



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

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

Option: CONCEPTION DES OUVRAGES HYDROTECHNIQUES

THEME :

**Étude de protection de l'aéroport Rabah Bitat contre les
inondations d'oued Boukhmira (W. Annaba)**

Présenté par :

SOUALHI Abdenacer

Devant les membres du jury

Nom et Prénoms	Grade	Qualité
HEBBOUCHE Abdelhamid	M.C.A	Président
TOUMI Samir	M.C.B	Examineur
OSMANI El Hadi	M.A.A	Examineur
BOURI Djamel Eddine	M.C.A	Promoteur

Session novembre 2025

Remerciements

Au terme de ce travail, qui représente pour moi l'aboutissement de plusieurs années d'efforts et de persévérance, je souhaite tout d'abord exprimer ma profonde gratitude à Dieu le Tout-Puissant pour la force, la patience et les opportunités qu'Il m'a accordées. Je tiens aussi à remercier, du fond du cœur, toutes les personnes qui, de près ou de loin, m'ont soutenu, encouragé ou conseillé tout au long de ce parcours. Leur présence et leur bienveillance ont largement contribué à la réalisation de ce modeste mémoire.

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon encadrant, Monsieur **BOURI Djamel Eddine**, pour son orientation précieuse, ses conseils avisés, sa disponibilité et son accompagnement constant tout au long de ce travail.*

Je tiens également à adresser toute ma gratitude aux membres du jury pour l'honneur qu'ils m'accordent en acceptant d'évaluer ce travail et pour l'attention qu'ils voudront bien lui consacrer.

Je tiens à remercier du fond du cœur aussi : L'ensemble du personnel et enseignants de l'Ecole Nationale Supérieure de l'Hydraulique (ENSH), qui ont veillé à ma formation.

Dédicace

*Je dédie ce travail, du plus profond de mon cœur, en témoignage
d'amour, de respect et de gratitude :*

À mes chers parents :

*Yazid et Salima, pour leur soutien indéfectible, leur patience et leurs
sacrifices tout au long de mes études et de ce projet. Je leur dois ce que je
suis aujourd'hui et ce que je deviendrai demain. Je m'efforcerai toujours de
rester leur fierté et de ne jamais les décevoir. Que Dieu Tout-Puissant les
protège, leur accorde santé et bonheur, et les préserve de tout mal.*

À mes frères :

*Abdeslam et Mounir, vous êtes mes piliers, mes confidents et mes
repères à chaque étape de ma vie. Votre présence a toujours su me soutenir
et m'inspirer.*

À ma grande famille :

Soualhi et Meskache pour leur soutien.

À tous mes amis.

الملخص:

تتناول هذه المذكرة موضوع الحماية من الفيضانات لوادي بوخميرة، الذي يمر بمحاذاة المنطقة المطارية رابح بيطاط. المتواجدة بولاية عنابة بعد إجراء دراسة شاملة للخصائص الجغرافية والجيولوجية والمناخية لمنطقة الدراسة، تم القيام بتحليل هيدروليكي لتقدير تصريف الفيضان المئوي. كما تم إجراء نمذجة هيدروليكية باستعمال برنامج HEC-RAS لمحاكاة الجريان وتحديد المناطق المعرضة للغمر. وبناءً على النتائج المتحصل عليها، تمت مقارنة بديلين للتجهيزات الهيدروليكية، مما أتاح اختيار الحل الأكثر فعالية في تقليص خطر الفيضانات.

الكلمات المفتاحية: الفيضانات؛ وادي بوخميرة؛ مطار رابح بيطاط؛ الحوض المائي؛ التهيئة الهيدروليكية

Résumé :

Ce mémoire porte sur la protection contre les inondations de l'Oued Boukhmira, qui longe la zone aéroportuaire Rabah Bitat. Après la caractérisation géographique, géologique et climatique de la zone d'étude, une analyse hydrologique a permis d'évaluer le débit de crue centennal. Une modélisation hydraulique a ensuite été réalisée avec HEC-RAS pour simuler l'écoulement et identifier les zones inondables. Deux variantes d'aménagement ont été comparées, conduisant au choix de la solution la plus efficace pour réduire le risque d'inondation.

Mots-clés : inondations ; Oued Boukhmira ; Aéroport Rabah Bitat ; bassin versant ; aménagement hydraulique.

Abstract :

This thesis focuses on flood protection for Oued Boukhmira, which runs alongside Rabah Bitat airport area. A comprehensive characterization of the study area was carried out, covering its geographical, geological, and climatic features. A hydrological analysis was conducted to estimate the 100-year flood discharge. Subsequently, a hydraulic modeling using HEC-RAS was performed to simulate the flow and identify flood-prone areas. Based on the results obtained, two hydraulic development alternatives were analyzed and compared, leading to the selection of the most effective solution for flood risk reduction.

Keywords: floods; Oued Boukhmira; Rabah Bitat Airport; watershed; hydraulic development.

Table des matières

Introduction générale	13
Chapitre I : Historique des crues et des inondations en Algérie	16
I.1. Introduction	17
I.2. Aléa, enjeu et vulnérabilité :	17
I.2.1. Aléa :	17
I.2.2. Enjeu et vulnérabilité :	17
I.2.3. Risque :	18
I.3. Les inondations :	18
I.3.1. Définition :	18
I.3.2. Les différents types d'inondations	18
I.3.3. Historique des inondations en Algérie	20
I.4. Conclusion :	28
Chapitre II : Présentation de la zone d'étude	30
II.1. Introduction	31
II.2. Situation géographique et administrative de la wilaya de Annaba	31
II.2.1. Situation géographique :	31
II.2.2. Situation administrative :	31
II.3. Localisation de la zone d'étude	31
II.3.1. Présentation générale du bassin versant Boukhmira et ses affluents	31
II.3.2. Présentation de l'aéroport	32
II.4. Géologie	32
II.4.1. La géologie et la lithologie de la zone d'étude	33
II.5. Sismicité de la région d'étude	35
II.6. La climatologie	36
II.6.2. Vitesse de vent	37
II.6.3. Evaporation	39
II.6.4. Précipitations	39
II.7. Conclusion	40
Chapitre III : Etude hydrologique	41
III.1. Introduction	42
III.2. Analyse du bassin versant	42
III.2.1. Qu'est-ce qu'un bassin versant ?	42
III.2.2. Les caractéristiques du bassin versant	43

III.2.3. Etude du relief	46
III.2.4. Etude du réseau hydrographique.....	52
III.2.5. Pluviométrie	58
III.3. Etude des apports liquides	64
III.3.1. Formule de SAMIE	65
III.3.2. Formule de Maillet-Gauthier :.....	65
III.3.3. Formule de DERI	65
III.3.4. Etude des apports solides :	66
III.4. Etude des crues :	67
III.4.1. Formules empiriques pour le calcul du débit maximum probable :.....	68
III.4.2. Détermination des débits maximums fréquents par la méthode du GRADEX :	70
III.4.3. Hydrogramme de crue	74
III.4.4. Choix de la crue de projet :	78
III.5. Conclusion :	79
Chapitre IV : Modélisation du cours d'eau non aménagé	80
IV.1. Introduction :	81
IV.2. Généralités :	81
IV.2.1. Ecoulement à surface libre	81
IV.2.2. Types d'écoulements.....	82
IV.2.3. Régime d'écoulement.....	83
IV.2.4. Les canaux.....	84
IV.2.5. Dimensionnement des canaux.....	87
IV.3. Modélisation du cours d'eau non aménagé	89
IV.3.1. Modélisation de l'écoulement	89
IV.4. Conclusion	97
Chapitre V : Étude des variantes d'aménagement.....	98
V.1. Introduction	99
V.2. Calcul hydraulique des canaux	99
V.2.1. Choix des paramètres de dimensionnement.....	99
V.3. Étude de variantes	100
V.3.1. Première variante : Canal en gabion	101
V.3.2. Deuxième variante : Canal en béton armé	104
V.3.3. Comparaison entre les deux variantes de conception	108
V.4. Conclusion :	109
Chapitre VI : Organisation de chantier	110
VI.1. Introduction.....	111

VI.2. Rôles et responsabilités des intervenants sur chantier	111
VI.2.1. Le maître de l'ouvrage.....	111
VI.2.2. Le maître d'œuvre.....	111
VI.2.3. L'entrepreneur	112
VI.3. Installations du chantier.....	112
VI.3.1. Installations destinées au personnel.....	112
VI.3.2. Installations destinées au stockage des matériaux.....	113
VI.3.3. Installations destinées à la réparation des engins	114
VI.3.4. Installations pour la préfabrication	114
VI.4. Les moyens de chantier.....	114
VI.4.1. Les moyens humains	114
VI.4.2. Les moyens matériels	114
VI.5. Estimation du coût de la variante en béton armé	115
VI.6. Planification des travaux	116
VI.6.1. Techniques de la planification	116
VI.6.2. Délai de construction et programme des travaux.....	118
VI.7. Conclusion	119
Conclusion générale	120
Références Bibliographiques.....	122
ANNEXES	127

Table des figures

Figure I-1 : Aléa, enjeu et risque.....	18
Figure I-2 : Alger - Bab el Oued: (à la recherche de biens récupérables)	21
Figure I-3 : Skikda – inondations du 28 au 31/12/1984 (Les allées: évacuation des personnes à l'aide de zodiacs).....	22
Figure I-4 : Béchar : inondations du 10 Octobre 2008 (Débordement de l'oued Béchar)	23
Figure I-5 : Ghardaia: inondations du 01-10-2008 (Destruction massive causée par les eaux boueuses)	24
Figure I-6 : Inondation du 15 et 16 Février 1907	25
Figure I-7 : Inondation du 13 au 14/12/2005 (Plaine Ouest - débordement du canal de ceinture)	25
Figure I-8 : Inondation du 13 au 14/12/2005 (Entrée Boulevard Saf Saf)	26
Figure I-9 : Inondation du 13 au 14/12/2005 (Entrée Ouest - RN 44 et Cité Rym)	26
Figure I-10 : Illustrant l'inondation qui envahit la piste d'atterrissage de l'aéroport... ..	28
Figure I-11 : Illustration des traces de la crue affectant l'aéroport.....	28
Figure II-1 : Vue satellitaire de la zone d'étude	32
Figure II-2 Illustration du contexte Géologique de la région d'étude.....	34
Figure II-3 : Carte géologique de la basse plaine de la Seybouse et de la Mafragh D'après L. JOLEAUD (1933)	35
Figure II-4 : Carte de micro zonage sismique du territoire national (RPA 2024).....	36
Figure II-5 : Histogramme des températures moyennes mensuelles (station les Salines)	37
Figure II-6 : Fréquence des vents de la région d'Annaba (1978-2006)	38
Figure II-7 : Histogramme des valeurs mensuelles et annuelles de l'humidité relative à la station les Salines (1975-2006)	39
Figure II-8 : Répartition mensuelle de la pluie moyenne annuelle de la station les Salines	40
Figure III-1 : Schématisation d'un bassin versant	43
Figure III-2 : Carte hypsométrique du bassin versant d'oued Boukhmira	47
Figure III-3 : Répartition des surfaces et courbe hypsométrique du bassin de l'Oued Boukhmira.....	48
Figure III-4 : Réseau hydrographique du bassin versant d'oued Boukhmira.....	53
Figure III-5: Graphique de l'ajustement à la loi de GUMBEL.	60
Figure III-6 : Graphique de l'ajustement à la loi de log-normale (Galton).	61
Figure III-7 : Graphe représente ajustement graphique pour les pluies et droite d'extrapolation pour les débits (Laborde, 2000)	71
Figure III-8 : Résultat d'ajustement de la série pluviométrique de la station pluviométrique LES SALINES.....	73
Figure III-9 : Hydrogramme de crue de la zone d'étude par la méthode Skolovsky. ...	77

Figure III-10 : Hydrogramme de la crue de projet.....	78
Figure IV-1 : Schéma des écoulements permanents et non-permanents.	82
Figure IV-2 : Schéma démonstratif des différents types d'écoulements.....	83
Figure IV-3 : Canal naturel.....	84
Figure IV-4 : Canal artificiel.....	84
Figure IV-5 : Éléments géométriques du canal.....	85
Figure IV-6 : Éléments géométriques pour différentes sections de canaux artificiels. .	86
Figure IV-7 : Les sections transversales les plus utilisées.....	86
Figure IV-8 : Création d'un projet dans HEC-RAS.	90
Figure IV-9 : Définition du tracé de l'oued et des sections en travers	91
Figure IV-10 : Introduction du débit de projet.....	91
Figure IV-11 : Introduction des conditions aux limites.....	92
Figure IV-12 : Paramétrage du régime d'écoulement et exécution de la simulation. ...	92
Figure IV-13 : Vue en Plan en 3D de l'Oued.....	93
Figure IV-14 : Profil en long du cours d'eau à l'état naturel.....	93
Figure IV-15 : Profils en travers de certaines sections.	94
Figure IV-16 : Carte des profondeurs.....	97
Figure V-1 : Profil en long du cours d'eau après l'aménagement (variante 1).....	101
Figure V-2 : Profils en travers de l'oued après l'aménagement (variante 1).....	102
Figure V-3 : Profil en long du cours d'eau après l'aménagement (variante 2).....	105
Figure V-4 : Vue en plan en 3D de l'oued après l'aménagement.	105
Figure V-5 : Profils en travers de l'oued après l'aménagement (variante 2).....	106
Figure VI-1 : Relation entre les personnes du chantier	112
Figure VI-2 : Diagramme de GANTT.....	118

Liste des tableaux

Tableau I-1: Pluviométrie journalière enregistrée lors des inondations du 13 au 14/12/2005.	27
Tableau II-1 : Les Coordonnées et le Code de la station les Salines	37
Tableau II-2 : Répartition mensuelle des températures moyennes (1969-2012) de la station les Salines	37
Tableau II-3 : Vitesse moyennes annuelles des vents (m/s) à la station Les Saline (1975-2006).....	38
Tableau II-4 : Fréquence des vents de la région d'Annaba (1978-2006).....	38
Tableau II-5 : Les valeurs mensuelles et annuelles de l'humidité relative à la station les Salines (1975-2006).....	39
Tableau II-6 : Répartition mensuelle de la pluie moyenne annuelle de la station les Salines.....	39
Tableau III-1 : La forme du bassin par rapport à l'indice de compacité de Horton.....	44
Tableau III-2 : La forme du bassin par rapport à l'indice de compacité de Gravelius..	45
Tableau III-3 : Les paramètres hydro morphométriques du bassin versant de l'Oued Boukhmira.....	46
Tableau III-4 : Paramètres Hypsométriques du bassin versant d'Oued Boukhmira	47
Tableau III-5 : Caractéristiques altimétriques du bassin versant.	49
Tableau III-6 : Pente moyenne du bassin versant d'Oued Boukhmira.....	49
Tableau III-7 : Classification O.R.S.T.O.M du relief à partir de l'indice de pente global.	51
Tableau III-8: Classification des reliefs d'après l'O.R.S.T.O.M.....	51
Tableau III-9 : Résultats de calculs des pentes et la dénivelée spécifique du bassin versant de l'Oued Boukhmira	51
Tableau III-10 : Les résultats de calculs du temps de concentration obtenue par les différentes formules	56
Tableau III-11: Les valeurs centrales du temps de concentration.....	56
Tableau III-12: Les paramètres hydrographiques du bassin versant d'oued Boukhmira	57
Tableau III-13: les caractéristiques géomorphologiques du bassin versant d'Oued Boukhmira.....	57
Tableau III-14: Pluie maximales journalières (1969-2022).....	58
Tableau III-15: Les caractéristiques de la série pluviométrique	59
Tableau III-16: Résultats d'ajustement à la loi GUMBEL	59
Tableau III-17: Comparaison des caractéristiques de la loi de GUMBEL et de l'échantillon.....	60
Tableau III-18: Résultats d'ajustement à la loi log-normale (Galton)	60
Tableau III-19: Comparaison des caractéristiques de la loi de log-normal (GALTON) et de l'échantillon	61

Tableau III-20: Résultats de test d'adéquation khi 2 des lois d'ajustement.	62
Tableau III-21: Les pluies max journalières des périodes de retour	62
Tableau III-22: Pluies de courtes pour différentes périodes de retour.	63
Tableau III-23: Intensités des pluies de courtes durées pour différentes périodes de retour	64
Tableau III-24: Les apports liquides par des différentes méthodes empiriques	65
Tableau III-25: les valeurs de l'apport solide et de l'érosion spécifique.....	67
Tableau III-26: Résultats des débits maximums des formules empiriques pour différentes périodes de retours.	69
Tableau III-27: Résultats de l'ajustement pour différentes périodes de retours.	74
Tableau III-28: Valeur du coefficient de forme de l'hydrogramme de crue δ	75
Tableau III-29: Valeurs des débits de crues en fonction du temps.	75
Tableau III-30: Crues de projet recommandées.	78
Tableau IV-1 : Principaux paramètres hydrauliques pour l'ensemble des stations.....	95
Tableau V-1 : Pente adoptée pour chaque tronçon du cours d'eau	99
Tableau V-2 : Les valeurs du coefficient de rugosité 'n'	100
Tableau V-3 : Valeurs de vitesse moyenne limite d'érosion pour les lits consolidés (Degoutte, 2012).....	100
Tableau V-4 : Revanches utilisées (Degoutte, 2012)	100
Tableau V-5 : Caractéristiques géométriques et hydrauliques des canaux en gabion.	101
Tableau V-6 : Principaux paramètres hydrauliques du profil en travers	103
Tableau V-7 : Caractéristiques géométriques et hydrauliques des canaux en béton armé	104
Tableau V-8 : Principaux paramètres hydrauliques du profil en travers	106
Tableau V-9 : Comparaison technique entre les deux variantes	108
Tableau VI-1 : Devis quantitatif et estimatif de la variante en béton armé	116
Tableau VI-2 : Durée estimée des opérations principales du projet	118

Liste des planches

Planche N° 01 : LEVÉ TOPOGRAPHIQUE D'OUED BOUKHMIRA ;

Planche N° 02 : PROFIL EN LONG DE L'OUED BOUKHMIRA ;

Planche N° 03 : PROFIL EN TRAVERS D'OUED BOUKHMIRA ;

Planche N° 04 : PLAN DES ZONES INONDABLES D'OUED BOUKHMIRA.

Liste des abréviations

ANRH : Agence National des Ressources Hydriques ;

ONM : Office National Météorologique ;

BV : Bassin Versant ;

O.R.S.T.O.M : Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer ;

HEC-RAS : Hydrologic Engineering Center's River Analysis System ;

MNT : Modèle Numérique de Terrain ;

RPA : Règlement Parasismique Algérien.

Introduction générale

Introduction générale

Les inondations représentent l'aléa naturel le plus fréquent à l'échelle mondiale et touchent chaque année des millions de personnes [1]. Elles comptent également parmi les catastrophes les plus dévastatrices, tant en termes de pertes humaines que de dommages matériels et économiques [2]. Leur fréquence et leur intensité se sont nettement accrues au cours des dernières décennies, en raison notamment de l'urbanisation rapide et du changement climatique.

Dans les régions méditerranéennes, les crues soudaines sont particulièrement courantes. Elles sont généralement provoquées par des orages intenses et localisés [3]. La vulnérabilité des populations face à ces phénomènes est souvent aggravée par une gestion inadéquate de l'aménagement urbain et du territoire [4].

De récentes recherches confirment que le changement climatique constitue l'un des principaux facteurs de l'augmentation des événements hydrométéorologiques extrêmes à l'échelle mondiale [5]. Le bassin méditerranéen est identifié comme une zone particulièrement sensible à ces évolutions, où les inondations deviennent de plus en plus fréquentes et destructrices. Sa topographie, marquée par des reliefs escarpés et des bassins versants de faible superficie, favorise le déclenchement de crues rapides et violentes [6]. Ce risque est d'autant plus préoccupant dans les zones côtières densément peuplées, où se concentrent les infrastructures et les activités économiques [7].

Située au sud du bassin méditerranéen, l'Algérie se caractérise par un climat majoritairement semi-aride à aride, couvrant une grande partie de son territoire. Au cours des cinquante dernières années, le pays a connu plusieurs épisodes d'inondations soudaines et destructrices, particulièrement marquées dans les régions nordiques.

L'aéroport Rabah Bitat, dans la wilaya d'Annaba, est exposé à un risque notable d'inondations récurrentes. Ces phénomènes hydrauliques peuvent causer des dégâts considérables aux infrastructures aéroportuaires et perturber gravement la continuité de leurs services. Face à cette problématique, la présente étude vise à analyser les risques d'inondation associés à l'oued Boukhmira et à proposer des solutions d'aménagement adaptées pour assurer la protection durable des installations aéroportuaires.

Ce travail s'articule autour de six chapitres complémentaires :

- **Chapitre I :** Historique des crues et inondations en Algérie, et analyse de la relation entre l'aléa, les enjeux et la vulnérabilité ;
- **Chapitre II :** Présentation de la zone d'étude, de ses caractéristiques géographiques, géologiques et climatiques, ainsi que du bassin versant ;

- **Chapitre III** : Étude hydrologique – Analyse des caractéristiques morphologiques du bassin, des précipitations, des écoulements et des phénomènes de crue liés à l’oued Boukhmira ;
- **Chapitre IV** : Étude hydraulique – Modélisation du cours d’eau à l’état naturel et délimitation des zones inondables ;
- **Chapitre V** : Étude des variantes d’aménagement – Évaluation et modélisation des solutions proposées pour la protection contre les crues ;
- **Chapitre VI** : Organisation du chantier – Planification, logistique, gestion des ressources, estimation des coûts et durée d’exécution des travaux.

L’objectif fondamental de cette étude est de concevoir et de proposer des mesures d’aménagement hydraulique efficaces, fondées sur une analyse hydrologique et hydraulique rigoureuse, afin de réduire significativement la vulnérabilité du site étudié face aux inondations et de contribuer à une gestion durable du risque.

Chapitre I : Historique des crues et des inondations en Algérie

I.1. Introduction

Parmi les quatorze risques majeurs répertoriés par l'Organisation des Nations Unies (ONU), le risque d'inondation en Algérie figure parmi les dix identifiés sur le territoire national et mentionnés dans la loi n°04-20 du 25 décembre 2004, relative à la prévention des risques majeurs et à la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable [8]. Il se classe en deuxième position à l'échelle nationale, après les séismes et les risques géologiques, en raison de l'importance des pertes matérielles et humaines qu'il engendre.

Les inondations résultent d'une interaction multifactorielle impliquant à la fois des composantes naturelles et anthropiques, parmi lesquelles figurent les conditions topographiques, géologiques, hydrologiques et météorologiques. La concomitance de ces paramètres contribue de manière significative à l'accroissement de la probabilité d'occurrence et de la sévérité des crues.

Dans cette optique, la présente étude s'attache à décrire les principales caractéristiques de ce phénomène et à proposer des mesures de prévention et de mitigation adaptées afin de réduire la vulnérabilité des zones exposées.

I.2. Aléa, enjeu et vulnérabilité :

I.2.1. Aléa :

L'aléa désigne un phénomène naturel, indépendant de l'action humaine et imprévisible, dont la survenue et l'intensité varient de manière aléatoire (pluies, typhons, inondations, etc.). Dans le cas d'une inondation, ce terme renvoie au phénomène naturel à l'origine du sinistre. L'aléa inondation est établi en fonction :

- ✓ Des hauteurs d'eau sur le terrain naturel,
- ✓ Des vitesses d'écoulement,
- ✓ De sa probabilité d'occurrence ou période de retour.

L'exposition qualifie la susceptibilité ou non d'une population ou d'une infrastructure à subir un endommagement éventuel en lien avec un aléa. Cette population, ces bâtiments, ces infrastructures ou ces activités exposés constituent des enjeux [9].

I.2.2. Enjeu et vulnérabilité :

Les enjeux sont constitués de « L'ensemble des populations, des biens, des activités ainsi que des éléments du patrimoine culturel et environnemental exposés à un aléa ou susceptibles d'être impactés par des inondations ». Les enjeux identifiés sont les suivants :

- ✓ Les espaces urbanisés avec enjeux humains ou économiques (Centres urbains, Zones d'activité et zones industrielles, certaines zones d'urbanisation future, etc.)
- ✓ Les enjeux liés à la sécurité publique ou ERP (Etablissement Recevant du Public), définis en fonction de l'importance des populations exposées
- ✓ Autres enjeux : AEP, infrastructures, équipements, etc.

La vulnérabilité correspond au degré de sensibilité des populations et des activités situées dans une zone exposée à un aléa. Elle traduit et évalue l'ampleur des conséquences

prévisibles de cet aléa sur les enjeux concernés, tels que les dommages matériels ou l'interruption d'un service.

I.2.3. Risque :

Le risque peut être défini comme la combinaison de deux composantes qui sont l'aléa et l'enjeu [10]. D'après l'Institut Français de l'Environnement (IFEN), le risque est « associé à un aléa, qu'il soit d'origine naturelle ou anthropique, dont les effets prévisibles affectent un grand nombre de personnes, entraînent des dommages considérables et excèdent les capacités de réaction des autorités directement concernées » (IFEN, 2002).

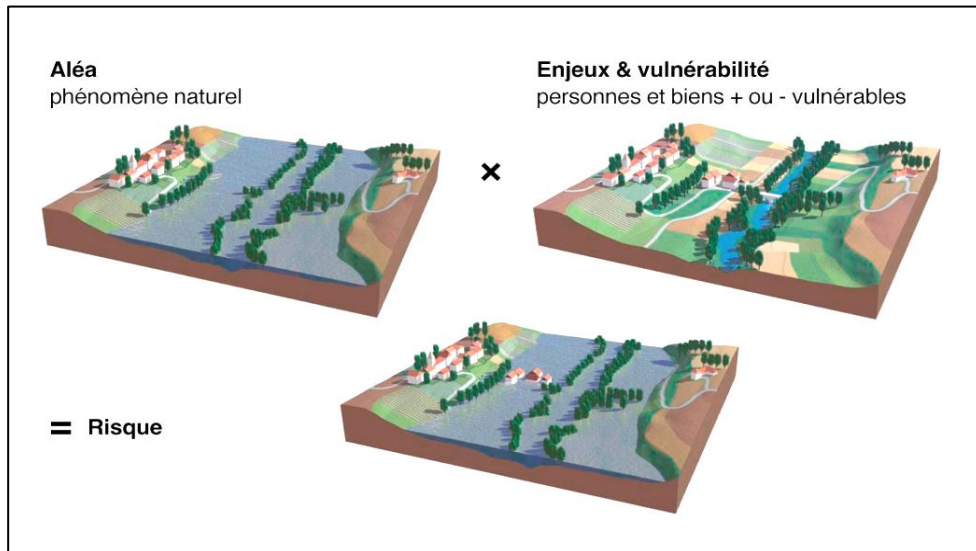


Figure I-1 : Aléa, enjeu et risque

I.3. Les inondations :

I.3.1. Définition :

L'inondation constitue l'un des principaux risques naturels à l'échelle mondiale et représente la catastrophe provoquant le plus de dommages. Elle se manifeste par la submersion, rapide ou progressive, d'une zone normalement non immergée, pouvant résulter de précipitations prolongées et/ou de forte intensité.

La crue est un phénomène naturel et saisonnier caractérisé par une élévation du niveau des eaux. Lorsqu'elle reste modérée, elle n'entraîne pas de perturbations significatives. Cependant, elle peut devenir dangereuse lorsque le débit et le volume d'eau dépassent la capacité du lit mineur, entraînant un débordement : on parle alors d'inondation. L'eau envahit alors les zones d'expansion des crues, correspondant au lit majeur du cours d'eau, souvent fortement urbanisées. Il est donc essentiel de distinguer clairement les notions de crue et d'inondation.

I.3.2. Les différents types d'inondations

Une inondation peut être caractérisée par son origine, la hauteur moyenne ou maximale de l'eau, l'étendue de la zone inondée et la durée de submersion (Glossaire International

d'Hydrologie, Association Internationale des Sciences Hydrologiques – AISH, Dictionnaire Français d'Hydrologie). Elle peut également résulter d'événements accidentels, tels que la rupture d'ouvrages hydrauliques, notamment les barrages et retenues collinaires, on distingue :

a- Les inondations de plaine

Elles résultent de crues lentes et progressives, survenant généralement après une période prolongée de précipitations, lorsque les sols sont saturés en eau, le plus souvent durant la saison des hautes eaux (hiver). Bien qu'elles ne représentent généralement pas une menace directe pour les vies humaines, sauf en cas d'imprudence, elles peuvent persister plusieurs semaines et engendrer d'importants dommages, tels que l'interruption des communications ou la détérioration des biens et des activités.

b- Les inondations dues à des crues torrentielles

Elles résultent d'une montée rapide et soudaine des eaux consécutive à des précipitations intenses. Leur prévision à plusieurs jours d'avance demeure difficile. Ces phénomènes affectent principalement les régions montagneuses et se caractérisent par leur caractère destructeur et meurtrier.

c- Les inondations par ruissellement

Ce type d'inondation résulte de pluies intenses ou d'infiltrations touchant les zones bâties dans le lit majeur. Dans les milieux urbanisés, l'imperméabilisation des sols empêche l'infiltration et favorise le ruissellement. L'eau s'accumule dans les points bas, saturant les réseaux d'évacuation. Cela entraîne la remontée par les égouts et la submersion des voies et constructions.

d- Les inondations par remontée de nappe

Le risque d'inondation associé à une crue peut être aggravé par la remontée du niveau des nappes phréatiques. Une élévation exceptionnelle du niveau de nappe entraîne une inondation par remontée de nappe. Ce phénomène est observé dans les zones de convergence des écoulements, où un substratum imperméable favorise l'émergence de l'eau en surface, formant des zones hydromorphes comme des étangs, mares temporaires ou marécages.

e- Inondations marines

Les débordements marins correspondent à des inondations temporaires des zones côtières provoquées par la mer sous l'effet de conditions météorologiques défavorables, telles que les fortes dépressions et les vents marins. Ils se traduisent par l'intrusion d'eaux salées particulièrement corrosives. Ce phénomène peut survenir lors d'un raz-de-marée ou d'un tsunami (rares mais dévastateurs), au cours d'une tempête accompagnée de vents violents et de fortes précipitations, ou encore à la suite d'une rupture des ouvrages de protection côtière, notamment dans les zones littorales basses et dépressionnaires.

I.3.3. Historique des inondations en Algérie

L'inventaire des inondations en Algérie pour la période 1969-2008 montre qu'aucune région n'est à l'abri de ce risque et que ces événements restent imprévisibles dans le temps et l'espace. Il apparaît également que de grandes inondations, provoquées par des pluies exceptionnelles sur de vastes bassins versants et affectant plusieurs régions, ont parfois atteint l'ampleur de catastrophes nationales, comme celles de l'automne 1968, de mars 1973 dans l'Est du pays, de 1974 dans les bassins de l'Algérois et de la Sebaou, ou encore de 1984 dans tout l'Est. Par ailleurs, les inondations urbaines par ruissellement, causées par des orages localisés en automne et en été, ont particulièrement touché les villes, avec en exemple les inondations du 10 novembre 2001, les plus meurtrières de l'histoire des inondations en Algérie.

