyenne du cours d'eau P _{moy} (m/Km)
SB1	66,09
SB2	136,21

SB3	127,94
SB4	223,62
SB5	172,26
SB6	105,00
SB7	118,67
SB8	142,04

III.4 Temps de concentration :

Le temps de concentration, selon Charef (1998), désigne la durée nécessaire à la goutte de pluie la plus éloignée, sur le plan hydraulique, pour atteindre l'exutoire. En l'absence d'observations directes à ce sujet, ce paramètre sera établi en recourant à des formules empiriques.

III.4.1 Formule SCS (Soil Conservation Service)

Cette équation tient compte à la fois de la longueur du cours d'eau et du dénivelé.

$$Tc = \left(\frac{0.87L^3}{H_{\max} - H_{\min}} \right)^{0.385}$$

Avec :

- **Tc** : temps de concentration (heure).
- **L** : longueur du talweg principal (km).
- **Hmax**: l'altitude maximale (m).
- **Hmin**: l'altitude minimale (m).

III.4.2 Formule de Giandotti

La formule de Giandotti est largement employée et est définie par la formule ci-dessous :

$$Tc = \frac{4 * \sqrt{S} + 1.5 * L}{0.8\sqrt{H_{\text{moy}} - H_{\min}}}$$

Avec :

- **tc** : temps de concentration (heure).
- **S** : surface du bassin versant (km²).
- **L** : longueur du talweg principal (km).
- **Hmin**: l'altitude minimale (m).
- **Hmoy**: l'altitude moyenne (m).

III.4.3 La formule de Kirplich

La formule s'écrit

$$Tc = \frac{1}{52} * \left(\frac{L * 1000}{\sqrt{I * 100}} \right)^{0.77}$$

Où :

- Tc : Est le temps de concentration en heure.
- L : Est la longueur du talweg en m.
- I : Est la pente moyenne du talweg en m/m.

Tableau III-20: Temps de concentration du bassin versant EL SAROUEL et ses sous bassins en heures

Bassin	Temps de concentration tc (SCS)h	Temps de concentration tc (Giandotti)h	Temps de concentration tc (KIRPLICH)h
SB1	0,38	1,95	3,61
SB2	0,27	1,04	2,53
SB3	0,20	0,98	2,11
SB4	0,18	0,67	1,63
SB5	0,14	0,98	1,14
SB6	0,19	2,09	1,56
SB7	0,24	1,02	2,12
SB8	0,26	0,88	2,50

Parmi les résultats présentés dans le tableau (III.20), nous choisissons celui dérivé de la loi de Giandotti, car il prend en considération la plupart des paramètres géomantiques du bassin versant.

III.5 Vitesse moyenne de ruissellement Vr :

Elle est donnée par la formule suivante :

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

Avec :

- Lcp : Longueur du talweg principal (Km).
- Tc : Temps de concentration (h).

Tableau III-21 Vitesse moyenne de ruissellement Vr

Sous bassins	Vr (km/h)
SB1	1.19
SB2	2.01
SB3	1.63
SB4	2.26
SB5	0.85
SB6	0.47
SB7	1.52
SB8	2.39

III.6 Conclusion

Suite à l'analyse des éléments climatiques, géographiques et hydrographiques de la zone d'étude, ces éléments peuvent être employés pour anticiper les risques hydrologiques, particulièrement dans le cadre actuel influencé par les changements climatiques.

A partir des résultats obtenus de la présentation zone d'étude, on peut prendre une idée sur les principales causes de l'inondation dans sous bassin d'EL SAROUEL le taux de ruissellement important à cause de la géomorphologie.



Chapitre IV

ETUDE HYDROLOGIQUE

CHAPITRE IV : Etude Hydrologique

IV.1 Introduction :

L'objectif principal d'une étude hydrologique est de déterminer les hydrogrammes de crues à différentes périodes de retour pour un bassin versant spécifique, ainsi que de définir les débits maxima probables correspondants qui serviront de conditions aux limites dans l'étude hydraulique. Pour ce faire, l'utilisation d'un modèle de calcul des débits et d'estimation des eaux à l'échelle d'un bassin versant est indispensable.

Le calcul hydrologique repose sur l'utilisation des paramètres hydrologiques calculés par le logiciel Arc GIS (10.8) sur une carte MNT du sous-bassin de EL SAROUEL.

IV.2 Analyse des données pluviométriques :

La première étape essentielle dans l'étude d'un projet d'aménagement est l'analyse des données pluviométriques disponibles. Il est nécessaire d'avoir une série pluviométrique comprenant les précipitations maximales journalières pour la période la plus étendue possible. Avant d'évaluer les précipitations sur les bassins versants, nous avons examiné les données disponibles à la station pluviométrique de PONT BOUCHET

IV.2.1 Pluies maximales journalières :

Les pluies maximales journalières peuvent entraîner des crues importantes, nécessitant une protection adéquate des structures.

IV.2.2 Les précipitations maximales journalières :

Cette étude vise à ajuster la série de données des précipitations maximales journalières présentées dans le tableau IV.1 en utilisant une loi théorique, dans le but de déterminer une intensité de pluie pour une durée et une période de retour spécifiques.

Tableau IV:1 Séries des Pluies Maximales Journalières (1977-2020) à la station de pont bouchet[Source ANRH ALGER]

Année	Pjmax	Année	Pjmax
1977	48,9	1999	82,8
1978	57,7	2000	28,7
1979	34	2001	39
1980	36	2002	101
1981	38,4	2003	38,7
1982	114,6	2004	82,9
1983	114,6	2005	61,8
1984	83,7	2006	62,1
1985	28,8	2007	53,7
1986	23,6	2008	63,3
1987	26,2	2009	77,4
1988	47,4	2010	68,1
1989	54	2011	101,5
1990	45	2012	32
1991	58	2013	67,3
1992	71	2014	62,7
1993	32,8	2015	28,5
1994	32,8	2016	35,3
1995	43	2017	61
1996	34,4	2018	133,1
1997	47,2	2019	60,7
1998	60	2020	94,3

IV.2.3 Contrôle de la série de valeurs :

- **Vérification de l'homogénéisation de la série :**

Afin de prévenir l'emploi d'informations erronées dans le dimensionnement des structures, il est essentiel de garantir que notre série de données ne présente pas de ruptures artificielles. Pour valider ou infirmer cette hypothèse, nous recourons au test de la médiane. Ce test a pour objectif de déterminer si la série de données est homogène ou non, et la procédure à suivre est la suivante :

1- Organiser la série en ordre croissant.

2- La médiane M est une valeur telle que 50 % des xi sont inférieurs à elle et 50 % des xi sont supérieurs. Deux situations peuvent se présenter : Si n est impair, la médiane est la valeur située à la position (n+1)/2. En revanche, si n est pair, la médiane est calculée comme la moyenne des valeurs aux positions n/2 et (n/2) + 1. Médiane = $(54 + 57.7) / 2 = 55.85$.

3- Substituer la série non triée par une séquence de signes \therefore (+) pour les $x_i > M$

(-) pour les $x_i < M$

Tableau IV:2. Calcul des paramètres du test de la médiane

Année	Pjmax	Rang	Classement	Signes
1977	48,9	1	23,6	-
1978	57,7	2	26,2	+
1979	34	3	28,5	-
1980	36	4	28,7	-
1981	38,4	5	28,8	-
1982	114,6	6	32	+
1983	114,6	7	32,8	+
1984	83,7	8	32,8	+
1985	28,8	9	34	-
1986	23,6	10	34,4	-
1987	26,2	11	35,3	-
1988	47,4	12	36	-
1989	54	13	38,4	-
1990	45	14	38,7	-
1991	58	15	39	+
1992	71	16	43	+
1993	32,8	17	45	-
1994	32,8	18	47,2	-
1995	43	19	47,4	-
1996	34,4	20	48,9	-
1997	47,2	21	53,7	-
1998	60	22	54	+
1999	82,8	23	57,7	+
2000	28,7	24	58	-
2001	39	25	60	-
2002	101	26	60,7	+
2003	38,7	27	61	-
2004	82,9	28	61,8	+
2005	61,8	29	62,1	+
2006	62,1	30	62,7	+
2007	53,7	31	63,3	-
2008	63,3	32	67,3	+
2009	77,4	33	68,1	+

2010	68,1	34	71	+
2011	101,5	35	77,4	+
2012	32	36	82,8	-
2013	67,3	37	82,9	+
2014	62,7	38	83,7	+
2015	28,5	39	94,3	-
2016	35,3	40	101	-
2017	61	41	101,5	+
2018	133,1	42	114,6	+
2019	60,7	43	114,6	+
2020	94,3	44	133,1	+

4- calculons les quantités Ns et Ts avec :

Ns : nombre total de série (+) ou (-)

Nous suivons approximativement une loi normale avec une moyenne $(N+2) / 2$ et une variance de $1/4[(N-1)]$. La variable Ts suit une loi binomiale. Pour un niveau de signification compris entre 91% et 95%, les conditions du test sont les suivantes :

$$Ns = 22 > \frac{1}{2} (N + 1 - U \frac{\alpha}{2} \sqrt{N + 1}) = 15$$

$$Ts = 6 < 3.3 \log_{10}(N + 1) = 8.72$$

Les conditions des tests ont été vérifiées, donc nous pouvons conclure que notre série de données est homogène.

IV.2.4 Les caractéristiques empiriques de la série :

Les caractéristiques empiriques de la série de donnée ont été obtenues par le logiciel HEC-SSP et sont représentées dans le tableau IV.2 suivant Tableau IV.2 : Caractéristique de la série de donnée avec N = 44ans

Tableau IV:3 Les caractéristiques empiriques de la série HEC-SSP

Caractéristiques			
Année d'observation	44	Médiane	55.850
Minimum	23.600	Mode	32.800
Maximum	133.100	Coefficient de variation (Cv)	0.253
Moyenne	58.364		
Ecart-type	26.652		

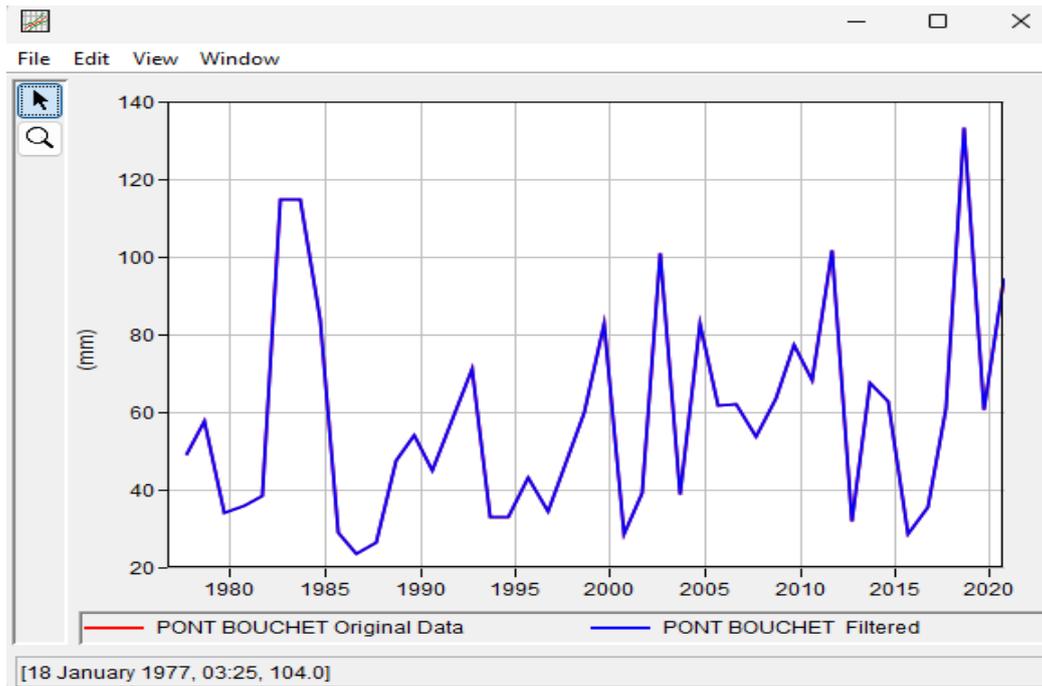


Figure IV-1 Les Pluies Maximales Journalières de station Pont Bouchet traiter par hec-ssp

IV.2.5 Choix de la loi d'ajustement :

IV.2.5.1 Logiciel utiliser pour l'ajustement :

HEC-SSP (Hydrologic Engineering Center's Statistical Software Package) est un logiciel développé par le Corps des ingénieurs de l'armée américaine. Il est conçu pour effectuer des analyses statistiques sur les données hydrologiques, telles que les débits des rivières et les données de précipitations. Le logiciel permet aux utilisateurs de réaliser diverses analyses, notamment :

- Analyse de fréquence des crues (basée sur des directives comme le Bulletin 17C)
- Analyse de fréquence générale
- Analyse de fréquence des volumes (pour les débits élevés ou faibles)
- Analyse de durée
- Analyse de fréquence coïncidente
- Analyse d'hydrogramme équilibré

HEC-SSP intègre divers outils d'analyse statistique précédemment utilisés par l'USACE, tels que HEC-FFA et STATS, et améliore les capacités de l'hydrologie statistique

IV.2.5.2 Ajustement de la série pluviométrique à la loi de GALTON :

Le processus d'ajustement est réalisé à l'aide d'une représentation sur du papier logarithmique normal. La loi de GALTON possède une fonction de répartition qui s'exprime en fonction de cette fonction :

$$F(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\mu} e^{-\frac{1}{2}\mu^2} d\mu$$

$$\mu = \frac{\sum_{j=1}^n \ln x_j - n \ln \bar{x}}{\sigma \ln x}$$

X : la moyenne de l'échantillon

σ : l'écart-type de l'échantillon

l'équation de la droite de la loi log normale est la suivante :

$$\ln x(p\%) = \ln \bar{x} + \sigma \ln u(p\%)$$

$$\ln \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n \ln x_i}{N}$$

Les résultats d'ajustement obtenus par la loi de GALTON sont représentés dans le tableau (IV.4) suivant :

Tableau IV:4: Résultats de l'ajustement à la loi de log-normale

Période de Retour (T)	Fréquence au non dépassement(q)	Valeurs Théoriques(mm)	Intervalle de confiance	
			5%	95%
2	50	52.99	59.37	47.37
5	20	76.94	87.31	67.21
10	10	93.50	107.97	79.77
20	5	109.82	129.43	91.77
50	2	131.63	158.76	107.12
100	1	148.53	182.45	118.68
200	0.5	165.89	206.94	130.22
500	0.2	189.66	241.69	145.71

- Test d'homogénéité :

Test d'adéquation du Khi carré

H0 : l'échantillon provient d'une loi -log normale ;44

H1 : l'échantillon ne provient pas d'une loi-log normale.

Résultats donne par hec-ssp :

Résultat de la statistique : $\chi^2 = 8.364$

Conclusion : Nous pouvons accepter H0 au niveau de signification de 5%

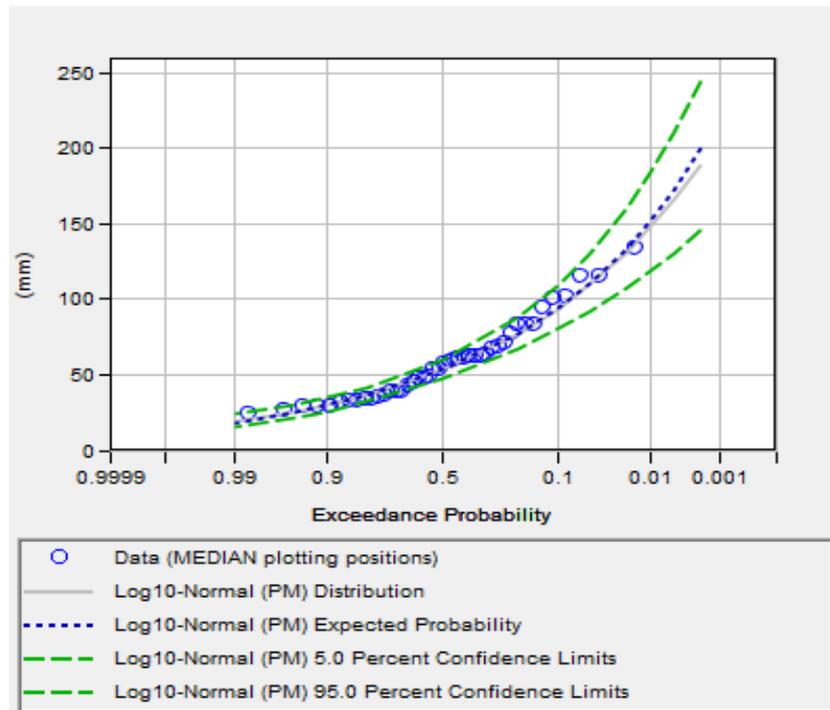


Figure IV-2 Ajustement à la loi de GALTON

IV.2.5.3 Ajustement de la série pluviométrique à la loi de GUMBEL (Méthode des moments) :

Le processus d'ajustement est similaire à celui défini pour la loi de GALTON. La seule différence réside dans la représentation graphique, qui peut être réalisée sur du papier (Gumbel/Hazen). La loi de GUMBEL possède une fonction de répartition exprimée par la formule suivante

$$F(x) = e^{-e^{-y}}$$

où $y = a(x - x_0)$.

- $1/a$: 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).

Les résultats d'ajustement obtenus par la loi de GUMBEL sont représentés dans le tableau IV.5 suivant :

Tableau IV:5 : Résultats de l'ajustement à la loi de GUMBEL

Période de Retour (T)	Fréquence a non Dépassement	Valeurs Théoriques	Intervalle de confiance	
			5%	95%
2	50	53.99	60.44	48.10
5	20	77.54	88.14	67.54
10	10	93.13	107.36	79.70
20	5	108.09	126.13	91.16
50	2	127.45	150.34	105.98
100	1	141.96	168.49	116.97
200	0.5	156.42	186.56	127.87
500	0.2	175.49	210.66	142.29

- **Test d'homogénéité :**

Test d'adéquation du Khi carré.

H0 : L'échantillon provient d'une loi Gumbel ;

H1 : L'échantillon ne provient pas d'une loi Gumbel.

Résultats donne par hec-ssp:

Résultat de la statistique : $X^2 = 7.273$

- **Conclusion** : Nous pouvons accepter H0 au niveau de signification de 5%.

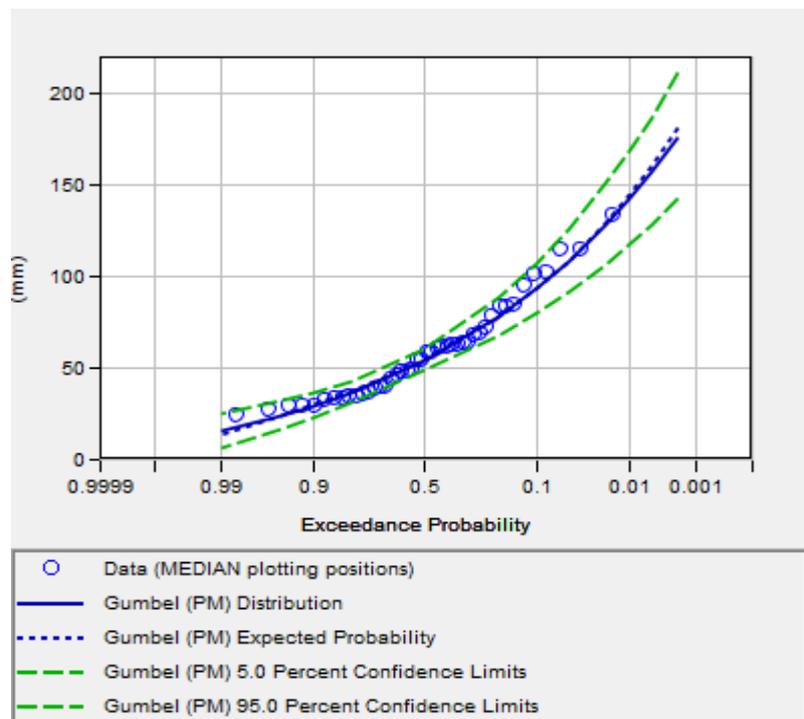


Figure IV-3: Ajustement à la loi de GUMBEL

- **conclusion :**

En analysant les graphiques générés par les deux lois, à savoir GUMBEL et GALTON, il apparaît que l'ajustement correspondant à la loi de GUMBEL est le plus satisfaisant, étant donné que les données expérimentales se rapprochent davantage de la droite théorique. Par conséquent, nous privilégions la loi de GUMBEL.

IV.3 Conception du hyétogramme de projet :

Les épisodes pluvieux sont des phénomènes aléatoires, à la structure très complexe et difficilement reproductible. Le dimensionnement des ouvrages pour se prémunir contre des dégâts qu'occasionnerait un événement de fréquence donnée devrait donc se faire en termes de risque de défaillance. Ceci nécessite la possibilité d'associer une probabilité à un événement donné (Sighomnou, 1989). Chaque épisode pluvieux est unique dans son genre, et on ne saurait lui affecter une probabilité d'occurrence précise. Malgré cette difficulté certains hydrologues ont tenté de mettre au point, à l'usage des projeteurs, des hyétogrammes synthétiques appelés «pluies de projet», dont la transformation conduit à des paramètres de ruissellement pour lesquels on peut chiffrer la probabilité d'occurrence en tout point du bassin versant. L'élaboration de telles pluies repose sur l'analyse statistique de divers éléments (hauteur, durée, fréquence) des épisodes pluvieux.

Nous nous proposons de construire donc ces courbes IDF pour en extraire la pluie de durée déterminée et de fréquence de retour de projet. Ces courbes peuvent être tirées des enregistrements réels échelonnés sur quelques années ; ou à partir de méthodes empiriques :

La recherche de la loi Intensité - Durée - Fréquence s'effectue sur la base des enregistrements pluviographiques . En effet, à partir des dépouillements des pluies on calcule les quantités de pluies correspondantes à différents pas de temps (6mn, 15mn,30mn, 1h, 2h, etc...). Pour chaque durée fixée on sélectionne la valeur maximale par averse. On obtient ainsi une série de données pour chaque pas de temps sur toute la période dépouillée. La relation Intensité - Durée - Fréquence empirique utilisée en Algérie en cas d'indisponibilité de données pluviographiques est celle donnée par K.BODY (ANRH, 1980) et qui s'écrit :

$$P(T, t) = P_{J;\max,T} \left(\frac{t}{24} \right)^b$$

- $P(T, t)$: Hauteur de pluie de fréquence et de durée choisies ;
- $P_{j\max,F}$: Pluie journalière maximale de fréquence voulue ;
- b : Exposant climatique, fonction de la pluie moyenne annuelle.

$$\text{Tell que : } b = 1 + \frac{\ln\left(\frac{P_{j,\max}}{24}\right) - \ln(25)}{\ln(24) - \ln(0.5)} = 0.59$$

Tableau IV:6 : Pluie de courte durée pour les sous bassins

Période De retour	2	5	10	50	100
T(heure)	Pluie de courte de durée de fréquence donnée (mm)				
0.5	5.29	7.60	9.13	12.49	13.91
1	8.02	11.52	13.83	18.93	21.09
2	12.16	17.46	20.97	28.70	31.96
3	15.50	22.27	26.74	36.60	40.77
4	18.43	26.46	31.78	43.50	48.45
6	23.50	33.75	40.54	55.48	61.79
12	35.62	51.16	61.44	84.09	93.66
18	45.43	65.25	78.37	107.24	119.45
24	53.99	77.54	93.13	127.45	141.96

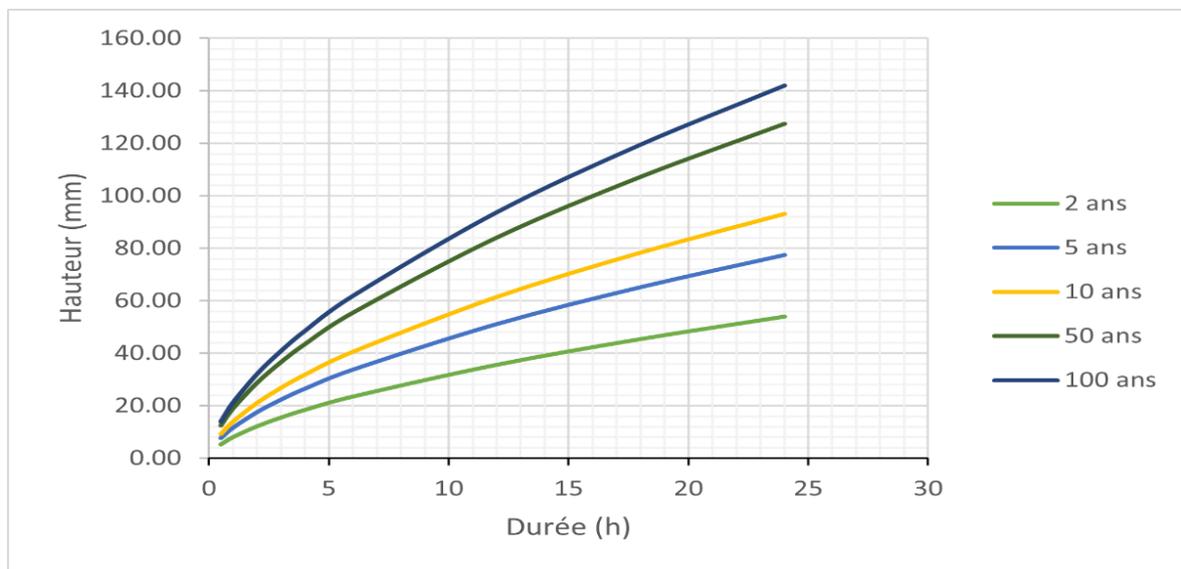


Figure IV-4 : Courbes hauteur- Durée - Fréquence

Tableau IV:7: Intensité de courte durée pour les sous bassins.