L'analyse des différents épisodes pluvieux au nord de l'Algérie indique qu'en moyenne, 47% des inondations surviennent en automne, 30% au printemps, 21 % en hiver et 2% en été. [11]

- **Les inondations de Novembre 2001 à Alger**

Entre le 9 et le 11 novembre 2001, Alger (Bab el Oued) a été frappée par des pluies exceptionnelles totalisant 262 mm, dont 204 mm en seulement 24 heures, déclenchant l'une des inondations les plus catastrophiques de l'histoire de l'Algérie. Le bilan humain s'est élevé à plus de 700 morts, 115 disparus et plusieurs milliers de blessés. Les dégâts matériels (effondrement de bâtiments, coupures de routes et d'électricité, véhicules renversés, arbres et poteaux électriques arrachés, interruption des liaisons ferroviaires entre Alger et le reste du pays) ont été estimés à 30 milliards de dinars algériens (300 millions de dollars). Les pluies torrentielles, accompagnées de violentes rafales de vent et de coulées de boue (130 mm enregistrés à Bouzareah le matin du 10 novembre), ont entraîné des destructions telles que les autorités ont dû déclencher le plan ORSEC pour secourir les victimes, évacuer des milliers de familles et faire appel à la solidarité internationale.



Figure I-2 : Alger - Bab el Oued: (à la recherche de biens récupérables)

- **Les inondations de Décembre 1984 à Skikda :**

Les inondations de 1984 ont également été provoquées par des pluies abondantes et persistantes sur plusieurs jours. Les précipitations quotidiennes maximales ont atteint 137 mm à Zardezas, 97,6 mm à El Harrouch et 111,2 mm à Ramdane Djamel (archives de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques – ANRH). Ces pluies exceptionnellement intenses ont entraîné la montée puis le débordement des eaux de l'oued Saf Saf et de ses principaux affluents situés en aval du barrage.



Figure I-3 : Skikda – inondations du 28 au 31/12/1984 (Les allées: évacuation des personnes à l'aide de zodiacs).

- **Les inondations du Sud**

Des inondations, qu'elles soient localisées ou d'ampleur significative, ont également touché le Sud du pays, comme ce fut le cas dans les régions d'Illizi, Adrar et Tamanrasset en mars 2005, à Tindouf en février 2006, à Béchar en octobre 2007 et 2008, ainsi qu'à Ghardaïa en octobre 2008. [12]

À la suite de fortes intempéries durant plus de trois jours, entraînant la crue des oueds Mâadar, Zouzfana et Béchar, la wilaya de Béchar a subi d'importants dégâts le 18 octobre 2007. Outre deux victimes emportées par les eaux, les infrastructures essentielles ont été sévèrement touchées : lignes téléphoniques coupées, circulation automobile interrompue, routes bloquées à la suite de l'effondrement de plusieurs dalots et ponts, et infiltrations d'eau dans de nombreuses habitations. Moins d'un an plus tard, la ville a de nouveau été frappée par l'inondation du 10 octobre 2008, qui a causé la mort de huit personnes et des dégâts considérables. Cet événement constitue la plus grande inondation qu'ait connue Béchar depuis 1959.

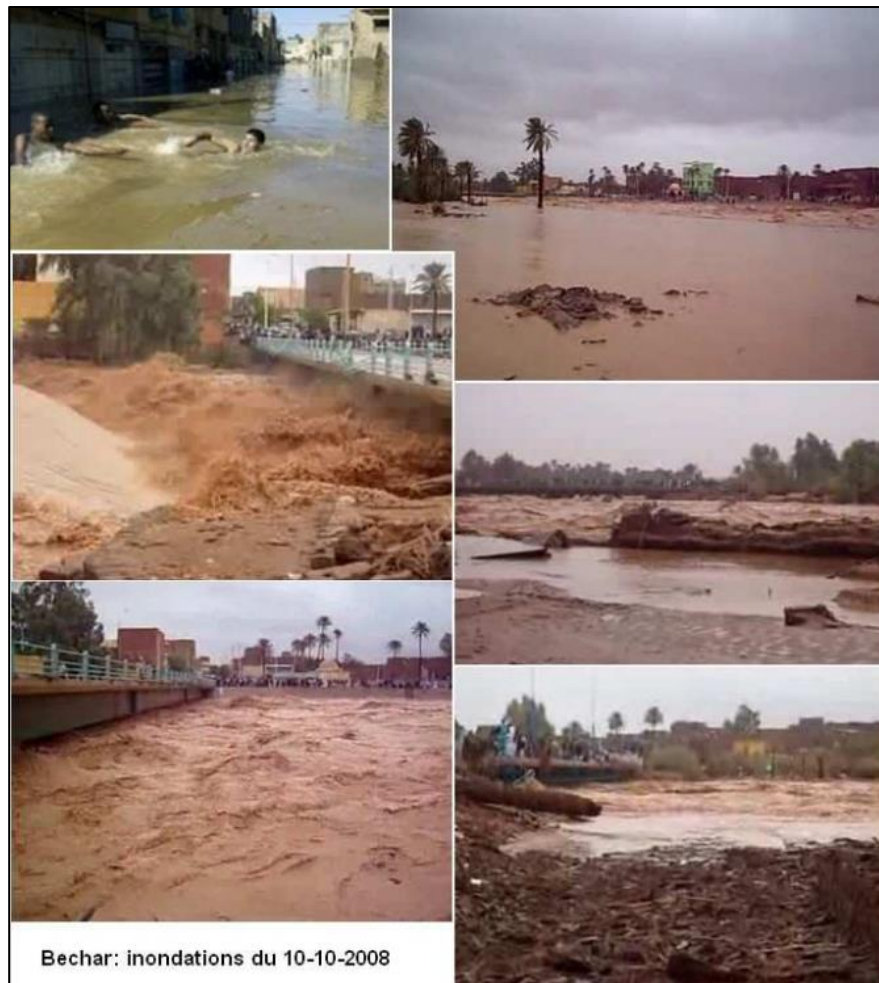


Figure I-4 : Béchar : inondations du 10 Octobre 2008 (Débordement de l'oued Béchar)

Dans la majorité des cas, la météorologie est un facteur déterminant dans la genèse des crues. En effet, ces inondations sont, en général, engendrées par des épisodes pluvieux généralisés (pluies orageuses) longs (plusieurs heures, voire plusieurs jours) ou spontanées ; vingt minutes seulement ont suffi aux pluies 'diluvienues' du 01-10-2008 pour causer la mort de plus de 34 personnes et transformer en ruines la vallée du M'zab à Ghardaïa Figure I-5, totalement inondée par des eaux boueuses Figure I-5. [13]



Figure I-5 : Ghardaia: inondations du 01-10-2008 (Destruction massive causée par les eaux boueuses)

- **Les inondations dans la ville de Annaba**

Les Annabis gardent en mémoire plusieurs épisodes hydrométéorologiques ayant provoqué d'importants dégâts humains et matériels. Bien que peu documentées, des inondations majeures ont été recensées en 1907, 1958, 1967, 1973, 1982, 1996 et 2005.

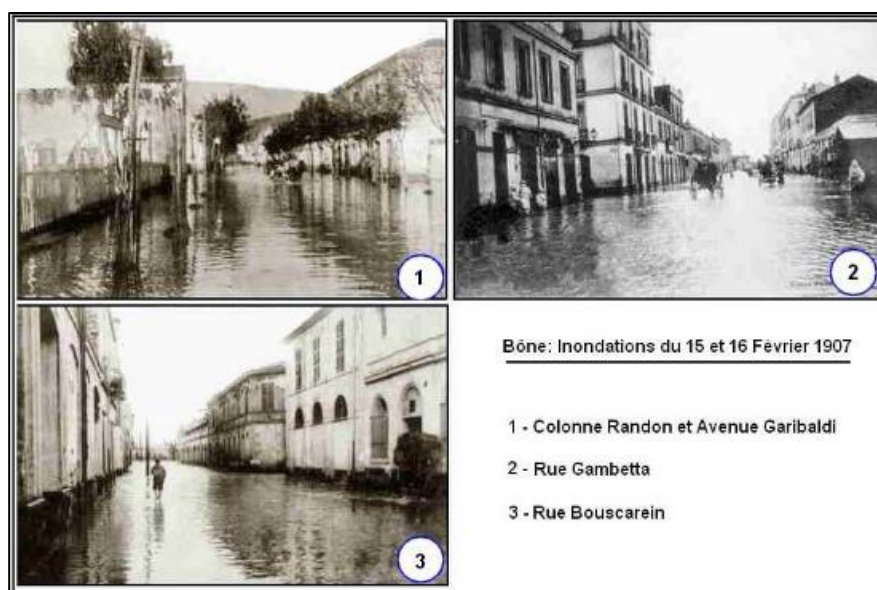


Figure I-6 : Inondation du 15 et 16 Février 1907



Figure I-7 : Inondation du 13 au 14/12/2005 (Plaine Ouest - débordement du canal de ceinture) (Source : Protection civile, 2005)



Figure I-8 : Inondation du 13 au 14/12/2005 (Entrée Boulevard Saf Saf) (Source : Protection civile, 2005)



Figure I-9 : Inondation du 13 au 14/12/2005 (Entrée Ouest - RN 44 et Cité Rym) (Source : Protection civile, 2005)

Les inondations les plus graves se sont produites en novembre 1982. Outre les 26 victimes, les dégâts matériels ont été considérables : de nombreuses baraques (gourbis) situées le long des oueds Sidi Harb et Forcha ont été emportées par les eaux. La crue a provoqué des

dommages si importants aux habitations et aux infrastructures de communication qu'ils étaient presque inestimables.

À Annaba, les crues majeures surviennent généralement entre octobre et avril et se distinguent par une durée de submersion prolongée, dépassant souvent deux jours. Le Tableau I-1 présente la répartition spatiale des précipitations enregistrées lors des inondations des 13 et 14 décembre 2005.

Tableau I-1: Pluviométrie journalière enregistrée lors des inondations du 13 au 14/12/2005.

Station	Date	Pluie (mm)	Observations
Annaba-les Salines	13/12/2005	61.5	-
Séraïdi	13/12/2005	135.9	-
Chaffia Barrage	13/12/2005	116.0	-
Lac des Oiseaux	13/12/2005	65.0	58.5 mm entre 18 :30 et 8 :45
Ain Berda	-	-	Non enregistrée
Guelma	13/12/2005	65.5	24.5 mm le 14/12/05
El Kerma	13/12/2005	5.5	25.3 mm le 12/12 et 32.5 mm le 14/12
Berrahal	13/12/2005	56.0	10.6 mm le 14/12/2005
Pont Bouchet	13/12/2005	8.7	61.8 mm le 12/12
Boukemouza	13/12/2005	104.5	-
Ain Charchar	13/12/2005	66.5	11.5 mm le 12/12/2005

Source : THESE-Beloulou-DEC-2008

En juin 2005, les pluies journalières maximales ont atteint une valeur importante de 104,5 mm, entraînant le débordement de l'oued Boukhmira dont le débit de crue a atteint 90,11 m³/s, provoquant d'importants dégâts.

Le plan d'eau s'élève et envahie sur les passages (pistes, maisons, champs), et particulièrement au niveau des pistes d'atterrissage (Aéroport **RabahBitat**), Figure I-10, qui sont dotées de canaux d'évacuation des eaux pluviales et qui déversent vers des ruisseaux naturels, d'autres créés et achèvent dans l'Oued Boukhmira. Ces derniers provoquent une inondation due particulièrement au retour des eaux de crues à l'intérieur de l'aéroport quand le niveau du plan d'eau augmente, et par suite engendre des submersions envahissent généralement les pistes d'atterrissages et ses terrains limitrophes.



Figure I-10 : Illustrant l'inondation qui envahit la piste d'atterrissage de l'aéroport

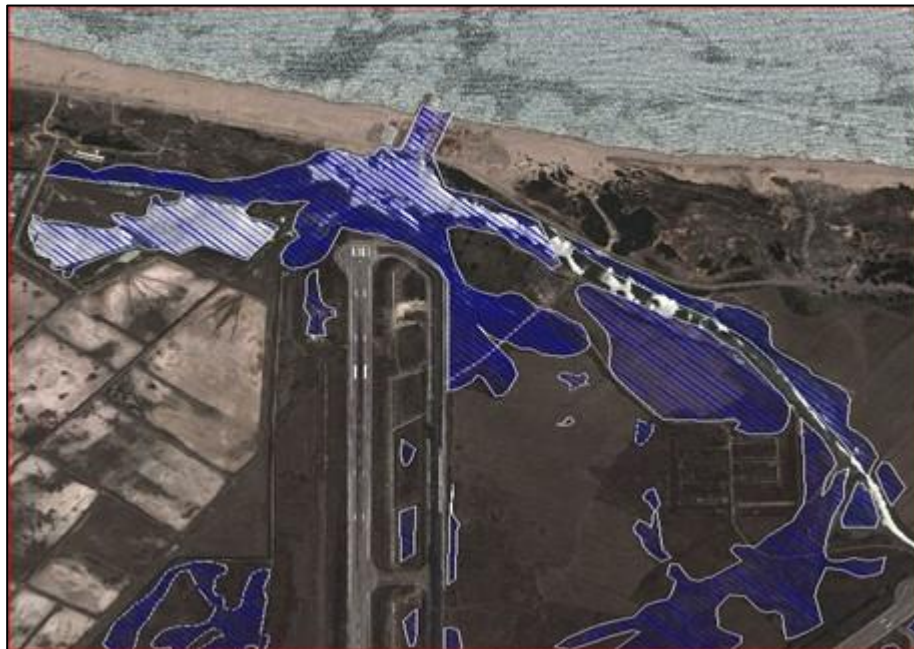


Figure I-11 : Illustration des traces de la crue affectant l'aéroport

Pour l'aéroport de Rabah Bitat, pris comme exemple, la vulnérabilité face aux inondations s'avère complexe. Elle résulte d'un ensemble de conditions et de mécanismes liés à des facteurs physiques, techniques, organisationnels et environnementaux, qui accentuent la fragilité de cette infrastructure face à ce type d'aléa. Comprendre cette vulnérabilité est fondamental pour prévenir les risques d'inondation, envisager des mesures de mitigation, et mettre en place des politiques et programmes d'intervention adaptés.

I.4. Conclusion :

Les crues, dont l'intensité varie dans le temps et dans l'espace, provoquent généralement peu de dommages en milieu naturel. En revanche, elles peuvent engendrer des conséquences imprévisibles et parfois catastrophiques en zone urbaine. Leur gestion demeure complexe et requiert une approche pluridisciplinaire, associant les aspects hydrologiques, hydrauliques,

urbanistiques et environnementaux, afin d'en identifier les causes et de mettre en œuvre des mesures de prévention et de protection efficaces.

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude

II.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation générale du bassin versant de la zone d'étude, dans le but de rassembler l'ensemble des informations nécessaires à la compréhension des mécanismes hydrologiques qui y interviennent. Les données géographiques, climatiques et géologiques présentées constituent une base essentielle pour la réalisation d'une étude de protection contre les inondations.

L'objectif principal est d'identifier la problématique spécifique du site, afin de proposer dans les chapitres suivants des solutions d'aménagement adaptées et cohérentes avec les caractéristiques du bassin versant.

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

II.2.1. Situation géographique

Annaba est une ville côtière de l'Est d'Algérie à 600 km d'Alger, 3ème ville principale après la capitale Alger, et Oran. Elle s'étend sur 1 439 km² avec 80 Km sur le littoral méditerranéen. La ville s'élève au fond d'une baie ouverte à l'est sur le golfe d'Annaba. Elle est dominée à l'ouest par la chaîne de montagne de l'Edough (1 008 m d'altitude). La wilaya d'Annaba est limitée :

- Au Nord par la Mer Méditerranée.
- A l'Est par la Wilaya d'El –Tarf.
- A l'Ouest par la Wilaya de Skikda.
- Au Sud par la Wilaya de Guelma.

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, elle abrite actuellement 831 070 habitants distribués sur 6 daïras regroupant 12 communes.

II.3. Localisation de la zone d'étude

II.3.1. Présentation générale du bassin versant Boukhmira et ses affluents

L'oued Boukhmira qui caractérise le secteur d'étude s'écoule sur un parcours de 25.41 km dans un bassin versant de 83.38 km² de surface et un périmètre de 65.86 km. L'oued s'inscrit dans un paysage de plaine, il prend sa source dans la localité de Belahmaren amant à 10 mètres d'altitude. Il pénètre dans une zone de marais, il poursuit son cours sur une dizaine de kilomètres pour rejoindre le côté droit des pistes d'atterrissage de l'aéroport Rabah Bitat, jusqu'à l'embouchure vers la mer méditerranéenne, à une altitude 0 mètres.



Figure II-1 : Vue satellitaire de la zone d'étude (Source : ARC-GIS)

La zone d'étude est située à l'aval de l'oued Boukhmira, entre la piste d'atterrissage de l'aéroport et la mer méditerranéenne.

II.3.2. Présentation de l'aéroport

L'aéroport international d'Annaba Rabah Bitat est situé à neuf kilomètres au sud de la ville d'Annaba (anciennement Bône sous l'Algérie française) et porte le nom de Rabah Bitat, ancien chef de l'État algérien. Il dispose de deux pistes : l'une en asphalte de 3 000 m de longueur, et l'autre en béton bitumineux de 2 290 m. Actuellement en rénovation pour répondre aux nouvelles normes du transport aérien, l'aéroport sera prochainement doté d'une nouvelle aérogare.

II.4. Géologie

Les couches superficielles et profondes du sol jouent un rôle crucial dans le processus d'écoulement, constituant la zone d'échange entre la surface terrestre et le débit mesuré à l'exutoire d'un bassin versant. En effet, la lithologie exerce une influence majeure sur le ruissellement, l'infiltration, l'érosion et le transport solide. Les formations géologiques se distinguent en matériaux meubles (sables, argiles, marnes) et en formations consolidées (grès, calcaires, dolomies, ect). La nature des affleurements conditionne directement l'hydrologie de surface ainsi que le type de dépôts alluvionnaires.

La connaissance de la géologie d'un bassin versant est essentielle pour comprendre l'influence des caractéristiques physiographiques. Le substratum géologique affecte non seulement l'écoulement des eaux souterraines, mais également le ruissellement de surface. Dans ce contexte, les éléments géologiques clés à considérer sont la lithologie (nature de la roche mère) et la structure tectonique du substratum. L'étude géologique d'un bassin versant

dans le cadre d'un projet hydrologique vise principalement à évaluer la perméabilité du substratum, qui conditionne la vitesse et le volume des crues ainsi que le soutien des débits d'étiage par les nappes souterraines. Un bassin à substratum imperméable connaît des crues plus rapides et plus intenses qu'un bassin à substratum perméable soumis à la même averse, ce dernier étant capable de retenir l'eau plus longtemps et de maintenir un débit de base en période de sécheresse. [14].

Dans cette partie, nous présentons brièvement les principales caractéristiques géologiques et lithologiques de la région étudiée, afin de mieux comprendre le contexte du site.

II.4.1. La géologie et la lithologie de la zone d'étude

La région étudiée se distingue par la présence de formations géologiques variées d'origine sédimentaire, métamorphique et magmatique, réparties sur les périodes Paléozoïque, Cénozoïque et Quaternaire, et regroupées en quatre grands ensembles tectoniques et structuraux.

L'échelle stratigraphique de ces terrains se répartit du Primaire au Quaternaire comme suit :

a- Le socle du Primaire

Affleure à l'ouest dans le massif de Edough, Belelieta et Bouhamra, constitué par des roches cristallophylliennes qui se superposent en trois séries :

- La série inférieure, constituée de gneiss riches en biotite et en sillimanite et présentant une épaisseur moyenne de 70 m, forme le noyau de l'anticlinal du massif de l'Edough.
- La série intermédiaire se distingue par des schistes et micaschistes riches en biotite, muscovite et grenat, parfois associés à des feldspaths visibles à l'œil nu. Elle comporte également des marbres intercalés au sein des micaschistes sous la forme de skarns.
- La série supérieure est composée d'un ensemble de gneiss œillés, de schistes satinés, de micaschistes à grenat et d'amphibolites.

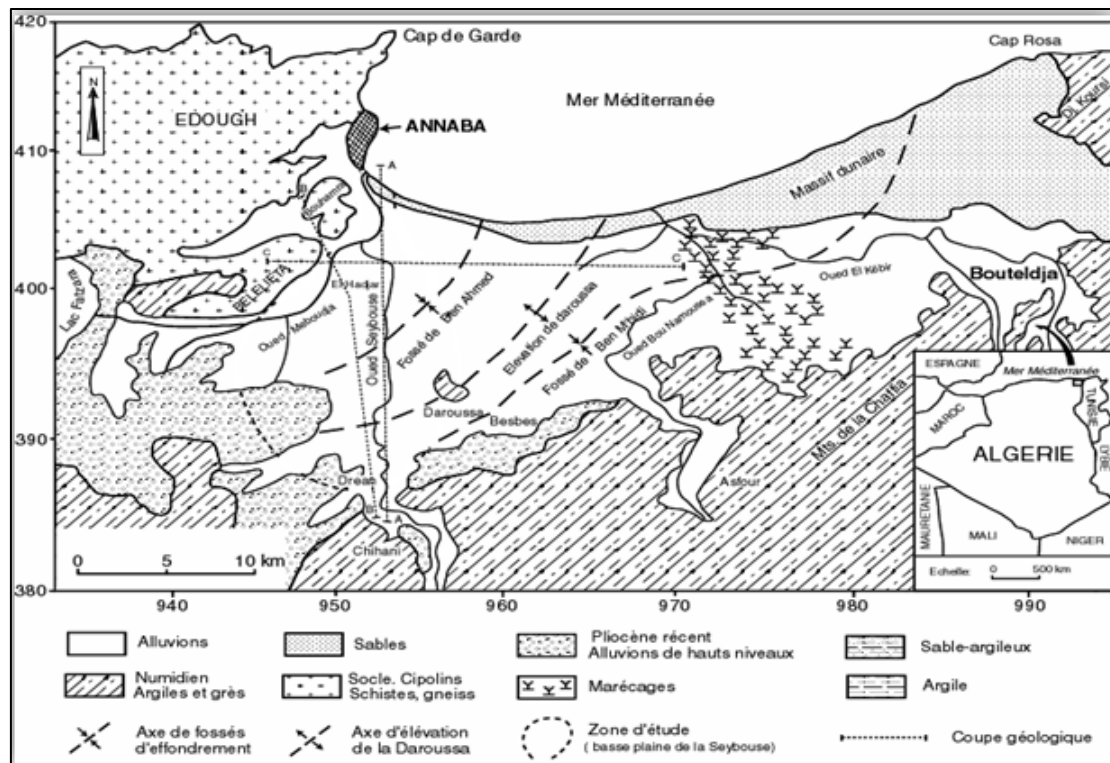


Figure II-2 Illustration du contexte Géologique de la région d'étude

b- Le Secondaire

A En dehors de la région étudiée, ces formations affleurent au sud, dans les secteurs de Guelma et Bouchegouf, à environ 20-50 km de la zone d'étude. Elles se répartissent en trois ensembles :

- Le Trias, constitué d'une association de dolomies, de calcaires dolomitiques et de gypse;
- Le Jurassique, représenté par des dolomies noires et des schistes calcareux ;
- Le Crétacé, formé de calcaires dolomitiques riches en foraminifères et en débris de rudistes.

c- Le Tertiaire

Présente une épaisseur importante dans la zone d'étude avec trois systèmes :

- L'Eocène inférieur : correspond à une série transgressive composée de calcaires massifs à faciès épinéritique.
- L'Oligocène est représenté par des niveaux argilo-gréseux numidiens formant le relief des montagnes situées au sud de la plaine d'Annaba, avec une épaisseur pouvant atteindre 150 m.
- Le Mio-Pliocène constitue le remplissage du bassin de la plaine d'Annaba, composé de formations graveleuses et sablo-argileuses d'origine continentale. Ces dépôts comprennent des horizons de graviers et des niveaux de travertins qui forment le réservoir de la nappe des graviers.

d- Le Quaternaire

Où L. Joleaud (1936) a distingué trois niveaux :

- Le Quaternaire ancien est formé de dépôts alluviaux composés d'argiles, de limons, de sables, de graviers et de galets, constituant la haute terrasse dont l'altitude varie entre 75 et 150 m.
- Le Quaternaire moyen correspond à la basse terrasse, située entre 20 et 50 m d'altitude, composée principalement d'argiles et de sables. Elle supporte des terres agricoles et s'étend sur l'ensemble de la région, notamment dans les vallées de l'oued Seybouse et de Boukhmira.
- Le Quaternaire récent est représenté par les sables des cordons dunaires littoraux ainsi que par les limons alluvionnaires de la plaine de Boukhmira.

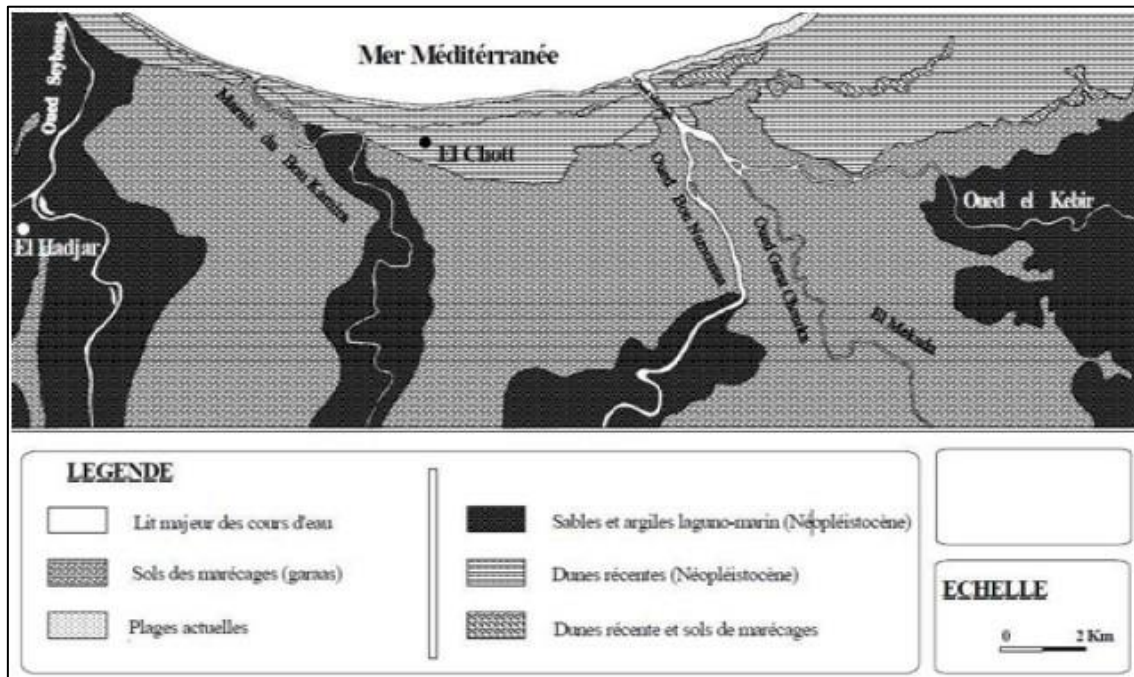


Figure II-3 : Carte géologique de la basse plaine de la Seybouse et de la Mafragh D'après L. JOLEAUD (1933)

Cette description géologique a fait apparaître que dans la zone d'étude, seules les formations du Mio-Pliocène et du Quaternaire peuvent constituer des réservoirs d'eau importants. Par contre, les formations du Primaire et celle du Tertiaire (Eocène inférieur et Oligocène), qui apparaissent à l'entourage du site, sont rarement exploitées.

II.5. Sismicité de la région d'étude

L'Algérie se situe dans une zone de convergence entre la plaque africaine et la plaque eurasiennne, ce qui en fait une région à forte sismicité. Cette instabilité tectonique engendre régulièrement des séismes, parfois très destructeurs. Les conséquences de ces secousses sont souvent lourdes, provoquant des pertes humaines significatives, des dégâts matériels considérables et affectant durablement les infrastructures et le tissu socio-économique local.

Les séismes de Chlef du 10 octobre 1980 à l'instar de celui de Boumerdès le 21 Mai 2003 continue de peser sur les dépenses publiques et locales. Et pour pouvoir éviter le phénomène,

la construction des ouvrages doit se faire de telle sorte à leur garantir une protection tolérable en répondant, surtout, aux Règles Parasismiques Algériennes (RPA).

En Algérie, le Règlement Parasismique Algérien (RPA 1999, version 2003) a intégré dans ses prescriptions deux types de secousses sismiques possibles : un séisme majeur et un séisme modéré. Il y est également prévu une classification des ouvrages en trois groupes d'usage, selon leur importance décroissante pour la vie économique et sociale de la collectivité, allant du groupe 1 (ouvrages à importance vitale) au groupe 3 (ouvrages ordinaires).

Le territoire national est divisé en sept (07) zones de sismicité croissante, définies sur la carte de zonage sismique Figure II-4.

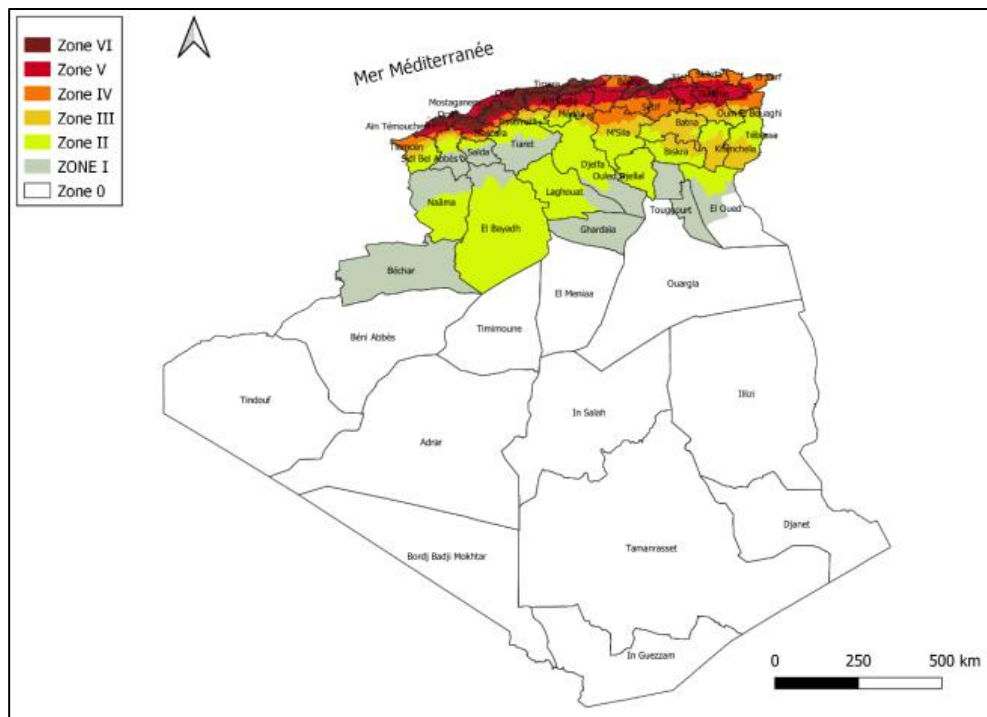


Figure II-4 : Carte de micro zonage sismique du territoire national (RPA 2024)

L'activité sismique est due principalement à la nature géologique de la région et aux mouvements tectoniques permanents à la frontière des plaques africaines et eurasiennes.

Selon les règles parasismiques Algériennes de 2024 établies par le ministère de l'Habitat et des Constructions, la région d'étude est classée « **Zone (4)** », caractérisée par une activité sismique moyenne.

II.6. La climatologie

La quantification des composantes climatiques représente une étape essentielle dans toute étude hydrologique ou dans toute analyse des potentialités d'une région donnée. En effet, les facteurs climatiques exercent une influence majeure sur les processus d'érosion, notamment les précipitations et leur répartition dans l'espace et dans le temps, les températures et leurs fluctuations, ainsi que l'effet de l'humidité de l'air et de l'évaporation.

L'objectif de l'étude climatologique est de fournir les données concernant le climat. La zone d'étude se situe à la côte de la mer Méditerranée, elle est caractérisée par un climat de type méditerranéen.

Pour les données pluviométriques et climatologiques, nous nous sommes basés sur les observations faites au niveau d'une station météorologique située dans le bassin versant d'oued Boukhmira, celle de Les Salines, qui est la plus crédible vu son emplacement par rapport à notre site d'étude et sa série complète allant de 1969 jusqu'en 2022 (54 années d'observation sans lacune), gérées par l'O.N.S.

Tableau II-1 : Les Coordonnées et le Code de la station les Salines

Station	Code de la station	Coordonnées		
		X	Y	Z
Les salines	14-06-24	955.80	403.80	3.00

II.6.1.1 Températures

La température joue un rôle déterminant dans l'étude de l'évaporation et de l'évapotranspiration. D'après la station Les Salines (1969-2012), les valeurs de la température sont consignées dans le tableau ci-dessous :

Tableau II-2 : Répartition mensuelle des températures moyennes (1969-2012) de la station les Salines

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fer	Mar	Avr	Mai	Juin	juil	Aou	Moy Ann
T (°C)	23.15	19.43	15.38	12.29	11.19	11.48	12.86	14.90	18.10	21.79	24.26	30.18	17.92

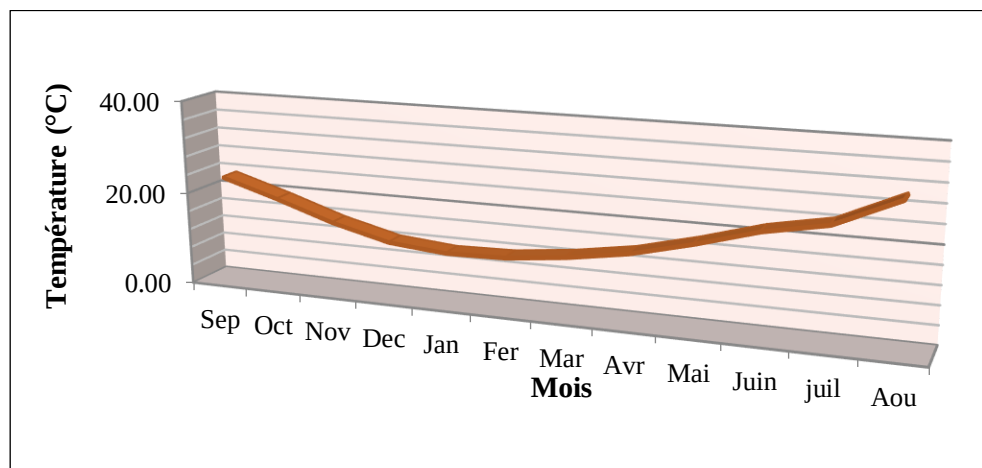


Figure II-5 : Histogramme des températures moyennes mensuelles (station les Salines)

D'après l'histogramme des températures moyennes mensuelles Figure II-5 : Histogramme des températures moyennes mensuelles (station les Salines) le mois de Janvier est le plus froid (11.19°C), alors que le mois d'Août est le plus chaud (30.18°C)

II.6.2. Vitesse de vent

Le vent est l'un des éléments les plus déterminants des régimes pluvieux, de l'évaporation et, par conséquent, du climat. Dans notre zone d'étude, les vents dominants sont

de direction Nord et Nord-Ouest, avec des vitesses moyennes variant entre 2,9 et 3,45 m/s. Ces vents, en contact avec le massif de l'Edough et la barrière montagneuse du Sud, déversent des pluies au passage.

Tableau II-3 : Vitesse moyennes annuelles des vents (m/s) à la station Les Saline (1975-2006)

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fer	Mar	Avr	Mai	Juin	juil	Aou	MoyAnn
V (m/s)	3.04	2.9	3.05	3.45	3.31	3.3	3.3	3.24	3.02	3.03	3.18	3.13	3.16

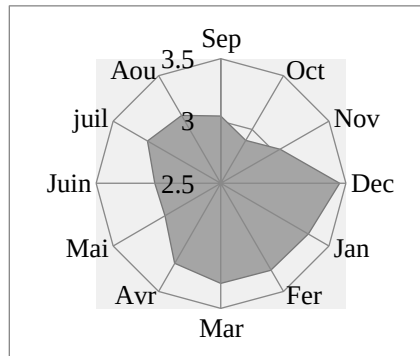


Figure II-6 : Graphe de la vitesse moyennes annuelles des vents (m/s) à la station Les Saline (1975-2006)

L'analyse statistique des données a permis de déterminer la fréquence du vent, dont les résultats sont synthétisés dans le tableau suivant.

Tableau II-4 : Fréquence des vents de la région d'Annaba (1978-2006)

Direction des vents	Fréquence (%)
Nord (N)	29.7
Nord-Est (N.E)	8.6
Est (E)	2.5
Sud-Est (S.E)	15.9
Sud (S)	10.4
Sud-Ouest (S.W)	0.4
Ouest (W)	26.5
Nord-Ouest (N.W)	5.9

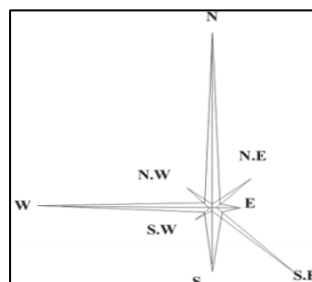


Figure II-6 : Fréquence des vents de la région d'Annaba (1978-2006)

II.6.3. Evaporation

L'évaporation constitue l'une des composantes clés du cycle hydrologique, et son analyse est indispensable pour l'élaboration du bilan hydroclimatique d'un bassin versant.

D'après la station Les Salines, les valeurs mensuelles et annuelles de l'humidité relative ont une moyenne annuelle de l'ordre de 74,66 % sur une période d'observation de 31 ans (1975-2006).

Tableau II-5 : Les valeurs mensuelles et annuelles de l'humidité relative à la station les Salines (1975-2006)

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fer	Mar	Avr	Mai	Juin	juil	Aou	Moy Ann
H%	72.42	74.70	76.42	77.20	78.16	77	75.45	74.65	75.03	72.83	70.18	71.86	74.66

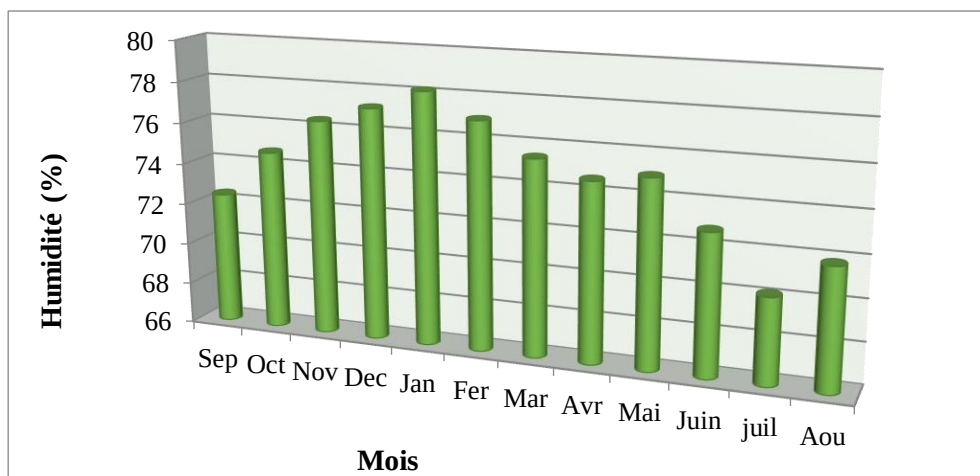


Figure II-7 : Histogramme des valeurs mensuelles et annuelles de l'humidité relative à la station les Salines (1975-2006)

Elle atteint son minimum en mois de juillet avec une valeur de 70,18 % et un maximum au mois de janvier avec une valeur de 78,16 %.

II.6.4. Précipitations

Les précipitations correspondent à l'eau d'origine atmosphérique qui tombe sur la surface terrestre sous forme liquide (pluie) ou solide (neige, grêle), et représentent l'une des principales composantes du cycle hydrologique.[15]

La station météorologique Les Salines servira de référence, compte tenu de sa situation auprès de la zone d'étude, où les données se répartissent sur une durée de 54 ans sans lacune (1969-2022).

Tableau II-6 : Répartition mensuelle de la pluie moyenne annuelle de la station les Salines

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Annuel
$\bar{P}_{moy}$ (mm)	38.65	68.01	80.71	103.01	89.65	76.78	69.11	58.38	40.82	13.80	3.07	9.01	651.00
$\bar{P}_{moy}$ (%)	5.94	10.45	12.40	15.82	13.77	11.79	10.62	8.97	6.27	2.12	0.47	1.38	100.00

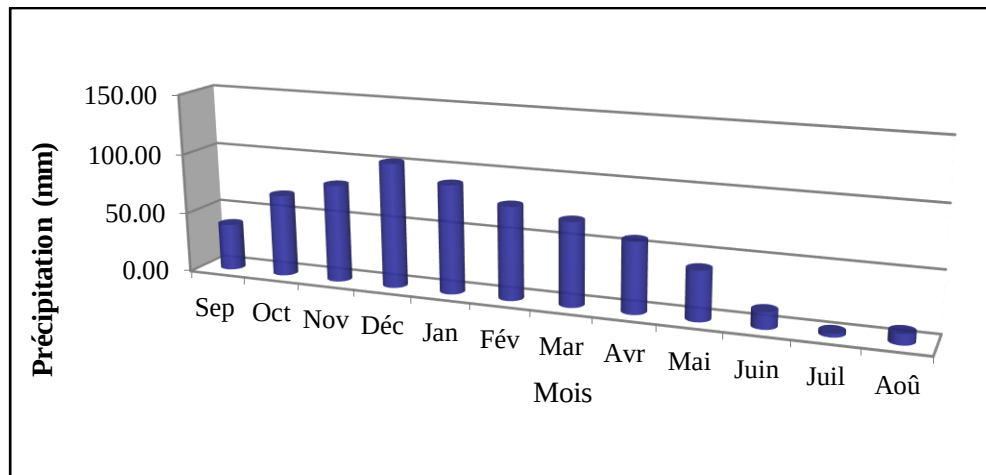


Figure II-8 : Répartition mensuelle de la pluie moyenne annuelle de la station les Salines

II.7. Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les principales caractéristiques géographiques, climatiques et géologiques du bassin versant étudié. Ces informations constituent une base essentielle pour comprendre le fonctionnement hydrologique de la zone et les mécanismes à l'origine des inondations potentielles. L'ensemble de ces éléments servira de référence pour la modélisation hydrologique et l'analyse des crues, qui feront l'objet du chapitre suivant.

Chapitre III : Etude hydrologique

III.1. Introduction

L'hydrologie est la science qui étudie le cycle de l'eau dans l'environnement, depuis son évaporation à la surface terrestre jusqu'à son retour sous forme de précipitations et d'écoulements. Bien qu'elle soit une discipline scientifique à part entière, l'hydrologie revêt également un rôle appliqué majeur, en fournissant les méthodes et outils nécessaires à la résolution de problèmes concrets tels que l'évaluation des ressources en eau et l'estimation des risques hydrologiques, notamment ceux liés aux inondations. [14]

Elle s'intéresse aux échanges d'eau entre l'atmosphère, la surface terrestre et le sous-sol, à travers des processus tels que les précipitations, l'évaporation, l'infiltration et la transpiration des végétaux. Ces échanges contrôlent la répartition et la disponibilité de l'eau sur le globe.

L'hydrologie de surface, plus spécifiquement, se focalise sur l'étude du ruissellement, des phénomènes d'érosion, du comportement des cours d'eau et des crues, qui peuvent conduire à des inondations. La compréhension de ces processus est indispensable pour la gestion rationnelle des ressources hydriques et la prévention des risques hydrologiques dans les zones exposées.

III.2. Analyse du bassin versant

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

Le bassin versant, également désigné sous le terme de bassin d'alimentation, est défini, pour une section de mesure donnée, comme l'ensemble de la surface topographique contribuant au drainage d'un cours d'eau principal et de ses affluents situés en amont de ladite section. L'ensemble des écoulements produits au sein de cette aire de drainage converge vers la section considérée avant de s'écouler vers l'aval.

Chaque bassin versant est délimité par une ligne de partage des eaux, tracée à partir des cartes topographiques. À partir de l'exutoire, cette limite est dessinée manuellement en reliant, perpendiculairement aux courbes de niveau, les points situés sur les crêtes, jusqu'à revenir à l'exutoire.

La transformation de la pluie en écoulement superficiel passe par l'intermédiaire du bassin versant. Ce dernier est défini comme «la région qui reçoit les précipitations et, suite aux processus hydrologiques entraînant pertes et retards, les achemine jusqu'à un exutoire" (OMM, 1996).

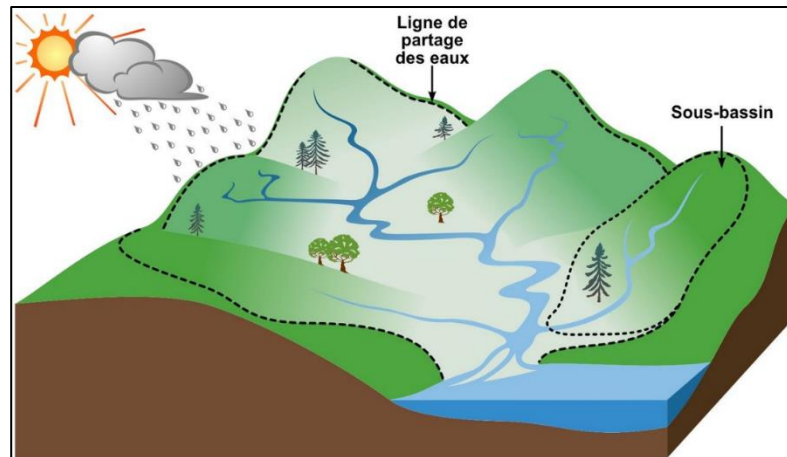


Figure III-1 : Schématisation d'un bassin versant

III.2.2. Les caractéristiques du bassin versant

Dans toute étude hydrologique, il est indispensable de définir dès le début les divers paramètres géométriques du bassin (surface, périmètre), ainsi que les caractéristiques morphométriques comme sa forme, son altitude moyenne et sa pente.

III.2.2.1 Caractéristiques géographiques du bassin versant

Le bassin versant de la zone d'étude est situé dans le grand bassin versant Cotiers Constantinois, identifié sous le code 03 par l'A.N.R.H, et appartient au sous-bassin n° 17. Il est situé entre 63°40'05" et 63°50'52" de latitude nord, et 7°45'32" et 7°51'37" de longitude est.

Les coordonnées UTM (Zone 32) de l'exutoire sont les suivantes :

Longitude : $X = 955.757 \text{ m}$

Latitude : $Y = 405.869 \text{ m}$

L'altitude : $Z = 0 \text{ m}$.

III.2.2.2 Caractéristiques physiographiques

Les caractéristiques physiographiques et géomorphologiques d'un bassin versant présentent une importance déterminante dans l'analyse hydrologique, dans la mesure où elles conditionnent, de manière souvent interdépendante, les mécanismes régissant l'écoulement superficiel. Ces paramètres physiques influencent de façon significative la dynamique hydrologique du bassin, notamment le régime des écoulements en période de crue et d'étiage.

Le comportement hydrologique d'un bassin versant est influencé par les facteurs physiographiques suivants :

a- Caractéristiques morphologiques

- **Surface et Périmètre**

L'aire d'un bassin versant représente la surface plane délimitée par la ligne de crête, également appelée contour du bassin s'exprime généralement en kilomètres carrés (km²). Le périmètre correspond à la longueur de cette ligne de contour, mesurée avec un curvimètre et

exprimée en kilomètres (km). Pour certaines applications on trace le périmètre stylisé du bassin en lissant son contour.

Le bassin de l'oued Boukhmira couvre une superficie de **83.38 km²** délimitée par une ligne de partage des eaux représentant son périmètre qui est évalué à **65.86 km** (selon les mesures effectuées à l'aide du logiciel ArcGIS).

- **La longueur du thalweg principal**

La longueur du thalweg (cours d'eau principal) est la distance curviligne entre l'exutoire et la ligne de partage des eaux, suivant le segment d'ordre le plus élevé. En cas d'embranchement de même ordre, on suit le segment drainant la plus grande surface. Elle s'exprime en kilomètres.

Autrement dit, c'est la distance mesurée le long du cours d'eau principal depuis l'exutoire jusqu'à la ligne des partages des eaux d'un bassin versant.[16]

La longueur du thalweg principal à pour valeur : **L_{cp} = 25.41 Km**.

b- Caractéristiques géométriques

- **Indice de compacité de Horton (KH)**

L'indice de compacité de Horton exprime le rapport de la largeur moyenne du bassin versant à la longueur du cours d'eau principal. Il se calcule par la relation :

$$K_h = \frac{S}{L^2} \quad \text{III-1}$$

Avec :

K_h : Indice de compacité de Horton ;

S : Aire totale du bassin de drainage (km²) ;

L : Longueur du cours d'eau principal (km).

Tableau III-1 : La forme du bassin par rapport à l'indice de compacité de Horton

K_h	La forme du bassin
$K_h < 1$	Bassin de forme allongée
$K_h > 1$	Bassin de forme ramassée

- **Indice de compacité de Gravelius :**

L'indice de compacité (K_c) renseigne sur la forme du bassin versant qui a une grande influence sur l'écoulement global du cours d'eau et surtout sur l'allure de l'hydrogramme à l'exutoire du bassin, résultant d'une pluie donnée. Il est établi en comparant le périmètre du bassin à celui d'un cercle qui aurait la même surface. Il s'exprime par la formule suivante (ROCHE, 1963) :

$$K_c = \frac{P}{2\sqrt{\pi S}} \quad \text{III-2}$$

Où :

P : périmètre du bassin versant en Km

S : Surface du bassin versant en Km²

D'après la formule de Kc on distingue trois cas

Tableau III-2 : La forme du bassin par rapport à l'indice de compacité de Gravélius

Kc	La forme du bassin
Kc = 1	Bassin compacte
1 < Kc < 1.3	Bassin moins compacte
Kc > 1.3	Bassin allongé

Plus le Kc est grand, plus le bassin est allongé, plus le temps de concentration est élevé, et la crue sera moins violente. Donc, l'indice de compacité est proportionnellement lié au temps de concentration Tc.

Dans notre cas le bassin versant est caractérisé par un Kc = 2 > 1.3, alors il est de forme relativement allongée.

- **Rectangle équivalent :**

Cette notion traduit une transformation géométrique dont laquelle on assimile le bassin versant a un rectangle équivalent ayant le même périmètre et la même superficie. Il permet de comparer les bassins versants entre eux du point de vue de l'écoulement.

En utilisant le coefficient de compacité, M.Roche a établi des relations donnant la longueur et la largeur d'un rectangle équivalent représentatif du bassin versant :

Soit : L et l les côtés du rectangle équivalent (respectivement Longueur et largeur).

On a les relations suivantes :

$$L, l = \frac{Kc\sqrt{S}}{1,12} \left[1 \pm \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{Kc} \right)^2} \right] \quad \text{III-3}$$

Avec :

Kc : Indice de compacité ;

S : superficie du bassin versant en Km².

- **Coefficient d'allongement :**

$$Ca = \frac{L_{cp}^2}{S} \quad \text{III-4}$$

Tel que :

L_{cp} : La longueur du talweg principal (Km) ;

S : La surface du bassin versant (Km²).

Tableau III-3 : Les paramètres hydro morphométriques du bassin versant de l'Oued Boukhmira

Désignation		Symbole	Unités	Valeur
Superficie		S	Km ²	83.38
Périmètre		P	Km	65.86
Indice de compacité de Gravelius		KC	/	2.0
Longueur du thalweg principal		Lp	Km	25.41
Coefficient d'allongement		Ca	/	7.74
Indice de compacité de Horton		Kh	/	0.02
Rectangle équivalent	Longueur	L	Km	29.91
	Largeur	l	Km	2.79

III.2.3. Etude du relief

III.2.3.1 Paramètre du relief

Le relief a une énorme influence sur la forme de l'hydrogramme de crue. Une forte pente provoque un écoulement plus rapide, donc un temps de concentration plus court, d'où une montée de crue plus rapide. L'importance de son étude est caractérisée par la répartition altimétrique du terrain, définie par une courbe appelée « courbe hypsométrique ».

- **La courbe hypsométrique :**

La courbe hypsométrique reste l'outil graphique par excellence [17] : elle exprime l'aire planimétrique des tranches d'altitude en fonction de la surface relative du bassin. Elle permet ainsi de révéler l'évolution structurale d'un bassin, et elle donne un bon résumé des distributions altimétriques et topographiques [18].

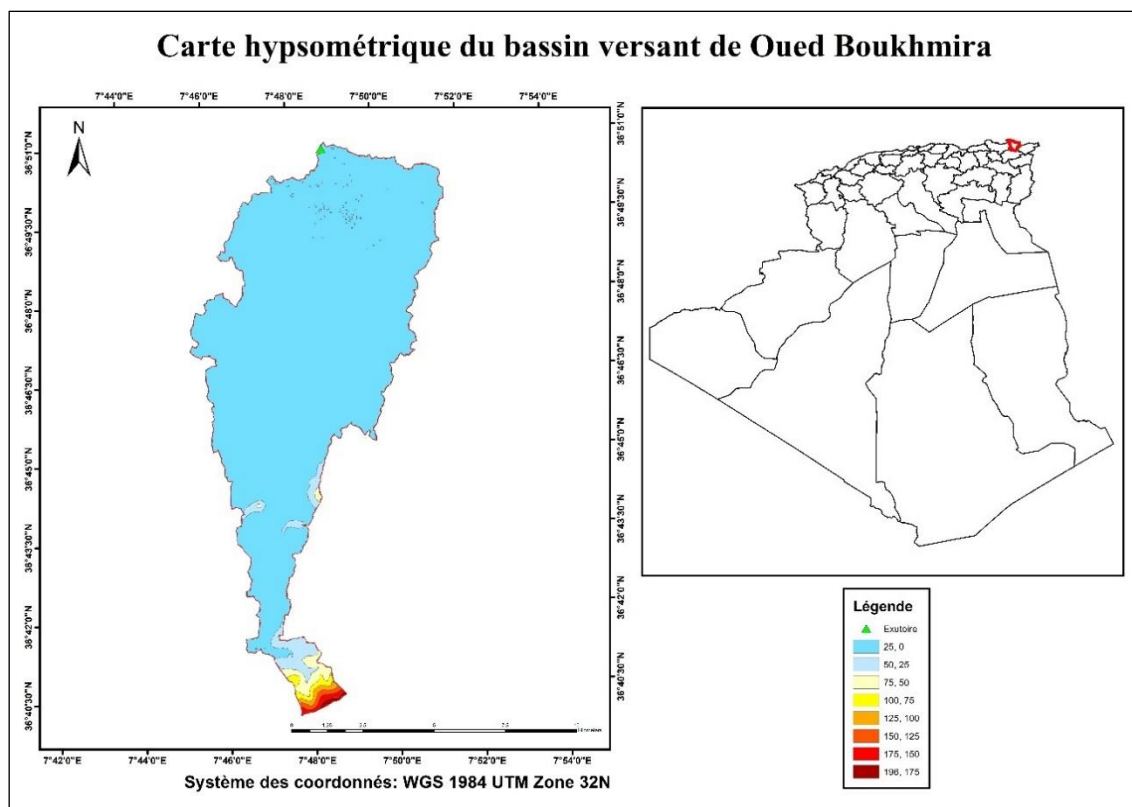


Figure III-2 : Carte hypsométrique du bassin versant d'oued Boukhmira

La répartition des surfaces élémentaires et leurs cumule en fonction des altitudes ont été obtenues avec logiciel ArcGIS. Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau III-4 : Paramètres Hypsométriques du bassin versant d'Oued Boukhmira

Altitude (m)	Hi (m)	Surfaces partielles (Km2)	Surfaces partielles (%)	Surfaces cumulées (Km2)	Surfaces cumulées (%)
175 - 193	185.5	0.13	0.15	0.13	0.15
150 - 175	162.5	0.27	0.32	0.39	0.47
125 - 150	137.5	0.25	0.30	0.64	0.77
100 - 125	112.5	0.26	0.31	0.90	1.08
75 - 100	87.5	0.44	0.52	1.34	1.61
50 - 75	62.5	1.02	1.22	2.36	2.83
25 - 50	37.5	2.19	2.63	4.55	5.45
0 - 25	12.5	78.83	94.55	83.38	100.00

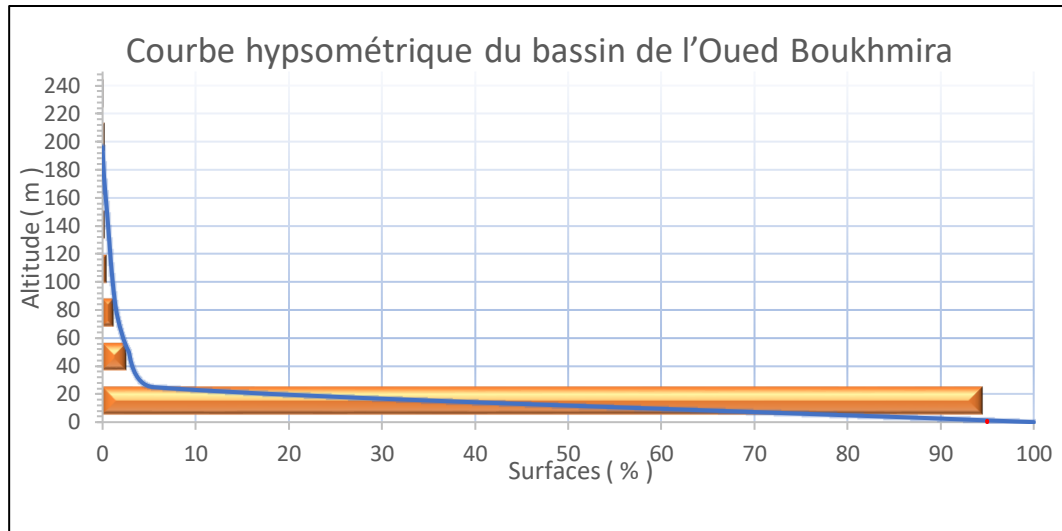


Figure III-3 : Répartition des surfaces et courbe hypsométrique du bassin de l'Oued Boukhmira

Les principales caractéristiques altimétriques sont :

1. L'altitude maximale et minimale (Hmax et Hmin) :

L'altitude maximale représente le point sommet du bassin, alors que l'altitude minimale exprime le point le plus bas, généralement situé à l'exutoire. Ces deux importantes données sont obtenues directement à partir de cartes topographiques.

2. L'altitude moyenne (Hmoy) :

C'est le rapport de la somme de la surface élémentaire par l'altitude moyenne correspondante sur la surface totale du bassin versant. Elle est calculée par la formule suivante :

$$H_{moy} = \frac{\sum H_i \times S_i}{S} \quad \text{III-5}$$

Avec :

H_i : Altitude moyenne entre deux courbes de niveau en (m) ;

S_i : Surface élémentaire entre deux courbes de niveau en (Km²) ;

S : Surface totale du bassin versant en (Km²).

3. L'altitude médiane « H5% » :

C'est la projection du point qui correspond à 5% de la surface cumulée sur la courbe hypsométrique.

4. L'altitude médiane « H50% » :

C'est la projection du point qui correspond à 50% de la surface cumulée sur la courbe hypsométrique.

5. L'altitude médiane « H95% » :

C'est la projection du point qui correspond à 95% de la surface cumulée sur la courbe hypsométrique.

Les différentes altitudes sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau III-5 : Caractéristiques altimétriques du bassin versant.

Altitudes	Valeur (m)
Hmin	0
Hmax	196
Hmoy	16
H5%	25
H50%	10
H95%	1

- **Les indices de pente**

Ces indices ont pour but de décrire les pentes d'un bassin versant, tout en facilitant leur comparaison et leur classification. Ils sont également utilisés pour estimer les vitesses d'écoulement.

✓ **La pente du bassin versant :**

$$I_{BV} = \frac{H_{max} - H_{min}}{L_{cp}} \quad \text{III-6}$$

Avec :

L_{cp} : Longueur de talwegs (Km) ;

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

✓ **La pente moyenne du bassin versant :**

$$I_m = \frac{\Delta H (0.5L_1 + L_2 \dots + 0.5L_n)}{S_{BV}} \quad \text{III-7}$$

Avec :

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

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

S_{BV} : Superficie du bassin versant (Km²).

Tableau III-6 : Pente moyenne du bassin versant d'Oued Boukhmira

Courbes	Longueur (Km)	ΔH (m)	Surface BV (Km ²)	I_m (m/Km)
0	12.69	25	83.38	9.02
25	9.67			
50	4.87			
75	3.28			
100	1.77			

125	1.78			
150	1.78			
175	1.21			

✓ Indice de pente de Roche (Ip)

M. ROCHE a proposé un indice de pente plus facile à calculer que le précédent : Ip est la moyenne de la racine carrée des pentes mesurées sur le rectangle équivalent, et pondérée par les surfaces.

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L_r}} \sum_{i=1} \sqrt{(S_i \times H_i)} \quad \text{III-8}$$

Avec :

I_p : Indice de pente de Roche ;

L_r : Longueur du rectangle équivalent (m) ;

S_i : Surface partielle (%) comprise entre 2 courbes de niveau consécutives H_i et H_{i+1} .

✓ Indice de pente moyenne

$$I_{pm} = \frac{H_{max} - H_{min}}{L_r} \quad \text{III-9}$$

Avec :

H_{max} et H_{min} : Altitude minimale et maximale (m) ;

L_r : Longueur du rectangle équivalent (Km).