Période De retour	2	5	10	50	100
T(heure)	Intensité de courte durée (mm/heure)				
0.5	10.58	15.20	18.25	24.98	27.83
1	8.02	11.52	13.83	18.93	21.09
2	6.08	8.73	10.48	14.35	15.98

3	5.17	7.42	8.91	12.20	13.59
4	4.61	6.62	7.95	10.87	12.11
6	3.92	5.63	6.76	9.25	10.30
12	2.97	4.26	5.12	7.01	7.80
18	2.52	3.62	4.35	5.96	6.64
24	2.25	3.23	3.88	5.31	5.92

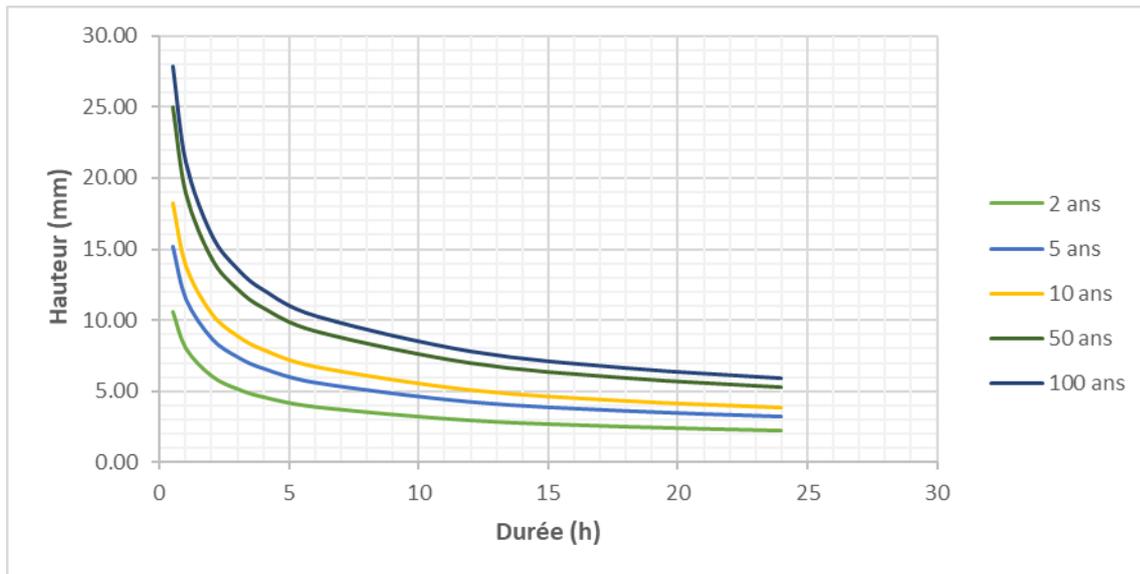


Figure IV-5 : Courbes Intensité – Durée – Fréquence

IV.4 Etude des crues

L'évaluation des inondations a toujours constitué une préoccupation essentielle dans la conception des infrastructures hydrauliques. Plusieurs techniques ont été développées pour permettre une estimation précise de ces phénomènes.

IV.4.1 Diverses approches pour l'évaluation des crues :

La multitude de méthodes de calcul des crues résulte des variations des conditions et des défis rencontrés lors des estimations, ainsi que des compétences de l'analyste. Les techniques employées pour déterminer les crues dépendent principalement des données accessibles ; une meilleure disponibilité des données réduit considérablement les problèmes rencontrés. Ce qui suit est un aperçu des différentes méthodes qui ont été développées.

IV.4.1.1 Formules empiriques :

IV.4.1.1.1 Formule de Mallet et Gauthier :

Au cours de leurs recherches sur "Les problèmes de l'eau en Algérie", Mallet et Gauthier ont développé une formule qui représente le débit maximal en fonction des précipitations, de la surface du bassin et de la période de retour. Cette formule peut être utilisée en Algérie pour un bassin versant $k=1$ et $A=20$, qui sont respectivement. Des facteurs qui sont influencés par les caractéristiques topographiques, climatiques et Analyse géologique des bassins.

$$Q_{\max. p\%} = 2 \cdot K \cdot \log(1 + A + P) \cdot S \cdot \sqrt{\frac{1 + 4 \cdot \log(T) - \log(S)}{L}}$$

Avec :

- **QMax**: débit de crue de période de retour voulue (m³/s).
- **P** : pluie moyenne annuelle (m).
- **S** : superficie du bassin versant (km²).
- **T** : période de retour (ans).
- **L** : longueur du talweg principal km).

Tableau IV:8: Les débits max par la formule de Mallet et Gauthier

Période de retour Sous bassin	10	50	100
	Qmax (m ³ /s)		
SB1	5.32	6.70	7.61
SB2	5.29	6.65	7.56
SB3	2.86	3.55	4.04
SB4	3.19	3.97	4.51
SB5	2.80	3.47	3.94
SB6	2.45	3.03	3.44
SB7	2.45	3.04	3.45
SB8	3.30	4.11	4.68

IV.4.1.1.2 Méthode fréquentielle de Meddi & al. 2017 :

Selon le Professeur Mohamed MEDDI, le modèle suivant a été développé pour l'une des trois régions du nord d'Algérie afin de calculer le Qmax dans les bassins non jaugés et pour les séries de mesure de débit insuffisantes dans les bassins équipés de stations hydrométriques. (Meddi, M., Toumi, S., & Assani, A. (2017)).

$$Q_{max}(F) = Q_{max} \cdot q(F)$$

Avec :

- Qmax : le débit maximal est calculé utilisant le modèle correspondant à la région en question, fonction de la superficie du bassin versant (S) en km² et de la pente du cours d'eau principal (Icp) sans unité.
- q (F) La fonction quantile correspondante a la région étudié en fonction d'une période de retour donné p

La zone à étudier se trouve dans la région I

Le Débit maximal :

$$Q_{max} = 3.52 S^{0.96} \cdot I_{cp}^{0.54}$$

La Fonction quantile q(F) :

- Pour une période de retour égale à 10 ans on a $q(F) = 2.14$
- Pour une période de retour égale à 50 ans on a $q(F) = 3.53$
- Pour une période de retour égale à 100 ans on a $q(F) = 4.13$

Tableau IV:9 : Les débits max par la formule de Professeur M. Meddi & al. 2017

Période de retour Sous bassins	10	50	100
	Qmax (m3/s)		
SB1	2.77	4.57	5.34
SB2	3.86	6.37	7.45
SB3	1.76	2.91	3.40
SB4	2.59	4.27	4.99
SB5	1.47	2.42	2.83
SB6	1.06	1.75	2.05
SB7	1.42	2.35	2.75
SB8	2.47	4.07	4.77

IV.4.1.2 Méthode de SCS CN

- **Relation pluie-débit du NRCS (SCS)**

Le Service de la conservation des sols (SCS) du Département de l'agriculture des États-Unis (1972), devenu aujourd'hui le Service de conservation des ressources naturelles (NRCS), a développé une relation pluie-débit pour les bassins versants. Pour l'ensemble de la tempête, la profondeur des précipitations excédentaires ou du ruissellement direct P_e est toujours inférieure ou égale à la profondeur des précipitations P ;

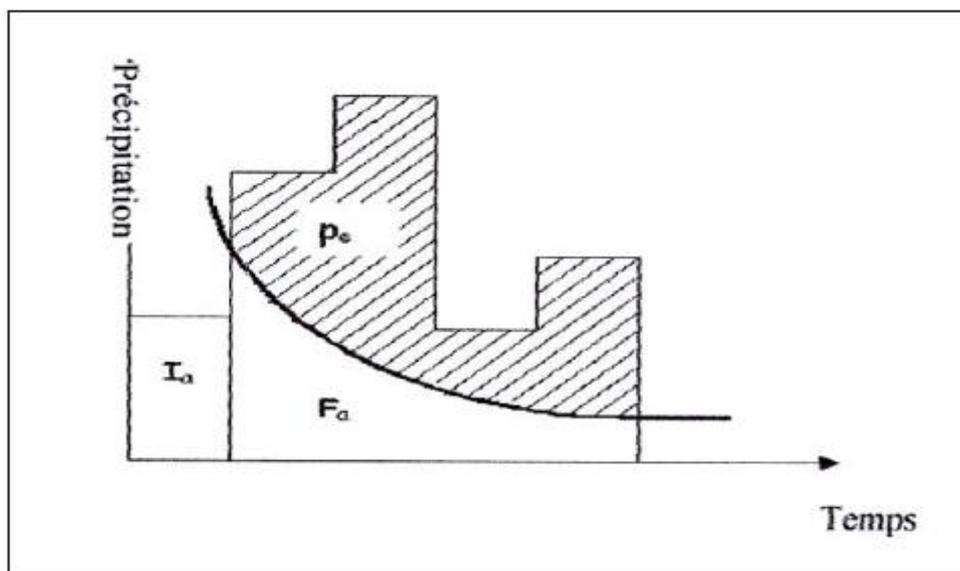


Figure IV-6 : Variables dans la méthode SCS des abstractions de pluie : I_a = abstraction initiale, P_e = excès de pluie, F_a = abstraction continue, et P = précipitation totale.

de même, après le début du ruissellement, la profondeur supplémentaire d'eau retenue dans le bassin versant F_a est inférieure ou égale à une rétention maximale potentielle S (voir Figure récent). Il existe une certaine quantité de précipitations I_a (abstraction initiale avant le début de la rétention) pour laquelle aucun ruissellement ne se produira, donc le ruissellement potentiel est P . La méthode SCS suppose que les ratios des deux quantités réelles aux deux quantités potentielles sont égaux, c'est-à-dire

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a} = \frac{\text{Actual}}{\text{potential}}$$

Par continuité,

$$P = P_e + I_a + F_a$$

La combinaison entre les deux équations nous donne

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}$$

qui est l'équation de base pour calculer la profondeur des précipitations excédentaires ou du ruissellement direct à partir d'une tempête par la méthode SCS. À partir de l'étude de nombreux petits bassins versants expérimentaux, une relation empirique a été développée pour I_a : $I_a = 0,2 \times S$

, de sorte que l'équation () est maintenant exprimée comme suit :

$$P_e = \frac{(P - 0,2 \cdot S)^2}{P + 0,8S}$$

la rétention maximale potentielle $S = S_0 + S_1$

Avec : S_0 : seuil de ruissellement (mm),

S_1 : est assimilable à une vitesse d'infiltration (mm/h),

Les études empiriques du SCS indiquent que la rétention maximale potentielle à $t=6D$ peut être estimée par

$$S_{\max} = 25,4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right)$$

où CN est le nombre de courbe de ruissellement, qui est une fonction de l'utilisation des terres, de l'humidité du sol antécédente et d'autres facteurs affectant le ruissellement et la rétention dans un bassin versant. Le nombre de courbe est un nombre sans dimension défini tel que $0 < CN < 100$. Pour les surfaces imperméables et les surfaces d'eau, CN est égal à 100 ; pour les surfaces naturelles, CN est inférieur à 100.

- **Comment en détermine le CN ?**

La GCN250 (Global Gridded Curve Numbers at 250 m resolution) est un ensemble de données hydrologiques à l'échelle mondiale, basé sur la méthode du Curve Number (CN). Le Curve Number est un paramètre utilisé dans l'ingénierie hydrologique pour estimer le ruissellement direct à partir des précipitations. Le GCN250 fournit une version améliorée et détaillée de ces valeurs, en les rendant disponibles sur une grille mondiale avec une résolution spatiale de 250 mètres.

Objectif de GCN250 :

Le GCN250 est conçu pour améliorer la précision des modèles hydrologiques et des études de conception, tels que les études de gestion des ressources en eau, la planification de l'infrastructure hydraulique, et l'analyse des inondations. En utilisant une grille mondiale à haute résolution, il permet de mieux caractériser le potentiel de ruissellement des terrains en fonction de leur couverture terrestre, leur utilisation des sols et leur état hydrologique.

- **Comment est déterminé le Curve Number avec GCN250 ?**

Le Curve Number est déterminé par plusieurs facteurs :

- L'utilisation et la couverture du sol : types de végétation, urbanisation, agriculture, forêts, etc.
- Le type de sol : Les sols sont classés en groupes hydrologiques (A, B, C, D) en fonction de leur perméabilité.
- L'état hydrologique : Sec, modérément humide, ou humide.

Le GCN250 utilise des données de télédétection, des bases de données géospatiales mondiales et des modèles climatiques pour déterminer ces facteurs et assigner une valeur de Curve Number à chaque pixel de 250 mètres. Cela donne une évaluation détaillée et localisée des conditions de ruissellement potentielles pour une région donnée.

En résumé, GCN250 est un outil précieux pour simuler et prévoir le comportement hydrologique dans des modèles à grande échelle avec une haute résolution, en intégrant les conditions locales du sol et de l'utilisation des terres.

Tableau IV:10 CN des conditions normales du sol (Chow, 1988)

Type des surfaces	Surface Impermeable %	Type de sol			
		A	B	c	D
Pâturage ou prairie : Bonne condition		68	79	86	89
Faible condition		39	61	74	80
Les espaces ouverts. Pelouse .parcs, .		68	79	86	89
Cimetières :		49	69	79	84
Couvert végétal < 50 %		39	61	74	80
Couvert végétal Compris entre 50et 75 %					
Couvert végétal > 75%					
Zones urbaines :					
Commerciale	85	89	92	94	95
industrielle	72	81	88	91	93
Parking. toits. allées. etc		98	98	98	98
Rues et routes :					
Chaussée avec égout pluvial		98	98	98	98
Gravies		76	85	89	91
Terre battue		72	82	87	81
Zones résidentielles :taille moyenne du lot					
J/8 acre et moins	65	77	85	90	92
1/4acre	38	61	75	83	87
J/3 acre	30	57	72	81	86
J/2 acre	25	54	70	80	85
1 acre	20	51	68	79	84
2 acre	12	46	65	77	82

Avec Nomenclature des groupes de sol du SCS :

- **Groupe de sol A** : Potentiel de ruissellement faible et taux d'infiltration élevé →Sables et graviers
- **Groupe de sol B** : Taux d'infiltration modéré et sol modérément bien drainé →Sables
- **Groupe de sol C** : Taux d'infiltration faible ; sols contenant des colloïdes et des argiles
- **Groupe de sol D** : Potentiel de ruissellement élevé et taux d'infiltration très faible →argiles gonflantes et couches de sol minces avec fond imperméable près de la surface

Pour un bassin versant présentant divers types de sols ou de couvertures végétales, il est possible de déterminer un coefficient de courbe (CN) moyen en utilisant la relation suivante :

$$CN_{moy} = \frac{\sum_i a_{ij} CN_i}{\sum_i A_i}$$

Où,

- j : L'indice associé à la subdivision du bassin de type de sol uniforme ;
- a_{ij} : l'aire de la subdivision j dans le sous bassin i ;
- A_i : l'aire du sous bassin i.

L'utilisation et le développement de la méthode SCS CN ont été largement encouragés en raison de sa facilité d'application dans divers bassins versants à climats variés à travers le monde (Vaššová, D., 2013 ; Choudhari, K et al., 2014 ; Yasin, Z et al., 2015 ; Razmkhah, H. 2016 ; Strapazan, C. et Petrut, M. 2017). En Algérie, elle a également été largement utilisée (Benaoudj, A 2014 ; Abdi, I ; Meddi, M. 2015 ; Moukhari, E., 2016). la méthode du Soil Conservation Service a été appliquée et calée en région méditerranéenne sur des bassins mesurés, et les résultats ont été assez similaires à ceux de la réalité. Le principe de fonctionnement est identique à celui de l'hydrogramme unitaire ; il est le suivant :

Un épisode pluvieux de temps T est supposé entraîner un ruissellement similaire.période

L'hydrogramme de base, créé par la pluie de base qui a été tombée pendant une période de D

Est supposé triangulaire, avec : $1/3T_c < D < 2/3T_c$

Il est caractérisé par :

- Débit de pointe : QP
- Temps de montée : $T_m = D/2 + 0,6 T_c$
- Temps de descente : $B = 1,67 T_m$
- Temps de base : $T_b = T_m + B$

L'évolution du déficit d'écoulement pendant l'averse est déterminée après avoir identifié S_{max}

par : $S_0 = 0.2 * S_{max}$ et $S_1 = (S_{max} - S_0)/6D$

Le volume ruisselé élémentaire est donc :

$$V_r = P_e * A$$

Avec : P_e : La lame d'eau ruisselée (excès de pluie).

A : surface du bassin versant

$$Q_p = 2 * V_r / T_b$$

$$\Rightarrow Q_p = \frac{2V_r}{T_m + B}$$

Cette équation sert à calculer Q_p , le débit maximal de l'hydrogramme élémentaire. L'utilisation de la méthode SCS a produit les résultats suivants :

Tableau IV:11: Les débits max par la Méthode SCS

Période de retour Sous bassins	10	50	100
	Qmax (m ³ /s)		
SB1	4.46	7.22	8.43
SB2	3.24	5.94	7.19
SB3	1.47	2.73	3.31
SB4	0.83	1.91	2.45
SB5	1.03	1.90	2.31
SB6	1.33	2.12	2.46
SB7	1.25	2.30	2.78
SB8	1.70	3.30	4.05

IV.4.2 Comparaison

Les résultats de la formule sont surestimés les débits, tandis que les résultats de et la méthode de SCS-CN sont proche Cela nous amène donc à écarter les débits calculés par la formule empiriques de Mallet et Gauthier et adopter ceux déterminés par les deux méthodes SCS et la formule de Professeur Mohamed MEDDI &Al.... ;2017.

Dans mon projet, j'ai choisi de poursuivre l'étude avec les résultats de la méthode SCS, car elle prend en compte des facteurs et des variables supplémentaires par rapport aux autres méthodes telles que des critères physiques : La méthode tient compte de facteurs physiques et de données climatiques tels que le type de sol, la végétation, et l'intensité des précipitations, ce qui lui confère une plus grande précision. pour le dimensionnement d'un éventuelle ouvrage de protection.

IV.4.3 L'hydrogramme des crues

L'hydrogramme des crues représente la variation des débits au fil du temps, notée $Q(t)$. Il prend généralement la forme d'une courbe en cloche asymétrique. L'analyse de cet hydrogramme est essentielle, car elle constitue un outil fondamental pour le dimensionnement des infrastructures hydrauliques. Le débit à l'exutoire est décrit par un hydrogramme, qui illustre l'évolution du débit dans le temps, généralement de manière continue.

- **Présentation de la méthode de Sokolovsky :**

Grâce à la méthode de Sokolovsky, il est possible de générer l'hydrogramme de crue en utilisant des débits de pointe. Selon elle, l'hydrogramme de crue est composé de deux branches de courbe. L'une pour la monter l'autre pour la décrue [Touaïbia, 2004] .

Débit de montée :

$$Q_t = Q_{max} * \left(\frac{t}{t_m}\right)^2$$

D'après Sokolovsky , t_m correspond au temps de montée de la crue, ce qui correspond au temps de concentration t_c ($t_m = t_c$).

Débit de la décrue :

$$Qt = Q_{max} * \left(\frac{t_b - t}{t_d}\right)^3$$

t_d est égal à $\gamma * t_m$, avec un coefficient γ qui varie en fonction des caractéristiques du bassin versant. Dans notre situation, le bassin est non boisé, donc γ est égal à 2.5

nous obtenons les résultats suivants :

- Le tableau ci-dessous présente les débits de montée et de décrue correspondant à différents débits maximaux obtenus par la méthode de scs, ainsi que leurs périodes de retour pour SB1.