✓ Indice de pente globale (Ig)

Le relief joue un rôle important, car il commande en grande partie l'aptitude au ruissellement des terrains. Son appréhension peut être faite à l'aide de l'indice de Roche, mais ce dernier étant cependant trop long à évaluer pour des études rapides, on a proposé un indice encore plus simple : **la pente globale...**

L'indice de pente globale (Ig) est le rapport de dénivelée entre l'altitude dépassée par 5% de la superficie du bassin et celle dépassée par 95% de superficie, à la longueur du rectangle équivalent.

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

Avec :

$H_{5\%}$: Altitude de fréquence correspondante au 5% de la surface total (m) ;

$H_{95\%}$: Altitude de fréquence correspondante au 95% de la surface total (m) ;

L_r : Longueur du rectangle équivalent (Km).

Tableau III-7 : Classification O.R.S.T.O.M du relief à partir de l'indice de pente global.

Relief	Valeur de I_g
Relief très faible	$I_g < 0.002$
Relief faible	$0.002 < I_g < 0.005$
Relief assez faible	$0.005 < I_g < 0.01$
Relief modéré	$0.01 < I_g < 0.02$
Relief assez fort	$0.02 < I_g < 0.05$
Relief fort	$0.05 < I_g < 0.1$
Relief très fort	$0.1 < I_g$

- **La dénivelée spécifique D_s**

L'indice I_g décroît pour un même bassin lorsque la surface augmente, il était donc difficile de comparer des bassins de tailles différentes.

La dénivelée spécifique D_s ne présente pas cet inconvénient : elle dérive de la pente globale I_g en la corrigeant de l'effet de surface admis étant inversement proportionnel à $\sqrt{S}$:

$$D_s = I_g \times \sqrt{S} = D \times \sqrt{\frac{l}{L_r}} \quad \text{III-11}$$

La dénivelée spécifique ne dépend donc que de l'hypsométrie ($D = H_{5\%} - H_{95\%}$) et de la forme du bassin (l/L).

Elle donne lieu à une deuxième classification de l'O.R.S.T.O.M., indépendante des surfaces des bassins :

Tableau III-8: Classification des reliefs d'après l'O.R.S.T.O.M.

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

Tableau III-9 : Résultats de calculs des pentes et la dénivelée spécifique du bassin versant de l'Oued Boukhmira

Paramètres	Symboles	Unités	Valeurs
Pente du bassin versant	IBV	m/Km	7.71
Pente moyenne du bassin versant	I_m	m/Km	9.02
Indice de pente de Roche	I_p	%	0.21
Indice de pente moyenne	I_{pm}	m/Km	6.55
Indice de pente globale	I_g	m/Km	0.80
Dénivelée spécifique	D_s	m	7.33
Relief	/	/	Très faible

III.2.4. Etude du réseau hydrographique

III.2.4.1 Caractéristiques du réseau hydrographique

Le réseau hydrographique d'un bassin versant est formé par l'ensemble des chenaux qui drainent les eaux de surface vers l'exutoire, en commençant par les petits cours d'eau ou ruisselets en amont, puis les affluents de second ordre, jusqu'au cours d'eau principal alimenté par les affluents majeurs. Ce maillage constitue le chevelu hydrographique du bassin.

La définition précise d'un cours d'eau, en particulier temporaire, peut varier selon les sources cartographiques utilisées. L'analyse du réseau hydrographique repose alors sur des critères essentiels :

- **Hiérarchisation du réseau :**

Pour chiffrer la ramification du réseau, chaque cours d'eau reçoit un numéro en fonction de son importance. Cette numérotation, appelée ordre du cours d'eau, diffère selon les auteurs. Parmi toutes ces classifications, nous adopterons celle de Schumm-Strahler (1957) :

- Tout cours d'eau n'ayant pas d'affluent est dit d'ordre 1 ;
- Au confluent de deux cours d'eau de même ordre n , le cours d'eau résultant est d'ordre $n + 1$;
- Un cours d'eau recevant un affluent d'ordre inférieur garde son ordre, ce qui se résume par:
$$n + n = n + 1 \quad \text{et} \quad n + m = \max(n, m)$$

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

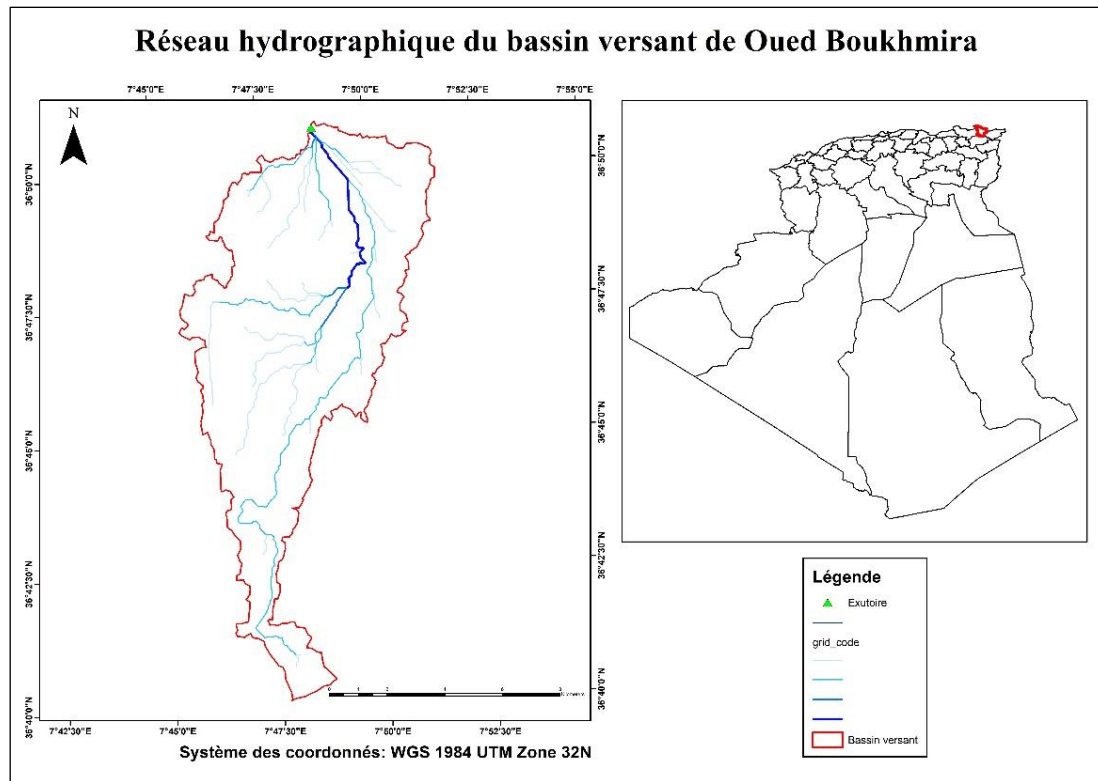


Figure III-4 : Réseau hydrographique du bassin versant d'oued Boukhmira

III.2.4.2 Paramètres hydrographiques

- Densité de drainage (Dd)**

La densité du drainage (Dd), introduite par Horton (1932), est la longueur totale du réseau hydrographique par unité de surface d'un bassin versant. Elle s'exprime en km/km². Elle est contrôlée par plusieurs facteurs notamment la nature géologique des terrains, la capacité d'infiltration du sol et sous-sol, les conditions climatiques et le couvert végétal du bassin [19].

$$D_d = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{A} \quad \text{III-12}$$

Avec :

Dd : Densité de drainage en Km/Km² ;

$\sum_{i=1}^n l_i$: Longueur totale de tous les thalwegs du bassin en Km ;

n : L'ordre le plus élevé dans la classification (n=4) ;

A : Superficie du bassin en Km².

- La densité hydrographique des thalwegs élémentaires F1**

Plusieurs indices vont s'appuyer sur la densité de drainage. M.A. Melton (1958) démontre qu'il existe une relation positive avec la densité hydrographique Fs (définie par R.E. Horton comme étant le nombre de talwegs Nx par unité de surface).

$$F_1 = \frac{\sum N_1}{S} \quad \text{III-13}$$

Avec :

F_1 : Densité hydrographique Km^{-2} ;

N_1 : Nombre de cours d'eau d'ordre 1 ;

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

- **Le coefficient de torrentialité**

Il est donné par l'équation suivante :

$$C_t = D_d \times F \quad \text{III-14}$$

Avec :

D_d : Densité de drainage ;

F : Densité hydrographique.

- **Profil en long**

Le profil en long d'un cours d'eau permet d'évaluer sa pente moyenne, paramètre essentiel pour la détermination du temps de concentration du bassin versant.

- **Temps de concentration**

Le temps de concentration T_c d'un bassin versant est défini comme la durée maximale nécessaire à une goutte d'eau pour parcourir l'ensemble du trajet hydrologique depuis le point le plus éloigné de l'exutoire jusqu'à celui-ci.

Théoriquement on estime que T_c est la durée comprise entre la fin de la pluie nette et la fin du ruissellement. Pratiquement le temps de concentration peut être déduit de mesures sur le terrain ou s'estimer à l'aide de formules le plus souvent empiriques.[20]

a- Formule de VENTURA

Est donnée par :

$$T_c = 0.1275 \times \frac{\sqrt{S}}{\sqrt{I_{BV}}} \quad \text{III-15}$$

Avec :

T_c : Temps de concentration (h) ;

I_{BV} : Pente du bassin versant (m/m) ;

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

b- Formule de KIRPICH

Cette méthode est adaptée aux bassins versants dont la superficie varie entre 0,4 ha et 81 ha, dont les sols sont argileux et dont la pente moyenne est comprise entre 3% et 10%.

$$T_c = 0.0663 \times \frac{L_{cp}^{0.77}}{I_g^{0.385}} \quad \text{III-16}$$

Avec :

T_c : Temps de concentration (h) ;

L_{cp} : Indice de pente globale (%) ;

I_g : Longueur du cours d'eau principal (m).

c- Formule de GIANDOTTI (sud Italie 1937)

$$T_c = \frac{4\sqrt{S} + 1.5L_{cp}}{0.8\sqrt{H_{moy} - H_{min}}} \quad \text{III-17}$$

Avec :

T_c : Temps de concentration (h) ;

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

S : Surface du bassin versant (Km²) ;

H_{moy} : Altitude moyenne du bassin versant (m) ;

H_{min} : Altitude minimale du bassin versant (m).

d- Formule de TURAZZA

$$T_c = 0.108 \frac{\sqrt[3]{S \times L_{cp}}}{\sqrt{I_{pm}}} \quad \text{III-18}$$

Avec :

T_c : Temps de concentration (h) ;

S : Surface du bassin versant (Km²) ;

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

I_{pm} : Pente moyenne du cours d'eau (m/m).

e- Formule ESPAGNOLE

$$T_c = 0.126 \times \left(\frac{L_{cp}}{I_{pm}^{0.25}} \right)^{0.76} \quad \text{III-19}$$

Avec :

T_c : Temps de concentration (h) ;

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

I_{pm} : Pente moyenne du cours d'eau principal (m/m).

f- Formule de SOLOVSKY

$$T_c = 4 \times \left[\frac{(S_{BV} \times L_{cp})^{0.333}}{\sqrt{I_{BV}}} \right]^{0.75} \quad \text{III-20}$$

Avec :

T_c : Temps de concentration (h) ;

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

S_{BV} : Superficie du bassin versant (Km²) ;

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

✓ Choix du temps de concentration :

Le tableau suivant récapitule les résultats de calculs du temps de concentration obtenue par les différentes formules :

Tableau III-10 : Les résultats de calculs du temps de concentration obtenue par les différentes formules

Formules	Temps de concentration en heures
Formule de VENTURA	13.26
Formule de KIRPICH	Non applicable
Formule de GIANDOTTI	23.63
Formule de TURAZZA	17.13
Formule ESPAGNOLE	3.83
Formule de SOLOVSKY	12.59

On a éliminé les valeurs extrêmes très grandes ou très petites pour ne laisser que les valeurs centrales.

Tableau III-11: Les valeurs centrales du temps de concentration

Formules utilisées	Temps de concentration en heures
Formule de VENTURA	13.26
Formule de TURAZZA	17.13
Formule de SOLOVSKY	12.59
Valeur adoptée	12.59

• Vitesse de ruissellement

On entend par ruissellement, l'écoulement par gravité à la surface du sol, suivant la pente du terrain et dans le micro-réseau hydrographique, des eaux météorologiques qui ont

échappé à l'infiltration, à l'évaporation et au stockage superficiel. C'est, tout simplement, le rapport entre la longueur parcourue par le temps de concentration.

$$V_r = \frac{L_{cp}}{T_c} \quad \text{III-21}$$

Avec :

V_r : Vitesse de ruissellement (Km/h) ;

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

T_c : Temps de concentration (h).

Les résultats des paramètres hydrographiques sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau III-12: Les paramètres hydrographiques du bassin versant d'Oued Boukhmira

Désignations	Symboles	Unités	Valeurs
Densité de drainage	Dd	Km/Km ²	1.10
Densité hydrographique	F	Km ⁻²	0.72
Coefficient de torrencialité	Ct	/	0.79
Temps de concentration	Tc	Heures	12.59
Vitesse de ruissellement	Vr	Km/h	2.04

Ci-dessus le tableau qui résume les caractéristiques géomorphologiques du bassin versant d'Oued Boukhmira.

Tableau III-13: les caractéristiques géomorphologiques du bassin versant d'Oued Boukhmira.

		Symbole	Unité	Valeur
Surface		S	Km ²	83.38
Périmètre		P	Km	65.86
Indice de compacité de Gravelius		Kc	/	2.0
Longueur du Thalweg Principal		Lp	Km	25.41
Coefficient d'allongement		Ca	/	7.74
Indice de compacité de Horton		Kh	/	0.02
Rectangle équivalent	Longueur	L	Km	29.91
	Largeur	l	Km	2.79
Altitude	Max	Hmax	m	196
	Moy	Hmoy	m	16
	Médiane	Hmed	m	10
	Min	Hmin	m	0
Pente du bassin versant		Ibv	m/Km	7.71
Pente moyenne du BV		Im	m/Km	9.02
Indice de pente de M Roche		Ip	%	0.21
Indice de pente moyenne		Ipm	m/Km	6.55
Indice de pente globale		Ig	m/Km	0.80
La dénivelée spécifique		Ds	m	7.33
Densité de drainage		Dd	Km/Km ²	1.10

Densité hydrographique	F	Km ⁻²	0.72
Coefficient de torrencialité	Ct	/	0.79
Temps de concentration	Tc	Heures	12.59
Vitesse de ruissellement	Vr	Km/h	2.04

III.2.5. Pluviométrie

L'étude pluviométrique sera effectuée à partir des données des précipitations mensuelles et journalières enregistrées au niveau de la station la plus proche de la zone d'étude.

La station météorologique Les Salines servira de référence, compte tenu de sa situation auprès de la zone d'étude, où les données se répartissent sur une durée de 54 ans sans lacune (1969-2022).

III.2.5.1 Précipitations maximales journalières

Pour l'étude des pluies journalières maximales, les données sont relevées à partir de la station les Salines. Les données relatives à cette station sont portées dans le Tableau III-14 pour une période de 54 ans (1969-2022).

Tableau III-14: Pluie maximales journalières (1969-2022).

Année	Pluie max jour (mm)	Année	Pluie max jour (mm)	Année	Pluie max jour (mm)
1969	30.8	1987	30.8	2005	61.5
1970	42.3	1988	64.2	2006	40.3
1971	36.6	1989	47.5	2007	65
1972	57.2	1990	33.2	2008	27
1973	72.5	1991	43.1	2009	73.3
1974	21.5	1992	39.5	2010	41.1
1975	19	1993	59.8	2011	56.9
1976	53.4	1994	54.3	2012	40.1
1977	40.8	1995	23.6	2013	57.96
1978	40.6	1996	46.5	2014	137.57
1979	79	1997	38.1	2015	91.28
1980	33.2	1998	48.4	2016	83.11
1981	31.3	1999	62.3	2017	62.62
1982	116.6	2000	56.8	2018	176.53
1983	73.6	2001	73.2	2019	90.16
1984	63.6	2002	74.2	2020	37.55
1985	19.5	2003	44.2	2021	72.18
1986	39.4	2004	64.7	2022	96.93

• Estimation des pluies journalières maximales

L'étude consiste à faire un ajustement pour la série de données des précipitations maximales journalières à l'aide d'une loi théorique afin de déterminer l'intensité de pluie pour une période de retour. Pour cela, il serait nécessaire de passer par les étapes suivantes :

1. Classer la série des précipitations par ordre croissant.
2. Calculer la fréquence expérimentale.
3. Calculer les caractéristiques empiriques de la série de données.

4. Ajuster graphiquement la loi choisie.
5. Calculer le quantile et son intervalle de confiance.

Les caractéristiques de notre série pluviométrique sont illustrées dans le tableau suivant :

Tableau III-15: Les caractéristiques de la série pluviométrique

Caractéristiques	Formule	Valeur
Moyenne des Pmaxj en (mm)	$X = \frac{\sum_{i=1}^{n=55} \overline{X_i}}{n}$	57.2
Ecart type « σ_x » ; Pour n > 30 ans	$\sigma_x = \frac{\sum_{i=1}^{n=55} (X_i - \overline{X})^2}{n - 1}$	29.0
Coefficient de variation « Cv »	$C_v = \frac{\sigma}{\overline{X}}$	0.507

L'exposant climatique pour notre région (**b=0.37**) est donné par l'ARNH d'Alger.

• Choix du modèle fréquentiel

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

- ✓ La loi de log-normale (droite de GALTON).
- ✓ La loi de GUMBEL (droite de HENRY).

a- Ajustement de la série pluviométrique à la loi de GUMBEL

L'ajustement des pluies maximales journalières sera effectué à l'aide du logiciel « HYFRAN »

Tableau III-16: Résultats d'ajustement à la loi GUMBEL

Période de retour (ans)	Probabilité de fréquence (q)	Pluie max jour en (mm)	Ecart type	Intervalle de confiance
1000	0.999	200	22.8	155 - 245
100	0.99	148	15.5	118 - 178
50	0.98	132	13.3	106 - 158
20	0.95	111	10.4	90.8 - 132
10	0.9	95	8.23	78.8 - 111
5	0.8	78	6.1	66.1 - 90.0

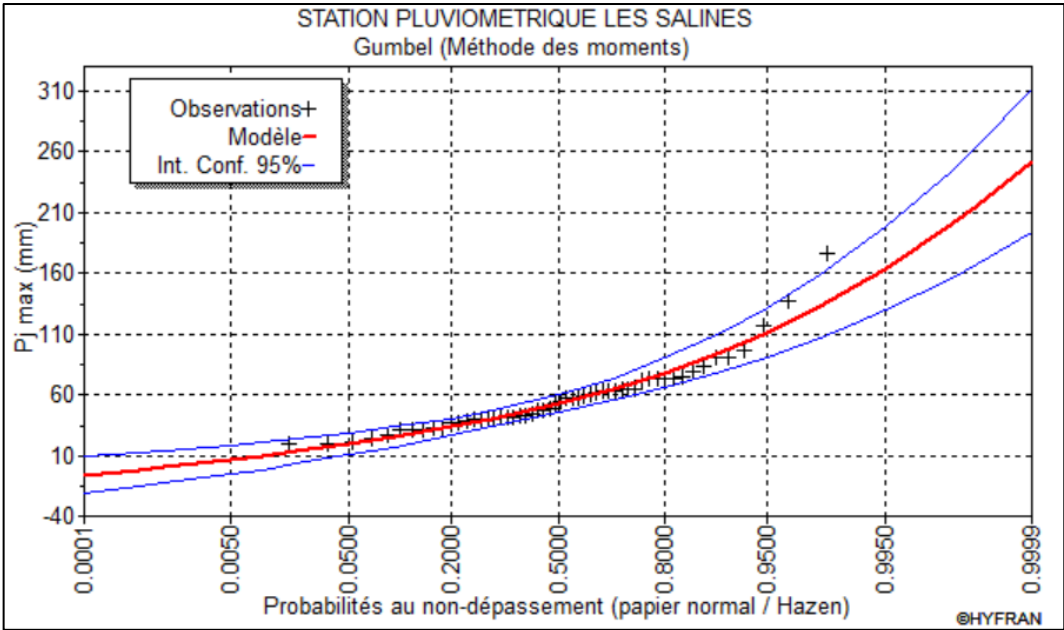


Figure III-5: Graphique de l'ajustement à la loi de GUMBEL.

Tableau III-17: Comparaison des caractéristiques de la loi de GUMBEL et de l'échantillon

Paramètres	Caractéristiques de la loi	Caractéristiques de l'échantillon
Minimum	Aucun	19
Maximum	Aucun	177
Moyenne	57.2	57.2
Ecart-type	29	29
Médiane	52.4	53.8
Coefficient de variation (Cv)	0.507	0.507
Coefficient d'asymétrie (Cs)	1.14	1.82
Coefficient d'aplatissement (Ck)	2.4	7.21

b- Ajustement de la série pluviométrique à la loi de log-normal (GALTON)

Le procédé d'ajustement est identique à celui établi pour la loi de GUMBEL, seule la représentation graphique change où elle est faite sur papier GUMBEL,

Tableau III-18: Résultats d'ajustement à la loi log-normale (Galton)

Période de retour (ans)	Probabilité de fréquence (q)	Pluie max jour en (mm)	Ecart type	Intervalle de confiance
1000	0.999	216	33.1	151 - 281
100	0.99	151	18.6	115 - 188
50	0.98	133	15	104 - 163
20	0.95	110	10.8	89.2 - 131
10	0.9	93.1	7.98	77.5 - 109
5	0.8	75.9	5.6	64.9 - 86.8

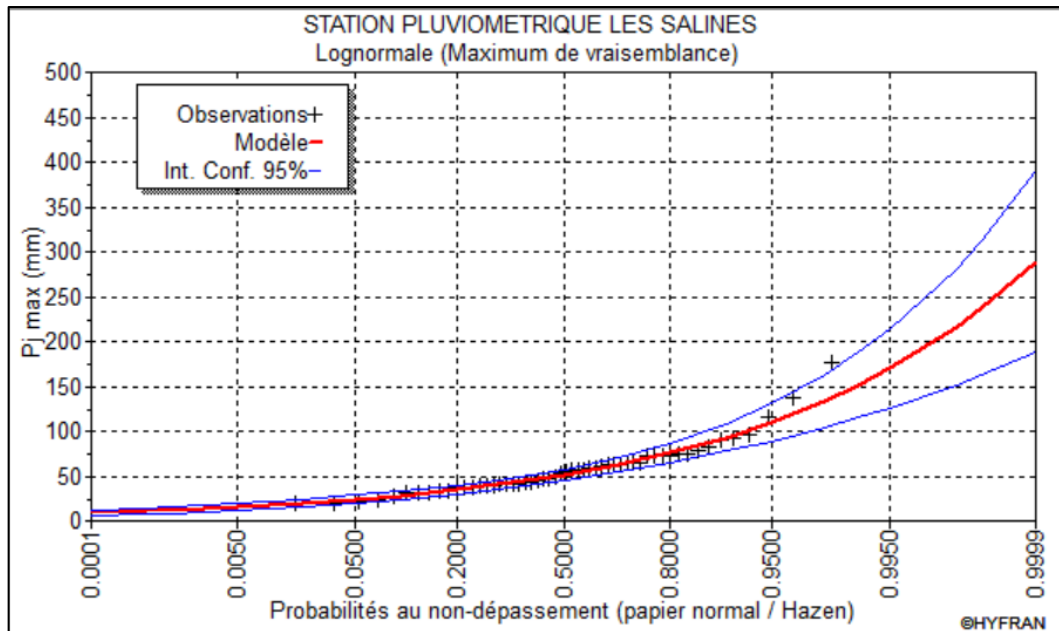


Figure III-6 : Graphique de l'ajustement à la loi de log-normale (Galton).

Tableau III-19: Comparaison des caractéristiques de la loi de log-normal (GALTON) et de l'échantillon

Paramètres	Caractéristiques de la loi	Caractéristiques de l'échantillon
Minimum	0	19
Maximum	Aucun	177
Moyenne	57.2	57.2
Ecart-type	28.1	29
Médiane	51.3	53.8
Coefficient de variation (Cv)	0.491	0.507
Coefficient d'asymétrie (Cs)	1.59	1.82
Coefficient d'aplatissement (Ck)	7.82	7.21

• Choix de la loi d'ajustement :

Il existe toujours des écarts entre les fréquences expérimentales des valeurs observées et les fréquences des mêmes valeurs calculées à partir d'une fonction de répartition quelconque. L'ajustement graphique est la première étape mais reste insuffisante pour le choix définitif de la loi théorique. Le test statistique d'adéquation consiste à comparer l'adéquation de plusieurs lois afin d'adopter le moins mauvais ajustement. Le test le plus utilisé EST le test χ^2

✓ Ajustement graphique visuelle (la méthode visuelle)

D'après les deux graphes (GUMBEL et Log Normale), nous pouvons conclure que la pluie maximale journalière suit la loi de Log Normale (droite de Galton), car la plupart des points sont à l'intérieur de l'intervalle de confiance et plus proches de la droite de Galton.

✓ Analyse des critères statistiques : Le test d'adéquation de khi carré (χ^2)

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

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

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

$$\chi^2_{calculé} = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - \mu_i)^2}{\mu_i} \quad \text{III-22}$$

Avec :

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

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

NB : Ce test n'est significatif que si ≥ 5 .

$\chi^2_{calculé}$ Est comparée à une valeur tabulée ou théorique, $\chi^2_{tabulé}$ fonction du nombre de degré de liberté et du seuil de signification α imposé en général à 5%.

$\chi^2_{théorique}$ Est tiré de la table de 2 en fonction de et représentée dans l'annexe

Si $\chi^2_{calculé} > \chi^2_{tabulé, \mu}$: On rejette l'hypothèse nulle.

Si $\chi^2_{calculé} \leq \chi^2_{tabulé, \mu}$: La loi d'ajustement sera retenue.

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

Tableau III-20: Résultats de test d'adéquation khi 2 des lois d'ajustement.

Loi de distribution	Degré de liberté γ	Nombre de classe	χ^2 cal	χ^2 thé
Gumbel	6	9	10.67	12.592
Log Normale	6	9	5.67	12.592

À partir des résultats obtenus du test khi carré et d'ajustement, la série des débits maximums annuels présente un ajustement adapté à la loi **Log Normale**.

Tableau III-21: Les pluies max journalières des périodes de retour

Période de retour (an)	1000	100	50	20	10	5
Fréquence	0.999	0.99	0.98	0.95	0.90	0.50
Pj max (mm)	216	151	133	110	93.1	75.9

III.2.5.2 Pluies de courtes durées de différentes fréquences et leurs intensités :

$$P_{cr} = P_{j\max} \left(\frac{t}{24} \right)^b \quad \text{III-23}$$

Avec :

P_{cr} : Pluie de courte durée de même fréquence que $P_{\max j\%}$ (mm).

$P_{j\max}$: Pluie maximale journalière pour une fréquence donnée (mm).

t : Temps en heures.

b : Exposant climatique (ANRH) $b = 0.37$

$$I_0 = \left(\frac{P_{\max}}{24} \right) \left(\frac{t}{24} \right)^{b-1} \quad \text{III-24}$$

Avec :

I_0 : Pluie de courte durée (mm/h)

Les précipitations pour les différentes fréquences sont regroupées dans le tableau suivant :

Tableau III-22: Pluies de courtes pour différentes périodes de retour.

Heures	Précipitations pour les différentes fréquences P_{cr} (mm)					
	5	10	20	50	100	1000
0.5	16.81	20.12	23.33	27.55	30.80	42.04
1	21.73	26.00	30.15	35.61	39.80	54.34
1.5	25.24	30.21	35.03	41.37	46.25	63.13
2	28.08	33.60	38.96	46.02	51.44	70.22
3	32.63	39.04	45.27	53.46	59.76	81.59
4	36.29	43.42	50.35	59.47	66.48	90.75
5	39.41	47.16	54.69	64.59	72.20	98.56
6	42.16	50.45	58.50	69.09	77.24	105.44
7	44.64	53.41	61.94	73.15	81.77	111.63
8	46.90	56.12	65.07	76.85	85.91	117.28
9	48.99	58.62	67.97	80.28	89.74	122.50
10	50.94	60.95	70.67	83.47	93.31	127.37
11	52.76	63.13	73.21	86.47	96.66	131.95
12	54.49	65.20	75.61	89.29	99.82	136.26
12.59	55.47	66.37	76.96	90.89	101.61	138.70
13	56.13	67.16	77.88	91.98	102.82	140.36
14	57.69	69.03	80.04	94.54	105.68	144.26
15	59.18	70.81	82.11	96.98	108.41	147.99
16	60.61	72.52	84.10	99.32	111.03	151.57
17	61.98	74.17	86.01	101.58	113.55	155.01
18	63.31	75.75	87.84	103.75	115.97	158.32
19	64.59	77.28	89.62	105.84	118.32	161.52

20	65.83	78.76	91.34	107.87	120.58	164.61
21	67.03	80.20	93.00	109.84	122.78	167.61
22	68.19	81.59	94.61	111.74	124.91	170.52
23	69.32	82.94	96.18	113.60	126.98	173.35
24	70.42	84.26	97.71	115.40	129.00	176.10

Les intensités pour les différentes fréquences sont regroupées dans le tableau suivant :

Tableau III-23: Intensités des pluies de courtes durées pour différentes périodes de retour

Heures	Précipitations pour les différentes fréquences Io (mm/h)					
	5	10	20	50	100	1000
0.5	33.63	40.23	46.66	55.10	61.60	84.09
1	21.73	26.00	30.15	35.61	39.80	54.34
1.5	16.83	20.14	23.35	27.58	30.83	42.09
2	14.04	16.80	19.48	23.01	25.72	35.11
3	10.88	13.01	15.09	17.82	19.92	27.20
4	9.07	10.86	12.59	14.87	16.62	22.69
5	7.88	9.43	10.94	12.92	14.44	19.71
6	7.03	8.41	9.75	11.52	12.87	17.57
7	6.38	7.63	8.85	10.45	11.68	15.95
8	5.86	7.01	8.13	9.61	10.74	14.66
9	5.44	6.51	7.55	8.92	9.97	13.61
10	5.09	6.09	7.07	8.35	9.33	12.74
11	4.80	5.74	6.66	7.86	8.79	12.00
12	4.54	5.43	6.30	7.44	8.32	11.36
12.59	4.41	5.27	6.11	7.22	8.07	11.02
13	4.32	5.17	5.99	7.08	7.91	10.80
14	4.12	4.93	5.72	6.75	7.55	10.30
15	3.95	4.72	5.47	6.47	7.23	9.87
16	3.79	4.53	5.26	6.21	6.94	9.47
17	3.65	4.36	5.06	5.98	6.68	9.12
18	3.52	4.21	4.88	5.76	6.44	8.80
19	3.40	4.07	4.72	5.57	6.23	8.50
20	3.29	3.94	4.57	5.39	6.03	8.23
21	3.19	3.82	4.43	5.23	5.85	7.98
22	3.10	3.71	4.30	5.08	5.68	7.75
23	3.01	3.61	4.18	4.94	5.52	7.54
24	2.93	3.51	4.07	4.81	5.38	7.34

III.3. Etude des apports liquides

L'apport moyen annuel est estimé par des méthodes empiriques qui donnent des résultats proches de ceux observés. Plusieurs formules empiriques couramment utilisées en Algérie sont donc proposées. Ces formules donnent la lame d'eau ruisselée, exprimée en mm,

et sont en règle générale fonction de la pluviométrie moyenne annuelle et de la superficie du bassin versant. Parmi ces formules, nous citons :

III.3.1. Formule de SAMIE

$$Le = P^2(293 - 2.2\sqrt{S}) \quad \text{III-25}$$

Avec :

Le : la lame d'eau écoulée, en (mm) ;

P : Précipitation moyenne annuelle, en (m) ;

S : Superficie du bassin versant, en (Km²).

$$A_0 = Le \times S \times 1000 \quad \text{III-26}$$

A_0 : Apport moyen annuel en m³

III.3.2. Formule de Maillet-Gauthier :

Cette formule donne le coefficient d'écoulement d'un bassin versant à partir de la pluie moyenne annuelle.

$$Le = 0.6\bar{P}(1 - 10^{-0.36 \cdot \bar{P}^2}) \times 10^3 \quad \text{III-27}$$

Avec :

Le : la lame d'eau écoulée, (m) ;

$\bar{P}$: Pluies moyennes annuelles, (m).

III.3.3. Formule de DERI

$$A_0 = 0.915 \times P^{2.684} \times S^{0.842} \quad \text{III-28}$$

Avec :

A_0 : Apport moyen annuel (Hm³) ;

P : pluie moyenne annuelle (m) ;

S : surface du bassin versant (Km²).

Les résultats sont classés dans le tableau suivant :

Tableau III-24: Les apports liquides par des différentes méthodes empiriques

Formules	Apport liquide	
	Le (mm)	A0 (Mm ³)
SAMIE	177.67	14.81
Maillet-Gauthier	318.34	26.54
DERI	143.73	11.98

Conclusion

Les résultats des valeurs obtenus sont proches entre elles, Les valeurs adoptées sont celles obtenues par la formule SAMIE.

III.3.4. Etude des apports solides :

L'érosion, le transport solide et la sédimentation sont la cause de la dégradation des sols agricoles, de l'alluvionnement des retenues et de nombreux dégâts dont les coûts sont considérables [21].

Les apports solides dépendent de l'étendue du relief du bassin versant, de la nature géologique des sols et de leur résistance à l'érosion, liée elle-même à la couverture végétale, au régime des pluies et des températures.

Vu l'absence des stations qui mesurent la dégradation annuelle, on est obligé de calculer l'apport solide par les formules empiriques pour les périodes de 10, 20, 50 et 100 ans. Les différentes formations géologiques rencontrées dans notre bassin versant sont des alluvions récentes (sables, limons et argiles), c'est la raison pour laquelle nous prenons le poids spécifique des apports solides égal à 1,6 t/m³.

III.3.4.1 Apport solide en suspension

a- Taux d'abrasion

- **Formule de Fournier**

$$E_s = \frac{1}{36} \left[\frac{P_m^2}{P_a} \right]^{2.65} \left[\frac{h}{S} \right]^{0.46} \quad \text{III-29}$$

Avec :

E_s : Taux d'abrasion en (t/Km² /an) ;

P_m : Pluie mensuelle du mois le plus pluvieux ;

P_a : Pluie moyenne annuelle ;

h : 45% ($H_{\max} - H_{\min}$) ;

S : Surface du bassin versant.

- **Formule de TIXERONT**

TIXERONT a donné une estimation du taux d'abrasion en fonction de la perméabilité du bassin et du ruissellement annuel

$$E_s = K \cdot Le^{0.15} \quad \text{III-30}$$

Avec :

Le : Ecoulement annuel (mm) ;

K : paramètre empirique varié suivant le degré de perméabilité des bassins versants

$K = 75$ pour les terrains à perméabilité élevée ;

$K = 350$ pour les terrains à perméabilité moyenne ;

$K = 1400$ pour les terrains à perméabilité faible ;

$K = 3200$ pour les terrains imperméables.

Dans notre cas :

$$Le = 177.67 \text{ mm} ; K = 350$$

b- Le volume solide :

Le calcul du volume des apports solides se base sur la formule suivante :

$$V_s = \frac{E_s \times S \times T}{\gamma_s} \quad \text{III-31}$$

Avec :

T : Temps d'exploitation ;

γ_s : Poids spécifique des sédiments.

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau III-25: les valeurs de l'apport solide et de l'érosion spécifique

Formule	Es (t/Km2/an)	Vs (Mm3)	
Formule de Fournier	46.47	10	0.024
		20	0.048
		50	0.12
		100	0.24
Formule de Tixeront	761.22	10	0.40
		20	0.79
		50	1.98
		100	3.97

III.3.4.2 Transport solide par charriage

En général, le transport solide par charriage est estimé de (10 % à 20%) du transport solide en suspension. Prenons la moyenne du transport solide par charriage estimé à 15% de la totalité du transport solide en suspension.

Donc le transport solide par charriage égale à **0.297 Mm³**.

III.4. Etude des crues :

L'intérêt économique de la détermination du débit maximal O_{max} , probable d'un cours d'eau est évident en raison des effets destructifs bien connus de ces événements hydrologiques.

Une crue est un événement comprenant une ou plusieurs augmentations rapides et fortes du débit d'une rivière, maintenant ce débit au-dessus d'un seuil donné. La crue est simple si elle présente une seule pointe. Elle est dite complexe si elle présente plusieurs pointes.

L'étude des crues revêt une place importante dans une étude hydrologique et doit être menée avec délicatesse pour ne pas tomber dans des erreurs de sous-estimations ou de surestimations,

compromettant respectivement la sécurité de l'ouvrage et son environnement, et entraînant des évaluations importantes quant à son coût, qui, lui-même, est lié à sa période de retour. [22]

L'estimation du débit de crue fréquentielle du bassin versant est calculé grâce à les formules empiriques.

III.4.1. Formules empiriques pour le calcul du débit maximum probable :

III.4.1.1 Formule de TURAZA :

$$Q_{max} = \frac{C_r \times P_{Tc} \times S}{T_c \times 3.6} \quad \text{III-32}$$

Avec :

Q_{max} : Le débit maximal en m³/s ;

C_r : Coefficient de ruissellement d'une fréquence donnée ;

P_{Tc} : Pluie de courte durée pour $t = T_c$ (mm) ;

T_c : Temps de concentration en heures ;

S : Superficie du bassin versant en Km².

III.4.1.2 Formule de Mallet et Gauthier :

Une autre formule empirique est aussi couramment utilisée en Algérie et va être par la suite révisée. La formule de Mallet-Gauthier, dont la forme générale s'écrit : (Coutagne 1951):

$$Q_{max} = 2K \times \log(1 + A.P) \times S \sqrt{\frac{1 + 4\log(T) - \log(S)}{L}} \quad \text{III-33}$$

Où :

Q_{max} : Indique le débit maximal en m³/s pour la période de retour T ;

K : Le coefficient de 0,5 à 6 selon les caractéristiques du bassin versant ($K=1.5$) ;

A : Un coefficient géographique variable entre 20 et 30 (en Algérie est pris égal à 20) ;

S : La superficie du bassin en Km² ;

L : La longueur du Talweg principal en Km ;

P : Le module pluviométrique annuel moyen en m ;

T : La période de retour en années.

III.4.1.3 Formule de GIANDOTTI :

$$Q_{max} = \frac{\beta \cdot S \cdot P_{tc} \sqrt{\bar{H} - H_{min}}}{4\sqrt{S} + 1.5\sqrt{L}} \quad \text{III-34}$$

Avec :

β : Coefficient topographique variant entre 66 et 166. Pour le cas de l'Algérie,

$\beta = 100$;

S : Surface du bassin versant en Km² ;

P_{tc} : Pluie de durée égale au temps de concentration t_c et de période de retour T , en (m) ;

$\bar{H}, H_{min}$: Altitudes moyenne et minimale du bassin versant respectivement ;

L : Longueur du cours d'eau principal en Km.

III.4.1.4 Formule de SOKOLOVSKY :

Cette méthode est d'un usage très courant dans les services hydrologiques de l'Algérie (ANRH). Cette formule est de forme suivante :

$$Q_T = \frac{0.28 \times (P_{ct} - H_0) \times \alpha \times F \times S}{t_m} \quad \text{III-35}$$

Avec :

P_{ct} : Pluies de courte durée en mm ;

α : Coefficient de ruissellement de crues ;

F : Coefficient de forme de la crue : $F = 12 / (4 + 3.\gamma)$

Pour : $S < 50 \text{ Km}^2 \rightarrow \gamma = 2$.

Pour : un bassin boisé avec un sol peu perméable $\rightarrow 2 \leq \gamma \leq 2.5$

Pour : un bassin boisé $\rightarrow 3 \leq \gamma \leq 4$.

On prend : $\gamma = 2$. D'où : $F = 1.2$

H_0 : C'est la perte d'eau initiale. Au nord de l'Algérie $H_0 = 7 \text{ mm}$;

S : Surface du bassin versant en Km² ;

t_m : Temps de montée de débit de crue, il est égal au temps de concentration t_c .

Les résultats de calcul sont classés dans le tableau suivant :

Tableau III-26: Résultats des débits maximums des formules empiriques pour différentes périodes de retours.

Formules	Qmax (m3/s)					
	5	10	20	50	100	1000
MALLET-GAUTHIER	77.919	99.853	117.771	137.930	151.04	189.413
GIANDOTTI	36.7	43.91	50.92	60.14	67.22	91.77
TURAZZA	48.544	62.23	75.97	94.566	109.196	161.552
SOKOLOVSKY	51.31	67.337	83.538	105.582	122.989	185.558

III.4.2. Détermination des débits maximums fréquents par la méthode du GRADEX :

III.4.2.1 Description de la méthode

La méthode du Gradex constitue une approche hydro-pluviométrique probabiliste permettant d'estimer les débits de crues extrêmes d'un cours d'eau pour des périodes de retour comprises entre 100 et 10 000 ans. Développée par EDF (Guillot et Duband, 1967) dans le cadre de la sécurité des grands barrages, cette méthode est aujourd'hui largement utilisée à travers le monde pour l'évaluation des débits associés à des événements rares ou exceptionnels. Elle repose sur l'exploitation des données pluviométriques afin d'extrapoler la loi de fréquence des débits. Son succès tient notamment à sa mise en œuvre relativement simple, rendue possible par une modélisation simplifiée du processus de transformation de la pluie en débit.

III.4.2.2 Principe de la méthode :

La méthode du Gradex repose sur le postulat selon lequel, au-delà d'un certain seuil de débit, le sol du bassin versant atteint un état de saturation hydrique. Ce seuil, appelé débit pivot ou débit seuil, varie généralement entre le débit décennal et le débit cinquantennal, selon la nature des sols et les caractéristiques morphologiques du bassin. Dans ces conditions, durant la durée caractéristique du ruissellement (D), tout accroissement des précipitations se traduit par une augmentation proportionnelle du débit.

Le principe fondamental de cette méthode, fondée sur l'analyse climatologique et hydrologique historique, consiste à déduire le comportement asymptotique de la loi de probabilité des volumes de crues rares à partir de celle des cumuls de précipitations extrêmes. En effet, pour des événements d'une période de retour d'environ dix ans, la capacité moyenne de rétention du bassin tend à se stabiliser, ce qui justifie l'hypothèse de linéarité entre pluie et débit pour les événements extrêmes.

Ainsi, la méthode du Gradex propose un cadre de calcul cohérent et physiquement vraisemblable, fondé sur une analyse fréquentielle des précipitations intenses à l'échelle locale ou régionale. Cette approche repose sur un **paramètre clé**, proportionnel à l'écart-type des fortes précipitations (P_{jmax}), appelé Gradex (gradient des valeurs extrêmes). Ce dernier constitue un invariant climatologique local, dont la valeur dépend essentiellement des conditions géographiques et climatiques de la région étudiée.

III.4.2.3 Hypothèses de la méthode :

Le postulat de base de la méthode est l'existence d'une relation entre la distribution des débits et celle des pluies génératrices. Cette méthode repose sur trois hypothèses suivantes (Meddi et Zeroual, 2018) :

✓ Hypothèse 01 :

La fonction de répartition des précipitations tombant sur le bassin est asymptotiquement, décrite par une loi de Gumbel ou par une loi exponentielle selon le type d'échantillonnage

utilisé. Le Gradex correspond à la pente de la fonction de répartition sur un graphique représentant la pluie en fonction du logarithme de la période de retour.

✓ **Hypothèse 02 :**

Le déficit d'écoulement, défini comme la différence entre le volume d'eau précipité et le volume écoulé à l'exutoire d'un bassin versant sur un intervalle de temps donné, n'augmente plus, en moyenne, au-delà d'un certain seuil de précipitations. Autrement dit, lorsque le bassin versant atteint un état de saturation critique, la distribution du déficit d'écoulement devient indépendante de l'intensité des précipitations ou du débit observé. Cette hypothèse se traduit, d'un point de vue graphique, par un parallélisme entre la fonction de répartition des précipitations et celle des écoulements pour un pas de temps équivalent. Le point de pivot, représentant l'origine de cette extrapolation, est généralement fixé pour une période de retour T_p comprise entre 10 et 50 ans, en fonction des caractéristiques spécifiques du bassin versant étudié.

✓ **Hypothèse 03 :**

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

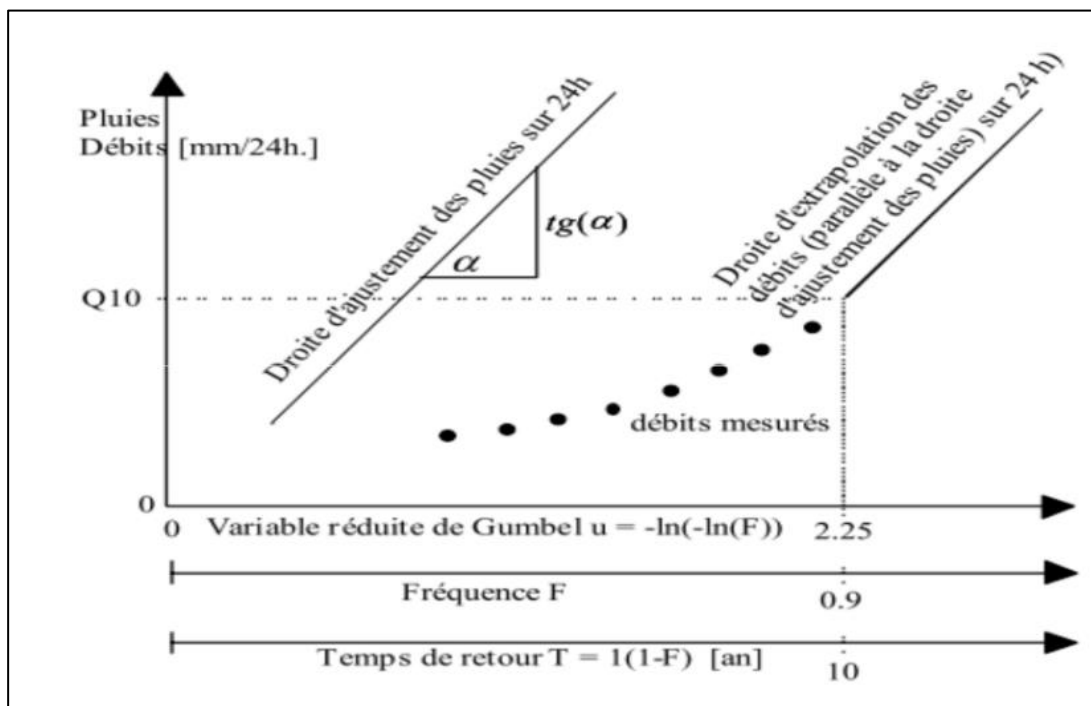


Figure III-7 : Graphe représente ajustement graphique pour les pluies et droite d'extrapolation pour les débits (Laborde, 2000)

III.4.2.4 Les étapes de la méthode :

- Choisir le pas de temps n heures (généralement égale à la moyenne des temps de base des hydrogrammes de crues disponibles, Pour la commodité des calculs on retiendra une valeur très arrondie, par exemple 2, 4, 6 ... 48 heures.). Le résultat final, débits de pointe, dépendent peu de h : il suffit de ne pas commettre d'erreur d'ordre de grandeur sur h .
- Ajuster par la loi de Gumbel des pluies maximales journalières.
- Calculer le Gradex des précipitations a (pente de la droite de Gumbel).

$$P(mm) = a.\mu + b$$

Avec :

μ : Variable réduite de Gumbel.

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

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

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

$$Q_{\mu\%} = a.\mu + b'$$

Avec :

a : Le Gradex de la pluie ;

μ : Variable réduite de Gumbel ($\mu = -\ln(-\ln(F))$) et $F = \frac{T-1}{T}$

Pour $T=10$ ans : $b' = Q_{10 \text{ ans}} - a.\mu$

- Tracer la droite de l'équation $Q_{\mu\%} = a.\mu + b'$ sur le même graphe que l'ajustement de P_{jmax} . Ensuite tirer les Q pour chaque période de retour (en mm). Puis Exprimer ces débits en m^3/s par la formule :

$$Q\left(\frac{m^3}{s}\right) = \frac{Q(mm) \times S(Km^2)}{3.6 \times n(h)}$$

- Calcul des débits de pointe :

Calculer sur les hydrogrammes des crues observées le rapport
 $P(\text{coefficient de pointe}) = \frac{Q_{max}}{Q_{moy}}$

- Donc : $Q_p\left(\frac{m^3}{s}\right) = Q\left(\frac{m^3}{s}\right) \times P$

III.4.2.5 Application :

Ajustement de la série pluviométrique (P_{jmax}) de la station les Salines (14-06-24) à la loi de Gumbel en utilisant le logiciel HYFRAN :

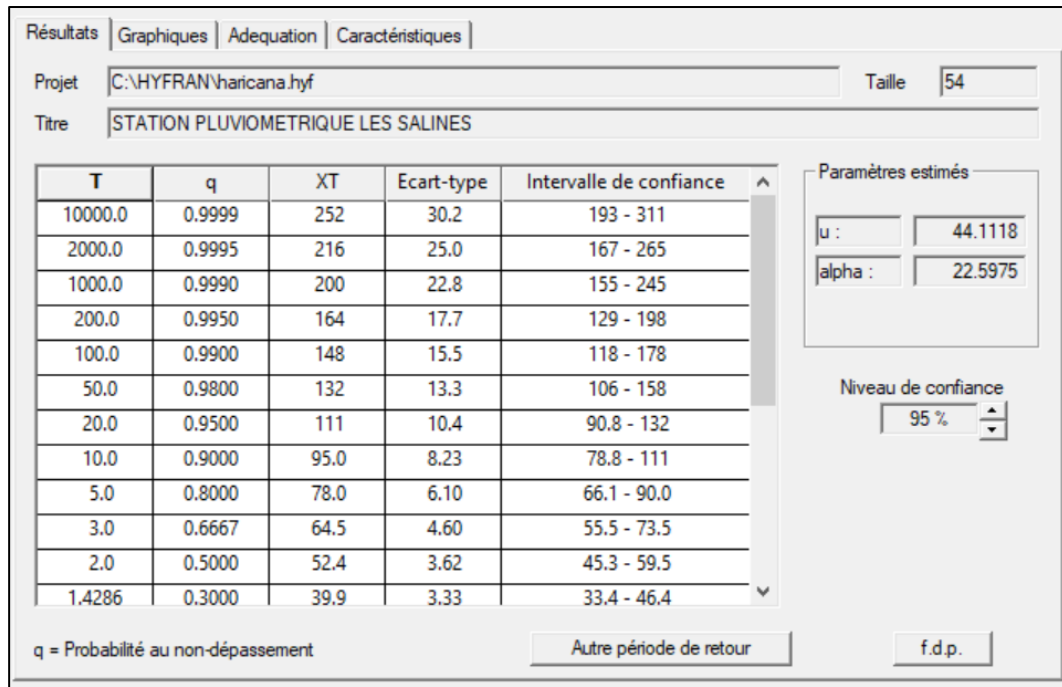


Figure III-8 : Résultat d'ajustement de la série pluviométrique de la station pluviométrique LES SALINES (Source : Logiciel HYFRAN).

- Détermination du GRADEX : d'après le logiciel l'HYFRAN l'équation de la droite de Gumbel est : $P(\text{mm}) = 22.60 \times \mu + 44.11$
- Le GRADEX est donc : $a = 22.60 \text{ mm}$
- Choix du pas de temps : Après l'examen des enregistrements de la crue de la station les Salines (011901), on a estimé le temps de base à $n=24\text{h}$.
- L'ajustement de la série des débits maximaux annuels de la station Les Salines à la loi de Gumbel nous a donné un débit décennal de :

$$Q_{10\text{ans}} = 99.85 \text{ m}^3/\text{s}$$

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

$$R_{10 \text{ ans (mm)}} = \frac{Q_{10\text{ans}} \times 3.6 \times n}{S_{(\text{oued Boukhmira})}}$$

Donc :

$$R_{10 \text{ ans (mm)}} = \frac{99.85 \times 3.6 \times 24}{83.38} = 103.47 \text{ mm}$$

- Extrapoler de la distribution des débits au-delà de 0.9 ($T=10 \text{ ans}$) par une droite de pente égale au GRADEX de la pluie :

$$b' = Q_{10 \text{ ans}} - a \cdot \mu$$

Avec :

$$\mu = -\ln(-\ln(F)) = -\ln\left(-\ln\left(\frac{10-1}{10}\right)\right) = 2.25$$

Donc :

$$b' = 52.62$$

Par conséquence :

$$Q_{\mu\%} = 22.60 \cdot \mu + 52.62$$

- On trace cette équation sur le même graphe que celui de l'ajustement des P_{jmax} , et pour chaque période de retour on tire le débit correspondant en (mm) et on les exprime par la formule (déjà cité).

Remarque :

Le coefficient de pointe $C_p=1$, car on a utilisé les débits maximums pour calculer le débit décennal.

Tableau III-27: Résultats de l'ajustement pour différentes périodes de retours.

Temps de retour (ans)	Fréquence empirique selon Hazen	Variable réduite de Gumbel μ	Précipitations estimées (mm/24h)	Débits moyen extrapolés (mm/24h)	Débits moyen extrapolés (m3/s)	Débits de pointe extrapolés (m3/s)
5	0.800	1.50	78	86.52	83.49	83.49
10	0.900	2.25	95	103.48	99.86	99.86
20	0.950	2.97	111	119.75	115.56	115.56
50	0.980	3.90	132	140.80	135.88	135.88
100	0.990	4.60	148	156.58	151.11	151.11
1000	0.999	6.91	200	208.72	201.43	201.43

Conclusion :

Le débit de crue fréquentielle du bassin versant est celui calculé avec la méthode de GRADEX.

III.4.3. Hydrogramme de crue

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

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

a- Branche de crue (montée)

$$Q(t) = Q_{max} \left(\frac{t}{T_m} \right)^n \quad \text{III-36}$$

b- Branche de décrue (descente)

$$Q(t) = Q_{max} \left(\frac{(T_b - t)}{T_d} \right)^m \quad \text{III-37}$$

Avec :

Q_{max} : Débit maximum de fréquence donnée (m^3/s) ;

$Q(t)$: Débit instantané au moment (t) (m^3/s) ;

n, m : Puissance des paraboles pour les bassins de petites gabarits ($m=3, n=2$).

T_m, T_d, T_b : Temps de montée et de décrue et de base de la crue (h) ;

$$T_m = T_c = 12.59 \text{ h}$$

$$T_d = T_m \times \delta$$

Tableau III-28: Valeur du coefficient de forme de l'hydrogramme de crue δ

Description du cours d'eau	Valeur de δ
Petits cours d'eau et vallons dans des bassins versants dénudés et faiblement perméable.	2,0 - 2.5
Petits cours d'eau et vallons dans des bassins versants brisés ou perméables, moyens cours d'eau avec terrasses de lit majeur normales.	3.0 – 4.0
Grands et moyens cours d'eau avec des terrasses de débordements étendues.	4.0 - 7.0

On prend : $\delta = 2$

$$T_d = 12.59 \times 2 = 25.18 \text{ h}$$

$$T_b = T_m + T_d = 12.59 + 25.18 = 37.77 \text{ h}$$

Tableau III-29: Valeurs des débits de crues en fonction du temps.

Temps (h)	5	10	20	50	100	1000
	Q(m3/s)					
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.50	0.13	0.16	0.18	0.21	0.24	0.32
1.00	0.53	0.63	0.73	0.86	0.95	1.27
1.50	1.19	1.42	1.64	1.93	2.14	2.86
2.00	2.11	2.52	2.92	3.43	3.81	5.08
2.50	3.29	3.94	4.56	5.36	5.96	7.94
3.00	4.74	5.67	6.56	7.72	8.58	11.44
3.50	6.45	7.72	8.93	10.50	11.68	15.57
4.00	8.43	10.08	11.66	13.72	15.25	20.33
4.50	10.67	12.76	14.76	17.36	19.30	25.73
5.00	13.17	15.75	18.23	21.43	23.83	31.77

5.50	15.93	19.06	22.05	25.93	28.84	38.44
6.00	18.96	22.68	26.25	30.86	34.32	45.75
6.50	22.25	26.62	30.80	36.22	40.28	53.69
7.00	25.81	30.87	35.72	42.00	46.71	62.27
7.50	29.63	35.44	41.01	48.22	53.62	71.48
8.00	33.71	40.32	46.66	54.86	61.01	81.33
8.50	38.06	45.52	52.67	61.94	68.88	91.81
9.00	42.66	51.03	59.05	69.44	77.22	102.93
9.50	47.54	56.86	65.80	77.37	86.04	114.69
10.00	52.67	63.00	72.90	85.72	95.33	127.08
10.50	58.07	69.46	80.38	94.51	105.10	140.10
11.00	63.73	76.23	88.21	103.73	115.35	153.77
11.50	69.66	83.32	96.42	113.37	126.08	168.06
12.00	75.85	90.72	104.98	123.44	137.28	182.99
12.50	82.30	98.44	113.91	133.94	148.96	198.56
12.59	83.49	99.86	115.56	135.88	151.11	201.43
13.00	79.48	95.06	110.01	129.35	143.85	191.75
13.50	74.76	89.42	103.48	121.67	135.31	180.37
14.00	70.24	84.01	97.21	114.31	127.12	169.45
14.50	65.90	78.82	91.21	107.25	119.27	158.98
15.00	61.74	73.84	85.45	100.48	111.74	148.95
15.50	57.76	69.09	79.95	94.00	104.54	139.35
16.00	53.96	64.54	74.68	87.81	97.66	130.18
16.50	50.32	60.19	69.65	81.90	91.08	121.41
17.00	46.86	56.04	64.86	76.26	84.81	113.05
17.50	43.55	52.09	60.28	70.88	78.83	105.08
18.00	40.41	48.33	55.93	65.77	73.14	97.49
18.50	37.42	44.76	51.79	60.90	67.73	90.28
19.00	34.58	41.36	47.87	56.28	62.59	83.44
19.50	31.89	38.15	44.14	51.90	57.72	76.94
20.00	29.34	35.10	40.62	47.76	53.11	70.80
20.50	26.94	32.22	37.28	43.84	48.75	64.99
21.00	24.66	29.50	34.14	40.14	44.64	59.51
21.50	22.52	26.94	31.17	36.66	40.77	54.34
22.00	20.51	24.53	28.39	33.38	37.12	49.48
22.50	18.62	22.27	25.77	30.30	33.70	44.92
23.00	16.85	20.15	23.32	27.42	30.50	40.65
23.50	15.20	18.18	21.03	24.73	27.50	36.66
24.00	13.65	16.33	18.90	22.22	24.71	32.94
24.50	12.22	14.62	16.91	19.89	22.12	29.48
25.00	10.89	13.03	15.07	17.72	19.71	26.27
25.50	9.66	11.55	13.37	15.72	17.48	23.31
26.00	8.53	10.20	11.80	13.88	15.43	20.57
26.50	7.49	8.95	10.36	12.18	13.55	18.06
27.00	6.53	7.81	9.04	10.63	11.82	15.76
27.50	5.66	6.78	7.84	9.22	10.25	13.67

28.00	4.88	5.83	6.75	7.94	8.83	11.77
28.50	4.17	4.98	5.77	6.78	7.54	10.05
29.00	3.53	4.22	4.88	5.74	6.38	8.51
29.50	2.96	3.54	4.09	4.81	5.35	7.14
30.00	2.45	2.93	3.40	3.99	4.44	5.92
30.50	2.01	2.40	2.78	3.27	3.64	4.85
31.00	1.62	1.94	2.25	2.64	2.94	3.91
31.50	1.29	1.54	1.78	2.10	2.33	3.11
32.00	1.00	1.20	1.39	1.63	1.82	2.42
32.50	0.77	0.92	1.06	1.25	1.39	1.85
33.00	0.57	0.68	0.79	0.92	1.03	1.37
33.50	0.41	0.49	0.56	0.66	0.74	0.98
34.00	0.28	0.34	0.39	0.46	0.51	0.68
34.50	0.18	0.22	0.25	0.30	0.33	0.44
35.00	0.11	0.13	0.15	0.18	0.20	0.27
35.50	0.06	0.07	0.08	0.10	0.11	0.15
36.00	0.03	0.03	0.04	0.05	0.05	0.07
36.50	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03
37.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
37.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

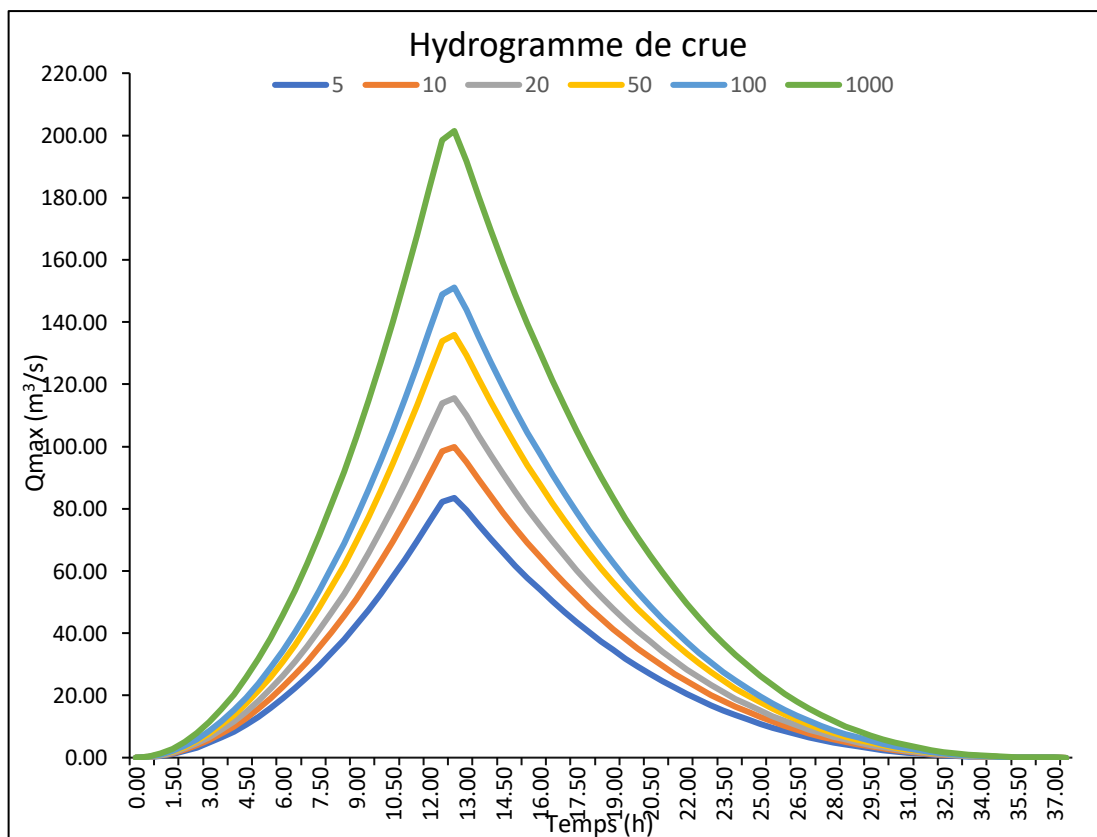


Figure III-9 : Hydrogramme de crue de la zone d'étude par la méthode Skolovsky.