Tableau IV:12 les débits de montée et de décrue SB1

Période de retour Durée (heure)	Q(m3/s)		
	10	50	100
0.20	0.00	0.01	0.01
0.50	0.08	0.12	0.14
0.80	0.31	0.50	0.59
1.00	0.61	0.98	1.14
1.50	2.04	3.31	3.86
1.95	4.46	7.22	8.43
2.50	3.51	5.67	6.62
3.50	2.07	3.34	3.91
4.50	1.01	1.63	1.90
5.50	0.32	0.52	0.61
6.81	0.00	0.00	0.00

L'hydrogramme de crue associée aux débits de crue pour SB1 obtenus est illustré par la figure (IV.7)

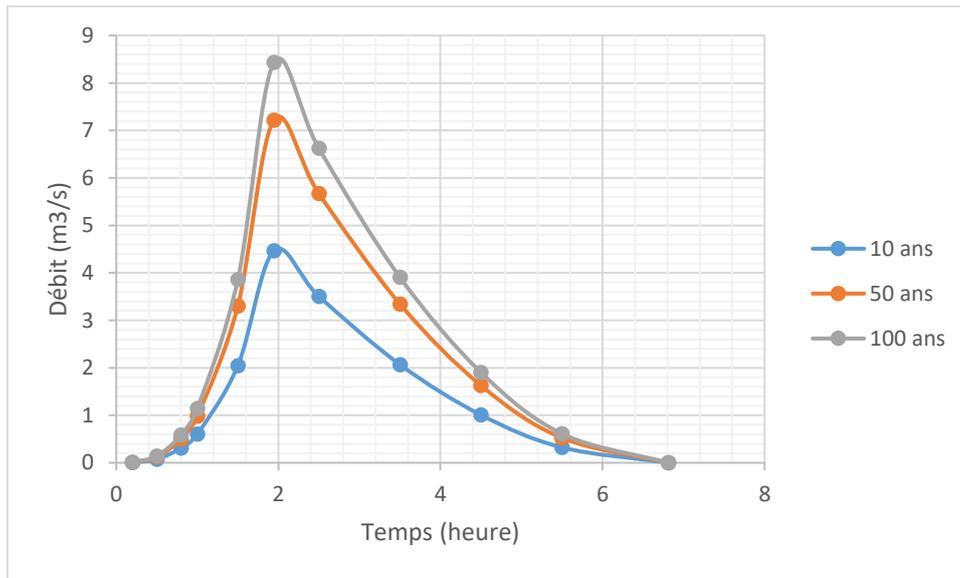


Figure IV-7: Hydrogramme de crue SB1

- Le tableau ci-dessous présente les débits de montée et de décrue correspondant à différents débits maximaux obtenus par la méthode de scs, ainsi que leurs périodes de retour pour SB2

Tableau IV:13 les débits de montée et de décrue SB2

Période de retour Durée (heure)	10	50	100
	Q(m³/s)		
0.2	0.02	0.04	0.05
0.5	0.36	0.67	0.81
0.8	1.49	2.74	3.31
1.0	3.24	5.94	7.19
1.5	2.18	4.00	4.85
2.5	0.61	1.12	1.36
3.6	0.00	0.00	0.00

L'hydrogramme de crue associé aux débits de crue obtenus pour SB2 est illustré par la figure (IV.8)

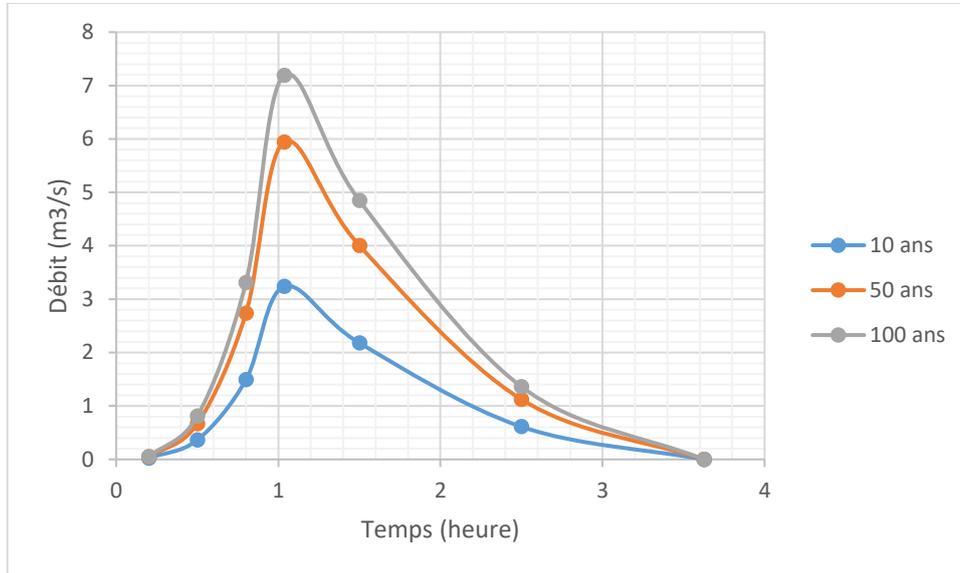


Figure IV-8: Hydrogramme de crue SB2

- Le tableau ci-dessous présente les débits de montée et de décrue correspondant à différents débits maximaux obtenus par la méthode de scs, ainsi que leurs périodes de retour pour SB

Tableau IV:14 les débits de montée et de décrue SB3

Période de retour Durée (heure)	10	50	100
	Q(m³/s)		
0.2	0.01	0.02	0.03
0.5	0.20	0.37	0.44
0.8	0.81	1.50	1.82
1.0	1.47	2.73	3.31
1.5	0.91	1.68	2.04
2.5	0.21	0.38	0.47
3.4	0.00	0.00	0.00

L'hydrogramme de crue associé aux débits de crue obtenus pour SB3 est illustré par la figure (IV.9)

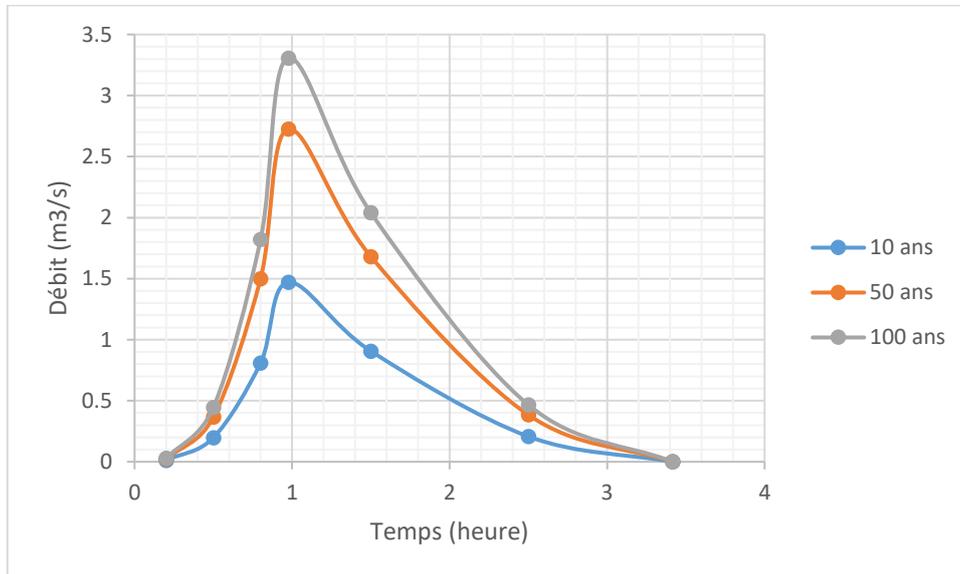


Figure IV-9: Hydrogramme de crue SB3

- Le tableau ci-dessous présente les débits de montée et de décrue correspondant à différents débits maximaux obtenus par la méthode de scs, ainsi que leurs périodes de retour pour SB4

Tableau IV:15 les débits de montée et de décrue SB4

Période de retour Durée (Heure)	10	50	100
	Q(m³/s)		
0.2	0.02	0.05	0.07
0.4	0.12	0.27	0.35
0.5	0.35	0.80	1.02
0.7	0.83	1.91	2.45
1.0	0.53	1.23	1.57
2.0	0.03	0.08	0.10
2.3	0.00	0.00	0.00

L'hydrogramme de crue associé aux débits de crue obtenus pour SB4 est illustré par la figure (IV.10)

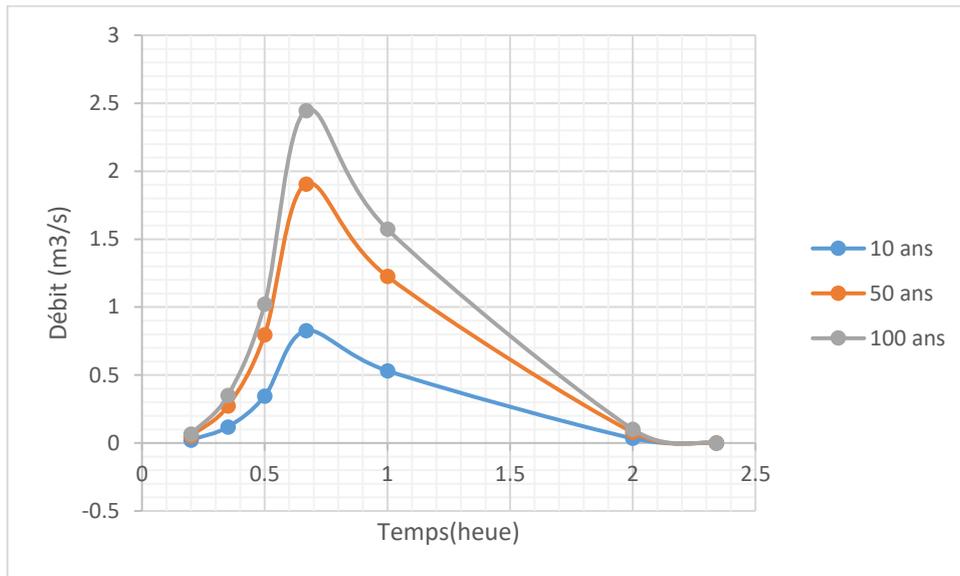


Figure IV-10: Hydrogramme de crue SB4

- Le tableau ci-dessous présente les débits de montée et de décrue correspondant à différents débits maximaux obtenus par la méthode de scs, ainsi que leurs périodes de retour pour SB5

Tableau IV:16 les débits de montée et de décrue SB5

Période de retour Durée (heure)	10	50	100
	Q(m ³ /s)		
0.2	0.01	0.02	0.02
0.5	0.14	0.26	0.31
0.8	0.56	1.05	1.27
1.0	1.03	1.90	2.31
1.5	0.63	1.17	1.43
2.5	0.15	0.27	0.33
3.4	0.00	0.00	0.00

L'hydrogramme de crue associé aux débits de crue pour SB5 obtenus est illustré par la figure (IV.11)

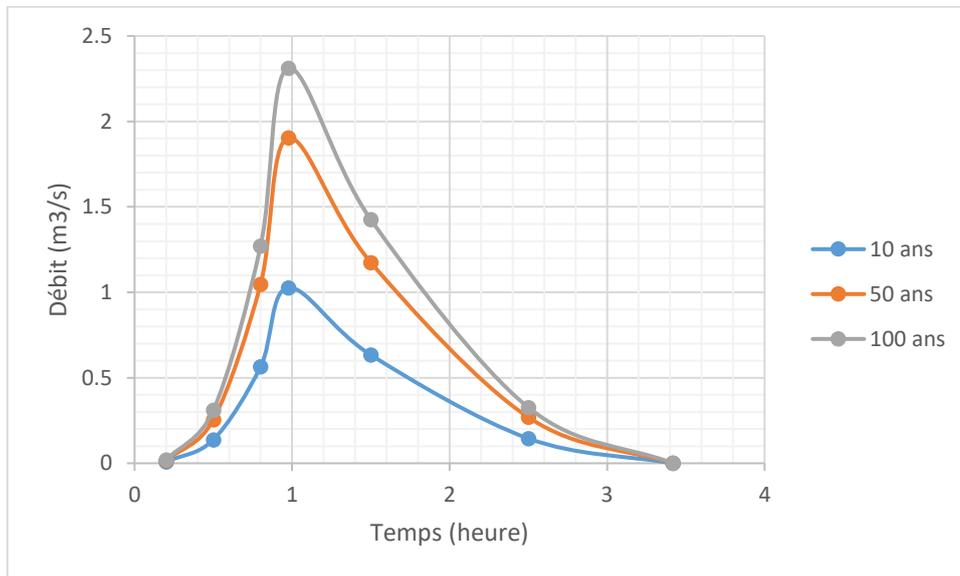


Figure IV-11: Hydrogramme de crue SB5

- Le tableau ci-dessous présente les débits de montée et de décrue correspondant à différents débits maximaux obtenus par la méthode de scs, ainsi que leurs périodes de retour pour SB6

Tableau IV:17 les débits de montée et de décrue SB6

Période de retour Durée (heure)	10	50	100
	Q(m3/s)		
0.2	0.001	0.002	0.002
0.5	0.018	0.029	0.034
1.0	0.146	0.233	0.271
2.1	1.331	2.119	2.464
3.0	0.907	1.443	1.678
4.0	0.535	0.851	0.989
6.0	0.084	0.133	0.155
7.3	0.000	0.000	0.000

L'hydrogramme de crue associé aux débits de crue pour SB6 obtenus est illustré par la figure (IV.12)

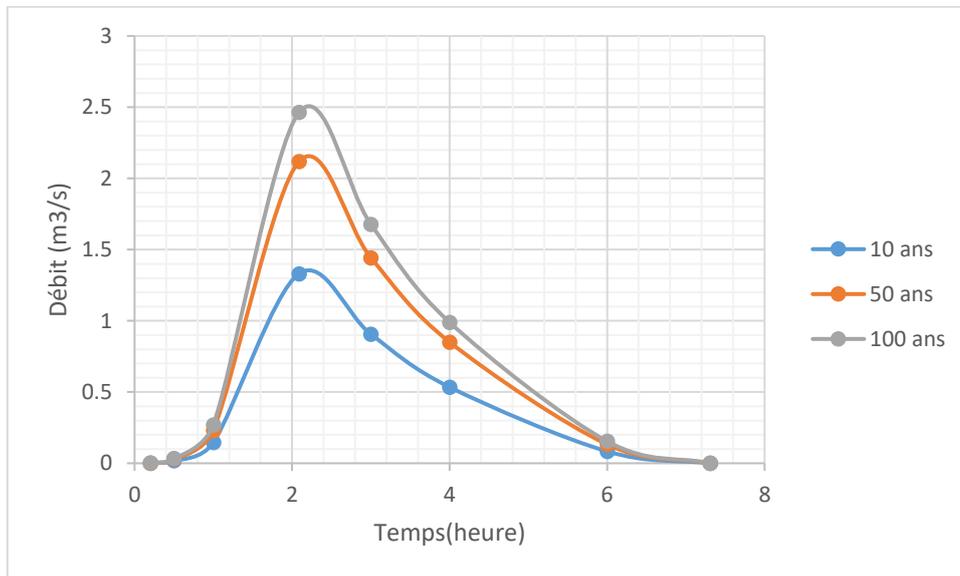


Figure IV-12: Hydrogramme de crue SB6

- Le tableau ci-dessous présente les débits de montée et de décrue correspondant à différents débits maximaux obtenus par la méthode de scs, ainsi que leurs périodes de retour pour SB7

Tableau IV:18 les débits de montée et de décrue SB7

Période de retour Durée (heure)	10	50	100
	Q(m3/s)		
0.2	0.009	0.017	0.021
0.5	0.148	0.272	0.330
0.8	0.608	1.116	1.350
1.0	1.252	2.299	2.783
2.0	0.472	0.868	1.050
3.0	0.061	0.113	0.136
3.6	0.000	0.000	0.000

L'hydrogramme de crue associé aux débits de crue pour SB7 obtenus est illustré par la figure (IV.13)

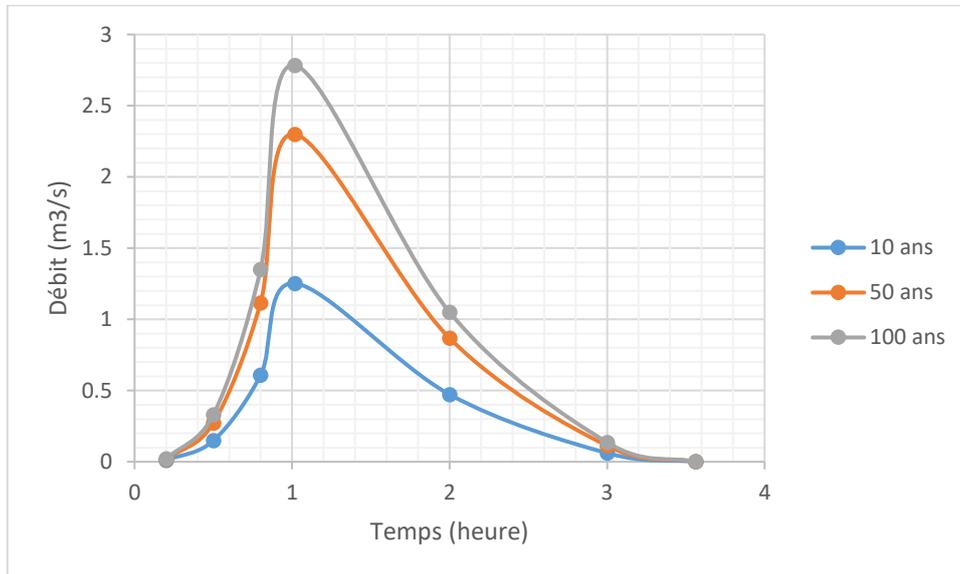


Figure IV-13: Hydrogramme de crue SB7

- Le tableau ci-dessous présente les débits de montée et de décrue correspondant à différents débits maximaux obtenus par la méthode de scs, ainsi que leurs périodes de retour pour SB

Tableau IV:19 les débits de montée et de décrue SB8

Période de retour Durée (heure)	10	50	100
	Q(m3/s)		
0.2	0.02	0.04	0.05
0.4	0.16	0.31	0.38
0.6	0.54	1.05	1.30
0.8	1.70	3.30	4.05
1.5	0.87	1.69	2.08
2.5	0.11	0.22	0.27
3.0	0.00	0.00	0.00

L'hydrogramme de crue associée aux débits de crue pour SB8 obtenus est illustré par la figure (IV.14)

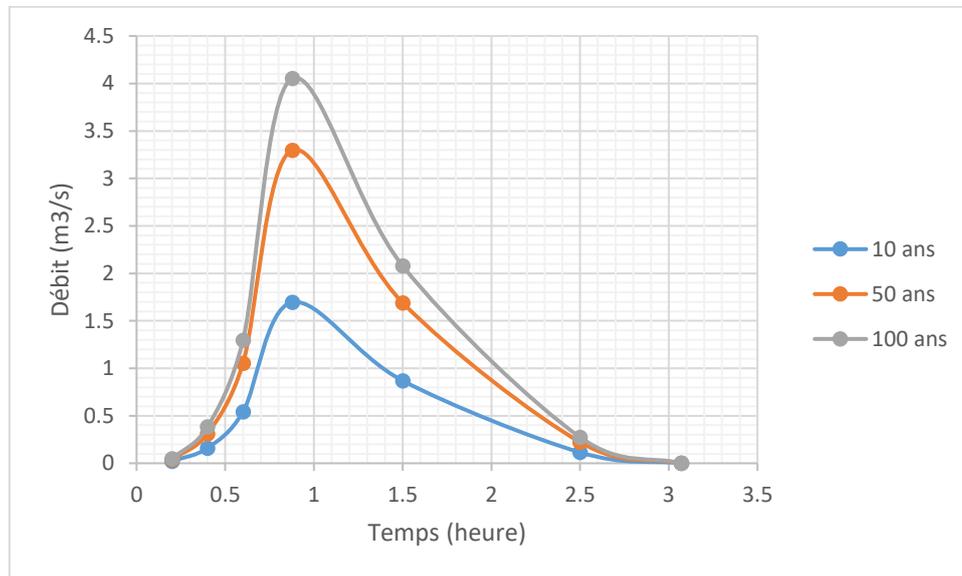
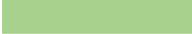


Figure IV-14 : Hydrogramme de crue SB8

IV.5 Conclusion :

L'objectif de l'étude hydrologique est de préparer des résultats fondamentaux pour l'analyse hydraulique. Les hydrogrammes des crues élaborées offrent une vision de l'évolution des crues au fil du temps, permettant ainsi de déterminer les valeurs des débits traversant la ville d'EL SAROUEL. L'utilisation de l'hydrogramme de crue obtenue nous permettra par la suite de réaliser une simulation de la crue centennale afin d'identifier les zones susceptibles d'être inondées.



Chapitre V

Modélisation de Réseau
Hydrographique

CHAPITRE V : Modélisation de Réseau Hydrographique :

V.1. Introduction :

L'analyse hydraulique constitue un élément essentiel du projet. Comme son appellation l'indique, nous allons examiner les débits ainsi que les niveaux d'eau dans la rivière durant les périodes de crue. Nous avons principalement recouru au logiciel HEC-RAS.

Cette recherche sur la protection contre les inondations s'appuie sur l'utilisation conjointe de deux logiciels CIVIL 3D et HEC-RAS 6.4.1:

Le logiciel CIVIL 3D permet d'élaborer une base de données géographique du terrain et sert d'interface, facilitant le transfert de données vers HEC-RAS 6.4.1. Pour sa part, HEC-RAS est un logiciel dédié à la simulation hydraulique.

V.2. Présentation du logiciel CIVIL 3D :

V.2.1. Définition du logiciel CIVIL 3D :

Développé par Autodesk, AutoCAD Civil 3D constitue un outil essentiel dans le domaine de la conception assistée par ordinateur (CAO) pour le génie civil. Ce logiciel est spécifiquement élaboré pour la modélisation tridimensionnelle d'infrastructures linéaires, en intégrant des axes en plan, des profils longitudinaux et des profils transversaux standards. Grâce à une variété de fonctionnalités permettant de cibler des objets Civil 3D, des objets externes et des surfaces multiples, il facilite la réalisation de constructions complexes et flexibles. AutoCAD Civil 3D se révèle être un instrument précieux pour la conception, le calage détaillé, l'analyse et l'édition de projets d'infrastructure, de terrassements (tels que les merlons, bassins et zones de stockage), ainsi que pour l'aménagement urbain, les réseaux gravitaires et sous pression, l'hydrologie et l'hydraulique.

V.2.2. La méthodologie de travail avec CIVIL 3D :

a. Transformer des levés topographiques en contours et en Modèle Numérique de Terrain (MNT) :

⇒ Les données topographiques Format de fichier :

Les levés topographiques sont généralement importés sous forme de fichiers de points (comme un fichier CSV avec les coordonnées X, Y, Z ou un fichier LandXML). Commande d'importation de points : Utilisez la commande POINT ou Import Points dans l'onglet Points de Civil 3D. Sélectionnez le fichier de points et assurez-vous que les points d'altitude sont bien associés aux coordonnées.

⇒ Créer un groupe de points :

Une fois les points importés, créez un groupe de points pour organiser les données de levé. Allez dans l'onglet Points, puis Create Point Group. Nommez votre groupe et sélectionnez les points que vous voulez y inclure.

⇒ Créer une surface (Surface TIN) :

Commande pour créer une surface : Allez dans l'onglet Home, puis dans Create Ground Data. Sélectionnez Create Surface . Définir les paramètres : Donnez un nom à la surface et définissez le style de la surface (par exemple, style avec contours). Ajouter les points à la surface : Faites un clic droit sur la surface nouvellement créée, puis sélectionnez Add > Point Group. Sélectionnez le groupe de points que vous avez créé plus tôt.

⇒ Générer les contours :

Affichage des contours : Une fois la surface créée, Civil 3D génère automatiquement les contours selon le style sélectionné. Vous pouvez ajuster les intervalles des courbes de niveau (contours) en modifiant le style de surface dans l'onglet Surface Properties . Personnalisation des courbes : Pour personnaliser les intervalles (majeurs, mineurs), allez dans les propriétés de la surface, puis modifiez les paramètres des courbes de niveau.

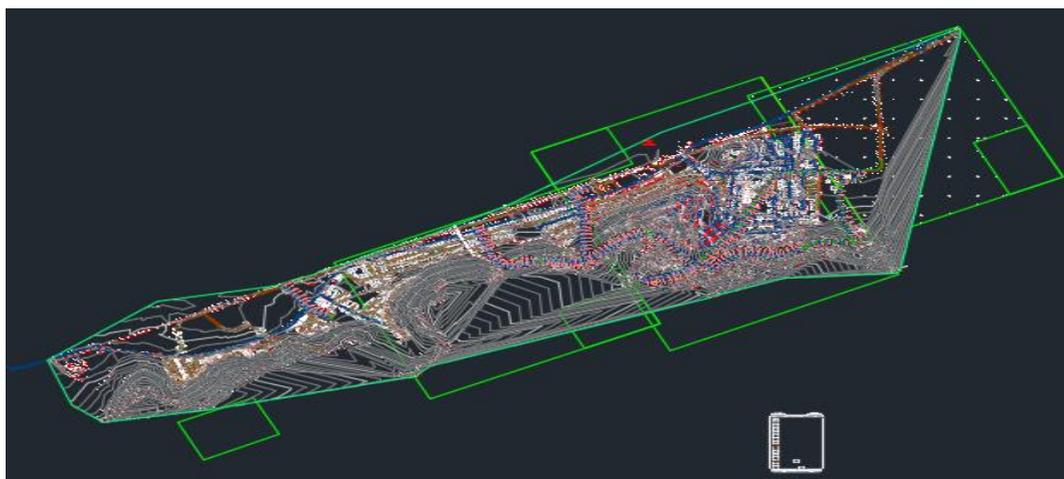


Figure V-1 : Transformer des levés topographiques en contours et en Modèle Numérique de Terrain (MNT)

b. Créer l'Axe du Cours d'Eau (Oued) et les rives :

Dessiner l'Axe : Allez dans l'onglet Home > Create Design > Alignment > Create Alignment > From Polyline.

Dessinez une polyligne qui suit l'axe principal de l'oued. Ensuite, transformez cette polyligne en axe (Alignment). définir les Paramètres de l'Axe : Vous serez invité à spécifier des paramètres tels que le nom de l'axe, le style, et d'autres propriétés géométriques.

Générer les Rives (Ou Bordures) de l'Oued Utiliser les Objets Hydrographiques :

Si votre oued a déjà des rives définies sur votre plan topographique, tracez des polygones représentant les rives (gauches et droites) de l'oued.

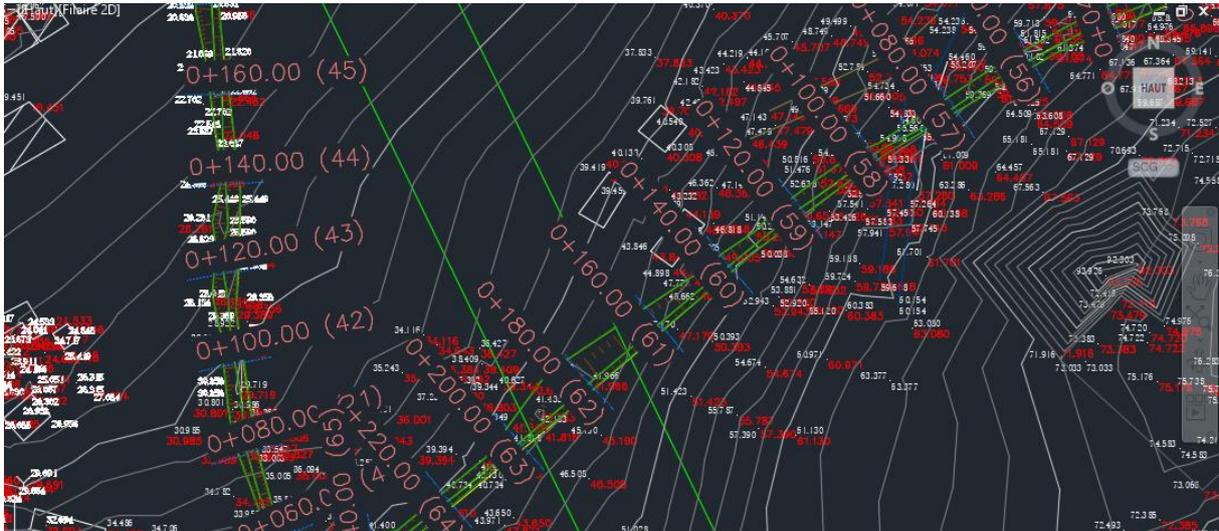


Figure V-2 : Créer les Axes du Cours d'Eau (Oued) et les rives

Ce nom fait généralement référence à l'axe du cours d'eau. Cochez "Utiliser les bords de la rivière" pour exporter les polygones ou les axes en tant qu'informations sur les rives.

c. Informations sur l'importation et l'exportation avec HEC-RAS :

Les fonctionnalités d'importation et d'exportation de HEC-RAS permettent d'analyser les données de crues grâce au logiciel public d'analyse des rivières, le River Analysis System, développé par le centre d'ingénierie hydraulique Hydrologic Engineering Center de l'USACE (Corps des ingénieurs de l'armée des États-Unis).

Procédure pour exporter des données au format HEC-RAS Pour exporter les données concernant les bords de la rivière, cochez "Utiliser les bords de la rivière", cliquez sur Gauche et/ou Droit, puis sélectionnez les polygones ou les axes dans le dessin.

Cette procédure décrit uniquement comment importer un fichier GEO vers le logiciel HEC-RAS

- Démarrez l'application HEC-RAS.
- Cliquez sur Edit Geometric Data.
- Dans la boîte de dialogue Geometric Data, cliquez sur le menu File Import Geometry Data GIS Format.
- Dans la boîte de dialogue Import GIS Format Data File, recherchez et sélectionnez le fichier GEO exporté depuis Autodesk Civil 3D. Cliquez sur OK.
- Dans l'assistant d'importation des données géométriques, vérifiez les données géométriques et cliquez sur Finished - Import Data.
- Les données géométriques seront visibles dans la fenêtre Geometric Data.
- Effectuez l'analyse.

V.3. La méthodologie de travail avec HEC-RAS :

V.3.1. Définition du logiciel HEC-RAS 6.4.1 :

Le logiciel HEC-RAS est un outil de modélisation hydraulique conçu pour simuler les écoulements à surface libre. Développé par le Hydrologique Engineering Center du Corps des ingénieurs de l'Armée américaine dans le cadre du projet Next Gen, il couvre divers aspects liés à l'hydrologie et à l'hydraulique. Parmi ces aspects figurent l'analyse du ruissellement des précipitations, l'hydraulique des cours d'eau, la simulation des systèmes de réservoirs, l'évaluation des dommages causés par les inondations, ainsi que la prévision des crues pour la conception des réservoirs.

V.3.2. L'environnement du logiciel HEC-RAS :

L'environnement du logiciel HEC-RAS se structure autour de projets, chacun d'eux étant composé de plusieurs fichiers. Chaque fichier porte le nom du projet et possède une extension spécifique, tout en présentant un ensemble de données distinct. Les fichiers se déclinent comme suit :

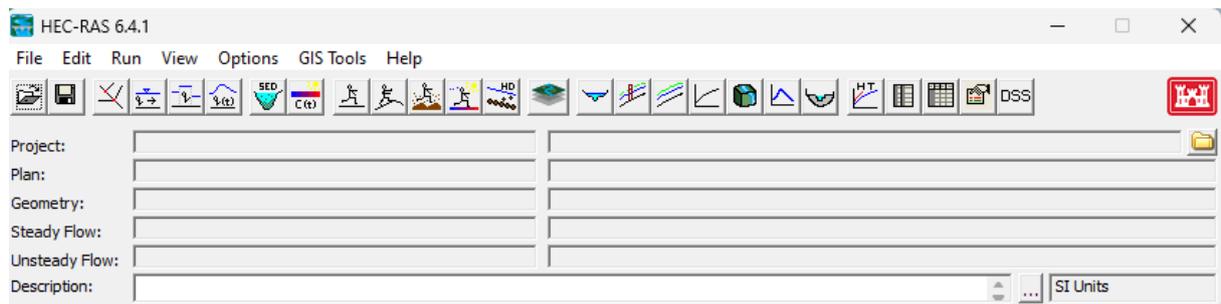


Figure V-3 : Logiciel HEC-RAS de Hydrologic Engineering Center

- Le fichier de projet: Il s'agit du fichier principal qui renferme les informations descriptives du projet ainsi que les configurations par défaut ou choisies par l'utilisateur.
- Le fichier de géométrie: Ce fichier contient la géométrie du cours d'eau étudié, intégrant toutes les informations relatives à cette géométrie (schémas, sections transversales, rugosité, ouvrages, etc.).
- Le fichier de débit: Ce fichier est destiné à stocker les données de débits et peut inclure plusieurs profils, chacun regroupant des conditions particulières de débit.
- Le fichier de plan: Chaque fichier de plan contient une combinaison de données spécifiques, permettant à l'utilisateur de simuler divers scénarios avec les mêmes données.
- Le fichier d'exécution: Ce fichier est généré automatiquement lors de l'exécution de chaque simulation et contient les données relatives à celle-ci.

- Le fichier de résultats: Il regroupe les résultats issus de la simulation.
- Tous les fichiers HEC-RAS sont numérotés de 0 à 99, leur nom étant défini par l'utilisateur et ne devant pas être modifié.

V.3.3. Les étapes de travail avec HEC-RAS :

- **1ère étapes :** pour créer un espace de travail dans HEC-RAS en commence avec : File>>New project>>nommer le fichier >>OK

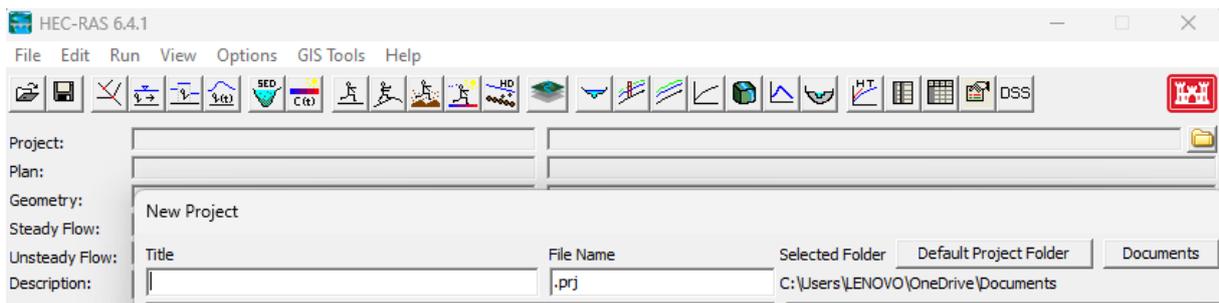


Figure V-4 : créer un espace de travail dans HEC-RAS

- **2ème étape :** Edit/enter geometric data>>file >>import geometry data >>GIS format>>ouvrir le fichier exporter par HEC-RAS et nommer>>OK>>cocher SI (metric units) >>Next>>finished. Import Data>>File >>save as >>nommer le fichier dans la case Title>>OK

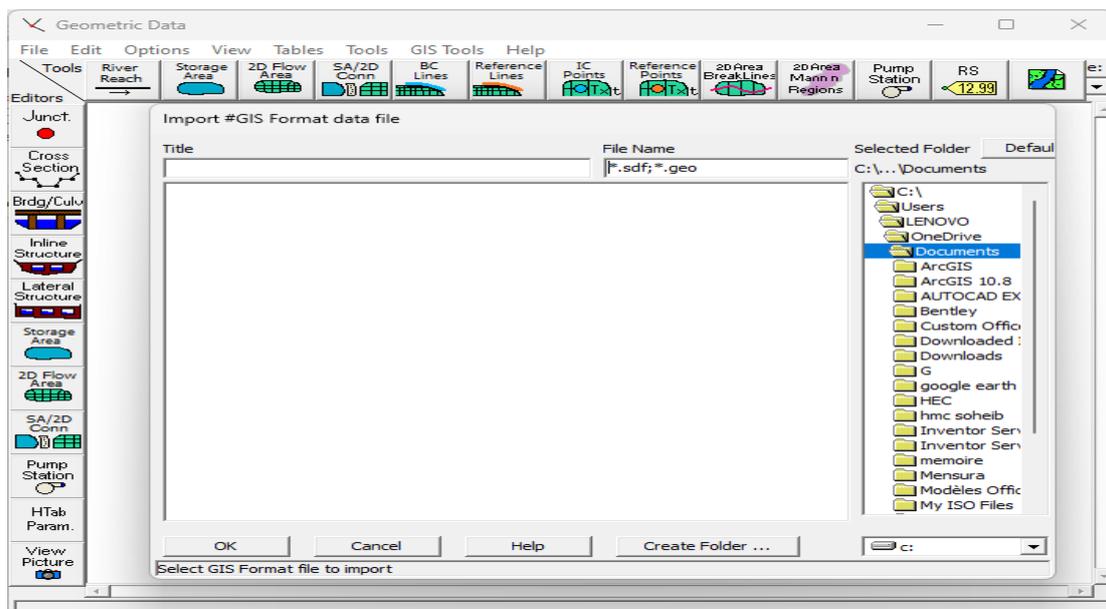


Figure V-5 : importer géométric data

- **La sélection des valeurs de rugosité de Manning :**

Les valeurs de rugosité, souvent désignées sous le terme de coefficient de Manning, revêtent une importance capitale dans la modélisation des écoulements en surface libre. Ces valeurs sont déterminées en fonction des caractéristiques du canal et des matériaux qui composent les rives du cours d'eau. La rugosité d'un canal, exprimée par le coefficient de Manning, définit la résistance au frottement entre l'eau et la paroi du canal. Elle a un impact direct sur la vitesse d'écoulement de l'eau ainsi que sur les pertes d'énergie qui en découlent. Pour les valeurs de rugosité de notre cours d'eau, nous choisissons : Valeurs du coefficient de Manning : l'utilisateur doit impérativement indiquer des valeurs pour le coefficient de Manning concernant le lit majeur gauche, le canal principal et le lit majeur droit.

- **Downstream Reach Lengths :**

cela fait référence à la distance séparant la section transversale actuelle de la section transversale suivante en aval.

- **Main Channel Bank Stations :**

cet élément sert à déterminer quelle portion de la section transversale est identifiée comme le canal principal, ainsi que les lits majeurs gauche et droit. Coefficients de contraction et d'expansion : ces coefficients sont employés pour évaluer la perte d'énergie résultant d'une contraction ou d'une expansion de l'écoulement. Les valeurs saisies dans une section spécifique sont utilisées pour calculer les pertes d'énergie entre cette section et la section transversale suivante en aval.

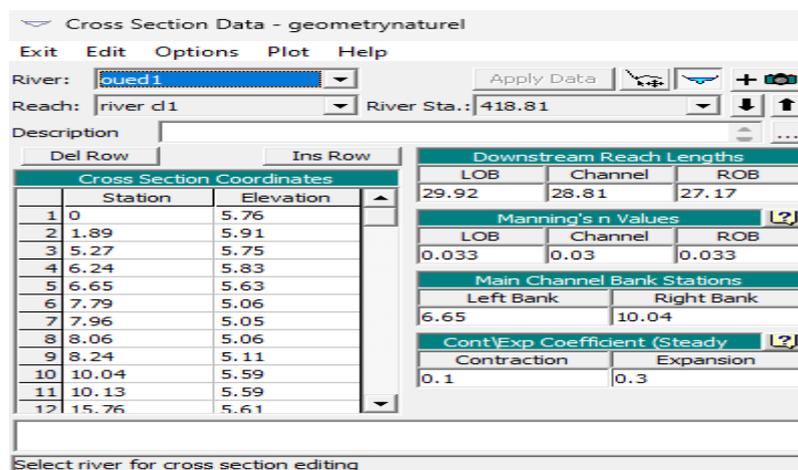


Figure V-6 : La sélection des valeurs de rugosité de Manning et Downstream Reach Lengths

- **3ème étape** : dans la barre de outils cliquer dur steady flow data>> entrer le débit dans la case PF1>>Reach Boundry conditions >>down stream>>Normal depht>>entrer la pente du cours d'eau >>up stream>>Normal depht>>entrerla même pente>>OK>>File >>save Flow data>>nommer le fichier >>OK

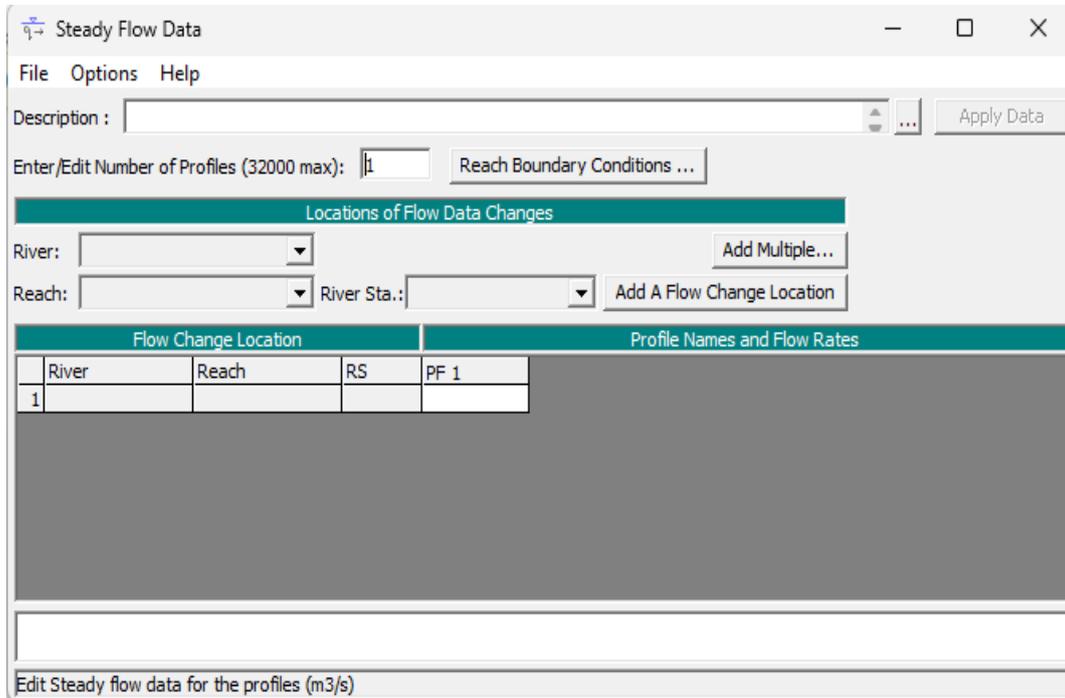


Figure V-7 : entrer les débits et les condition limites

- **4ème étape** : dans la barre d'outils cliquer sur Run>>steady Flow analyst>>mixed >>comput

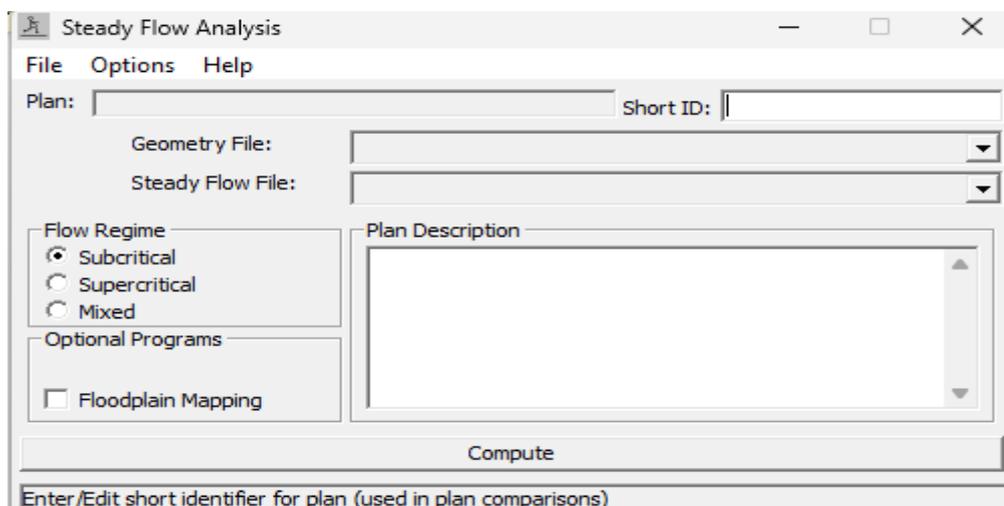


Figure V-8 : lancer la simulation

V.4. Simulation hydraulique de réseau hydrographique EL SAROUEL

En se fondant sur les données recueillies, nous avons procédé à la saisie des informations nécessaires pour réaliser une simulation hydraulique à l'aide du logiciel HEC-RAS. Pour établir le modèle de l'oued, nous avons utilisé le logiciel CIVIL 3D afin de tracer le lit de l'oued ainsi que les sections transversales, tout en déterminant leurs altitudes. et pour cette étude, nous avons dessiné 161 profils en travers, espacés de 20 à 30 mètres. Dans un premier temps, le travail consiste à entrer les données dans le logiciel HEC-RAS :

- Le tracé de l'oued.
- Les profils en travers (161 profils).
- La rugosité pour chaque section n.
- les débits de crue (la crue centennale).

Le tracé et les sections en travers

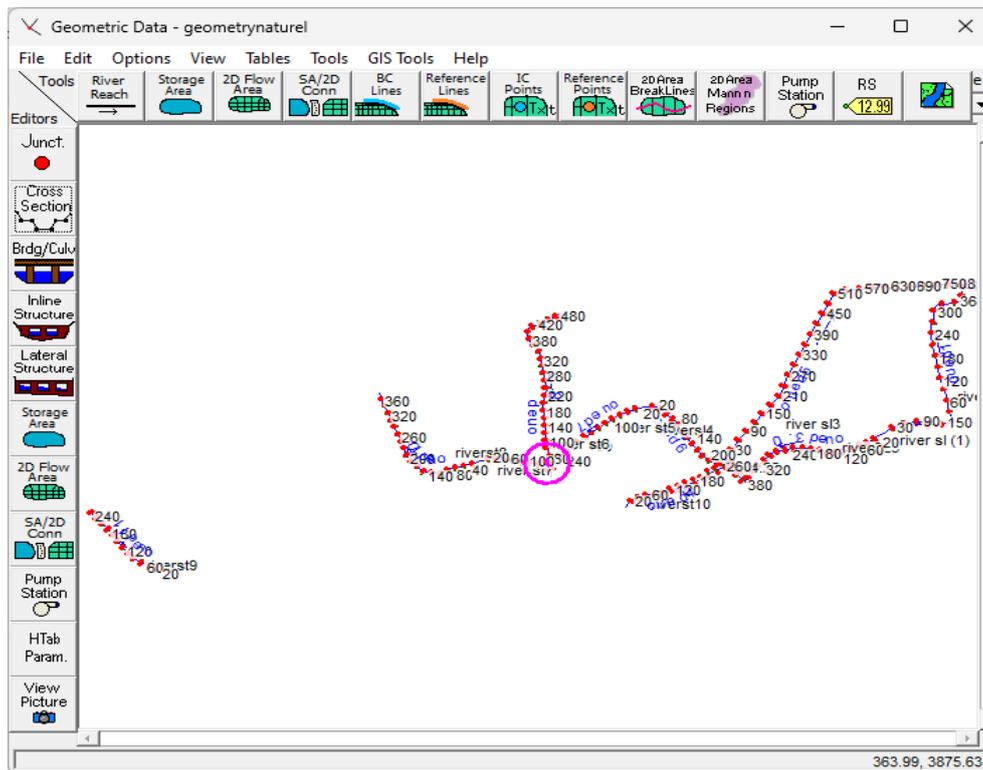


Figure V-9 Tracé de l'Oued et les sections en travers

La figure suivante représente un profil pour une section en travers :

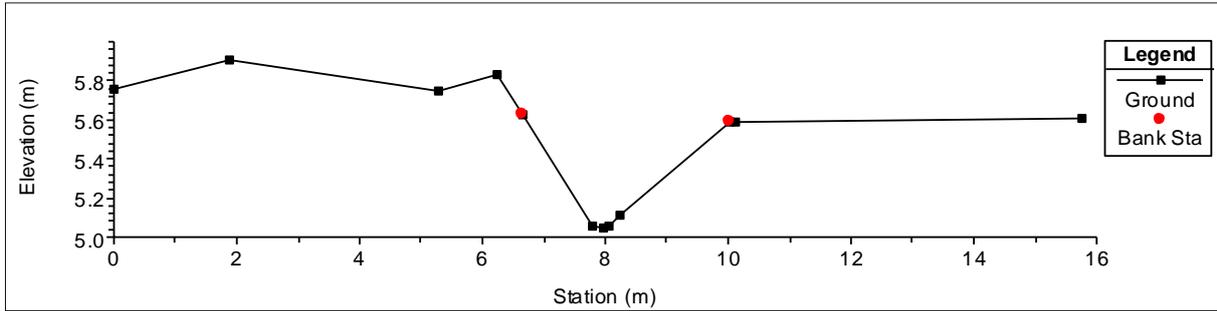


Figure V-10 : Le profil pour la section en travers

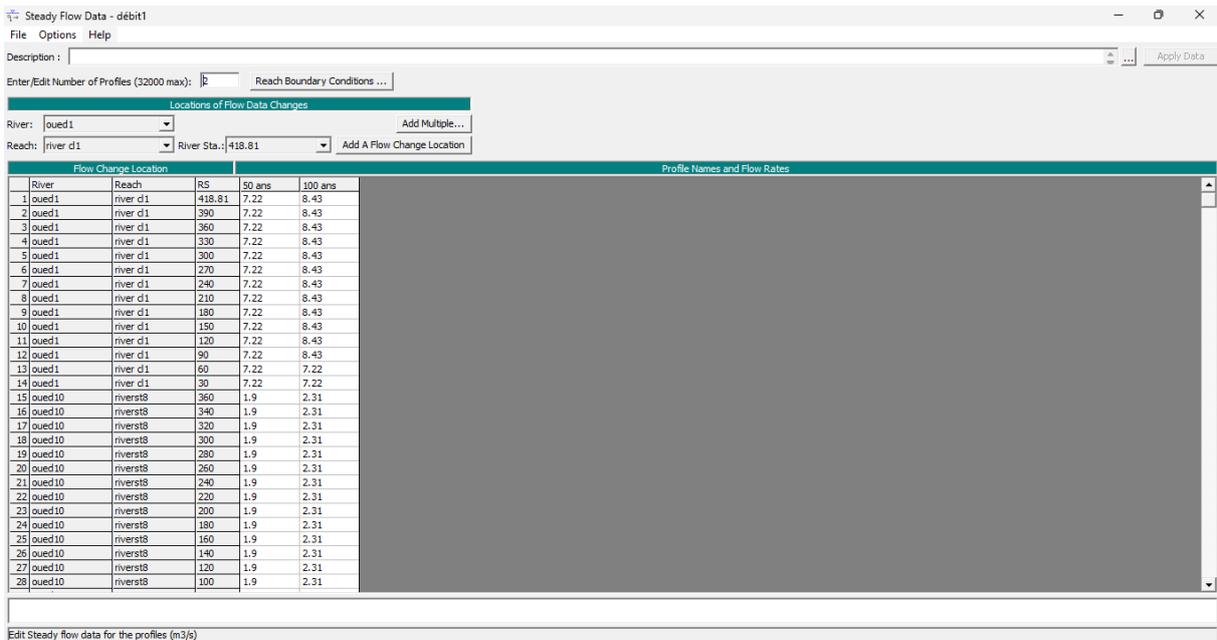


Figure V-11 : entrer les débits et les condition limites du réseau hydrographique d' EL SAROUEL