III.4.4. Choix de la crue de projet :

On appelle crue de projet, la crue maximale que l'ouvrage est capable d'évacuer sans dommage grave. En général, on se fixe la fréquence (ou période de retour) de la crue du projet puis on évalue le débit de crue (ou l'hydrogramme) à l'entrée dans l'ouvrage.

Le choix de la fréquence de la crue de projet est très important ; en effet, il influe directement sur le débit à évacuer, donc sur la taille de l'ouvrage, alors sur le coût du projet ; en augmentant la période de retour, on augmente donc le coût total de l'ouvrage. Par contre, l'augmentation de la période de retour de la crue de projet diminue le risque de voir arriver des dommages. Le choix de la période de retour peut donc s'aborder par le biais de la comparaison du coût en regard du risque.

Tableau III-30: Crues de projet recommandées.

Catégories des dommages	Crue de projet recommandé de probabilité de dépassement annuelle
Elevés : Perte de vie, dommages considérables	1/100000 à 1/10000
Important : pas de pertes de vies, dommages importants	1/10000 à 1/1000
Faible : pas de perte de vies, dommages légers	1/1000 à 1/100

Puisqu'il s'agit d'un aménagement contre les inondations, on opte donc pour une période de retour de **100 ans**.

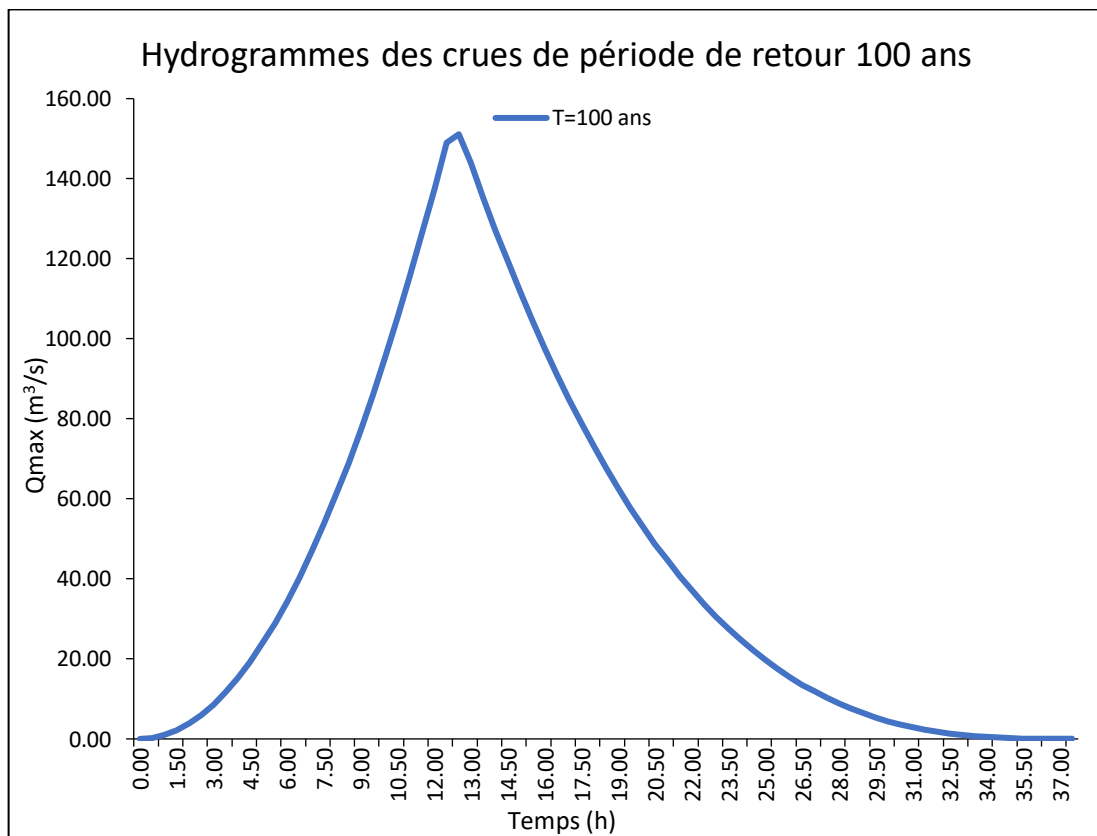


Figure III-10 : Hydrogramme de la crue de projet.

III.5. Conclusion :

L'objectif de ce chapitre est de déterminer les principales caractéristiques hydrologiques du bassin versant de l'oued Boukhmira lesquelles influencent directement le comportement du cours d'eau. Il vise également à estimer le débit de crue centennal étape essentielle pour proposer par la suite un aménagement hydraulique adapté aux conditions spécifiques de l'oued et à la maîtrise du risque d'inondation.

Chapitre IV : Modélisation du cours d'eau non aménagé

IV.1. Introduction :

L'étude des écoulements, qu'ils se produisent en charge ou à surface libre dans des canaux naturels ou artificiels, constitue une étape fondamentale de toute étude hydraulique. Cette analyse précède et conditionne la conception de tout projet d'aménagement, car elle permet de comprendre le comportement dynamique du cours d'eau et d'évaluer sa capacité à évacuer les débits de crue.

Afin de modéliser de manière réaliste l'écoulement à surface libre de l'oued Boukhmira, il est d'abord nécessaire de décrire l'état général du tronçon traversant la zone de l'aéroport Rabah Bitat. Par la suite, le calcul hydraulique, fondé sur la règle des valeurs extrêmes (débits maximaux et vitesses d'écoulement), permet de vérifier si le cours d'eau et les ouvrages existants assurent une évacuation efficace et continue des volumes d'eau générés lors des épisodes pluvieux intenses.

L'objectif de ce chapitre est de définir un programme d'aménagement hydraulique adapté en s'appuyant sur l'analyse des hauteurs d'eau correspondantes aux débits hydrologiques. Cette démarche permettra d'élaborer les cartes de profondeurs d'inondation, d'identifier les zones à risque et, in fine, de proposer des mesures de protection appropriées pour la zone d'étude.

IV.2. Généralités :

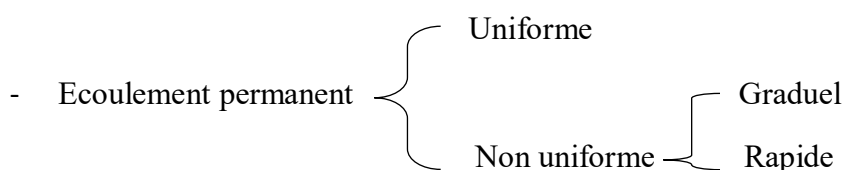
Contrairement à l'hydraulique en charge, où l'écoulement est principalement entraîné par un gradient de pression, l'hydraulique à surface libre repose sur l'action de la gravité. Elle se caractérise par la présence d'une surface libre, en contact direct avec l'atmosphère. C'est dans ce cadre que s'inscrit l'étude des écoulements naturels.

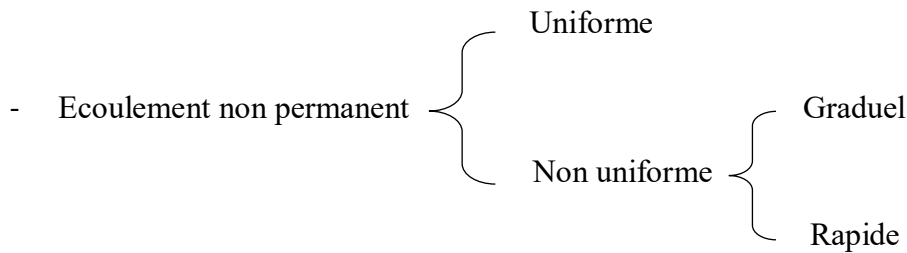
Une de leurs caractéristiques principales est que la profondeur de l'eau y est généralement faible par rapport à la longueur de l'écoulement, comme c'est le cas dans les rivières ou les canalisations ouvertes. La modélisation de ce type d'écoulement implique de diviser le domaine d'étude en deux sous-domaines distincts : l'un, inférieur, occupé par l'eau, et l'autre, supérieur, contenant de l'air. Ces deux volumes sont séparés par une interface clairement définie représentant la surface libre.

IV.2.1. Ecoulement à surface libre

Un écoulement à surface libre est un écoulement dans lequel la surface supérieure du fluide est soumise à la pression atmosphérique, ce qui signifie qu'elle n'est pas confinée. Ce type d'écoulement est principalement régi par la gravité comme force motrice.

L'hydraulique fluviale est une branche de l'hydraulique qui s'intéresse aux écoulements à surface libre, présents dans les canaux naturels ou artificiels. Plusieurs types d'écoulements peuvent être rencontrés dans ce domaine :





IV.2.2. Types d'écoulements

Les écoulements peuvent être classés selon la variation des paramètres hydrauliques, tels que la hauteur d'eau et la vitesse, en fonction du temps et de la position dans l'espace.

IV.2.2.1 La variation temporelle

a- Ecoulement permanent

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

Il se divise en :

- Uniforme
- Non uniforme

b- Ecoulement non permanent

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

Il se divise en :

- Uniforme
- Non uniforme : peut-être graduellement ou rapidement variée.

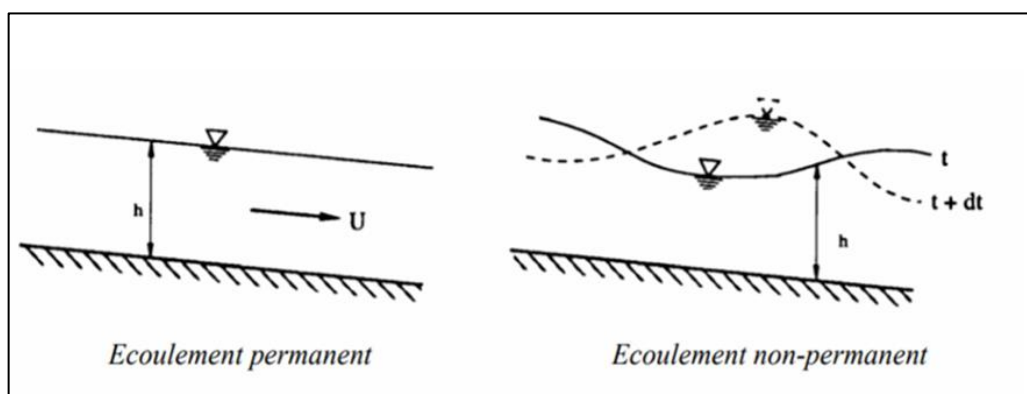


Figure IV-1 : Schéma des écoulements permanents et non-permanents.

IV.2.2.2 La variation spatiale

Un écoulement **uniforme** se caractérise par des grandeurs hydrauliques constantes le long du parcours, telles que la vitesse, le tirant d'eau et la section, c'est-à-dire qu'elles ne varient

pas selon l'espace ($\partial v/\partial x = 0$; $\partial h/\partial x = 0$; $\partial Q/\partial x = 0$). Cela implique une pente constante du lit, de la ligne d'eau et de la ligne d'énergie.

À l'inverse, un **écoulement non uniforme** présente des variations spatiales de ces mêmes grandeurs ($\partial v/\partial x \neq 0$; $\partial h/\partial x \neq 0$; $\partial Q/\partial x \neq 0$). Ces variations peuvent être progressives (écoulement graduellement varié) ou brusques (écoulement rapidement varié), notamment en présence de changements de géométrie ou de pente dans le canal.

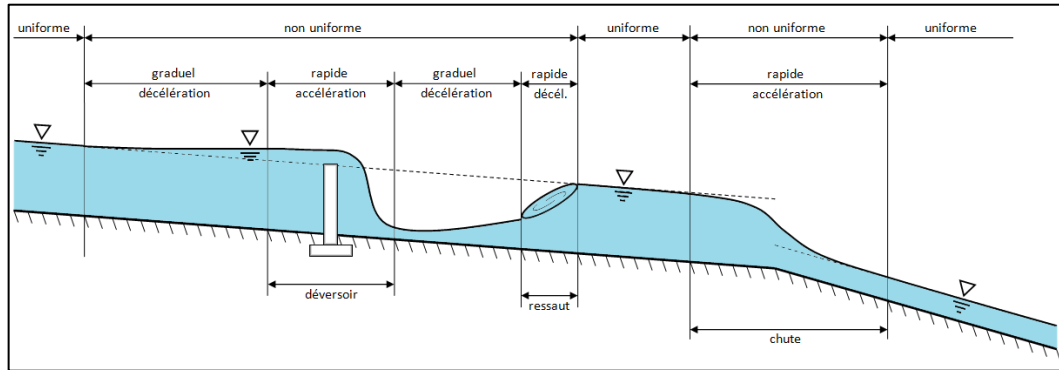


Figure IV-2 : Schéma démonstratif des différents types d'écoulements

IV.2.3. Régime d'écoulement

Pour déterminer le régime d'écoulement, il est nécessaire de calculer le nombre de Froude : C'est un paramètre hydraulique sans dimension qui décrit le rapport des forces d'inertie aux forces de pesanteur, ou encore le rapport de l'énergie potentielle à l'énergie cinétique du cours d'eau [23]. Son expression la plus répandue est la suivante :

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{g \times D_h}} \quad \text{IV-1}$$

Avec :

F_r : nombre de Froude ;

V : vitesse moyenne de l'écoulement (m/s) ;

g : accélération gravitationnelle (9.81 m/s^2) ;

D_h : tirant d'eau (m).

Selon la valeur de Fr , on distingue trois régimes d'écoulement :

- $F_r < 1$: le régime est fluvial ;
- $F_r = 1$: le régime est critique ;
- $F_r > 1$: le régime est torrentiel.

Un autre nombre adimensionnel utilisé dans l'étude hydraulique s'ajoute au nombre de Froude pour former trois autres régimes : le nombre de Reynolds.

$$MR_e = \frac{V \times h}{\nu} \quad \text{IV-2}$$

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

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

IV.2.4. Les canaux

On appelle canal un système de transport dans lequel un liquide s'écoule et dont la surface libre est soumise à la pression atmosphérique [24].

IV.2.4.1 Types de canaux

On distingue deux catégories de canaux :

a- Les canaux naturels

Les canaux naturels désignent les cours d'eau présents de manière naturelle à la surface ou en subsurface, tels que les ruisseaux, torrents, rivières, fleuves et estuaires. Les caractéristiques géométriques et hydrauliques de ces canaux sont généralement très irrégulières, ce qui rend l'application des principes de l'hydraulique théorique uniquement approximative, reposant sur des hypothèses simplificatrices.

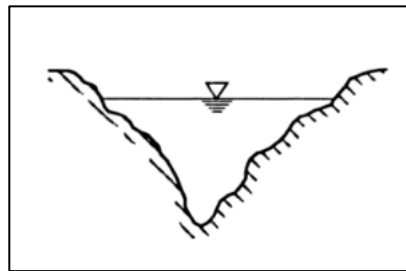


Figure IV-3 : Canal naturel

b- Les canaux artificiels

Les canaux artificiels sont des cours d'eau aménagés par l'homme. Ils peuvent être à ciel ouvert, construits au niveau du sol, comme les canaux de navigation, d'adduction, d'évacuation, d'irrigation ou de drainage. Ils peuvent également être couverts, ne remplissant pas nécessairement toute la section, comme les tunnels hydrauliques, aqueducs, drains ou égouts. Les caractéristiques hydrauliques de ces canaux sont en général assez régulières.

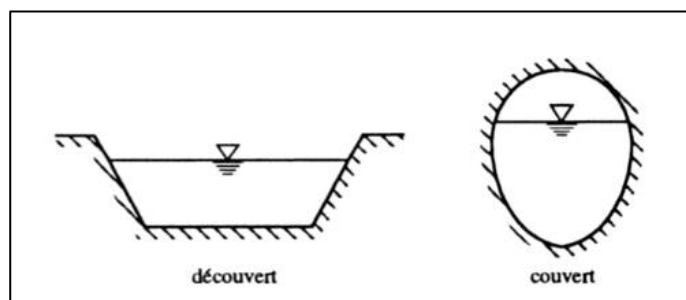


Figure IV-4 : Canal artificiel

IV.2.4.2 Propriétés des canaux

a- Propriétés géométriques

Les éléments géométriques d'un canal à surface libre sont des grandeurs qui caractérisent la forme de la section transversale de l'écoulement. Ils sont indispensables pour effectuer les calculs hydrauliques tels que le débit, la vitesse moyenne, ou encore le régime d'écoulement. Ces éléments sont :

- La section mouillée S ;
- Le périmètre mouillé P ;
- Le rayon hydraulique R_h :

$$R_h = \frac{S}{P} \quad \text{IV-3}$$

- La largeur B ;
- La profondeur du canal h ;
- La profondeur hydraulique D_h :

$$D_h = \frac{S}{B} \quad \text{IV-4}$$

- La pente de la surface libre j_w ;
- La pente du fond J_f :

$$J_f = \tan \alpha$$

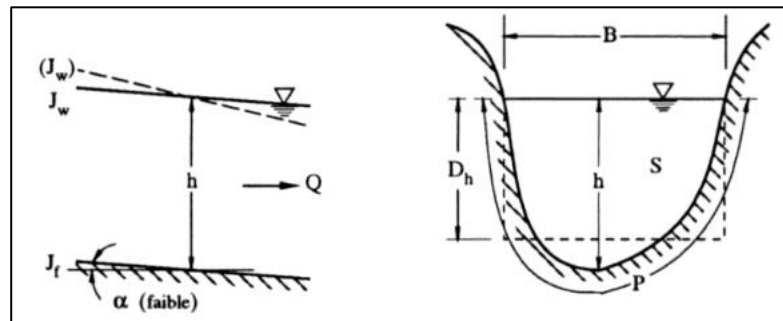


Figure IV-5 : Eléments géométriques du canal

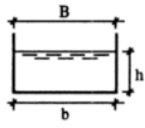
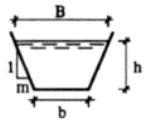
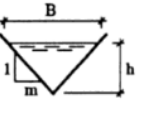
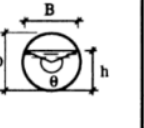
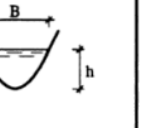
					
	Rectangle	Traپèze	Triangle	Cercle	Parabole
Surface S	$b h$	$(b + mh)h$	mh^2	$\frac{1}{8} (\theta - \sin \theta) D^2$	$\frac{2}{3} B h$
Périmètre mouillé P	$b + 2h$	$b + 2h\sqrt{1+m^2}$	$2h\sqrt{1+m^2}$	$\frac{1}{2} \theta D$	$B + \frac{8}{3} \frac{h^2}{B} *$
Rayon hydraulique R_h	$\frac{b h}{b + 2h}$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

Figure IV-6 : Éléments géométriques pour différentes sections de canaux artificiels.

Remarques :

- ✓ Les sections transversales les plus utilisées sont : trapézoïdale, triangulaire, rectangulaire et semi-circulaire.

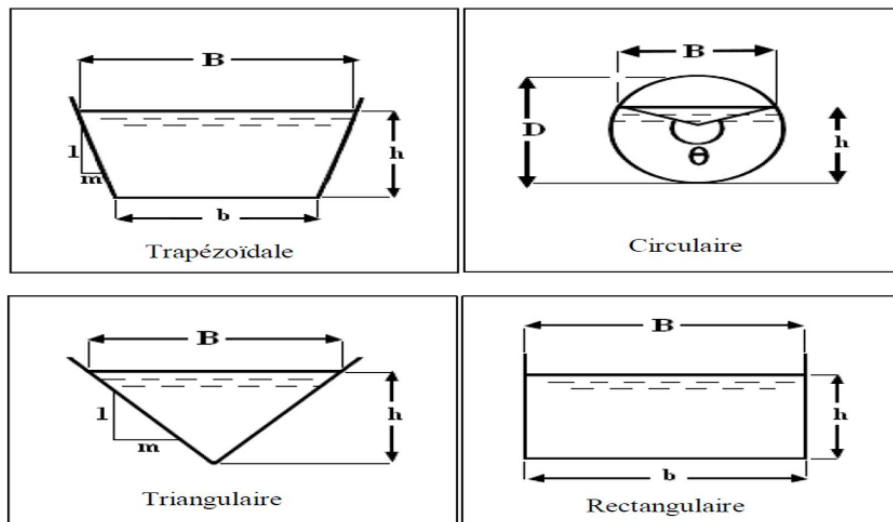


Figure IV-7 : Les sections transversales les plus utilisées

- ✓ Dans un canal rectangulaire, si $b \gg h \Rightarrow R \approx h$.
- ✓ La section hydraulique la plus avantageuse est celle qui permet d'obtenir un débit maximal Q tout en minimisant le périmètre mouillé P

$$S = 2h^2, \quad P = 4h, \quad R = \frac{S}{P} = \frac{h}{2}$$

b- Propriétés géométriques**i. Poids volumique**

Le poids volumique de l'eau est noté $\gamma_w = g\rho_w$ et vaut 9.81 Kn/m^3 pour l'eau sans matière en suspension, ρ_w désigne la masse volumique de l'eau et vaut 1000 kg/m^3 dans le cas de l'eau sans matière en suspension et g désigne l'accélération de la pesanteur et vaut 9.81 m/s^2 .

ii. Débits

Indique le volume d'eau qui traverse la section perpendiculaire du canal par unité de temps.

iii. Vitesse en un point de l'écoulement

La vitesse (V) en un point de l'écoulement est celle de la particule qui passe en ce point au moment considéré.

iv. Vitesse moyenne

La vitesse moyenne de l'eau dans le canal est influencée par la pente du fond, la rugosité et la forme de la section.

IV.2.5. Dimensionnement des canaux**IV.2.5.1 Régime uniforme**

L'écoulement est considéré comme uniforme si la hauteur h reste constante le long de l'écoulement et si la pente de la surface libre est égale à celle du fond.

IV.2.5.2 Conditions de l'écoulement uniforme

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

IV.2.5.3 Formules principales de calcul

La formule de calcul principale pour un écoulement permanent uniforme est la formule de Chézy.

La vitesse moyenne du courant est sous la forme suivant :

$$V = C\sqrt{R \cdot i} \quad \text{IV-5}$$

En utilisant le produit suivant :

$$Q = V \times S \quad \text{IV-6}$$

On obtient :

$$Q = C.S\sqrt{R.i} \quad \text{IV-7}$$

Avec :

C : Coefficient de Chézy ($\text{m}^{0.5}/\text{s}$) ;

R : Rayon hydraulique ;

V : Vitesse moyenne de l'écoulement (m/s) ;

S : Section du canal (m^2) ;

i : Pente de fond du canal.

IV.2.5.4 Détermination de coefficient de Chézy

Pour la détermination du coefficient de Chézy C , on utilise les formules empiriques suivantes :

1. Formule d'AGROSKINE

$$C = \frac{1}{n} + 17.72 \log(R_h) \quad \text{IV-8}$$

Avec :

C : Coefficient de Chézy ($\text{m}^{0.5}/\text{s}$) ;

R_h : Rayon hydraulique ;

n : Coefficient de rugosité.

2. Formule de MANNING-STRICKLER

$$C = \frac{1}{n} R_h^{\frac{1}{6}} = K_s \cdot R_h^{\frac{1}{6}} \quad \text{IV-9}$$

Avec :

C : Coefficient de Chézy ($\text{m}^{0.5}/\text{s}$) ;

R_h : Rayon hydraulique ;

n : Coefficient de rugosité ;

K_s : Coefficient de Strickler.

3. Formule de PAVLOVSKY :

$$C = \frac{1}{n} R_h^{\frac{1}{y}} \quad \text{IV-10}$$

Avec :

C : Coefficient de Chézy ($\text{m}^{0.5}/\text{s}$) ;

R_h : Rayon hydraulique ;

n : Coefficient de rugosité ;

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

$$y = 2.5\sqrt{n} - 0.13 - 0.75\sqrt{R_h}(\sqrt{n} - 0.1)$$

4. Formule de BAZIN

$$C = \frac{87}{1 + \frac{m_b}{\sqrt{R_h}}} \quad \text{IV-11}$$

Avec :

C : Coefficient de Chézy ($\text{m}^{0.5}/\text{s}$) ;

R_h : Rayon hydraulique ;

m_b : Coefficient de BAZIN, $m_b \in [0.06; 1.75]$.

IV.3. Modélisation du cours d'eau non aménagé

IV.3.1. Modélisation de l'écoulement

IV.3.1.1 Choix du type de modèle hydraulique

De nombreux logiciels permettent la modélisation hydraulique des écoulements à surface libre. Pour notre étude, le logiciel HEC-RAS (version 6.3.1) a été choisi en raison de plusieurs avantages, parmi lesquels :

- Aucun coût de licence. Tout le monde peut l'utiliser librement.
- Permet de simuler les écoulements d'eau dans les rivières, les canaux, en 1D (profil) ou en 2D (surface), en conditions stables (permanentes) ou changeantes dans le temps (non permanentes).
- On peut utiliser des cartes et des données topographiques (MNT, shapefiles) venant de logiciels comme ArcGIS ou QGIS.
- Les résultats de modélisation (niveaux d'eau, vitesses, zones inondées...) sont visibles sous forme de graphiques, cartes ou animations.

IV.3.1.2 Présentation du logiciel HEC-RAS

HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System) est un logiciel intégré d'analyse hydraulique destiné à la simulation des écoulements à surface libre. Développé par le Hydrologic Engineering Center du U.S. Army Corps of Engineers (USACE, 2010a et 2010b), il est aujourd'hui largement utilisé par de nombreuses firmes d'ingénierie et institutions gouvernementales. HEC-RAS se distingue par ses interfaces conviviales, facilitant l'édition des données et le paramétrage des simulations.

HEC-RAS résout les problèmes des écoulements à surface libre permanent ou non permanent de calcul de ligne d'eau en graduellement varié. Il résout les équations de Saint Venant 1D (équation de l'énergie unidimensionnelle) par la méthode de différences finies, les pertes étant évaluées par la formule de frottement au fond de Manning-Strickler et par des

formules de contraction/expansion de l'écoulement. Pour les situations rapidement variées telles que les ressauts hydrauliques, les écoulements à proximité des ponts, et les confluences de rivière, l'équation de l'énergie est remplacée par l'équation de quantité de mouvement. Pour les écoulements débordants, la section totale est divisée en sous-sections homogènes en termes de forme et de rugosité, et chaque débit partiel Q_i est calculé selon la "Divided Channel Method" à l'aide de la formule de Manning-Strickler. Il permet aussi de modéliser le transport de sédiments dans les rivières, les études de qualité des eaux, etc. HEC RAS trouve ses domaines d'application pour la simulation des crues, la simulation de la gestion des retenues d'eau, l'étude de transport de sédiment en rivière, étude du transport des polluants, etc [25].

IV.3.1.3 Etapes de simulation par HEC-RAS

v. Créer un nouveau projet

La première étape dans l'utilisation de HEC-RAS consiste à créer un nouveau projet. Pour cela, l'utilisateur doit lancer le logiciel, puis accéder au menu « File » et sélectionner l'option « New Project ». Une fenêtre s'ouvre alors pour saisir le nom du projet et définir le dossier de destination où seront enregistrés tous les fichiers associés. Une fois ces informations renseignées, le projet est initialisé

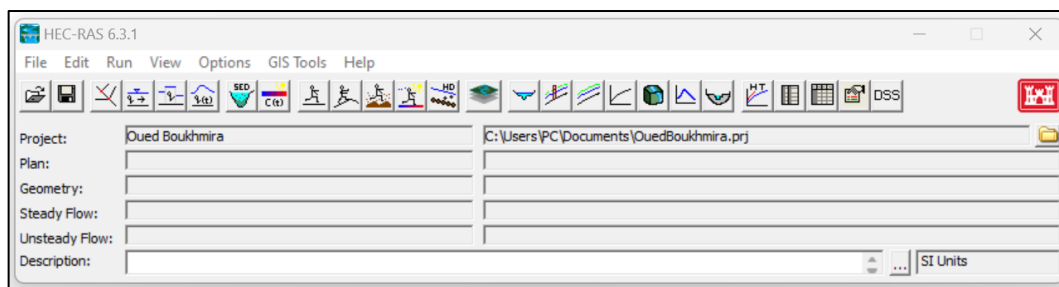


Figure IV-8 : Création d'un projet dans HEC-RAS.

vi. Modélisation de la rivière

La modélisation de la rivière constitue une étape fondamentale dans la préparation d'un projet HEC-RAS. Elle consiste à représenter le cours d'eau et son environnement à l'aide de données géométriques précises. À cette fin, l'utilisateur ouvre l'éditeur de géométrie pour tracer le tracé du chenal principal, définir les tronçons de la rivière, et insérer les sections transversales perpendiculaires à l'écoulement. Chaque section doit être renseignée avec ses élévations, sa largeur, et les coefficients de rugosité (coefficient de Manning) pour représenter correctement les caractéristiques physiques du lit et des berges. Cette modélisation permet de créer une base solide sur laquelle les conditions hydrauliques et les calculs d'écoulement pourront être appliqués.