V.5. Résultats de la simulation hydraulique par le logiciel HEC- RAS :

Après avoir élaboré le modèle de réseau, la simulation a été lancée

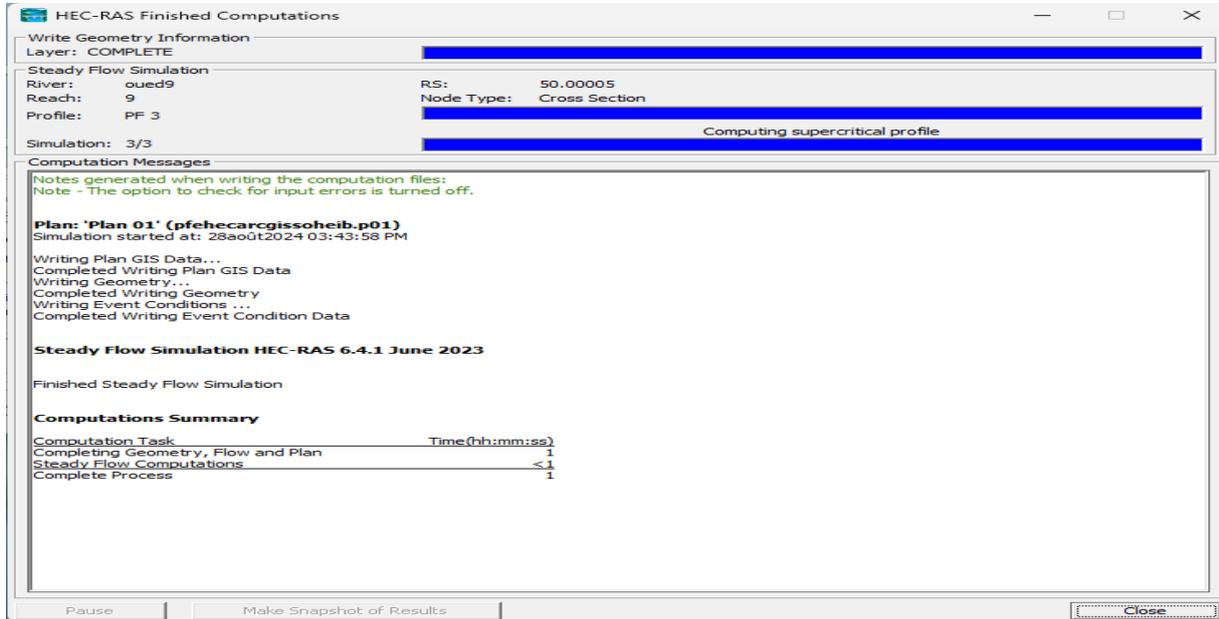
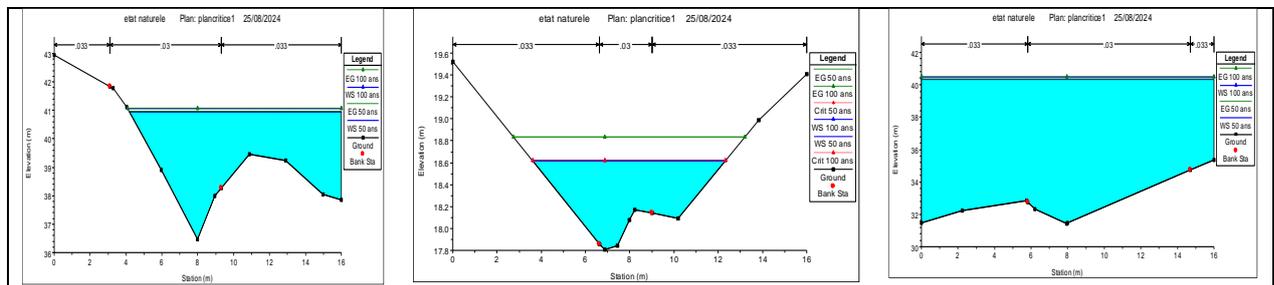


Figure V-12 : Interface graphique de logiciel HEC-RAS après la simulation

Les résultats : obtenus se présentent comme suit.

La hauteur d'eau pour les 11 sections de la simulation hydraulique de la crue centennale et de 50 ans à l'état naturel est illustrée dans la figure ci-dessous :



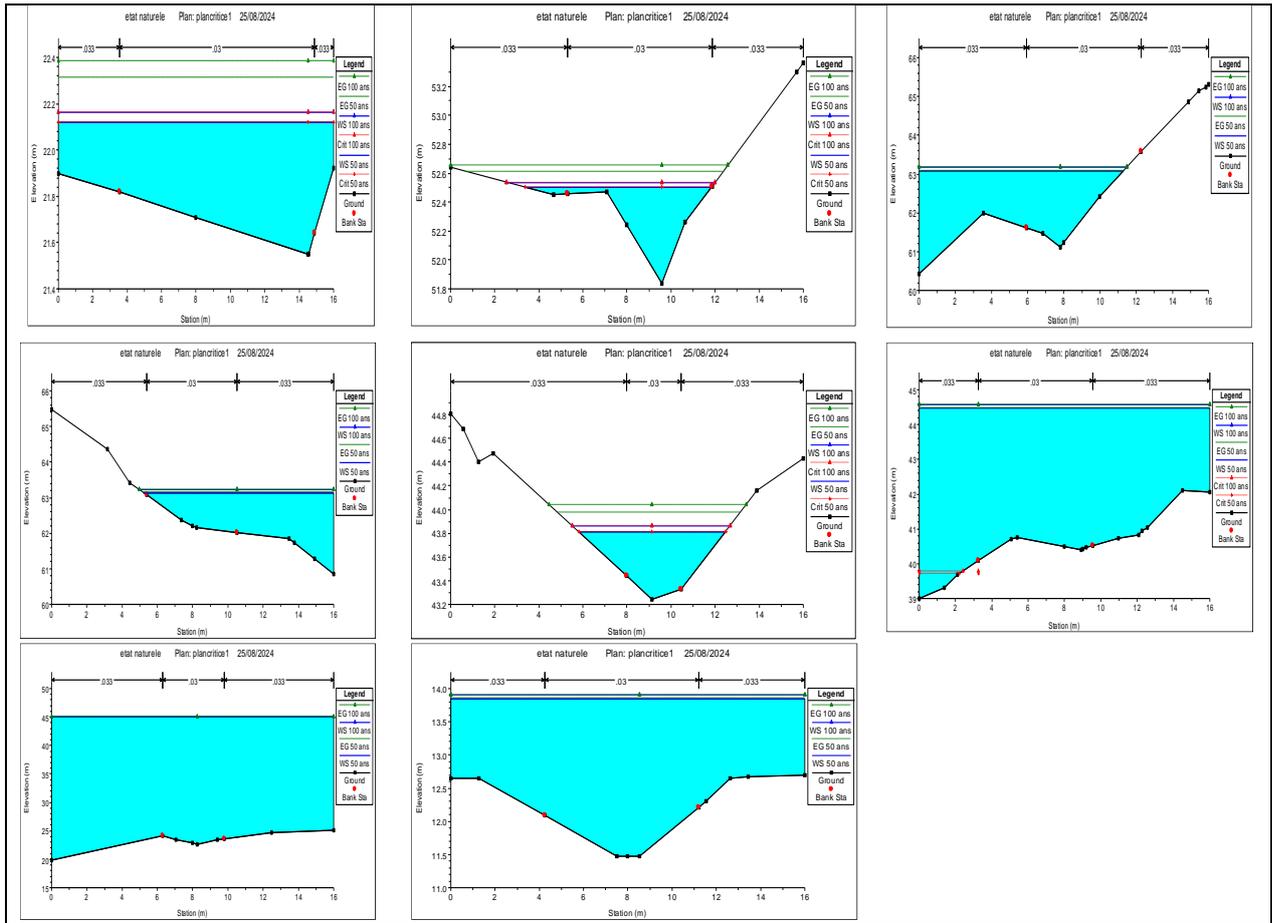
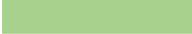


Figure V-13 : Profils des sections en travers après la simulation

V.6. Conclusion

L'analyse effectuée à l'aide du logiciel HEC-RAS sur le segment de réseau hydrographique traversant la ville de EL sarouel a permis de cartographier l'étendue de la propagation des inondations. Il est observé que la majorité des sections de canaux les subissent un débordement. En se fondant sur les résultats de cette simulation, il est essentiel d'aménager l'oued afin de garantir la protection de la ville de EL SAROUEL contre les risques d'inondation.



Chapitre VI

AMENAGEMENT DES
COURS D'EAU

CHAPITRE VI : Aménagement du cours d'eau :

VI.1. Introduction :

L'aménagement d'un cours d'eau désigne toute intervention qui modifie la géométrie, le fond ou les talus de ce cours d'eau. L'objectif principal est de recréer un chenal adapté aux débits d'étiage et aux crues, dans le but de réduire les risques d'inondation dans la ville de EL SAROUEL et les agglomérations situées en aval des oueds. La conservation des eaux et des sols, ainsi que le contrôle de l'érosion, sont également des objectifs importants de ce projet.

Les objectifs principaux de cette étude sont :

- Assurer un écoulement normal des eaux.
- Protéger efficacement les zones bâties contre les inondations.
- Restaurer les sections dégradées des cours d'eau.
- Préserver le lit et les berges contre l'érosion.
- Améliorer le cadre de vie en réduisant les nuisances olfactives et en améliorant l'aspect visuel.(ZEGHDOUD,2019).

VI.2. Techniques d'aménagement :

Les structures de protection se divisent en deux catégories : directes et indirectes.

VI.2.1. Protection directe

La protection directe implique une intervention immédiate sur le site menacé par la mise en œuvre des actions suivantes :

- ✚ **Curage** : Cette opération permet d'améliorer significativement les conditions d'écoulement en éliminant tous les obstacles et dépôts qui entravent le flux des eaux dans le cours d'eau. Le débroussaillage est également essentiel lors de la traversée des zones urbaines pour des raisons sanitaires, ainsi que dans les sections courantes pour réduire la rugosité et augmenter le débit.
- ✚ **Recalibrage** : Cette technique vise à élargir et approfondir les sections des cours d'eau afin d'accroître leur capacité d'évacuation des eaux et de garantir une section mouillée conforme aux critères de protection souhaités.
- ✚ **Renforcement des ouvrages** : Cela concerne les structures de franchissement des oueds et la modification de leurs caractéristiques ainsi que des systèmes existants en cas d'insuffisance (ponts, dalots, buses, etc.).
- ✚ **Réalisation de canaux** : Cette action permet de restaurer le couloir initial de l'oued. Cette solution est cruciale lorsque le lit de l'oued et son domaine hydraulique sont entièrement occupés par des constructions ou des infrastructures routières.
- ✚ **Protection des berges** : Cela englobe tous les ouvrages destinés à maintenir la stabilité des terres face à l'action de l'eau. Les berges sont en effet soumises à des courants

perturbateurs générés par les crues. De plus, les terres peuvent glisser en raison de l'infiltration d'eau après le retrait de la crue. La protection des berges est également indispensable à proximité de certaines infrastructures telles que les ponts.

- ✚ **Endiguement des oueds** : Cela consiste à construire des digues le long du cours d'eau sur ses deux rives. Cette opération peut être facilement réalisée avec les ressources locales en main-d'œuvre et en matériaux. 1. La protection permet également d'instaurer une protection sélective. Il est en effet possible de le mettre en place progressivement en commençant par protéger la zone la plus fertile et la plus riche des inondations. [Sghara, 2013].

VI.2.2. La protection indirecte :

En revanche, consiste à intervenir à une certaine distance des sites menacés, en dehors du périmètre d'aménagement, en réalisant des ouvrages sur les oueds responsables des inondations.

- ✚ **Création de canaux périphériques** : Ces canaux permettent de dévier les eaux vers des oueds situés en dehors des zones à protéger. Cette déviation peut concerner tout ou partie des eaux d'un oued vers un autre.
- ✚ **Construction de barrages** : Ou de seuils, pour stocker et atténuer les crues en amont des zones menacées. Le volume et la capacité de rétention du barrage doivent être optimisés pour assurer une protection efficace.
- ✚ **Aménagement des bassins versants** : Pour lutter contre l'érosion, en utilisant des méthodes biologiques ou en construisant des seuils en béton ou en gabions, afin de réduire la vitesse d'écoulement et favoriser le dépôt de sédiments en amont (Sghara, 2013).

VI.3. Généralités sur les écoulements à surface libre :

VI.3.1. Définition :

Les écoulements à surface libre se distinguent par la présence d'une surface en contact avec l'air, généralement soumise à la pression atmosphérique et dont la forme peut varier. Ce type d'écoulement est principalement influencé par la gravité en raison de la pente du canal.

Les écoulements à surface libre en régime permanent peuvent être de deux types :

- Régime uniforme : Si les caractéristiques géométriques du canal restent constantes tout au long du tronçon considéré, l'écoulement est dit uniforme.
- Régime varié : Si les caractéristiques géométriques du canal varient le long du tronçon, l'écoulement est dit varié.

VI.3.2. Canaux à ciel ouvert

Un canal est un système de transport où l'eau s'écoule avec une surface libre exposée à la pression atmosphérique. Le profil de meilleure conductivité est celui qui permet de transporter le débit maximum d'eau. Pour un canal ayant une pente "I" et un coefficient de rugosité "n", la section qui véhicule le débit maximum est celle où le rayon hydraulique est à son maximum.

VI.3.3. Différents types de canaux :

Il existe deux catégories de canaux : les canaux naturels et les canaux artificiels.

a. Canaux naturels :

Les canaux naturels sont des cours d'eau qui se forment naturellement à la surface ou sous la terre, comme les ruisselets, torrents, rivières, fleuves et estuaires. Les caractéristiques géométriques et hydrauliques de ces canaux sont généralement irrégulières, rendant les calculs basés sur la théorie hydraulique approximatifs, nécessitant certaines hypothèses pour être applicables.

b. Canaux artificiels :

Les canaux artificiels sont des cours d'eau créés par l'homme, à la surface ou sous la terre. Ils incluent les canaux découverts construits au niveau du sol (canaux de navigation, d'adduction, d'évacuation, d'irrigation et de drainage) ainsi que les canaux couverts, où les liquides ne remplissent pas toute la section (tunnels hydrauliques, aqueducs, drains, égouts). Les propriétés hydrauliques des canaux artificiels sont généralement régulières, ce qui permet d'obtenir des résultats plus précis avec l'application de la théorie hydraulique.

VI.4. Choix de la variante d'aménagement

VI.4.1. Élaboration d'un canal en béton armé :

Tous les canaux en béton doivent être conçus avec soin afin d'assurer la capacité de débit nécessaire. La conception d'un canal repose sur l'utilisation de formules qui relient sa capacité de débit, son profil, sa pente, la perte de charge et la rugosité de ses parois. Dans une structure en béton armé, les barres d'acier principales sont placées dans les zones soumises à des tensions pour compenser la faible résistance à la traction du béton. La pente des parois latérales d'un canal en béton de forme trapézoïdale doit être déterminée en fonction du type de sol sur lequel reposent ces parois.[R. MAHTOUT et T .AMRANI,2022]

VI.4.2. Les avantages et les inconvénients des matériaux employés dans les constructions Béton armé :

➤ Les principaux avantages de béton ou du béton armé incluent :

- Une meilleure performance hydraulique en matière d'écoulement ;
- La disponibilité des matériaux de construction ;
- Une forme étroite qui s'intègre bien en milieu urbain ;
- Une longévité significative ;
- Une facilité d'entretien.

➤ Les inconvénients du béton armé sont :

- L'obligation de réaliser une fondation en béton,
- Une résistance limitée à l'érosion et à l'effritement ;
- Un coût élevé en génie civil ;
- Le risque d'être perçu comme une décharge par les habitants environnants

VI.4.3. Choix de la revanche du canal :

Il est impératif de conserver la hauteur des rives du canal légèrement au-dessus de celle nécessaire pour garantir une capacité de transport suffisante. Cette approche permet de prendre en considération les vagues, les perturbations de la surface aquatique et de prévenir les débordements. Par conséquent, il est conseillé d'incorporer une marge de sécurité aux tirants d'eau pour chaque section évaluée.

Le tableau ci-dessous présente la hauteur de cette marge en fonction du débit de conception.

Tableau VI:1: Revanches utilisées (Degoutte,2012).

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

VI.4.4. Choix de la pente :

La complexité de la configuration topographique du terrain, dans la zone d'étude, se manifeste par la variation de la pente, ce qui pose plusieurs défis. Il est nécessaire de choisir la pente de manière à établir un régime torrentiel avec des dimensions économiques et une vitesse acceptable. La détermination des pentes de projet repose sur le relevé topographique de la zone d'étude, ce qui nous a permis de segmenter chaque canal en plusieurs tronçons.

VI.4.5. Le coefficient de rugosité :

La rugosité d'un canal est influencée par la nature du revêtement ainsi que par les valeurs associées à cette rugosité. Canal avec revêtement en béton la Valeur de la rugosité n est égale à 0.013.

VI.4.6. Débit de crue statistique :

- ⇒ Canal 1 : Le débit de référence pour le dimensionnement Q100ans=8.43 m³/s
- ⇒ Canal 2 : Le débit de référence pour le dimensionnement Q100ans=8.43 m³/s
- ⇒ Canal 3 : Le débit de référence pour le dimensionnement Q100ans=8.43 m³/s.
- ⇒ Canal 4 : Le débit de référence pour le dimensionnement Q100ans= 2.78m³/s.
- ⇒ Canal 5 : Le débit de référence pour le dimensionnement Q100ans=13.99 m³/s
- ⇒ Canal 6 : Le débit de référence pour le dimensionnement Q100ans=2.78 m³/s.
- ⇒ Canal 7 : Le débit de référence pour le dimensionnement Q100ans=2.31 m³/s.
- ⇒ Canal 8 : Le débit de référence pour le dimensionnement Q100ans= 4.62m³/s.
- ⇒ Canal 9 : Le débit de référence pour le dimensionnement Q100ans=2.31 m³/s.
- ⇒ Canal 10 : Le débit de référence pour le dimensionnement Q100ans=2.31 m³/s.
- ⇒ Canal 11 : Le débit de référence pour le dimensionnement Q100ans=7.19 m³/s.

VI.5. Choix de la section type pour les différents canaux de l'aménagement projeté :

En identifiant les zones d'inondation dans le site étudié, j'ai décidé de mettre en place une ceinture de protection en béton le long de la ville. Cela coupe à travers certaines zones de l'étude.

On a Proposé deux types de ceinture de protection en béton :

- ✚ **Variante 1** : Projection d'un canal trapézoïdale en béton.
- ✚ **Variante 2** : Projection d'un canal rectangulaire en béton.

VI.6. Calcul hydraulique et dimensionnement des sections types des canaux projetés :

Analyse hydraulique et détermination des dimensions des sections standards des canaux envisagés. L'analyse hydraulique pour la détermination de la section transversale sélectionnée repose sur les formules suivantes :

VI.6.1. FORMULE DE MANNING-STRICKLER :

$$C = K \cdot R^{\frac{1}{6}}$$

et

$$V = K \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot I^{\frac{1}{2}}$$

Cette formule est la plus couramment employée pour le dimensionnement de toutes les formes géométriques concernant des sections ouvertes variées. Elle est exprimée par la relation suivante :

$$Qc = V \cdot S = K \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot I^{\frac{1}{2}} \cdot S$$

Avec :

- ✓ K = Coefficient de Manning – Strickler
- ✓ S = Section mouillée de l'ouvrage au m²
- ✓ P = Périmètre mouillé de l'ouvrage en m
- ✓ R = Rayon hydraulique de l'ouvrage S / P en m
- ✓ I = Pente longitudinale de l'ouvrage en m/m
- ✓ V = Vitesse de l'eau dans l'ouvrage en m/s
- ✓ Qc = Débit capable de l'ouvrage en m³/s

a. Valeurs typiques de K utilisées dans les études :

- Structures en fonte, béton, grès, PVC, PEHD, etc. : K = 70 à 80
- Structures métalliques en tôle ondulée : K = 40 à 45
- Fossés profonds recouverts de gazon : K = 25 à 30

Il est important de faire la distinction entre les coefficients fournis par les fabricants (qui peuvent atteindre 110, calculés en laboratoire sur des canalisations neuves sans dépôts) et les coefficients réels, qui prennent en compte l'accumulation de matières en suspension au fond des

structures (ce biofilm remplace alors le coefficient de Manning – Strickler du matériau de la structure). [KERLOC'H Bruno ;2014]

b. Variante 1 : canal trapézoïdale

S_m désire : section du canal, sous une forme trapézoïdale

$$S_m = (b + m \times h) \times h$$

P_m : périmètre mouillé, pour une configuration trapézoïdale. Le calcul de P_m s'effectue de la manière suivante :

$$p_m = b + 2 \times h\sqrt{1 + m^2}$$

$$\frac{Q * n}{\sqrt{I}} = \frac{[(b + m * h) * h]^{\frac{5}{3}}}{[(b + 2 * h\sqrt{1 + m^2})]^{\frac{2}{3}}}$$

• **Choix du fruit talus :**

Le fruit du talus, pris en compte dans notre calcul équivalent à 1, permet d'évaluer la faisabilité de la réalisation d'un angle de 45°, ainsi que son rapprochement à la valeur déterminant la section optimale.

c. Variante 2 : canal rectangulaire.

S_m désire : section du canal, sous une forme rectangulaire

$$S_m = b * h$$

P_m : périmètre mouillé, pour une configuration rectangulaire. Le calcul de P_m s'effectue de la manière suivante :

$$P_m = b + 2h$$

$$\frac{Q \cdot n}{\sqrt{I}} = \frac{(b \cdot h)^{\frac{5}{3}}}{(b + 2h)^{\frac{2}{3}}}$$

VI.6.2. Dimensionnement

Les caractéristiques du canal sont déterminées en utilisant le logiciel Flow-Master ;

VI.6.2.1. Variante 1 canal en béton de forme trapézoïdale :

Ci-dessous sont présentés les résultats du calcul hydraulique pour le canal trapézoïdal :

Canal 1 :

Section trapézoïdale en béton : $b = 2$ m.

Tableau VI:2. Dimensions de l'aménagement en béton armé du tronçon de canal 1var1.

Tronçons	Q (m3/s)	n	m	B (m)	I (m/m)	H(m)
0-255	8.43	0.013	1	2	0.04	1.3
255-420	8.43	0.013	1	2	0.016	1.3

Canal 2 :

Section trapézoïdale en béton : $b = 2$ m.

Tableau VI:3. Dimensions de l'aménagement en béton armé du tronçon de canal 2 var1.

tronçons	Q (m3/s)	n	m	B (m)	I (m/m)	H(m)
0-60	8.43	0.013	1	2	0.02	1.2
60-170	8.43	0.013	1	2	0.12	1.2

Canal 3 :

Section trapézoïdale en béton : $b = 2$ m.

Tableau VI:4. Dimensions de l'aménagement en béton armé du tronçon de canal3 var1

tronçons	Q (m3/s)	N	m	B (m)	I (m/m)	H(m)
0-185	8.43	0.013	1	2	0.0058	1.5
185-340	8.43	0.013	1	2	0.05	1.5
340-455	8.43	0.013	1	2	0.1	1.3

Canal 5 :

Section trapézoïdale en béton : $b = 3$ m.

Tableau VI:5. Dimensions de l'aménagement en béton armé du tronçon de canal5 var1

tronçons	Q (m3/s)	n	m	B (m)	I (m/m)	H(m)
0-300	13.99	0.013	1	3	0.036	1.4
300-825	13.99	0.013	1	3	0.011	1.4

Canal 6 :

Section trapézoïdale en béton : $b = 1$ m.

Tableau VI:6. Dimensions de l'aménagement en béton armé du tronçon de canal6 var1

tronçons	Q (m3/s)	n	m	B (m)	I (m/m)	H(m)
0-90	2.78	0.013	1	1	0.1	1
90-250	2.78	0.013	1	0.5	0.17	1

Canal 7 :

Section trapézoïdale en béton : $b = 0.5$ m.

Tableau VI:7. Dimensions de l'aménagement en béton armé du tronçon de canal 7 var1

Tronçons	Q (m3/s)	n	m	B (m)	I (m/m)	H(m)
0-200	2.31	0.013	1	0.5	0.1	1
200-257	2.31	0.013	1	0.5	0.049	1

Canal 8 :

Section trapézoïdale en béton : $b = 1\text{ m}$.

Tableau VI:8. Dimensions de l'aménagement en béton armé du tronçon de canal 8 var1

tronçons	Q (m3/s)	n	m	B (m)	I (m/m)	H(m)
0-55	4.62	0.013	1	1	0.17	1.2
55-225	4.62	0.013	1	1	0.12	1.2
225-350	4.62	0.013	1	1	0.014	1.4
350-497	4.62	0.013	1	1	0.01	1.4

Canal 9 :

Section trapézoïdale en béton : $b = 1\text{ m}$.

Tableau VI:9. Dimensions de l'aménagement en béton armé du tronçon de canal 9 var1

Tronçons	Q (m3/s)	n	m	B (m)	I (m/m)	H(m)
0-50	2.31	0.013	1	1	0.078	1
50-163	2.31	0.013	1	1	0.045	1

Canal 10 :

Section trapézoïdale en béton : $b = 1\text{ m}$.

Tableau VI:10. Dimensions de l'aménagement en béton armé du tronçon de canal 10 var1

Tronçons	Q (m3/s)	n	m	B (m)	I (m/m)	H(m)
0-210	2.31	0.013	1	1	0.16	1
210-275	2.31	0.013	1	1	0.1	1
275-375	2.31	0.013	1	1	0.035	1

Canal 11 :

Section trapézoïdale en béton : $b = 3\text{ m}$.

Tableau VI:11. Dimensions de l'aménagement en béton armé du tronçon de canal 11 var1

tronçons	Q (m3/s)	n	m	B (m)	I (m/m)	H(m)
0-165	7.19	0.013	1	3	0.0085	1.2
165-243	7.19	0.013	1	3	0.0247	1.2

VI.6.2.2. Variante 2 canal en béton de forme rectangulaire :

Ci-dessous sont présentés les résultats du calcul hydraulique pour le canal rectangulaire :

Canal 1 :

Section rectangulaire en béton : $b = 2$ m

Tableau VI:12. Dimensions de l'aménagement en béton armé du tronçon de canal 1 var2.

tronçons	Q (m3/s)	n	B (m)	I (m/m)	H(m)
0-255	8.43	0.013	2	0.04	1.5
255-420	8.43	0.013	2	0.016	1.5

Canal 2 :

Section rectangulaire en béton : $b = 2$ m.

Tableau VI:13. Dimensions de l'aménagement en béton armé du tronçon de canal 2 var2

tronçons	Q (m3/s)	n	B (m)	I (m/m)	H(m)
0-60	8.43	0.013	2	0.02	1.4
60-170	8.43	0.013	2	0.12	1.2

Canal 3 :

Section rectangulaire en béton : $b = 3$ m.

Tableau VI:14. Dimensions de l'aménagement en béton armé du tronçon de canal 3 var2

tronçons	Q (m3/s)	n	B (m)	I (m/m)	H(m)
0-185	8.43	0.013	3	0.0058	1.5
185-340	8.43	0.013	3	0.05	1.5
340-455	8.43	0.013	3	0.1	1.5

Canal 5 :

Section rectangulaire en béton : $b = 4$ m.

Tableau VI:15. Dimensions de l'aménagement en béton armé du tronçon de canal 5 var2

tronçons	Q (m3/s)	n	B (m)	I (m/m)	H(m)
0-300	13.99	0.013	4	0.036	1.4
300-825	13.99	0.013	4	0.011	1.4

Canal 6 :

Section rectangulaire en béton : $b = 1$ m.

Tableau VI:16. Dimensions de l'aménagement en béton armé du tronçon de canal 6 var2

tronçons	Q (m3/s)	n	B (m)	I (m/m)	H(m)
0-90	2.78	0.013	1	0.1	1
90-250	2.78	0.013	1	0.17	1

Canal 7 :

Section rectangulaire en béton : b = 1 m.

Tableau VI:17. Dimensions de l'aménagement en béton armé du tronçon de canal 7 var2

tronçons	Q (m3/s)	n	B (m)	I (m/m)	H(m)
0-200	2.31	0.013	1	0.1	1
200-257	2.31	0.013	1	0.049	1

Canal 8 :

Section rectangulaire en béton : b = 1.5 m.

Tableau VI:18. Dimensions de l'aménagement en béton armé du tronçon de canal 8 var2

tronçons	Q (m3/s)	n	B (m)	I (m/m)	H(m)
0-55	4.62	0.013	1	0.17	1.2
55-225	4.62	0.013	1	0.12	1.2
225-350	4.62	0.013	1.5	0.014	1.5
350-497	4.62	0.013	1.5	0.01	1.5

Canal 9 :

Section rectangulaire en béton : b = 1 m.

Tableau VI:19. Dimensions de l'aménagement en béton armé du tronçon de canal 9 var2

tronçons	Q (m3/s)	n	B (m)	I (m/m)	H(m)
0-50	2.31	0.013	1	0.078	1
50-163	2.31	0.013	1	0.045	1

Canal 10 :

Section rectangulaire en béton : b = 1 m.

Tableau VI:20. Dimensions de l'aménagement en béton armé du tronçon de canal 10 var2

tronçons	Q (m3/s)	n	B (m)	I (m/m)	H(m)
0-210	2.31	0.013	1	0.16	1
210-275	2.31	0.013	1	0.1	1
275-375	2.31	0.013	1	0.035	1

Canal 11 :

Section rectangulaire en béton : $b = 3$ m.

Tableau VI:21. Dimensions de l'aménagement en béton armé du tronçon de canal 11 var2

tronçons	Q (m ³ /s)	n	B (m)	I (m/m)	H(m)
0-165	7.19	0.013	3	0.0085	1.2
165-243	7.19	0.013	3	0.0247	1.1

VI.6.3. Principe de calcul :

▪ L'objectif du dimensionnement des sections est de respecter les critères suivants :

1. Réduire l'emprise de l'ouvrage ;
2. Diminuer la profondeur de la fouille ;
3. Minimiser la section de l'ouvrage ;
4. Assurer une vitesse d'écoulement ni trop faible ni trop élevée.

▪ En règle générale, on cherchera à :

1. Prioriser la satisfaction des conditions 3 et 4 ;
2. Ajuster les dimensions du canal pour répondre aux conditions 1 et 2 ;
3. Modifier la pente afin de respecter la condition 4.

VI.6.4. Vitesse d'érosion

Pour prévenir les ruptures du fond et des berges des canaux sous l'effet dynamique d'un courant d'eau, la vitesse de ce dernier ne doit pas dépasser la vitesse limite maximale. Les valeurs de vitesse moyenne limite d'érosion pour les lits consolidés sont présentées dans le tableau ci-dessous [Degoutte, 2012].

Tableau VI:22. Valeurs de vitesse moyenne limite d'érosion pour les lits consolidés (Degoutte, 2012).

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

VI.7. Résultats de la simulation hydraulique par le logiciel HEC- RAS après l'aménagement :

Voici les résultats de l'analyse dans le programme, et les autres résultats se trouvent en annexe :

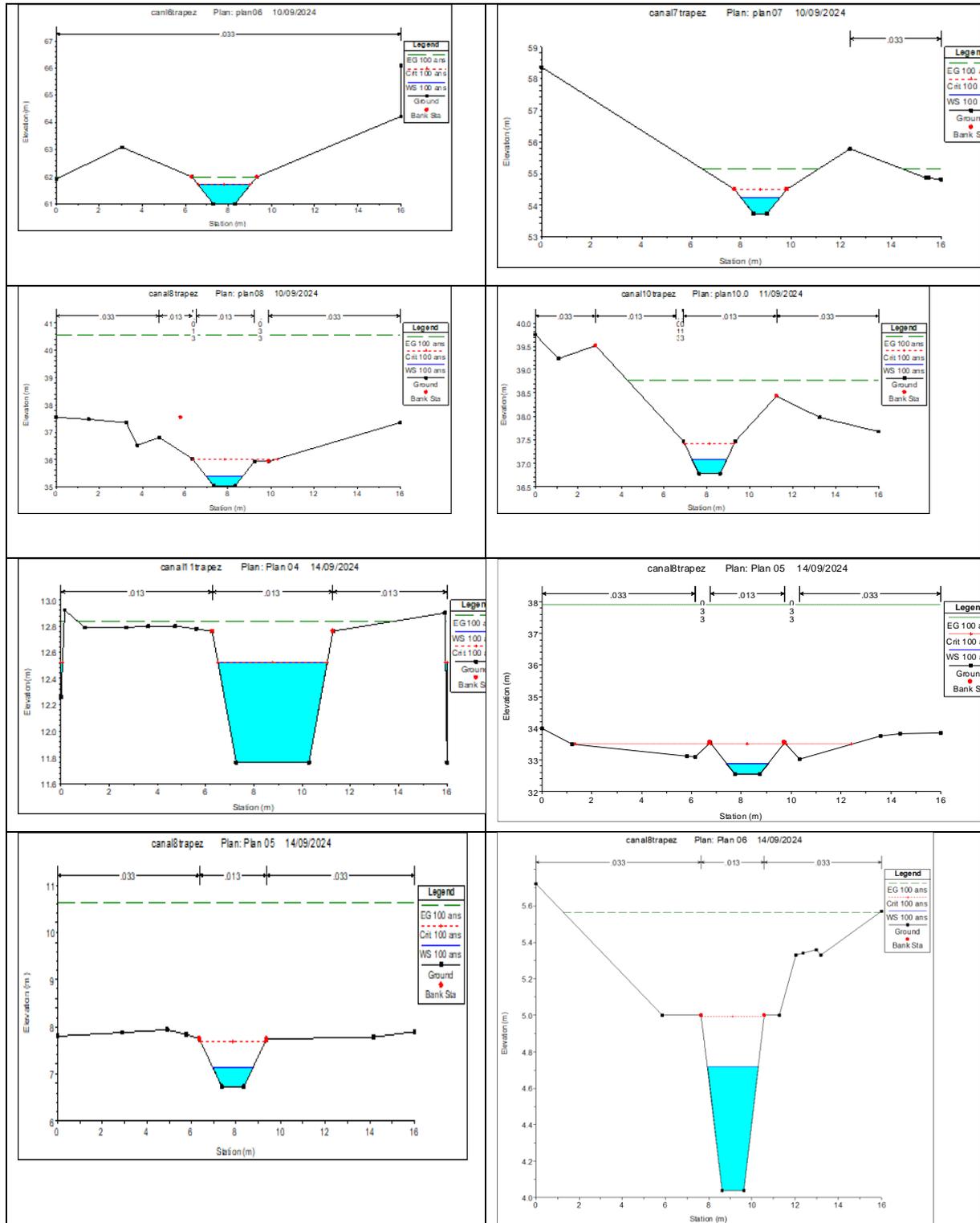
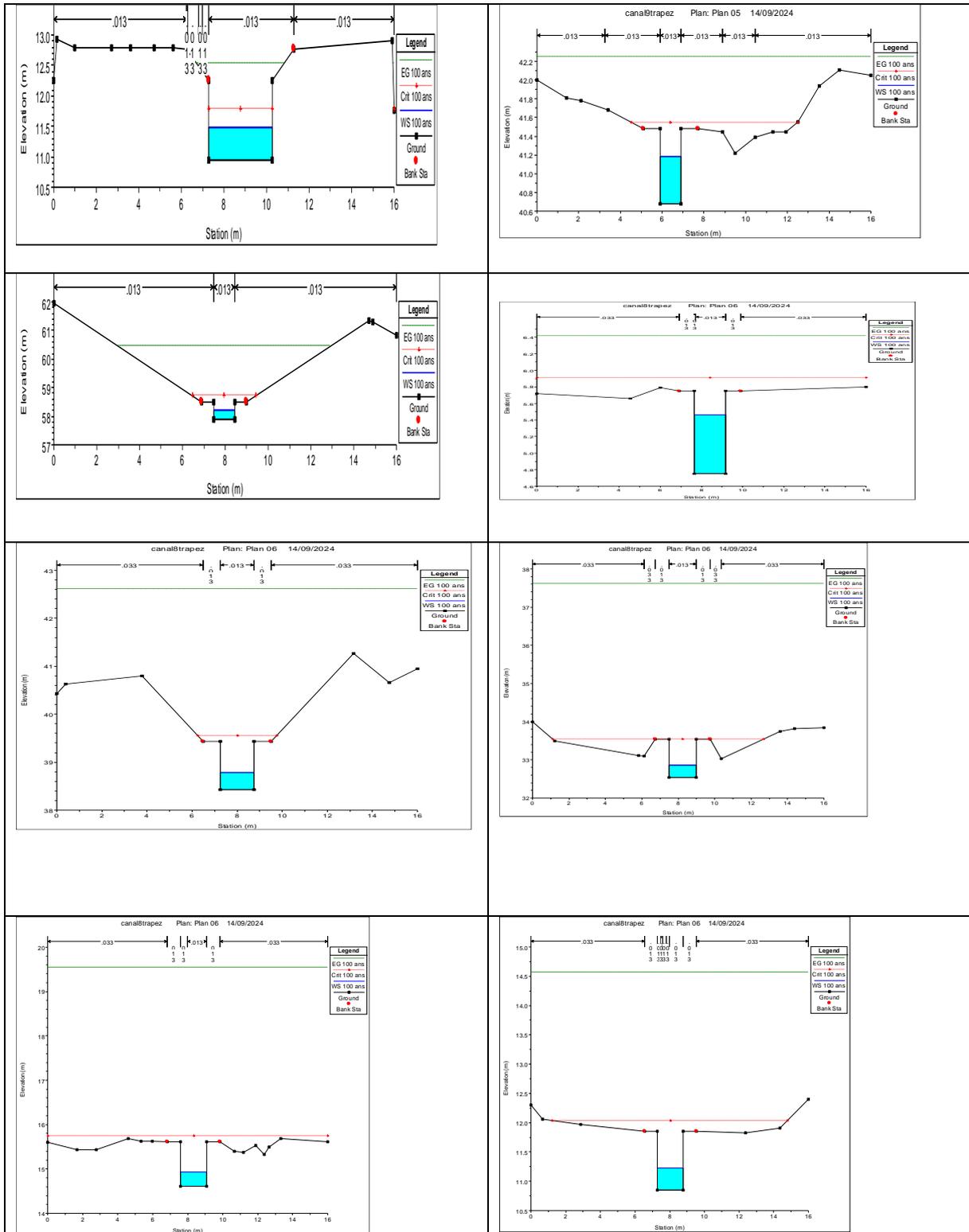


Figure VI-1 : Profils des sections en travers après la simulation et après l'aménagement de forme trapézoïdale



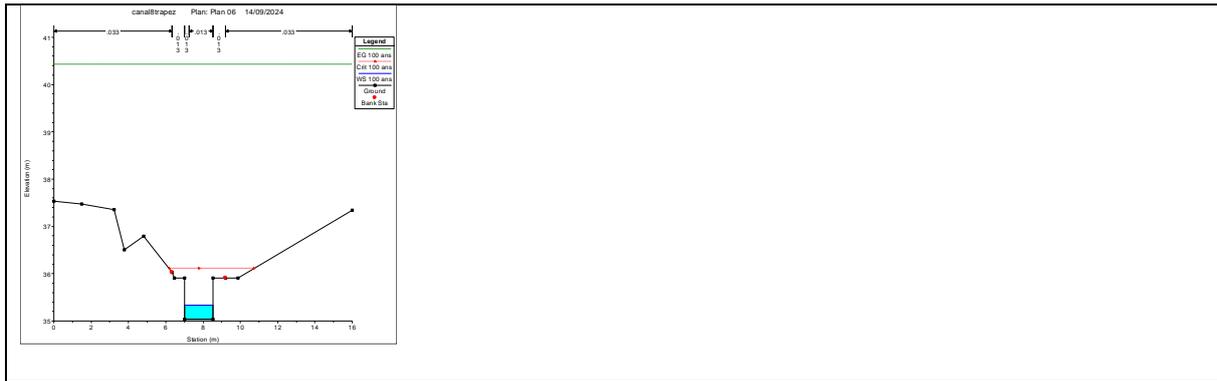


Figure VI-2 : Profils des sections en travers après la simulation et après l'aménagement de forme rectangulaire

La figure VI représente le profile en long du canal 8 après l'aménagement :

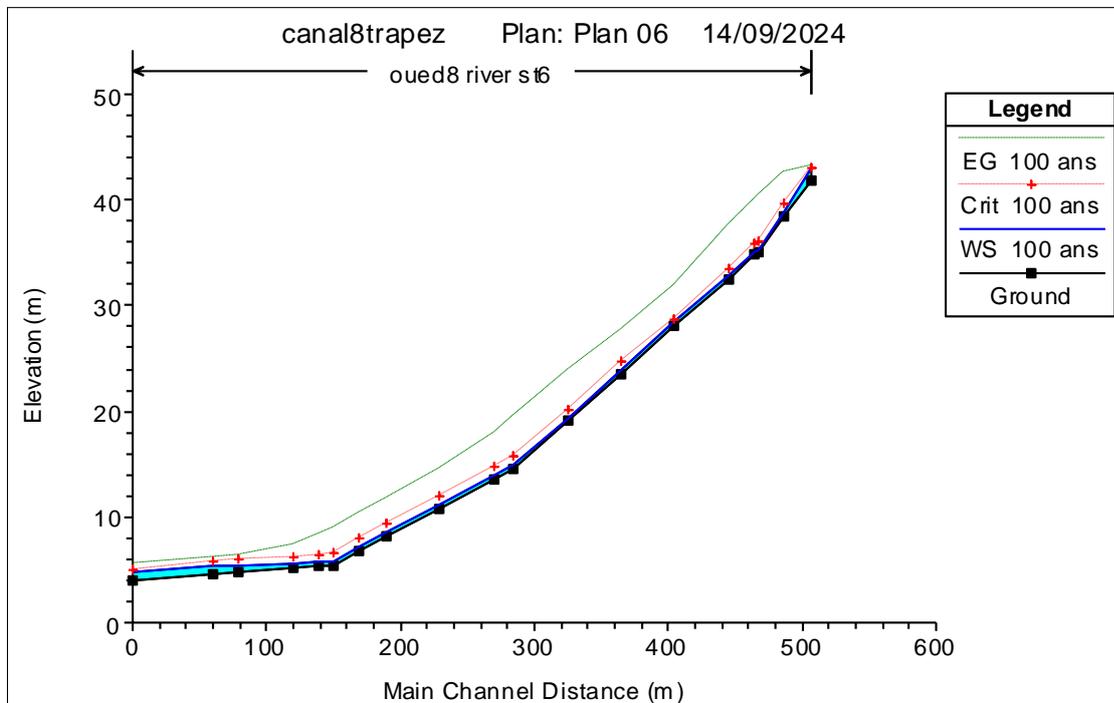


Figure VI-3 Profile en long après la simulation de canal 8

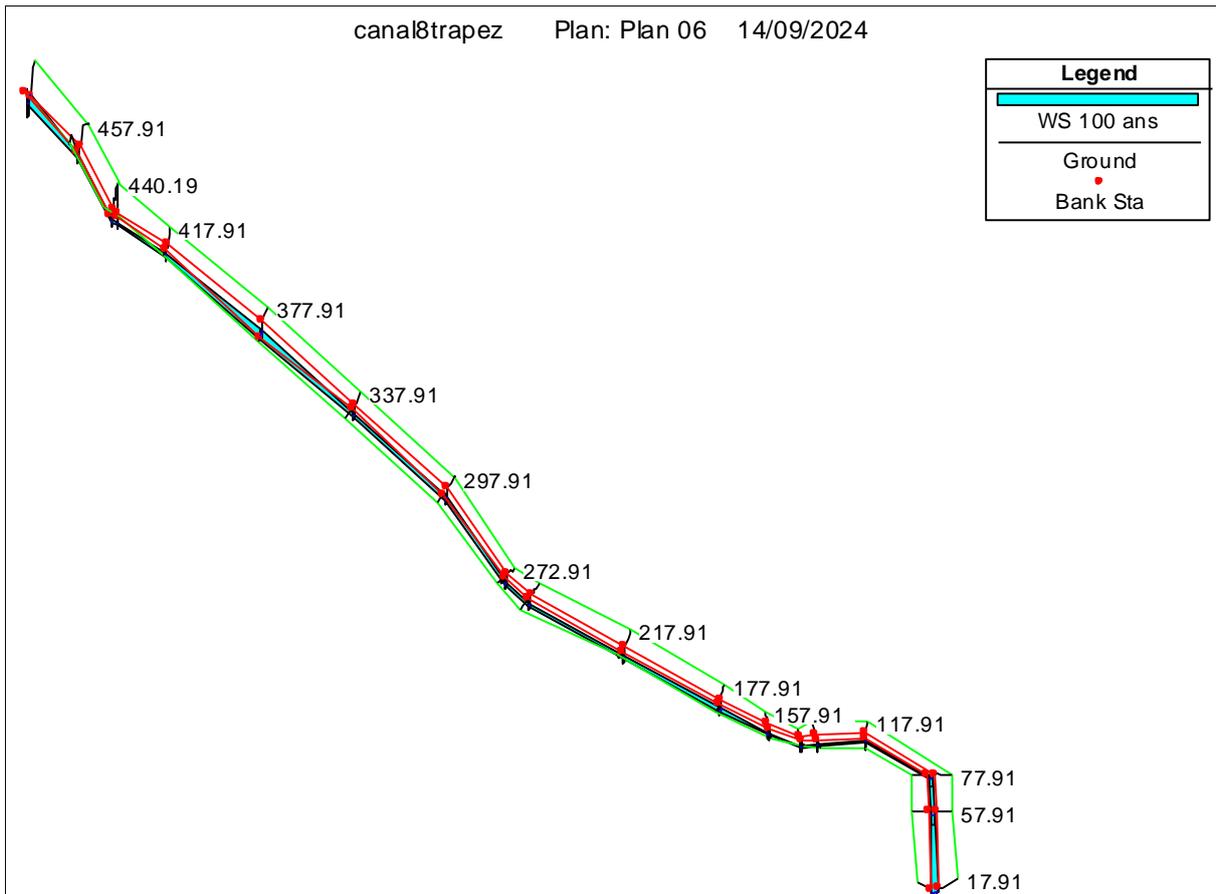


Figure VI-4 : Visualisation en 3D des zones inondables pour la crue centennale pour le canal 8

VI.8. Analyse des résultats de calcul :

D'après les tableaux annexés, qui illustrent les résultats des calculs pour les deux options d'aménagement, il est observé que : Le régime d'écoulement des cours d'eau est de nature torrentielle, avec un nombre de Froude variant entre 1 et 3 dans la majorité des canaux. Ce type de régime présente l'avantage d'une évacuation rapide des crues vers l'exutoire (Oued de Bou djemaa dans notre étude) et prévient le dépôt de sédiments. La vitesse d'écoulement sur l'ensemble des sections transversales fluctue entre 1 et 6 m/s. Ces vitesses ne présentent pas de risque d'érosion pour le lit et les parois des canaux en béton, étant donné qu'elles demeurent inférieures aux vitesses limites admissibles, qui s'élèvent à environ 10 m/s. La différence d'altitude entre la ligne d'eau et le radier permet de déterminer la hauteur d'eau à chaque section du canal. La comparaison de cette hauteur avec la profondeur du canal indique l'absence de débordement et la capacité adéquate de la section projetée pour évacuer la crue vers l'exutoire.