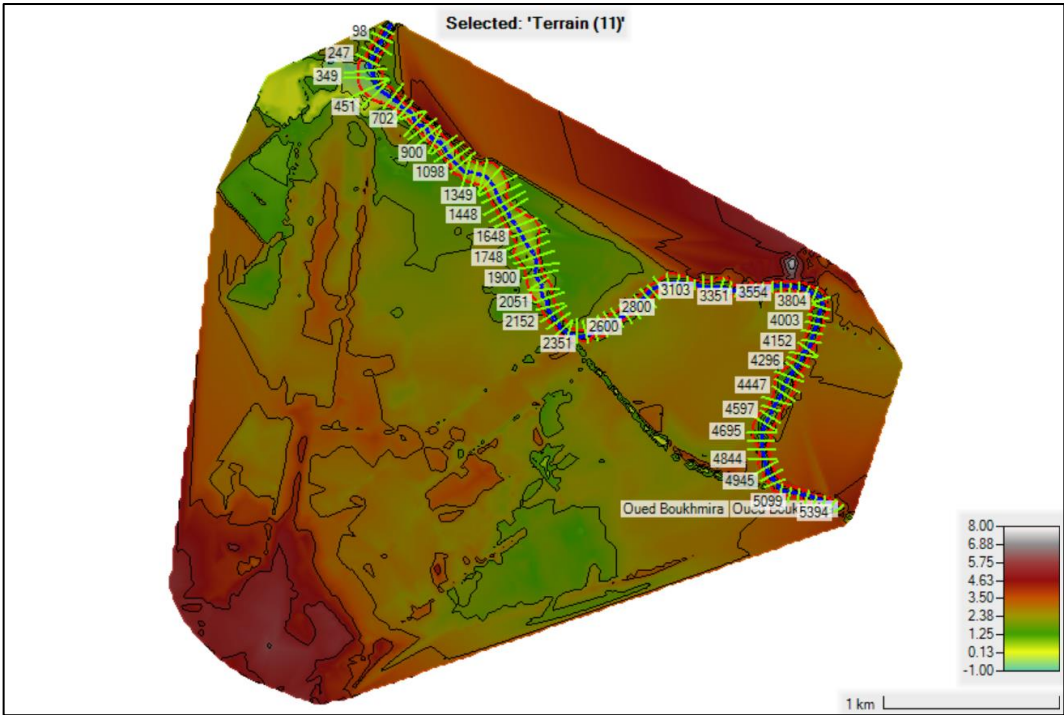


Figure IV-9 : Définition du tracé de l'oued et des sections en travers

vii. Débit et conditions aux limites

La modélisation hydraulique par HEC-RAS consiste à spécifier les débits d'entrées utilisés pour calculer les profils d'écoulement ainsi que les conditions aux limites telles que coefficient de Maning, la hauteur critique et la pente. À cette étape, le débit de crue a été intégré au modèle, ainsi que les conditions aux limites définies à l'amont et à l'aval.

File Options Help

Description :

Enter/Edit Number of Profiles (32000 max):

Locations of Flow Data Changes

River:

Reach: River Sta.:

Flow Change Location			Profile Names and Flow Rates
River	Reach	RS	PF 1
1 Oued Boukhmira	Oued Boukhmira	5394	151.11

Figure IV-10 : Introduction du débit de projet

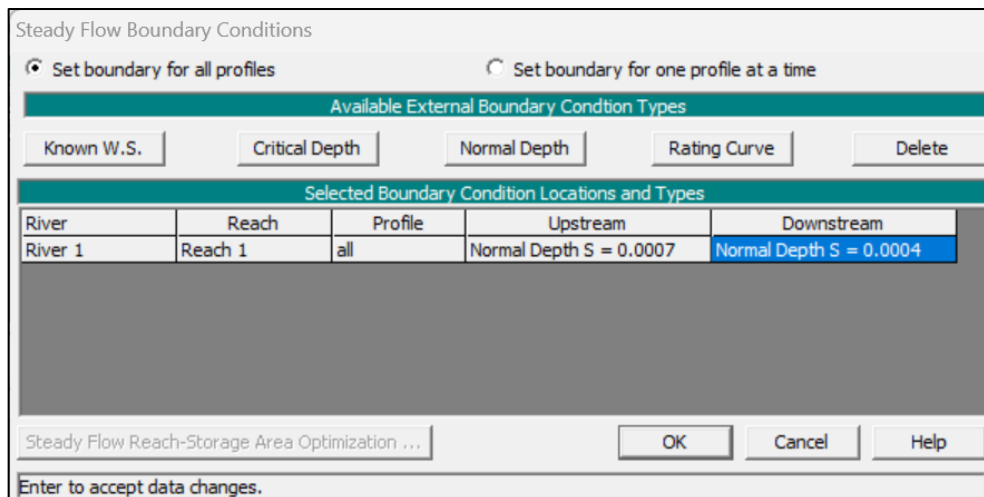


Figure IV-11 : Introduction des conditions aux limites

viii. Simulation

Une fois toutes les données requises et les conditions aux limites validées, il convient de définir le type de régime hydraulique à utiliser pour le calcul. Dans notre étude, une configuration mixte a été adoptée, avant de procéder à l'exécution de la simulation.

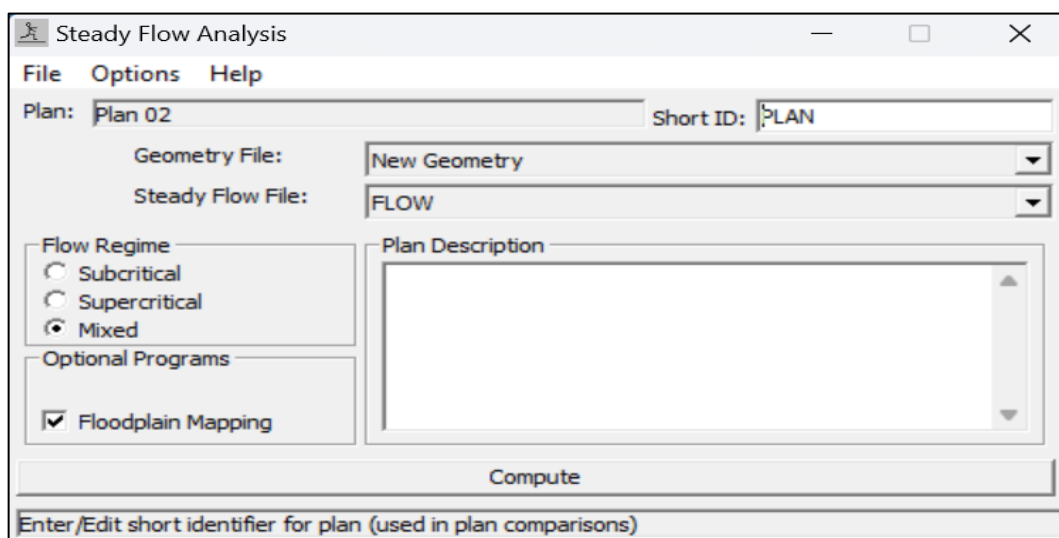


Figure IV-12 : Paramétrage du régime d'écoulement et exécution de la simulation.

IV.3.1.4 Résultat de la simulation

Les résultats obtenus à partir de la simulation menée sous HEC-RAS apportent une vision détaillée du fonctionnement hydraulique du cours d'eau dans son état actuel. Cette analyse permet d'examiner avec précision la distribution des vitesses, les niveaux d'eau, le nombre de Froude, ainsi que les variations du régime le long du tronçon étudié. Ces informations sont essentielles pour localiser les secteurs vulnérables aux inondations et orienter les choix d'aménagement visant à réduire les risques et à améliorer la gestion du lit fluvial.

i. Visualisation tridimensionnelle du tronçon modélisé

HEC-RAS fournit une vue de trois dimensions qui facilite le suivi du comportement des eaux de crue. La Figure IV-13 montre que la plupart des parties du tronçon présentent un débordement de l'oued, notamment dans la partie aval et le centre du tronçon où se situent les pistes d'atterrissage de l'aéroport.

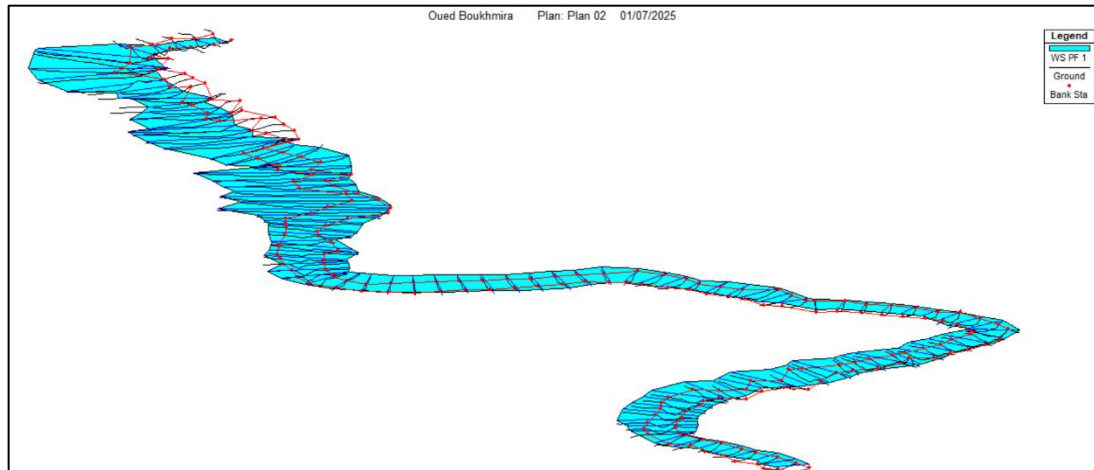


Figure IV-13 : Vue en Plan en 3D de l'Oued.

ii. Le profil en long

La ligne d'eau offre une représentation en profil longitudinal du tronçon étudié, illustrant le niveau de l'oued ainsi que celui correspondant à la crue centennale. Dans le cadre de cette analyse, le comportement de l'inondation se révèle fortement influencé par les variations topographiques du terrain.

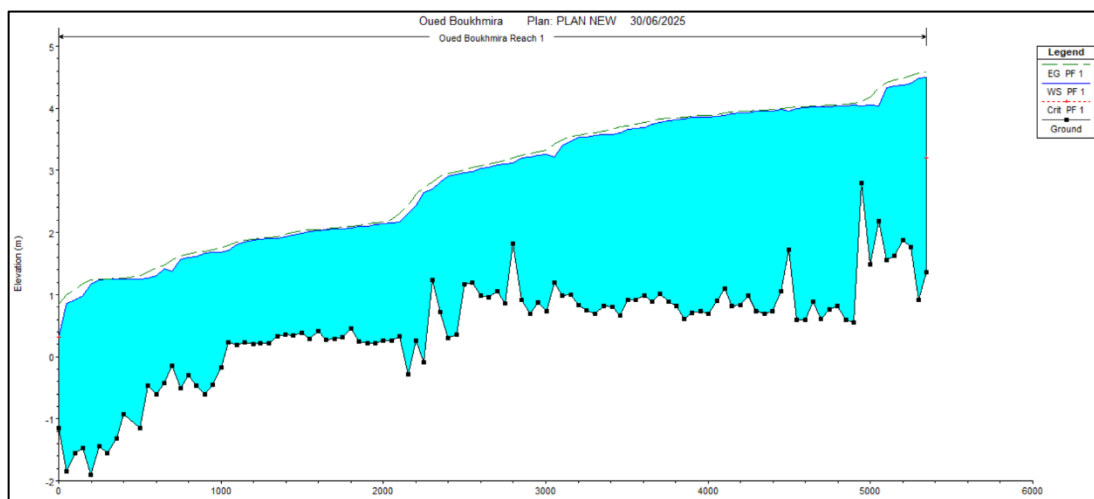


Figure IV-14 : Profil en long du cours d'eau à l'état naturel.

iii. Les profils en travers

Les profils en travers décrivent la forme du lit de la rivière à différents points, ils influencent directement les résultats liés aux hauteurs d'eau et à l'identification des zones inondables.

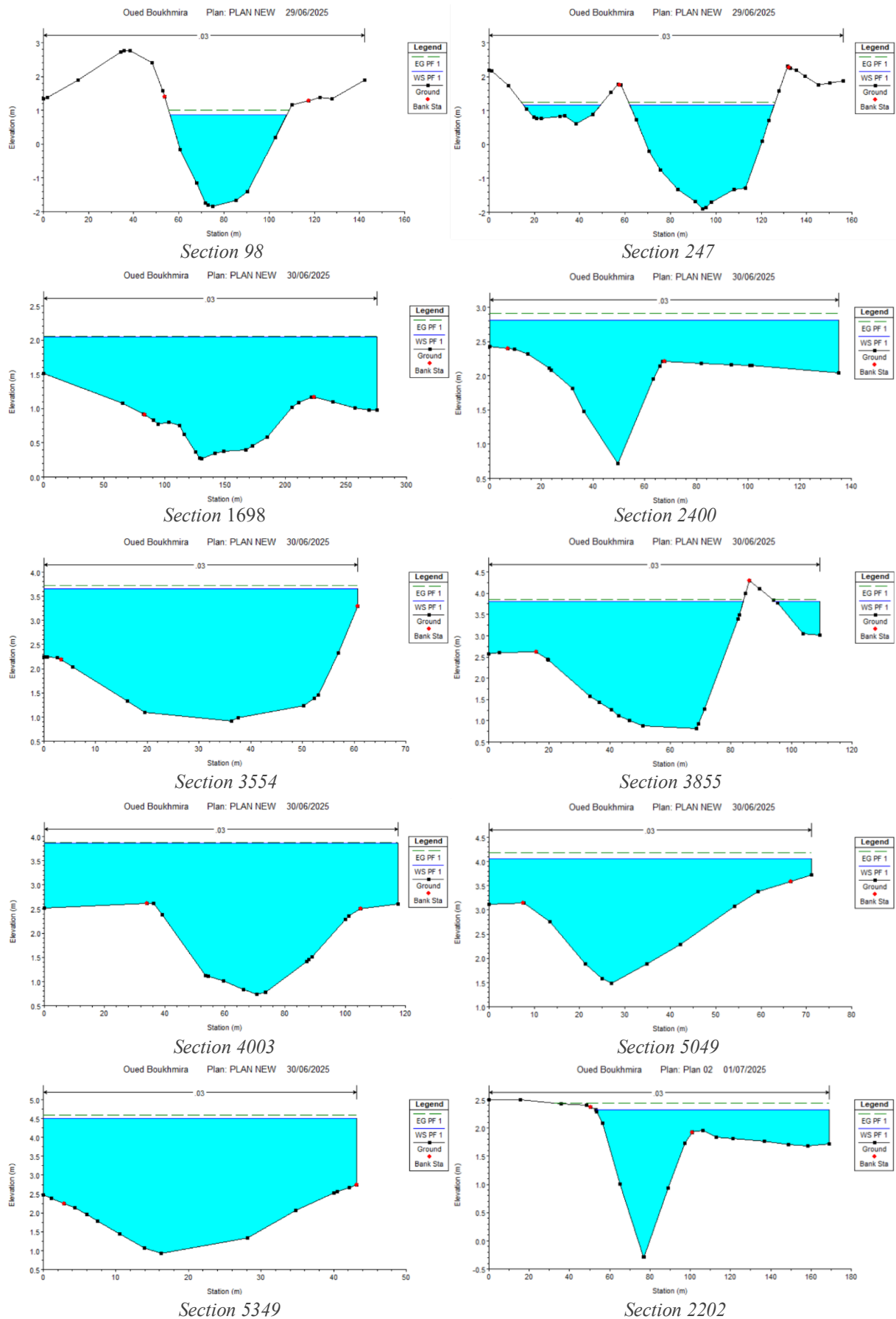


Figure IV-15 : Profils en travers de certaines sections.

Tableau IV-1 : Principaux paramètres hydrauliques pour l'ensemble des stations.

Rivière	Profile	Cote du fond (m)	Cote du plan d'eau (m)	Ligne d'énergie (m)	Pente (m/m)	Vitesse (m/s)	Section mouillée (m ²)	Largeur au miroir (m)	Nombre de Froude
Oued Boukhmira	5394	1.36	4.52	4.61	0.00055	1.28	119.89	58.4	0.28
Oued Boukhmira	5299	1.76	4.42	4.55	0.000813	1.63	94.76	41.2	0.34
Oued Boukhmira	5150	1.56	4.35	4.44	0.000688	1.4	113.45	60	0.31
Oued Boukhmira	5099	2.74	4.02	4.35	0.004167	1.58	62.25	55.7	0.63
Oued Boukhmira	5049	1.76	4.06	4.18	0.001261	1.34	101.07	71.1	0.39
Oued Boukhmira	4995	2.8	4.04	4.11	0.000844	0.97	139.27	132.4	0.31
Oued Boukhmira	4945	0.55	4.05	4.08	0.000217	0.83	212.91	146.1	0.18
Oued Boukhmira	4795	0.76	4.02	4.05	0.000205	0.79	233.6	165	0.17
Oued Boukhmira	4695	0.88	4.02	4.03	0.00009	0.56	309.81	173	0.12
Oued Boukhmira	4547	1.72	3.96	4.01	0.00037	0.96	151.38	75.4	0.22
Oued Boukhmira	4498	1.05	3.98	3.99	0.000088	0.55	315.37	180.6	0.11
Oued Boukhmira	4447	0.73	3.95	3.98	0.000157	0.79	193.54	72.2	0.15
Oued Boukhmira	4347	0.74	3.96	3.97	0.000078	0.52	313.04	165.57	0.11
Oued Boukhmira	4296	0.99	3.93	3.96	0.000239	0.86	196.11	125.03	0.19
Oued Boukhmira	4249	0.83	3.92	3.95	0.000204	0.8	217.12	142.4	0.17
Oued Boukhmira	4199	0.81	3.91	3.94	0.000231	0.77	224.82	161.4	0.18
Oued Boukhmira	4152	1.09	3.88	3.92	0.000361	0.96	180.18	127.57	0.22
Oued Boukhmira	4104	0.9	3.87	3.91	0.000274	0.88	189.91	117.3	0.2
Oued Boukhmira	4053	0.69	3.86	3.89	0.000215	0.8	209.63	124.9	0.18
Oued Boukhmira	3902	0.61	3.83	3.86	0.000243	0.84	189.84	110	0.19
Oued Boukhmira	3855	0.82	3.81	3.85	0.000256	0.91	178.7	99.05	0.19
Oued Boukhmira	3754	1.01	3.77	3.82	0.000419	1.06	153.92	96.52	0.24
Oued Boukhmira	3704	0.89	3.74	3.8	0.000443	1.11	146.27	86.49	0.25
Oued Boukhmira	3654	0.98	3.69	3.77	0.000524	1.33	119.9	58.7	0.28
Oued Boukhmira	3603	0.92	3.67	3.75	0.000451	1.21	129.64	61.6	0.26
Oued Boukhmira	3554	0.92	3.66	3.72	0.000405	1.14	134.02	60.7	0.24
Oued Boukhmira	3505	0.67	3.61	3.7	0.000578	1.31	119.6	64.47	0.29
Oued Boukhmira	3457	0.8	3.58	3.67	0.000724	1.3	117.21	67.32	0.31
Oued Boukhmira	3403	0.81	3.57	3.63	0.000386	1.08	144.2	69.8	0.24
Oued Boukhmira	3351	0.69	3.56	3.61	0.00029	1.01	155.07	70.8	0.21
Oued Boukhmira	3301	0.75	3.53	3.59	0.000383	1.1	141.36	66	0.23
Oued Boukhmira	3250	0.83	3.53	3.57	0.000313	0.88	176.91	102.2	0.21
Oued Boukhmira	3203	1	3.47	3.54	0.000679	1.27	128.65	100.15	0.3
Oued Boukhmira	3152	0.98	3.4	3.5	0.000975	1.43	113.31	90.35	0.36
Oued Boukhmira	3103	1.2	3.21	3.42	0.002162	2.08	78.4	64.18	0.53
Oued Boukhmira	3054	0.73	3.25	3.33	0.000582	1.33	121.74	63.5	0.29
Oued Boukhmira	2954	0.69	3.22	3.27	0.000493	0.99	161.18	118.2	0.25
Oued Boukhmira	2850	1.82	3.12	3.2	0.001399	1.43	118.12	117.3	0.41
Oued Boukhmira	2750	1.06	3.09	3.13	0.00038	0.94	185.03	139.1	0.23
Oued Boukhmira	2701	0.96	3.05	3.11	0.000534	1.08	155.19	119.35	0.27
Oued Boukhmira	2600	1.2	2.98	3.04	0.000877	1.18	141.6	131.2	0.33
Oued Boukhmira	2550	1.16	2.96	3.01	0.000506	0.99	171.21	139.8	0.26
Oued Boukhmira	2451	0.3	2.91	2.96	0.000465	1.02	169.82	133.9	0.25
Oued Boukhmira	2400	0.72	2.82	2.91	0.001739	1.49	115.97	135.1	0.45
Oued Boukhmira	2351	1.24	2.7	2.81	0.002339	1.68	106.77	138.2	0.52
Oued Boukhmira	2252	0.26	2.44	2.61	0.004603	1.96	86.41	144.4	0.7
Oued Boukhmira	2102	0.26	2.15	2.2	0.00096	1.11	152.53	170.8	0.34
Oued Boukhmira	1999	0.22	2.12	2.15	0.000254	0.71	222.54	155.2	0.18
Oued Boukhmira	1951	0.22	2.11	2.14	0.000301	0.77	200.94	133.7	0.2
Oued Boukhmira	1849	0.46	2.07	2.1	0.000427	0.8	221.8	243.1	0.23
Oued Boukhmira	1798	0.32	2.06	2.08	0.000271	0.7	251.11	241.7	0.19
Oued Boukhmira	1748	0.29	2.05	2.07	0.000172	0.57	295.23	254	0.15

Rivière	Profile	Cote du fond (m)	Cote du plan d'eau (m)	Ligne d'énergie (m)	Pente (m/m)	Vitesse (m/s)	Section mouillée (m ²)	Largeur au miroir (m)	Nombre de Froude
Oued Boukhmira	1698	0.27	2.05	2.06	0.000163	0.53	316.07	275.9	0.14
Oued Boukhmira	1648	0.41	2.03	2.05	0.000227	0.61	257.44	211.7	0.17
Oued Boukhmira	1549	0.39	1.99	2.02	0.000343	0.79	195.88	138.9	0.21
Oued Boukhmira	1498	0.34	1.96	2	0.000579	0.92	189.39	260.4	0.27
Oued Boukhmira	1448	0.35	1.93	1.97	0.000633	0.94	194.44	274.4	0.28
Oued Boukhmira	1400	0.33	1.9	1.94	0.00059	0.91	197.84	244.4	0.27
Oued Boukhmira	1297	0.22	1.89	1.91	0.000207	0.64	251.32	187.05	0.16
Oued Boukhmira	1150	0.19	1.8	1.85	0.000757	1.06	159.66	186.76	0.3
Oued Boukhmira	1098	0.23	1.71	1.8	0.001463	1.37	118.94	133.47	0.41
Oued Boukhmira	1052	-0.18	1.69	1.74	0.000645	1.08	148.93	125.05	0.29
Oued Boukhmira	752	-0.15	1.38	1.56	0.003057	1.96	81.77	84.16	0.6
Oued Boukhmira	551	-1.15	1.24	1.31	0.000585	1.15	139.17	97.64	0.28
Oued Boukhmira	451	-0.93	1.25	1.27	0.000186	0.64	252.78	168.69	0.16
Oued Boukhmira	51	-1.15	0.31	0.84	0.0008	3.23	46.84	44.16	0.31

Remarque :

D'après les résultats de la simulation, on remarque que :

- ✓ La vitesse d'écoulement varie entre 0,52 et 3.23 m/s.
- ✓ La hauteur d'eau varie entre 1.24 et 3,5 m.
- ✓ La variation du régime d'écoulement tout au long de l'oued est mise en évidence par les valeurs du nombre de Froude, qui varient entre 0,11 et 1.

iv. Les zones inondables

Après le calcul hydraulique effectué avec HEC-RAS, cette étape vise à analyser la distribution des hauteurs d'eau le long de l'oued, en vue d'identifier les zones potentiellement exposées à un dépassement des berges. Cette analyse repose sur l'extraction des hauteurs d'eau en différents points stratégiques du cours d'eau. La délimitation des secteurs inondables a été effectuée à l'aide de l'outil RAS Mapper intégré au logiciel. L'utilisation de cet outil a permis de générer la carte suivante :



Figure IV-16 : Carte des profondeurs

IV.4. Conclusion

Les résultats de la simulation hydraulique effectuée avec le logiciel HEC-RAS sur l'oued Boukhmira, situé à proximité de l'aéroport Rabah Bitat, ont mis en évidence une forte vulnérabilité du site face aux crues. Plusieurs zones du tronçon étudié sont soumises à des débordements significatifs, susceptibles d'affecter directement les infrastructures aéroportuaires et leurs abords.

Cette situation souligne la nécessité urgente de concevoir et de mettre en œuvre des aménagements hydrauliques appropriés, visant à réduire le risque d'inondation, à protéger les installations sensibles, et à prévenir les impacts potentiellement graves des crues futures. Ces constats constituent la base du chapitre suivant, consacré à l'étude et à la modélisation des variantes d'aménagement proposées pour la sécurisation du site.

Chapitre V : Étude des variantes d'aménagement

V.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude comparative de plusieurs variantes d'aménagement visant à assurer une protection optimale de l'aéroport Rabah Bitat contre les risques d'inondation. S'appuyant sur les résultats hydrologiques et hydrauliques présentés dans les chapitres précédents, et en tenant compte des caractéristiques topographiques et environnementales de la zone d'étude, différentes solutions d'aménagement hydraulique ont été élaborées.

L'objectif principal est d'évaluer l'efficacité de chaque variante en matière de gestion des crues, de réduction de la vulnérabilité et de diminution du risque d'inondation. Cette analyse permettra d'identifier la solution la plus adaptée aux conditions locales, garantissant ainsi la sécurité et la pérennité des infrastructures aéroportuaires, tout en favorisant une gestion durable du milieu hydraulique.

V.2. Calcul hydraulique des canaux

Le dimensionnement des diverses sections ouvertes, aux formes géométriques variées, a été effectué en appliquant la formule de Manning-Strickler, exprimée par la relation suivante :

$$Q = \frac{1}{n} R_h^{\frac{2}{3}} \cdot S_m \cdot I^{\frac{1}{2}} \quad \text{V-1}$$

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

n : coefficient de rugosité ;

R_h : rayon hydraulique ;

S_m : section mouillée du canal en (m^2) ;

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

V.2.1. Choix des paramètres de dimensionnement

- **La pente du projet :**

Le profil en long d'oued Boukhmira révèle une pente globalement faible. Toutefois, en raison des irrégularités marquées du lit naturel du cours d'eau, il a été nécessaire d'opter pour une pente uniforme au niveau de chaque tronçon afin d'assurer une meilleure stabilité hydraulique.

Tableau V-1 : Pente adoptée pour chaque tronçon du cours d'eau

Rivière	Tronçon	Section de départ	Section d'arrivée	Pente du projet (m/m)
Oued Boukhmira	1	5393	2496	0.0007
Oued Boukhmira	2	2496	846	0.0015
Oued Boukhmira	3	846	46	0.0004

- **Le coefficient de rugosité :**

La rugosité hydraulique d'un canal à surface libre dépend essentiellement des caractéristiques physiques de son revêtement. Elle reflète la résistance opposée à l'écoulement

par les parois et le lit du canal, influencée par la texture, la présence d'irrégularités ou de végétation. À titre illustratif, les valeurs typiques du coefficient de rugosité, selon différents types de matériaux ou d'aménagements, sont résumées dans le tableau suivant.

Tableau V-2 : Les valeurs du coefficient de rugosité 'n'

Caractéristiques du lit ou du revêtement	Rugosité n
Canal en béton armé	0.013
Canal en gabion	0.03

- **Vitesse d'érosion :**

Pour prévenir l'érosion du fond et des berges des canaux sous l'effet de la dynamique du courant, la vitesse de l'eau ne doit pas dépasser une valeur limite maximale. Les vitesses moyennes limites admissibles pour les lits consolidés sont présentées dans le tableau ci-dessous (Degoutte, 2012).

Tableau V-3 : 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

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

La marge de sécurité, ou revanche, correspond à la hauteur libre entre le niveau maximal de l'eau en période de crue (ligne d'eau) et le sommet de la berge. Elle vise à assurer la sécurité hydraulique de l'ouvrage face à des crues exceptionnelles.

La marge de sécurité oscille, généralement, entre 0,30 m pour les petits canaux, et 0.60 à 1.20 m pour les grands canaux. Il est donc indispensable de tenir compte de toutes les circonstances qui peuvent conduire à modifier ces indications [26].

Tableau V-4 : Revanches utilisées (Degoutte, 2012)

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

V.3. Étude de variantes

Dans cette étude, deux variantes d'aménagement ont été proposées :

- Un canal trapézoïdal en béton armé ;
- Un canal trapézoïdal en gabion.

Un calcul hydraulique sera réalisé pour chacune des variantes, en vérifiant l'état d'écoulement sur l'ensemble des tronçons du cours d'eau à l'aide de simulations effectuées avec le logiciel HEC-RAS. Chaque solution d'aménagement proposée fera l'objet d'une description détaillée, afin de permettre le choix de la variante la plus adaptée d'un point de vue technico-économique.

V.3.1. Première variante : Canal en gabion

La première variante proposée consiste en la construction d'un canal trapézoïdal en gabions. Ce type d'aménagement est retenu pour sa capacité à stabiliser efficacement les berges et à résister à l'érosion, tout en favorisant un écoulement fluide des eaux de crue. Grâce à leur structure perméable, les gabions permettent également de diminuer la pression hydrostatique, ce qui constitue un avantage certain dans les contextes topographiques complexes ou soumis à des régimes hydrauliques fluctuants.

V.3.1.1 Dimensionnement

Les dimensions des canaux en gabions sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau V-5 : Caractéristiques géométriques et hydrauliques des canaux en gabion

Tronçons	Section départ	Section arrivée	Longueur (m)	Largeur au fond (m)	Hauteur du canal (m)	Rugosité n (Manning)
1	5393	2496	2897	50	3	0.03
2	2496	846	1650	50	3	0.03
3	846	46	800	50	3	0.03

V.3.1.2 Résultats de la simulation

- Profil en long :

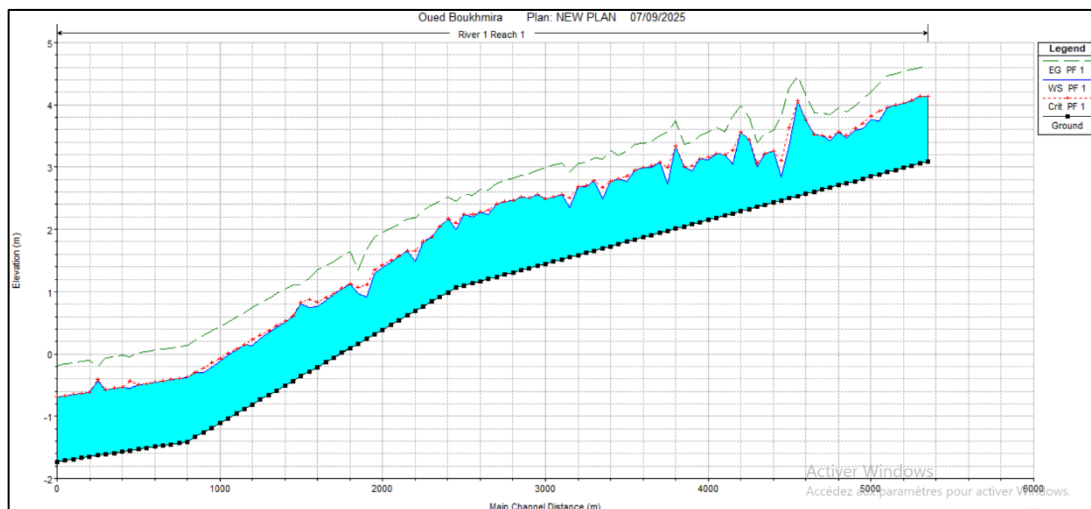


Figure V-1 : Profil en long du cours d'eau après l'aménagement (variante 1).

• Profils en travers :

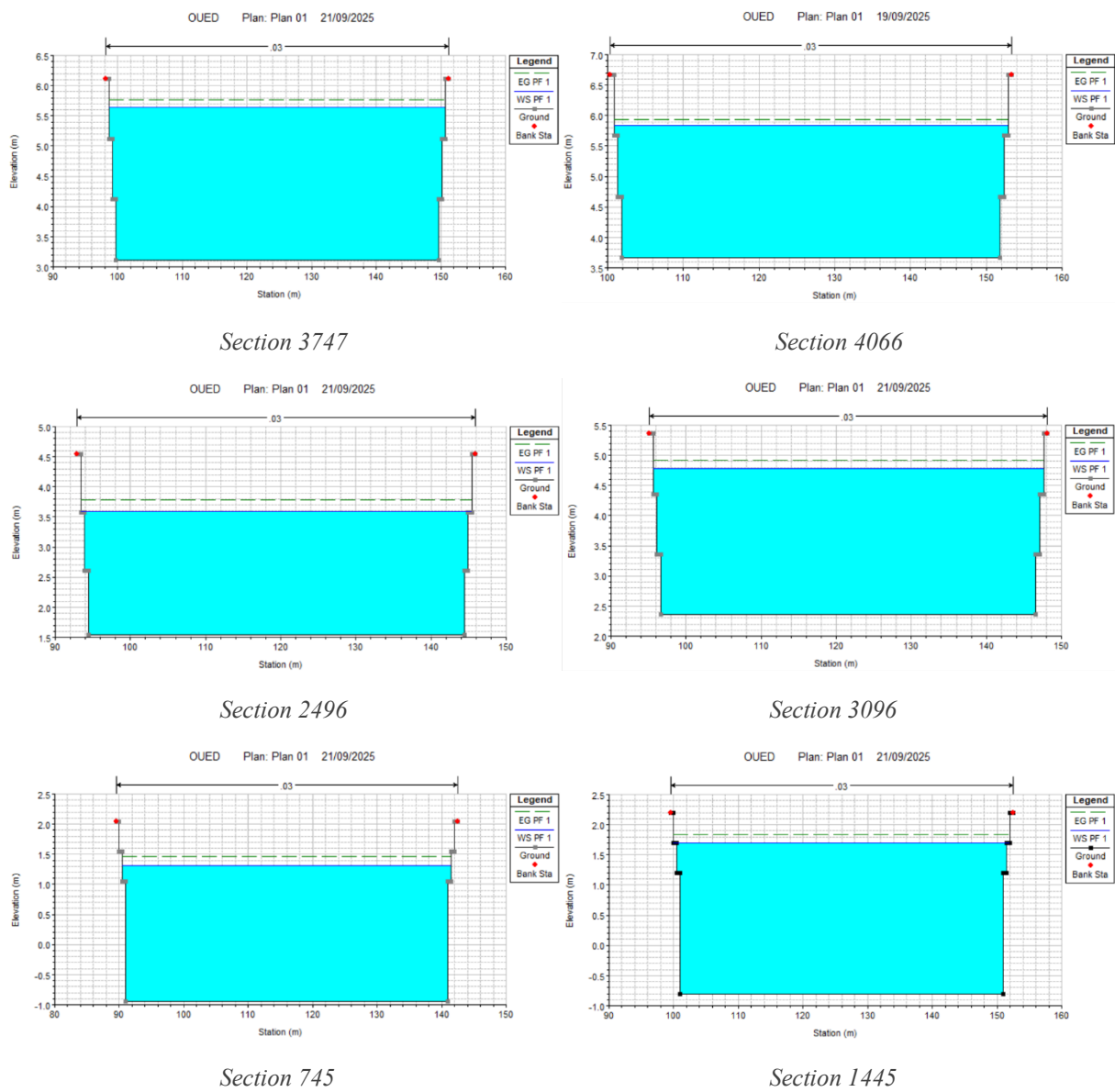


Figure V-2 : Profils en travers de l'oued après l'aménagement (variante 1).

• Paramètres d'écoulement :

Les résultats des paramètres d'écoulement sont représentés dans le tableau ci-dessus :

Tableau V-6 : Principaux paramètres hydrauliques du profil en travers

Rivière	Profile	Cote du fond (m)	Cote du plan d'eau (m)	Ligne d'énergie (m)	Pente (m/m)	Vitesse (m/s)	Section mouillée (m ²)	Largeur au miroir (m)	Nombre de Froude
Oued Boukhmira	5393	3.7	6.26	6.38	0.000708	1.54	130.21	52	0.31
Oued Boukhmira	5244	3.67	6.23	6.35	0.000709	1.54	130.12	52	0.31
Oued Boukhmira	5146	3.63	6.19	6.31	0.00071	1.54	130.09	52	0.31
Oued Boukhmira	5096	3.6	6.15	6.28	0.000711	1.54	130.01	52	0.31
Oued Boukhmira	5045	3.56	6.12	6.24	0.000712	1.54	129.99	52	0.31
Oued Boukhmira	4996	3.53	6.08	6.2	0.000714	1.54	129.88	52	0.31
Oued Boukhmira	4945	3.49	6.05	6.17	0.000714	1.54	129.85	52	0.31
Oued Boukhmira	4895	3.46	6.01	6.13	0.000716	1.54	129.76	52	0.31
Oued Boukhmira	4796	3.42	5.98	6.1	0.000717	1.54	129.7	52	0.31
Oued Boukhmira	4646	3.39	5.94	6.06	0.000719	1.54	129.6	52	0.31
Oued Boukhmira	4596	3.35	5.9	6.03	0.000719	1.54	129.55	52	0.31
Oued Boukhmira	4545	3.32	5.87	5.99	0.000722	1.55	129.42	52	0.31
Oued Boukhmira	4495	3.29	5.83	5.95	0.000723	1.55	129.37	52	0.31
Oued Boukhmira	4446	3.25	5.8	5.92	0.000725	1.55	129.25	52	0.31
Oued Boukhmira	4396	3.22	5.76	5.88	0.000726	1.55	129.18	52	0.31
Oued Boukhmira	4346	2.84	5.35	5.47	0.000756	1.57	127.59	52	0.32
Oued Boukhmira	4296	2.8	5.31	5.44	0.000759	1.57	127.42	52	0.32
Oued Boukhmira	4245	2.77	5.27	5.4	0.000763	1.57	127.18	52	0.32
Oued Boukhmira	4146	2.73	5.23	5.36	0.000767	1.57	127	52	0.32
Oued Boukhmira	4046	2.7	5.2	5.32	0.000772	1.58	126.74	52	0.32
Oued Boukhmira	3945	2.67	5.16	5.28	0.000778	1.58	126.46	52	0.32
Oued Boukhmira	3846	2.63	5.12	5.24	0.000782	1.58	126.23	52	0.32
Oued Boukhmira	3747	2.6	5.08	5.21	0.000788	1.59	125.94	52	0.33
Oued Boukhmira	3546	2.56	5.04	5.17	0.000794	1.59	125.66	52	0.33
Oued Boukhmira	3396	2.53	5	5.13	0.0008	1.6	125.32	52	0.33
Oued Boukhmira	3296	2.49	4.96	5.09	0.000807	1.6	125.03	52	0.33
Oued Boukhmira	3246	2.46	4.91	5.04	0.000815	1.6	124.64	52	0.33
Oued Boukhmira	3197	2.42	4.87	5	0.000822	1.61	124.29	52	0.33
Oued Boukhmira	3096	2.39	4.83	4.96	0.000831	1.61	123.87	52	0.33
Oued Boukhmira	2796	2.35	4.79	4.92	0.00084	1.62	123.48	52	0.34
Oued Boukhmira	2745	2.32	4.74	4.88	0.000851	1.63	122.98	52	0.34
Oued Boukhmira	2696	2.29	4.7	4.84	0.000861	1.63	122.53	52	0.34
Oued Boukhmira	2646	2.25	4.66	4.79	0.000873	1.64	121.99	52	0.34
Oued Boukhmira	2596	2.22	4.61	4.75	0.000886	1.65	121.44	52	0.34
Oued Boukhmira	2496	2.18	4.56	4.7	0.000901	1.66	120.82	52	0.35
Oued Boukhmira	2346	2.15	4.52	4.66	0.000916	1.66	120.2	52	0.35
Oued Boukhmira	2295	2.01	4.32	4.47	0.000998	1.71	117.05	52	0.36
Oued Boukhmira	2246	1.98	4.27	4.42	0.001026	1.72	116.04	52	0.37
Oued Boukhmira	2196	1.94	4.21	4.36	0.001056	1.74	115.01	52	0.37
Oued Boukhmira	2146	1.91	4.15	4.31	0.001093	1.76	113.8	52	0.38
Oued Boukhmira	2095	1.87	4.09	4.25	0.001133	1.78	112.54	52	0.39
Oued Boukhmira	2045	1.84	4.03	4.2	0.001182	1.8	111.08	52	0.39
Oued Boukhmira	1996	1.8	3.97	4.14	0.001238	1.83	109.5	52	0.4
Oued Boukhmira	1946	1.77	3.9	4.07	0.001309	1.86	107.62	52	0.41
Oued Boukhmira	1895	1.73	3.82	4	0.001393	1.89	105.56	52	0.42
Oued Boukhmira	1796	1.7	3.74	3.93	0.001505	1.94	103.08	52	0.44
Oued Boukhmira	1746	1.62	3.66	3.86	0.001506	1.94	103.06	52	0.44
Oued Boukhmira	1696	1.55	3.59	3.78	0.001507	1.94	103.04	52	0.44
Oued Boukhmira	1645	1.47	3.51	3.71	0.001472	1.94	103.02	51	0.44
Oued Boukhmira	1596	1.4	3.44	3.63	0.001467	1.94	103.13	51	0.44
Oued Boukhmira	1545	1.32	3.37	3.56	0.001462	1.94	103.24	51	0.43
Oued Boukhmira	1445	0.26	2.4	2.58	0.00128	1.86	107.6	51	0.41
Oued Boukhmira	1396	0.19	2.34	2.51	0.001254	1.85	108.29	51	0.4

Rivière	Profile	Cote du fond (m)	Cote du plan d'eau (m)	Ligne d'énergie (m)	Pente (m/m)	Vitesse (m/s)	Section mouillée (m ²)	Largeur au miroir (m)	Nombre de Froude
Oued Boukhmira	1346	-0.35	1.95	2.11	0.001019	1.73	115.46	51	0.37
Oued Boukhmira	1295	-0.42	1.91	2.06	0.00098	1.71	116.88	51	0.36
Oued Boukhmira	1246	-0.5	1.86	2.01	0.000939	1.69	118.43	51	0.35
Oued Boukhmira	1146	-0.86	1.57	1.71	0.00086	1.64	121.7	51	0.34
Oued Boukhmira	1096	-0.89	1.47	1.62	0.000932	1.68	118.7	51	0.35
Oued Boukhmira	1046	-0.91	1.42	1.57	0.000977	1.71	117.01	51	0.36
Oued Boukhmira	996	-0.93	1.37	1.52	0.00103	1.74	115.1	51	0.37
Oued Boukhmira	946	-0.95	1.31	1.47	0.00109	1.77	113.08	51	0.38
Oued Boukhmira	846	-0.97	1.24	1.41	0.001164	1.8	110.82	51	0.39
Oued Boukhmira	745	-0.99	1.17	1.35	0.001255	1.85	108.27	51	0.4
Oued Boukhmira	495	-1.01	1.1	1.28	0.001372	1.9	105.31	51	0.42
Oued Boukhmira	397	-1.03	1.01	1.21	0.001526	1.96	101.9	51	0.44
Oued Boukhmira	295	-1.06	0.8	1.03	0.002007	2.15	92.93	50	0.5
Oued Boukhmira	195	-1.08	0.64	0.92	0.002573	2.32	86.08	50	0.57
Oued Boukhmira	96	-1.1	0.07	0.67	0.008979	3.41	58.68	50	1

V.3.2. Deuxième variante : Canal en béton armé

La deuxième variante consiste en la réalisation d'un canal à section trapézoïdale en béton armé. Ce profil a été retenu pour ses performances hydrauliques élevées, offrant une capacité de transit importante et un écoulement optimal, tout en garantissant une grande stabilité structurelle, notamment en cas de forts débits. Le talus est conçu avec un fruit de pente $m = 1$, correspondant à un angle de 45° , afin de faciliter les travaux de mise en œuvre sur le terrain.

V.3.2.1 Dimensionnement

Les dimensions des canaux en béton armé sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau V-7 : Caractéristiques géométriques et hydrauliques des canaux en béton armé

Tronçons	Section départ	Section arrivée	Longueur (m)	Largeur au fond (m)	Hauteur du canal (m)	Largeur au miroir (m)	Rugosité n (Manning)
1	5393	2496	2897	45	2.5	50	0.013
2	2496	846	1650	45	2.5	50	0.013
3	846	46	800	45	2.5	50	0.013

V.3.2.1 Résultats de la simulation

- Profil en long :

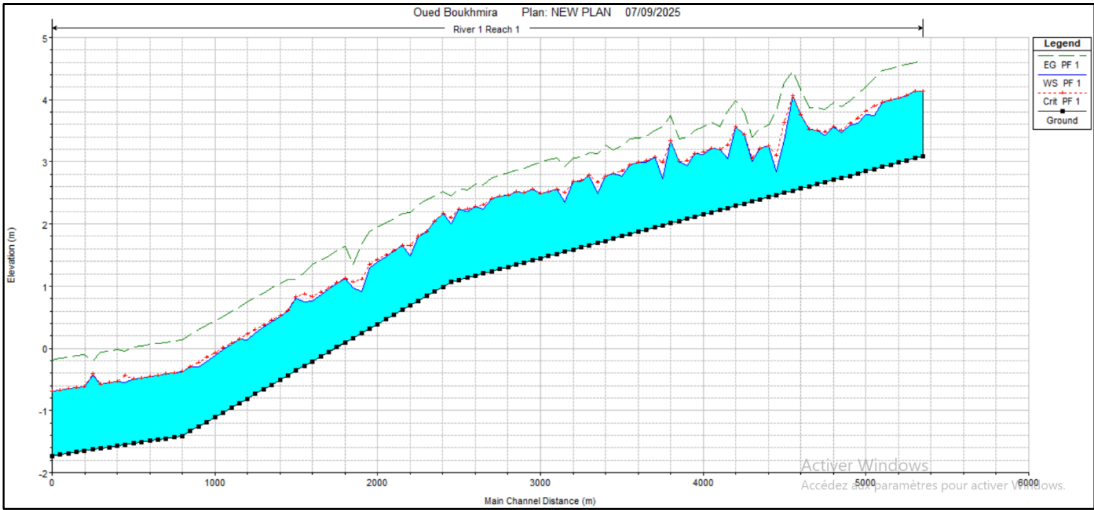


Figure V-3 : Profil en long du cours d'eau après l'aménagement (variante 2).

- Visualisation tridimensionnelle :

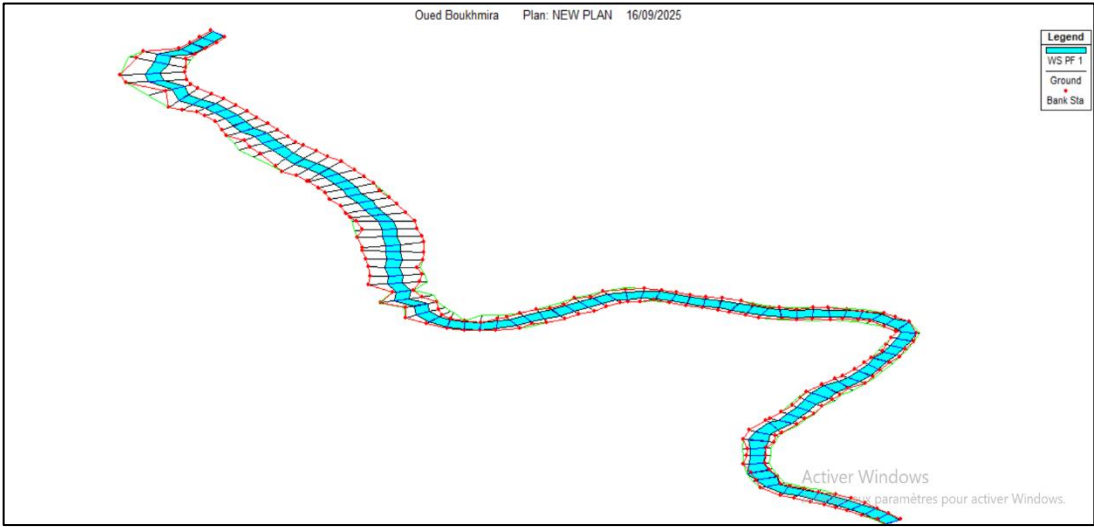
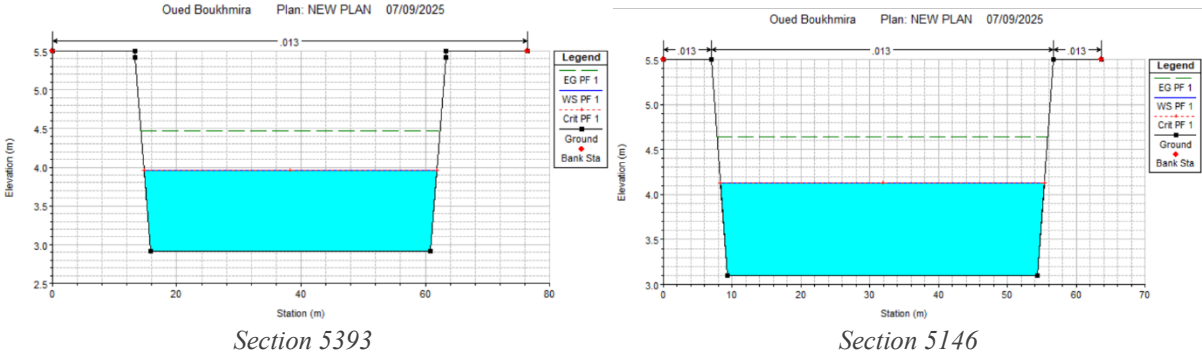


Figure V-4 : Vue en plan en 3D de l'oued après l'aménagement.

- Profils en travers :



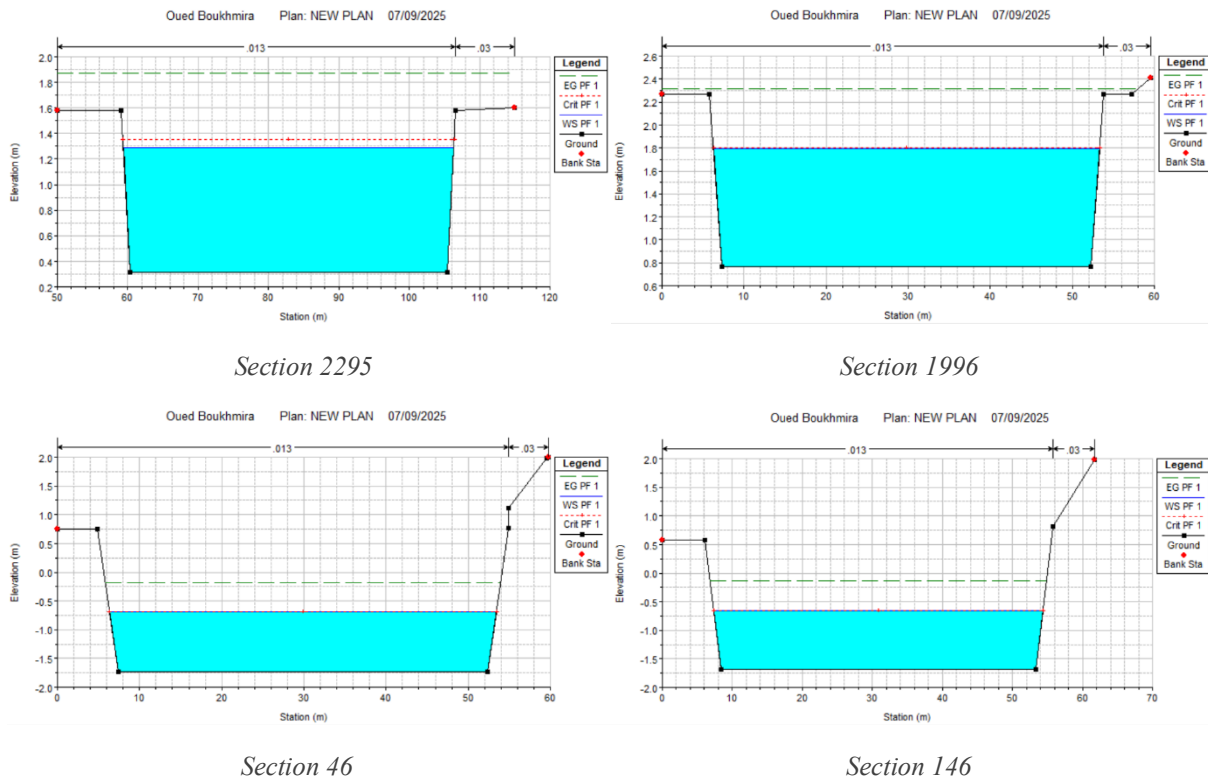


Figure V-5 : Profils en travers de l'oued après l'aménagement (variante 2).

- Paramètres d'écoulement :**

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

Tableau V-8 : Principaux paramètres hydrauliques du profil en travers

Rivière	Profile	Cote du fond (m)	Cote du plan d'eau (m)	Ligne d'énergie (m)	Pente (m/m)	Vitesse (m/s)	Section mouillée (m ²)	Largeur au miroir (m)	Nombre de Froude
Oued Boukhmira	5393	3.09	4.13	4.64	0.0017	3.17	47.68	47.07	1.01
Oued Boukhmira	5244	2.99	4.03	4.54	0.0017	3.17	47.7	47.07	1.01
Oued Boukhmira	5146	2.92	3.96	4.47	0.0017	3.17	47.7	47.07	1.01
Oued Boukhmira	5096	2.88	3.62	4.32	0.0044	3.71	40.74	47.07	1.64
Oued Boukhmira	5045	2.85	3.81	4.2	0.0016	2.76	54.9	73.7	1.01
Oued Boukhmira	4996	2.82	3.61	4.09	0.0028	3.05	49.47	47	1.2
Oued Boukhmira	4945	2.77	3.59	3.98	0.0019	2.76	54.82	47	1.06
Oued Boukhmira	4895	2.75	3.46	3.88	0.0021	2.77	53.19	47.07	1.1
Oued Boukhmira	4796	2.67	3.43	3.84	0.0025	2.86	52.91	46.99	1.13
Oued Boukhmira	4646	0.65	1.32	3.5	0.0197	6.54	23.12	46.6	3.12
Oued Boukhmira	4596	0.78	2.13	2.77	0.0025	3.54	42.64	46.6	1.24
Oued Boukhmira	4545	0.59	1.37	2.51	0.0071	4.73	31.93	47	2
Oued Boukhmira	4495	2.46	3.11	3.42	0.0026	2.49	60.75	47	1.01
Oued Boukhmira	4446	2.43	3.25	3.59	0.0036	2.57	58.73	47.07	1.01
Oued Boukhmira	4396	2.4	3.22	3.53	0.0021	2.48	60.84	47.07	1.01
Oued Boukhmira	4346	2.36	3.01	3.4	0.0034	2.75	55	47.07	1.16
Oued Boukhmira	4296	0.65	1.34	2.93	0.0192	5.6	26.99	47	2.68
Oued Boukhmira	4245	0.74	2.01	2.43	0.0015	2.86	52.81	46.6	1.01
Oued Boukhmira	4146	2.22	3.16	3.58	0.0033	2.86	52.77	46.6	1.1
Oued Boukhmira	4046	2.15	3.12	3.56	0.0021	2.93	51.53	47	1.08
Oued Boukhmira	3945	2.08	2.93	3.4	0.0027	3.03	50.41	47.2	1.19

Rivière	Profile	Cote du fond (m)	Cote du plan d'eau (m)	Ligne d'énergie (m)	Pente (m/m)	Vitesse (m/s)	Section mouillée (m²)	Largeur au miroir (m)	Nombre de Froude
Oued Boukhmira	3846	0.77	1.7	3.09	0.0113	5.22	28.95	47	2.33
Oued Boukhmira	3747	0.84	1.55	3.09	0.0120	5.51	27.43	47	2.44
Oued Boukhmira	3546	1.8	2.77	3.26	0.0023	3.14	49.99	46	1.12
Oued Boukhmira	3396	1.69	2.49	3.14	0.0044	3.56	42.47	46	1.49
Oued Boukhmira	3296	1.62	2.68	3.07	0.0020	2.76	54.81	46.06	1.05
Oued Boukhmira	3246	1.59	2.69	3.07	0.0018	2.72	55.56	46.06	1.01
Oued Boukhmira	3197	1.56	2.35	2.93	0.0035	3.36	44.98	46.06	1.34
Oued Boukhmira	3096	1.48	2.52	3.03	0.0017	3.17	47.7	47.07	1.01
Oued Boukhmira	2796	1.27	2.44	2.79	0.0019	2.6	58.12	47.07	1.01
Oued Boukhmira	2745	1.24	2.4	2.74	0.0018	2.58	58.52	47.07	1.01
Oued Boukhmira	2696	1.2	2.24	2.63	0.0030	2.77	54.46	46	1.21
Oued Boukhmira	2646	1.17	2.27	2.64	0.0018	2.69	56.27	46.66	1.01
Oued Boukhmira	2596	1.14	2.2	2.55	0.0021	2.61	57.8	47	1.08
Oued Boukhmira	2496	1.06	2	2.45	0.0030	2.96	51.02	47	1.28
Oued Boukhmira	2346	0.84	1.88	2.39	0.0017	3.17	47.68	47.07	1.01
Oued Boukhmira	2295	0.77	1.79	2.31	0.0018	3.2	47.18	47.05	1.02
Oued Boukhmira	2246	0.69	1.49	2.18	0.0033	3.68	41.07	48	1.33
Oued Boukhmira	2196	0.62	1.65	2.16	0.0017	3.17	47.7	47.07	1.01
Oued Boukhmira	2146	0.54	1.57	2.09	0.0018	3.2	47.2	47.05	1.02
Oued Boukhmira	2095	0.47	1.48	2.01	0.0018	3.25	46.56	47.02	1.04
Oued Boukhmira	2045	0.39	1.38	1.94	0.0020	3.3	45.73	46.99	1.07
Oued Boukhmira	1996	0.31	1.29	1.87	0.0021	3.38	44.7	46.94	1.11
Oued Boukhmira	1946	0.24	0.91	1.68	0.0065	3.89	39.49	46	2.51
Oued Boukhmira	1895	0.16	0.97	1.34	0.0032	2.73	57.2	46.6	1.46
Oued Boukhmira	1796	0.01	1.04	1.56	0.0018	3.2	47.22	47.05	1.02
Oued Boukhmira	1746	-0.06	0.95	1.49	0.0018	3.24	46.61	47.03	1.04
Oued Boukhmira	1696	-0.14	0.86	1.42	0.0019	3.3	45.85	46.99	1.07
Oued Boukhmira	1645	-0.21	0.76	1.34	0.0021	3.38	44.72	46.95	1.11
Oued Boukhmira	1596	-0.28	0.75	1.22	0.0017	3.03	49.89	47	1.43
Oued Boukhmira	1545	-0.36	0.8	1.11	0.0011	2.45	61.69	47.07	1.12
Oued Boukhmira	1445	-0.51	0.52	1.04	0.0018	3.2	47.21	47.05	1.02
Oued Boukhmira	1396	-0.58	0.43	0.96	0.0018	3.24	46.65	47.03	1.04
Oued Boukhmira	1346	-0.66	0.34	0.89	0.0019	3.29	45.88	47	1.06
Oued Boukhmira	1295	-0.73	0.24	0.82	0.0021	3.38	44.75	46.95	1.1
Oued Boukhmira	1246	-0.81	0.14	0.75	0.0023	3.47	43.58	46.9	1.15
Oued Boukhmira	1146	-0.96	0.07	0.59	0.0018	3.2	47.24	47.05	1.02
Oued Boukhmira	1096	-1.04	-0.02	0.51	0.0018	3.24	46.62	47.03	1.04
Oued Boukhmira	1046	-1.11	-0.11	0.44	0.0019	3.3	45.83	46.99	1.07
Oued Boukhmira	996	-1.19	-0.21	0.37	0.0021	3.37	44.81	46.95	1.1
Oued Boukhmira	946	-1.26	-0.3	0.3	0.0022	3.42	44.17	46.92	1.13
Oued Boukhmira	846	-1.41	-0.38	0.14	0.0018	3.2	47.27	47.05	1.02
Oued Boukhmira	745	-1.45	-0.41	0.1	0.0017	3.17	47.7	47.07	1.01
Oued Boukhmira	495	-1.55	-0.54	-0.05	0.0019	3.13	48.35	47.07	1.13
Oued Boukhmira	397	-1.59	-0.55	-0.04	0.0017	3.17	47.69	47.07	1.01
Oued Boukhmira	295	-1.63	-0.44	-0.2	0.0009	2.21	72.45	47.07	1.1
Oued Boukhmira	195	-1.67	-0.63	-0.12	0.0017	3.17	47.7	47.07	1.01
Oued Boukhmira	96	-1.71	-0.67	-0.16	0.0017	3.17	47.7	47.07	1.01

V.3.3. Comparaison entre les deux variantes de conception

- **Comparaison technique :**

Tableau V-9 : Comparaison technique entre les deux variantes

Critère	Canal en béton armé	Canal en gabions
Résistance mécanique	Très élevée ; adaptée aux fortes sollicitations hydrauliques	Bonne, mais dépend de la qualité des matériaux et du compactage
Durabilité	Excellente durabilité à long terme, même sous climat agressif	