D'autre part Selon les résultats des calculs hydrauliques effectués sur la section appropriée du canal, il est constaté que les vitesses dans certaines tronçons Assez grand pourrait affecter sur la stabilité des canaux. Pour y remédier, il est impératif de corriger la pente longitudinale en intégrant des chutes d'une hauteur de 20 à 40 cm (redents) ou bien utilisée une rugosité artificielle afin de réduire ces vitesses et de dissiper l'énergie excédentaire.

- **Critères d'évaluation :**

La sélection de la variante sera fondée sur plusieurs critères :

- Efficacité hydraulique : elle se réfère au potentiel d'amélioration de la capacité hydraulique que les mesures peuvent offrir
- Difficultés de mise en œuvre : elle évalue le niveau de complexité technique associé à la réalisation.
- Enjeux environnementaux : ce critère prend en considération l'utilisation des sols environnants (zones urbaines, agricoles) ainsi que les déficits ou atouts environnementaux existants.
- Durabilité : il s'agit de la longévité de l'aménagement. • Entretien : ce critère évalue l'ampleur et la fréquence des interventions d'entretien requises.
- Coût : il s'agit de l'évaluation des dépenses liées à la construction.

- **Choix finals :**

Suite à l'analyse des sections suggérées pour l'aménagement des oueds, nous avons choisi d'utiliser des canaux en béton armé de configuration trapézoïdale pour l'ensemble des oueds due aux causes suivantes :

- a. **Coûts de construction :**

Canal trapézoïdal : Cette configuration permet de réduire la quantité de matériaux (béton) nécessaire pour les parois inclinées par rapport à un canal rectangulaire ayant la même capacité. Toutefois, l'installation des coffrages peut s'avérer plus délicate.

Canal rectangulaire : Bien que sa forme standard simplifie la construction et l'installation des coffrages, le besoin accru en béton et en armatures pour résister aux pressions latérales peut entraîner une augmentation des coûts.

- b. **Coûts d'entretien :**

Canal trapézoïdal : La configuration inclinée des parois favorise l'entretien et limite l'accumulation de débris. Néanmoins, l'accès aux zones internes du canal peut s'avérer plus complexe.

Canal rectangulaire : Bien que ses parois verticales facilitent le nettoyage, la forme carrée peut encourager l'accumulation de sédiments.

- c. **Impact environnemental :**

Canal trapézoïdal : Son design plus naturel permet une meilleure intégration dans le paysage environnant, ce qui constitue souvent un atout dans les initiatives de gestion des ressources en eau.

Canal rectangulaire : Moins harmonieux avec l'environnement naturel, il peut engendrer des répercussions esthétiques ou écologiques.

- d. **Réduire l'emprise de l'ouvrage :**

Diminution la profondeur de la fouille : Il est préférable lorsque le canal traverse une zone habitée et cela est offert par les canaux trapézoïdaux.

VI.9. Dimensionnement des infrastructures de passage :

La route peut représenter un obstacle nuisible à l'écoulement naturel, et inversement, cet écoulement peut causer des dommages à la route. Il est donc essentiel que les structures hydrauliques destinées à rétablir les écoulements naturels soient dimensionnées de manière appropriée afin de réduire les risques :

- d'inondation, de submersion ou de dégradation de la route dans des limites acceptables ;
- de défaillance de l'infrastructure routière.

On identifie généralement deux catégories d'ouvrages :

- les buses (circulaires et ovales) ;
- les dalots.

Les ouvrages de franchissement actuellement en place et concernés par cette étude sont au nombre de quatre, situés à l'intersection de l'oued et des voies. Suite à l'aménagement des canaux du zone d'étude, les ouvrages de franchissement seront redimensionnés de manière à intégrer les caractéristiques nécessaires pour permettre le passage de la crue centennale. Les caractéristiques des ouvrages de franchissement seront définies sur HEC RAS afin de permettre le passage de la nouvelle hauteur d'eau. La vérification de la capacité des ouvrages a été réalisée logiciel flowmaster.

VI.9.1. Choix de l'ouvrage de passage (franchissement) :

Choix de l'ouvrage de franchissement sera déterminée par la prise en compte du débit traversant l'ouvrage hydraulique, des charges statiques et dynamiques qui affectent la structure, ainsi que du coût d'investissement et du temps nécessaire à la construction.

Type	Buses		Dalots
	Rigides	Souples	
Forme	Circulaire	Ovale	Rectangulaire
Matériau	BA	Acier	BA
Mise en œuvre	Préfabriquées	Tôles préfabriquées et assemblés	Coulé sur place ou éléments préfabriqués
Emploi	Faible débit	Sous Remblais important	Les plus employés
Avantages	Economique	Supporte des charges importantes	Supporte directement les charges.
			A section égale et pente égale, un dalot est capable d'écouler un débit supérieur à celui d'une buse.
Inconvénients	Petit débit (<10 m ³ /s)	Corrosion	Plus de durée de construction.
	Remblais important (>80 cm)	L'assemblage réalisé par soudure est cher Remblais important (>80 cm)	

Figure VI-5: Bénéfices et limites des diverses solutions envisagées

Étant donné que les débits devant traverser les structures de franchissement ne dépassent pas 10 m³/s, les buses ont été retenus comme option. Sauf en canal 5 elle dépasse 10 m³/s les dalots ont été retenus comme option.

- **Dimensionnement des buses et des dalots projetés :**

Tableau VI:23. Pré-dimensionnement des buses et des dalots projetés :

Localisation	Ouverture (A)	Hauteur (H)	Diamètre (d)	Nombre D'ouvertures	Q100	Vitesse	Fr
	m	m	m		[m ³ /s]	[m /s]	
Canal 5	1.3	1	/	4	13.99	3.89	1.48
Canal 8	/	/	0.8	3	4.62	3.11	1.12
Canal 11	/	/	1	5	7.19	2.97	1.32

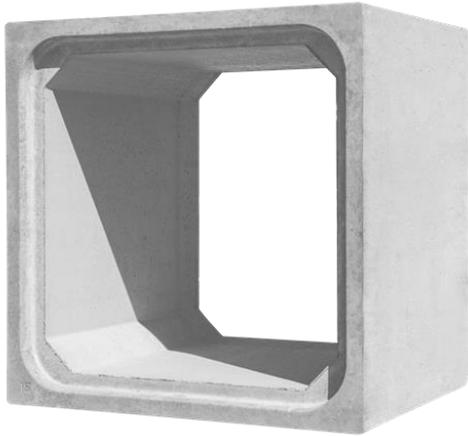


Tableau VI:24 . Photo d'un dalot

- Pour le canal numéro 10 au niveau du tronçon trois, j'ai choisi une projection de dalots de dimension $A \times H$ [1.5×1 m] pour traverser une zone habitée contenant des regards de visite chaque 30 mètres.

VI.9.2. Élaboration des buses et des dalots

L'équation de Manning présente une formulation implicite dans laquelle la largeur du radier b du dalot est déterminée, permettant ainsi de calculer le tirant d'eau y par le biais d'itérations successives, tout en respectant les critères suivants :

- ✚ Une vitesse moyenne de 3 m/s, sans excéder 5 m/s ;
- ✚ La condition $H/A < 1,25$ afin de garantir un écoulement dénoyé (où H et A représentent respectivement la hauteur et la largeur du dalot).

VI.10. Conclusion :

Le dimensionnement d'une infrastructure d'aménagement est établi sur la base des résultats les plus récents concernant la crue centennale. Cette analyse a été réalisée dans le but de sélectionner des conceptions d'ouvrages adéquates, visant à protéger la ville de EL SAROUEL. Les objectifs principaux de cette démarche sont les suivants :

- Assurer la protection des terres environnantes, en particulier des habitations, contre les crues et les inondations ;
- Sauvegarder les infrastructures existantes.

Selon les résultats de la simulation effectuée avec l'outil HEC-RAS dans le chapitre précédent, le quatrième tronçon, ne présente pas de risques d'inondation. Ce tronçon nécessite uniquement un nettoyage des rives, un curage du lit et un recalibrage pour accroître la capacité hydraulique du cours d'eau, ainsi qu'un renforcement des berges.



Chapitre VII

ORGANISATION DE
CHANTIER

CHAPITRE VII:Organisation de chantier

VII.1. Introduction :

L'organisation du chantier pour la construction de la ceinture de protection contre les inondations vise à garantir une exécution fluide des travaux tout en respectant les délais, les coûts, et les normes de sécurité. Ce projet comprend la réalisation d'une ceinture de protection de forme trapézoïdale et rectangulaire, conçue pour protéger la zone contre les risques d'inondation. L'ensemble des intervenants, les ressources matérielles, humaines et les méthodes de planification ont été soigneusement définis pour répondre aux contraintes du site.

La construction en toute sécurité implique une approche axée sur la qualité, en mobilisant une main-d'œuvre hautement qualifiée, en utilisant des équipements de pointe soigneusement vérifiés, et en adoptant des méthodes de construction optimales. Cela nécessite également une capacité de prévision accrue, ce qui se traduit par un rendement supérieur, des bénéfices maximisés et une amélioration significative de la qualité de vie. Dans cette optique, nous développons un plan de sécurité et de santé. Toutefois, cet objectif ne doit pas être considéré comme une finalité en soi, mais plutôt comme un levier essentiel pour promouvoir des pratiques préventives contre les accidents, ce qui justifie son statut de document fondamental. La mise en œuvre effective de ce plan repose sur une structure dédiée à l'hygiène, à la sécurité et à la santé sur le site de construction.

VII.2. Organisation de chantier :

L'Organisation d'un chantier implique l'anticipation des ressources requises, qu'elles soient humaines, matérielles ou en matériaux, ainsi que l'établissement d'un rythme de travail afin d'optimiser l'utilisation de ces ressources, dans le but d'assurer rapidité, qualité et rentabilité.

VII.3. Les intervenants sur le chantier :

- **Maître d'ouvrage** : Assure la gestion globale du projet, notamment en matière de financements et de validation des étapes critiques.
- **Maître d'œuvre** : Responsable de la conception technique et du suivi de l'exécution des travaux.
- **Entrepreneur** : Exécute les travaux conformément aux spécifications techniques, notamment le terrassement, la construction des canaux, et la mise en place des protections.
- **Consultants et experts hydrauliques** : Interviennent pour garantir l'efficacité hydraulique de la ceinture de protection.

VII.4. Travaux préparatoires et installation de l'entreprise :

L'installation du chantier est une étape cruciale pour assurer le bon déroulement des travaux. Elle nécessite un espace suffisamment grand pour organiser les différentes zones, y compris les aires de stockage et les pistes de circulation pour les engins. Cette phase inclut la mise en place progressive des infrastructures, des engins et des postes de travail fixes.

- Les installations peuvent être réparties en plusieurs catégories :

VII.4.1. Installations destinées au personnel :

Pour garantir un environnement de travail sécurisé et fonctionnel, des infrastructures sont prévues pour accueillir le personnel du chantier. Celles-ci comprennent des dortoirs, des réfectoires, des sanitaires et des bureaux de chantier. Elles doivent être situées à proximité de l'accès principal au chantier, tout en évitant la zone de travail des grues. Ces installations visent à améliorer la communication entre les intervenants et à fournir des conditions de travail adéquates lors des réunions de chantier ou des périodes de repos.

VII.4.2. Installations destinées au stockage des matériaux :

Les matériaux de construction, notamment les ciments, les agrégats et les aciers, sont stockés dans des zones dédiées, sécurisées et proches des accès au chantier. Les ciments peuvent être entreposés dans des silos métalliques ou des baraquements en bois ou en métal, tandis que les agrégats peuvent être stockés en plein air, en prenant soin de les séparer pour éviter tout mélange. Le stockage sécurisé des éléments préfabriqués et des équipements de construction est essentiel pour prévenir les vols et faciliter leur utilisation.

VII.4.3. Installations destinées à la réparation des engins :

Même si les réparations majeures des engins ne se déroulent pas sur le chantier, un atelier bien équipé est nécessaire pour assurer l'entretien courant et les réparations d'urgence des différents matériels. Cet atelier doit être suffisamment proche des zones d'activité pour permettre des interventions rapides sur les équipements lourds, tels que les grues, afin de minimiser les interruptions de travail.

VII.4.4. Installations destinées à la préfabrication :

Une aire de préfabrication est aménagée à proximité des bâtiments à construire. Cette zone permet la fabrication sur place des éléments préfabriqués nécessaires à l'ouvrage, tels que des poutres, dalles, acrotères, poteaux et conduites. Pour cela, des hangars équipés du matériel adéquat sont mis en place, facilitant ainsi la production des éléments structurels en béton et des coffrages en bois, directement sur le site de construction.

VII.5. Réalisation des travaux :

VII.5.1. Travaux de terrassement :

Pour mener à bien les travaux de terrassement, il est essentiel de procéder à une analyse des masses volumiques de terrassement, en privilégiant les méthodes les plus rentables concernant la distribution et le transport des matériaux de construction sur le site, tout en tenant compte des spécifications techniques des équipements mécaniques utilisés.

VII.5.2. Travaux d'excavation :

Les diverses opérations d'excavation doivent être exécutées conformément aux informations fournies dans le dossier des plans et au calendrier général des travaux. Ces opérations incluent le décapage, l'enlèvement de la terre végétale le long de la zone d'aménagement, ainsi que son évacuation vers une décharge destinée aux déchets inertes.

VII.6. Les Moyens de chantier :

VII.6.1. Moyens Humains :

La réussite d'un projet de construction repose avant tout sur des moyens humains qualifiés. Il est crucial de nommer une équipe compétente, en commençant par le conducteur des travaux et son adjoint, dont les titres, références et compétences doivent être spécifiés. Le personnel inclut également des techniciens spécialisés, tels que des géotechniciens, des topographes, et des ouvriers qualifiés pour les différentes étapes du chantier. Les rôles clés nécessaires au projet comprennent :

- **Conducteur des travaux** : Responsable du suivi global du chantier et des équipes.
- **Contremaître** : Supervise la mise en œuvre des tâches journalières.
- **Chauffeurs d'engins** : Conduisent les engins de chantier tels que les bulldozers et les camions.
- **Ouvriers** : Participent aux travaux généraux de construction.
- **Ferrailleurs, coffreurs et soudeurs** : Spécialistes pour les structures en acier et en béton.

VII.6.2. Moyens Matériels :

L'équipement nécessaire pour la réalisation des travaux est varié et dépend de la nature des tâches à accomplir. La documentation détaillée des matériels utilisés, incluant leur marque, capacité, performance et mode d'intervention, est indispensable. Voici les différentes catégories de matériels :

a. Engins de Terrassement :

Les engins de terrassement sont essentiels pour l'extraction, le transport, le nivellement, et la préparation du sol. Ils incluent :

- **Bulldozers** : Utilisés pour les grands travaux de terrassement et la création de voies d'accès.
- **Chargeurs (à pneus et à chenilles)** : Pour le chargement des déblais.
- **Camions-bennes** : Transportent les matériaux extraits et ceux nécessaires à la construction.
- **-Pelles hydrauliques** : Pour creuser les fondations et effectuer des travaux de fouille.
- **Compacteurs** : Utilisés pour compacter les matériaux de remblais et assurer la stabilité des structures.
- **Grues** : Pour la manipulation de coffrages et d'aciers.

b. Matériel de Préparation et Bétonnage :

Le projet nécessite aussi des équipements spécifiques pour la fabrication et la mise en place du béton :

-Bétonnières et camions malaxeurs : Utilisés pour la fabrication et le transport du béton sur le chantier.

- Pompes immergées : Pour évacuer les eaux stagnantes, surtout pendant les périodes hivernales.

c. Équipements de Compactage :

Pour garantir la solidité des fondations et des remblais, le compactage est réalisé à l'aide de :

- Compacteurs à pied de mouton : Utilisés pour la consolidation des matériaux meubles.
- Compacteurs à rouleaux lisses : Assurent une finition parfaite des surfaces compactées.

Chaque équipement est utilisé selon la phase des travaux : préparation du terrain, terrassement, compactage ou bétonnage. Un suivi attentif des moyens matériels et humains est indispensable pour assurer l'efficacité et la sécurité des opérations sur le chantier.

VII.7. Devis quantitatif et estimatif du projet :

Un devis détaillé a été élaboré pour prévoir les coûts des différentes phases du projet, incluant :

- Les matériaux de construction (béton armé pour les canaux).
- La main-d'œuvre spécialisée pour les travaux hydrauliques.
- Les équipements et engins nécessaires pour la réalisation.
- Les mesures de sécurité et d'aménagement temporaire.

Le coût total est estimé en tenant compte de plusieurs variantes pour chaque segment de la ceinture de protection, en fonction de la forme (trapézoïdale ou rectangulaire) et des exigences locales.

Tableau VII:1. Devis quantitatif et estimatif du projet

Désignations des travaux		Unité	Quantité	Prix unitaire (DA)	Montant (DA/mL)
Terrassement	Déblais	m ³	32895.6	400	13158240
	Remblais	m ³	4720.7	200	944140
lit de béton de propreté dosé à 150 kg/m3		m ³	1462	7000	10234000
exécution des canaux	canaux trapézoïdaux	m ³	1871.8	31000	58027120
	canaux rectangulaires	m ³	3015.4	28000	84431200
Montant HT			82363500		
TVA 19%			15649065		
Total TTC			98012565		

- Les résultats dans le tableau de devis quantitative et estimative de projet confirment ce que nous avons conclu dans le chapitre précédent, à savoir que dans notre projet, les canaux en forme trapézoïdale sont moins coûteux que les canaux en forme de rectangulaire.

VII.8. Conclusion

L'organisation de chantier pour la construction de la ceinture de protection contre les inondations requiert une planification minutieuse, une coordination efficace entre les différents acteurs et l'utilisation d'engins adaptés pour garantir la qualité et la durabilité des travaux. En se basant sur les études hydrauliques et topographiques, le projet vise à protéger durablement la zone des risques d'inondation.

Conclusion finale

Ce projet de fin d'études m'a offert l'opportunité d'acquérir une expérience significative dans l'évaluation du risque d'inondation. La réalisation de cette étude a exigé une compréhension approfondie des dynamiques hydrologiques et hydrauliques de l'hydrosystème dans la ville étudiée. En effet, cette zone est fortement marquée par l'intervention humaine, ce qui a entraîné des modifications de son régime hydrologique,

La modélisation des vulnérabilités face aux inondations s'avère essentielle pour repérer les zones à risque et analyser les mesures préventives appropriées. Bien que la probabilité d'inondations sévères soit généralement faible, leurs conséquences sur le développement socio-économique de la région peuvent être significatives. Une gestion efficace des risques d'inondation requiert des données cruciales concernant les zones potentiellement inondables.

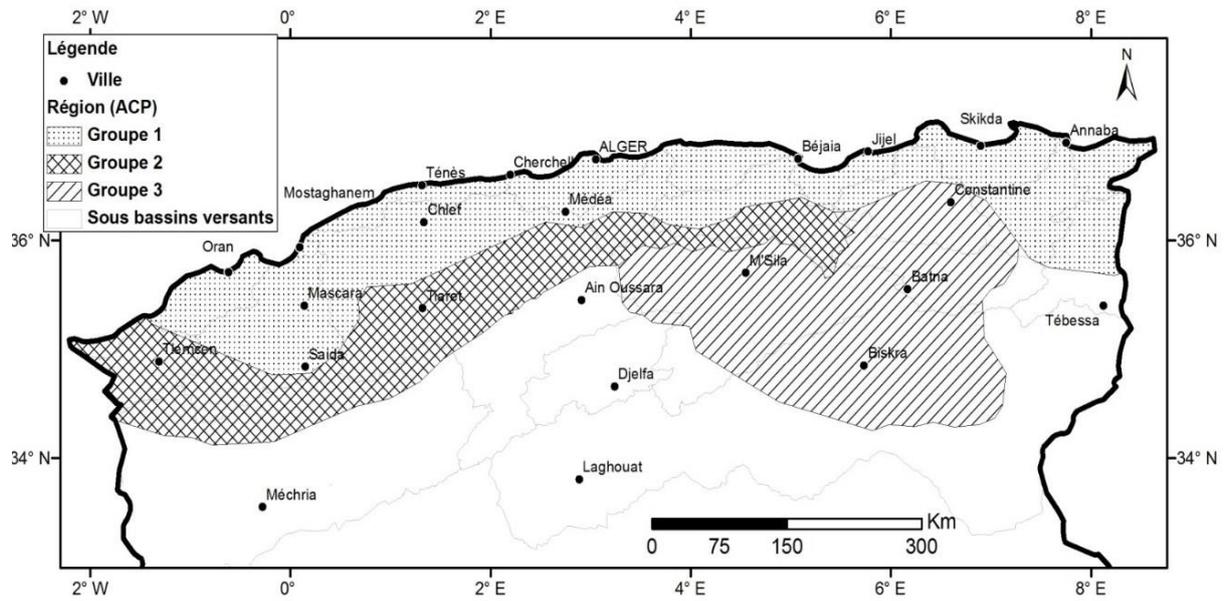
À l'issue de cette étude visant à protéger l'agglomération de EL SAROUEL contre les risques d'inondation et les eaux de ruissellement, nous avons identifié les solutions d'aménagement les plus appropriées en tenant compte des conditions naturelles. Notre démarche s'est articulée autour de trois étapes fondamentales. Dans un premier temps, une reconnaissance du site, basée sur les plans d'occupation du sol, ainsi qu'une analyse hydrologique approfondie, nous ont permis de déterminer les débits des eaux pluviales pour des périodes de retour différents.

Dans un second temps, nous avons localisé et délimité les zones susceptibles d'être inondées, ce qui nous a conduit à proposer des alternatives adéquates pour mettre en place des solutions efficaces afin de prévenir ce phénomène naturel. Nous avons finalement retenu une option consistant à réaliser des aménagements en béton, tels qu'un des canaux, appelés « canal ceinture », dont l'objectif est d'évacuer les eaux provenant de la partie supérieure de la zone étudiée.

Références bibliographiques

- 1) **DAHDOUH.Yacina.(2018)** .THESE : Présentée en vue de l'obtention du diplôme de DOCTORAT Elément d'analyse du phénomène d'inondation dans les villes à bassin péri-urbain. Modélisation hydrologique. Cas de la ville de Annaba.
- 2) **Combe, C. (2007)**. La ville endormie ? Le risque d'inondation à Lyon : approche géohistorique et systémique du risque de crue en milieu urbain et périurbain (Doctoral dissertation, Lyon 2).
- 3) **Defrance, D. (2012)**, Javelle, P., Arnaud, P., & Andréassian, V. (2012, April). Flash flood warning at ungauged locations: can proxy data be useful to calibrate the hydrological model used? In EGU General Assembly Conference Abstracts (Vol. 14, p. 7145).
- 4) **H.Oumarou et A.Oumarou ,(2017)**. La gestion humanitaire des inondations dans une commune de Niamey.
- 5) **HENRY. (2004)**, systèmes d'information spatiaux pour la gestion du risque d'inondation de plaine
- 6) **S Beucher et al. (2008)**, Risque d'inondation et dynamiques territoriales des espaces de renouvellement urbain : les cas de Seine-Amont et de l'est londonie.
- 7) **M BACHI – (2011)**, Problématique du risque inondation en milieu urbain ; cas de l'agglomération de sidi bel Abbes mémoire de fin d'eudes, 2010, Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen –. Faculté de Technologie.
- 8) **Chabane, (2016)**, Adaptation et flexibilité des agrosytèmes de la région de Jijel face aux changement climatique.
- 9) **S.Lahlah .(2000)**, Inventory of flood zones in Algeria—first approach
- 10) **Laroussi BELOULOU. (2008)**. Vulnérabilité aux inondations en milieu urbain. Cas de la ville de Annaba (Nord-Est Algérien). Thèse de Doctorat d'Etat.
- 11) **Meddi, M., Toumi, S., & Assani, A. (2017)**. Application de l'approche L-moments à l'analyse de la fréquence des crues régionales dans le nord de l'Algérie. Revue internationale des sciences et technologies de l'hydrologie, 7(1), 77-102.
- 12) **Gilard et al., (1998)**. Inondabilité : une méthode de prévention raisonnable du risque d'inondation pour une gestion mieux intégrée des bassins versants.
- 13) **G.Oberlin. (1995)** : Les outils disponibles de la prévention des inondations dommageables.
- 14) **Sghara, N., (2013)**. « Protection de la ville de Béni-Ounif (Béchar) contre les inondations.
- 15) Application de logiciels HEC-HMS et HEC-RAS ». Mémoire de Magister, Université des sciences et de technologie d'Oran, 150 pages.
- 16) **ZEGHDOUDI Bilel. (2019)**. Thème : Etude de protection contre l'inondation dans le sous-bassin d'ELHAMMAM
- 17) **KERLOC'H Bruno. (2014)**. (C.E.T.E. NORD - PICARDIE) et MAELSTAF Damien (DDE80). Le dimensionnement des réseaux d'assainissement des agglomérations.
- 18) **G. Degoutte. (2012)**. Les déversoirs sur les digues fluviales.
- 19) **R. MAHTOUT et T.AMRANI,(2022)**. Contribution à l'étude d'aménagement d'oued tifrit, commune d'akbou, wilaya de Bejaia

Annexes



Les limites géographiques des trois zones identifiées pour le calcul de débit maximum par Meddi et al., (2017).

Valeurs du coefficient n de Manning

Nature des surfaces	Etats des parois			
	Parfait	Bon	Assez bon	Mauvais
A) Canaux artificiels				
Ciment lissé	0,01	0,011	0,012	0,013
Mortier de ciment	0,011	0,012	0,013	0,015
Aqueducs en bois raboté	0,01	0,012	0,013	0,014
Aqueducs en bois non raboté	0,011	0,013	0,014	0,015
Canaux revêtus de béton	0,012	0,014	0,016	0,018
Moëllons bruts	0,017	0,02	0,025	0,03
Pierres sèches	0,025	0,03	0,033	0,035
Moëllons dressés	0,013	0,014	0,015	0,017
Aqueducs métalliques à section demi-circulaire lisse	0,011	0,012	0,013	0,015
Aqueducs métalliques à section demi-circulaire plissée	0,0225	0,025	0,0275	0,030
Canaux en terre droits et uniformes	0,017	0,020	0,0225	0,025
Canaux avec pierres, lisses et uniformes	0,025	0,030	0,033	0,035
Canaux avec pierres, rugueux et irréguliers	0,035	0,040	0,045	-
Canaux en terre à larges méandres	0,0225	0,025	0,0275	0,030
Canaux en terre dragués	0,025	0,0275	0,030	0,033
Canaux à fond en terre, côtés avec pierres	0,028	0,030	0,033	0,035
B) Cours d'eau naturels				
1) Propres, rives en ligne droite	0,025	0,0275	0,030	0,033
2) Idem 1 avec quelques herbes et pierres	0,030	0,033	0,035	0,040
3) Avec méandres, avec quelques étangs et endroits peu profonds, propres	0,035	0,040	0,045	0,050
4) Idem 3, l'eau à l'étiage, pente et sections plus faibles	0,040	0,045	0,050	0,055
5) Idem 3, avec quelques herbes et pierres	0,033	0,035	0,040	0,045
6) Idem 4, avec pierres	0,045	0,050	0,055	0,060
7) Zones à eau coulant lentement avec herbes ou fosses très profondes	0,050	0,060	0,070	0,080
8) Zones avec beaucoup de mauvaises herbes	0,075	0,100	0,125	0,150

Résultats de simulation en HEC-ras Avant l'aménagement :

Q(m3/s)	Min Ch El(m)	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G.	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude
8.43	17.81	18.66	18.66	18.89	0.012527	2.52	4.11	9.02	0.99
8.43	16.80	17.24	17.45	18.00	0.109817	4.05	2.19	9.06	2.52
8.43	14.48	14.79	14.97	15.40	0.068027	2.50	2.50	9.39	1.89
8.43	12.54	13.01	13.15	13.50	0.056997	3.51	2.97	14.05	1.93
8.43	10.87	11.18	11.34	11.73	0.059427	2.56	2.58	8.44	1.78
8.43	9.73	10.08	10.15	10.33	0.033114	2.14	3.90	16.00	1.38
8.43	8.04	9.06	9.19	9.46	0.025112	3.03	3.38	11.08	1.30
8.43	7.94	8.22	8.29	8.48	0.040008	2.00	3.74	16.00	1.47
8.43	6.77	7.45	7.50	7.67	0.018803	2.29	4.24	16.00	1.13
8.43	6.33	6.76	6.83	7.02	0.025417	2.27	3.79	13.18	1.27
8.43	6.09	6.76	6.61	6.83	0.003589	1.29	7.38	16.00	0.53
8.43	5.68	6.62		6.65	0.000922	0.85	11.33	16.00	0.29
8.43	5.26	6.23		6.34	0.004940	1.44	5.92	10.13	0.60
8.43	5.05	5.97	5.97	6.13	0.008719	2.07	5.39	15.76	0.81

8.43	40.34	40.05	40.05	40.41	0.020416		3.18	4.51	0.00
8.43	39.69	38.44	38.73	39.36	0.062374		1.98	3.60	0.00
8.43	35.65	35.46	35.79	36.69	0.129575		1.72	4.39	0.00
8.43	31.44	32.21	32.50	33.19	0.098021	4.64	1.94	5.16	2.40
8.43	28.87	27.38	27.84	29.23	0.174347		1.40	3.31	0.00

8.43	40.43	41.25	39.26	41.26	0.000255	0.28	15.49	9.94	0.13
8.43	40.42	41.24		41.26	0.000314	0.29	14.01	8.91	0.14
8.43	40.68	41.18		41.24	0.001603	0.46	7.58	6.88	0.30
8.43	40.74	41.03		41.18	0.005027	0.58	4.97	5.51	0.49
8.43	36.48	41.13		41.13	0.000050	0.30	29.43	11.96	0.06
8.43	39.37	41.11		41.13	0.000301	0.55	14.24	9.82	0.16
8.43	41.21	40.70	40.70	41.08	0.018887		3.11	4.14	0.00
8.43	39.98	40.18	40.31	40.65	0.026388	1.00	2.81	4.86	1.01
8.43	39.41	39.14	39.38	39.93	0.048838		2.14	3.02	0.00
8.43	38.70	37.71	36.58	37.80	0.003023		6.14	3.81	0.00
8.43	36.68	37.59		37.72	0.006027	1.32	5.55	8.57	0.62
8.43	36.88	37.20	37.20	37.51	0.015558	1.07	3.55	6.15	0.85
8.43	36.28	36.80	36.88	37.14	0.020461	1.57	3.45	7.52	1.04
8.43	34.61	35.92	34.79	35.96	0.000717	0.59	10.29	7.88	0.23
8.43	34.95	35.62	35.62	35.89	0.016189	1.76	3.79	7.03	0.97
8.43	33.77	33.47	33.94	35.06	0.128440		1.51	2.87	0.00
8.43	30.94	32.09	32.41	33.07	0.067559	4.38	1.92	3.98	2.00
8.43	31.43	31.98	32.01	32.17	0.019966	1.77	4.58	15.68	1.09
8.43	27.46	28.42	29.01	31.00	0.199796	7.12	1.18	2.44	3.26
8.43	23.18	24.20	24.82	26.90	0.209701	7.27	1.16	2.27	3.24
8.43	21.21	23.98	22.54	24.00	0.000274	0.61	14.05	9.90	0.16

8.43	22.93	23.72	23.72	23.94	0.014311	1.80	4.24	10.29	0.97
------	-------	-------	-------	-------	----------	------	------	-------	------

2.78	51.84	52.54	52.54	52.65	0.014687	1.51	1.93	9.46	0.93
2.78	47.38	47.88	48.14	51.35	1.399147	8.24	0.34	2.71	7.46
2.78	44.38	44.87	45.06	45.54	0.099811	3.62	0.77	3.14	2.34
2.78	40.57	41.14	41.43	42.64	0.214024	5.42	0.51	1.80	3.25
2.78	36.74	37.02	37.22	37.97	0.237525	4.32	0.64	4.02	3.44
2.78	33.58	34.20	34.44	35.01	0.098649	3.98	0.70	2.26	2.28
2.78	33.01	33.45	33.51	33.66	0.038171	1.88	1.38	6.17	1.38
2.78	28.40	28.88	29.29	31.57	0.474255	7.26	0.38	1.60	4.74
2.78	27.51	28.01	28.12	28.37	0.056667	2.76	1.07	4.43	1.77
2.78	23.64	24.11	24.46	25.98	0.315191	6.05	0.46	1.95	3.98
2.78	22.05	22.76	22.94	23.31	0.057874	3.29	0.85	2.37	1.76
2.78	20.89	21.71	21.87	22.23	0.050164	3.20	0.87	2.12	1.59
2.78	20.30	20.86	20.98	21.25	0.043572	2.76	1.01	2.97	1.52

13.99	21.55	22.16	22.16	22.38	0.013568	2.16	6.91	16.00	1.00
13.99	19.81	20.15	20.44	21.39	0.107758	3.03	3.04	10.90	2.36
13.99	17.87	19.59	18.49	19.62	0.000396	0.79	19.00	15.07	0.20
13.99	18.24	19.30	19.30	19.56	0.011897	1.90	6.39	11.87	0.90
13.99	15.82	16.28	16.69	18.41	0.245767	6.47	2.17	7.85	3.87
13.99	15.74	16.52	16.53	16.74	0.014094	2.23	6.85	16.00	1.02
13.99	14.83	15.37	15.55	15.98	0.048705	3.57	4.17	12.36	1.82
13.99	12.96	13.60	13.81	14.32	0.063117	3.87	3.88	13.62	2.05
13.99	12.92	13.58	13.58	13.79	0.010938	1.64	7.36	16.00	0.86
13.99	10.42	11.13	11.51	12.84	0.131268	6.39	2.52	7.22	2.97
13.99	10.05	11.77	11.27	11.85	0.001664	1.32	11.75	14.23	0.39
13.99	10.83	11.51	11.51	11.73	0.013200	1.93	7.03	16.00	0.96
13.99	10.31	10.94	10.99	11.22	0.021939	2.45	6.07	16.00	1.23
13.99	9.13	10.24	9.83	10.34	0.002454	1.38	10.23	11.08	0.46
13.99	9.34	9.91	9.91	10.19	0.009543	1.31	6.49	13.18	0.77
13.99	8.38	9.20	9.35	9.70	0.028374	3.35	4.62	10.42	1.45
13.99	8.21	8.82	8.83	9.04	0.013863	2.32	6.90	16.00	1.02
13.99	7.94	8.42	8.43	8.64	0.012887	2.01	6.91	16.00	0.96
13.99	6.53	7.61	7.76	8.13	0.019032	3.23	4.48	8.48	1.18
13.99	6.96	7.78	7.63	7.90	0.004824	1.70	9.43	16.00	0.63
13.99	6.37	7.74		7.80	0.001714	1.26	12.97	16.00	0.40
13.99	6.98	7.48	7.46	7.68	0.013136	1.90	7.15	16.00	0.95
13.99	6.54	7.07	7.07	7.28	0.013283	1.95	7.02	16.00	0.96
13.99	5.41	6.64	6.24	6.74	0.002804	1.40	10.12	13.75	0.49
13.99	5.08	6.58		6.66	0.002237	1.28	11.51	16.00	0.43
13.99	5.30	6.53		6.60	0.001587	1.26	12.74	16.00	0.38

13.99	5.44	6.27	6.27	6.48	0.012579	2.31	7.11	16.00	0.98
-------	------	------	------	------	----------	------	------	-------	------

2.78	63.20	62.90	62.90	63.15	0.022289		1.27	2.58	0.00
2.78	61.12	61.18	61.46	62.13	0.133519	1.00	0.65	1.97	1.84
2.78	58.40	57.90	58.15	58.89	0.180521		0.63	2.64	0.00
2.78	56.28	54.96	55.23	55.85	0.120246		0.67	1.75	0.00
2.78	50.45	49.59	49.94	51.59	0.421441		0.44	1.97	0.00
2.78	47.67	46.39	46.65	47.23	0.113541		0.69	1.93	0.00
2.78	41.91	41.84	42.10	43.45	0.347344		0.50	2.35	0.00
2.78	36.05	35.78	36.04	37.05	0.285431		0.56	2.81	0.00
2.78	31.77	32.61	32.91	33.58	0.114215	4.37	0.64	1.52	2.16
2.78	30.13	30.90	31.02	31.35	0.094010	3.33	0.98	6.35	1.72
2.78	24.24	24.81	25.26	27.55	0.481696	7.33	0.38	1.33	4.38
2.78	22.56	23.21	23.41	23.84	0.074719	3.53	0.79	2.43	1.98

2.31	63.50	62.98	62.98	63.20	0.022156		1.12	2.62	0.00
2.31	62.02	61.54	61.77	62.30	0.112220		0.60	1.74	0.00
2.31	59.91	59.67	59.90	60.32	0.084836		0.65	1.71	0.00
2.31	56.36	55.51	55.51	55.72	0.020404		1.14	2.78	0.00
2.31	53.99	53.73	54.02	54.74	0.162544		0.52	1.51	0.00
2.31	50.73	49.85	50.18	51.07	0.205118		0.47	1.30	0.00
2.31	48.81	47.28	47.51	48.03	0.106785		0.60	1.57	0.00
2.31	44.46	44.07	44.34	45.14	0.194862		0.50	1.92	0.00
2.31	41.91	42.10	42.18	42.36	0.088583	2.29	1.04	8.54	2.04
2.31	41.30	40.92	41.01	41.24	0.037871		0.93	2.52	0.00
2.31	40.16	40.05	39.61	40.08	0.001595		3.17	5.51	0.00
2.31	39.43	39.86	39.86	39.99	0.020043	1.75	1.47	5.97	1.06

4.62	43.24	43.86	43.86	44.04	0.015916	1.86	2.48	7.17	1.01
4.62	40.27	40.74	40.97	42.85	0.918066	6.44	0.72	6.28	6.08
4.62	35.13	35.63	35.96	37.02	0.134040	5.46	0.93	3.14	2.78
4.62	32.88	33.03	33.22	34.02	0.190705	1.28	1.07	6.39	2.29
4.62	29.91	30.07	30.29	30.84	0.127226	1.89	1.21	5.44	2.11
4.62	27.09	27.35	27.53	28.06	0.148972	3.27	1.25	6.57	2.68
4.62	24.87	24.72	24.95	25.51	0.107887		1.17	4.17	0.00
4.62	21.77	22.25	22.51	23.23	0.117254	4.41	1.07	4.53	2.63
4.62	20.12	20.45	20.58	20.93	0.098965	3.34	1.56	9.10	2.32
4.62	17.52	17.70	17.87	18.45	0.156323	2.40	1.23	6.93	2.52
4.62	14.95	15.62	15.81	16.26	0.077626	3.87	1.38	5.47	2.08
4.62	13.24	13.73	13.94	14.46	0.103826	3.78	1.22	4.96	2.43
4.62	11.57	11.77	11.91	12.29	0.112471	1.96	1.51	9.72	2.15
4.62	9.31	9.59	9.77	10.21	0.101837	2.28	1.34	6.01	1.97
4.62	7.79	7.95	8.08	8.36	0.075748	1.75	1.66	8.75	1.80
4.62	6.64	6.87	6.94	7.10	0.049311	2.19	2.32	16.00	1.62
4.62	6.14	6.36	6.37	6.47	0.019616	1.50	3.19	16.00	1.05
4.62	5.65	6.25	5.87	6.26	0.000577	0.51	9.44	16.00	0.21
4.62	5.60	6.12	6.12	6.22	0.012047	1.32	3.39	16.00	0.83
4.62	4.71	5.57	5.10	5.59	0.000811	0.69	6.96	10.17	0.25

4.62	4.56	5.56		5.58	0.000444	0.55	8.95	13.72	0.19
4.62	4.54	5.56		5.57	0.000263	0.42	11.27	15.82	0.15
4.62	3.77	5.56		5.57	0.000091	0.35	15.54	15.72	0.09
4.62	4.25	5.06	5.06	5.51	0.023345	2.02	1.60	1.79	0.74
4.62	3.91	4.80	4.82	5.06	0.017906	2.25	2.05	4.58	1.07

2.31	47.61	44.78	44.78	45.03	0.023834		1.04	2.10	0.00
2.31	45.49	43.84	43.84	44.06	0.022271		1.12	2.62	0.00
2.31	43.24	41.46	41.46	41.67	0.021639		1.14	2.81	0.00
2.31	40.84	39.31	39.61	40.56	0.231621		0.47	1.74	0.00
2.31	38.48	38.14	38.24	38.46	0.047518		0.92	3.46	0.00
2.31	32.36	31.59	31.93	35.46	1.351774		0.26	1.84	0.00
2.31	28.03	28.22	28.31	28.53	0.124562	2.65	0.98	10.26	2.41
2.31	22.67	21.55	20.95	21.61	0.003166		2.26	2.58	0.00
2.31	21.05	21.38	21.38	21.48	0.017290	1.14	1.75	9.57	0.90
2.31	19.27	18.54	18.80	20.28	0.552017		0.40	2.68	0.00
2.31	16.22	16.56	16.64	16.84	0.069177	2.94	1.09	8.72	1.81
2.31	14.17	14.38	14.48	14.85	0.147353	3.70	0.88	9.91	2.79
2.31	13.03	13.50	13.53	13.62	0.029102	1.79	1.55	10.09	1.24
2.31	10.72	10.69	10.85	11.91	0.718091		0.47	5.76	0.00
2.31	9.45	9.43	9.49	9.63	0.037529		1.24	10.15	0.00
2.31	8.07	8.04	8.14	8.39	0.115993		0.88	6.47	0.00
2.31	7.08	7.36	7.37	7.46	0.022033	1.59	1.71	10.76	1.10
2.31	6.80	6.93	6.94	7.00	0.023152	1.20	2.01	16.00	1.05

7.19	13.25	13.72	13.72	13.87	0.012965	1.82	4.50	15.83	0.94
7.19	12.85	13.48	13.23	13.52	0.001867	0.96	8.50	16.00	0.39
7.19	12.62	13.22	13.22	13.42	0.013801	1.52	3.77	9.74	0.91
7.19	11.47	12.84	12.24	12.87	0.000683	0.82	10.31	16.00	0.25
7.19	11.14	12.82		12.86	0.000828	0.93	10.31	16.00	0.26
7.19	12.37	12.67	12.67	12.81	0.010013	0.96	4.88	16.00	0.73
7.19	11.93	12.27	12.33	12.49	0.027710	1.75	3.67	16.00	1.24
7.19	11.66	11.98	11.98	12.12	0.016423	1.67	4.32	15.17	1.00
7.19	9.54	10.46	10.77	11.44	0.070132	4.39	1.64	3.36	2.01
7.19	9.38	10.56	10.29	10.62	0.002862	1.16	6.70	13.82	0.47
7.19	9.22	10.45	10.31	10.55	0.004406	1.41	5.61	11.45	0.57
7.19	9.53	10.25	10.25	10.39	0.015553	1.72	4.48	16.00	0.98

Résultats Après l'aménagement :

7.19	12.95	13.66	13.66	13.82	0.001514	1.95	4.51	13.84	1.81
7.19	12.78	13.53	13.25	13.57	0.000301	1.89	8.60	15.42	1.36
7.19	12.61	13.52		13.56	0.000233	1.87	8.28	14.78	1.32
7.19	12.44	13.20	13.20	13.52	0.002314	2.50	2.92	4.71	1.00
7.19	12.27	12.65	12.84	13.39	0.013291	4.14	2.08	9.35	2.24

7.19	12.10	12.85	12.56	12.89	0.000289	2.88	8.46	15.01	1.35
7.19	11.93	12.86		12.88	0.000119	2.63	11.38	15.59	1.23
7.19	11.76	12.52	12.52	12.84	0.002319	2.51	12.90	4.64	1.00
7.19	11.59	11.77	11.97	12.68	0.023681	3.54	1.81	10.19	2.73
7.19	11.19	11.56	11.80	12.38	0.014194	4.22	1.85	7.60	2.32
7.19	10.65	10.65	10.93	11.97	0.025399	4.31	1.41	4.95	2.35
7.19	10.12	10.37	10.59	11.32	0.027349	4.58	1.67	8.19	3.06
7.19	9.59	10.02	10.26	10.95	0.013347	4.43	1.87	8.91	2.28

7.19	12.95	13.45	13.66	14.17	0.008513	3.84	2.12	9.23	1.85
7.19	12.78	13.53	13.25	13.57	0.000301	2.89	8.60	15.42	1.36
7.19	12.61	13.52		13.56	0.000233	2.87	8.28	14.78	1.32
7.19	12.44	13.20	13.20	13.52	0.002314	2.50	2.92	4.71	1.00
7.19	12.27	12.65	12.84	13.39	0.013291	4.14	2.08	9.35	2.24
7.19	12.10	12.85	12.56	12.89	0.000289	1.88	6.46	15.01	1.35
7.19	11.93	12.86		12.88	0.000119	2.63	7.38	15.59	1.23
7.19	11.76	12.52	12.52	12.84	0.002319	2.51	7.90	4.64	1.00
7.19	11.59	11.77	11.97	12.68	0.023681	3.54	1.81	10.19	2.73
7.19	11.19	11.56	11.80	12.38	0.014194	4.22	1.85	7.60	2.32
7.19	10.65	10.65	10.93	11.97	0.025399	4.32	1.41	4.95	2.50
7.19	10.12	10.37	10.59	11.32	0.027349	4.58	1.67	8.19	3.06
7.19	9.59	10.02	10.26	10.95	0.013347	4.43	1.87	8.91	2.28

2.31	47.25	47.90	47.90	48.14	0.002871	2.15	1.07	2.30	1.01
2.31	41.43	41.85	42.37	47.42	0.247337	5.44	1.22	1.04	3.25
2.31	41.07	41.61	42.02	43.92	0.076064	5.73	0.34	1.27	3.14
2.31	40.89	41.48	41.85	43.12	0.048037	5.67	0.41	1.37	3.32
2.31	39.47	42.20	41.01	42.21	0.000048	2.40	5.72	3.01	1.12
2.31	39.23	42.20		42.20	0.000027	2.34	6.87	3.00	1.09
2.31	40.34	42.19		42.20	0.000071	2.44	5.19	3.78	1.16
2.31	41.29	41.94	41.94	42.18	0.002868	2.15	1.07	2.30	1.01
2.31	40.68	41.07	41.36	41.99	0.018439	4.24	0.54	1.78	2.45

2.31	59.70	60.50	60.50	60.75	0.003085	2.23	1.04	2.10	1.01
2.31	57.70	58.09	58.50	60.39	0.058973	5.71	0.34	1.28	3.13
2.31	55.70	56.06	56.50	58.96	0.080641	6.54	0.31	1.21	3.79
2.31	53.70	54.05	54.50	57.22	0.091037	5.89	0.29	1.19	3.28
2.31	51.70	52.04	52.50	55.34	0.095912	5.04	0.29	1.18	3.21
2.31	49.70	50.04	50.50	53.39	0.098133	6.11	0.28	1.18	3.27
2.31	47.70	48.04	48.50	51.42	0.099145	6.14	0.28	1.18	3.29
2.31	45.70	46.04	46.50	49.43	0.099602	6.15	0.28	1.18	3.30
2.31	43.70	44.04	44.54	47.43	0.099802	6.16	0.28	1.18	3.31
2.31	41.70	42.04	42.49	45.43	0.100017	6.16	0.28	1.18	3.31
2.31	40.75	41.13	41.62	43.57	0.063863	6.92	0.33	1.26	3.29
2.31	39.53	39.79	40.10	42.12	0.079125	6.75	0.34	1.84	3.00

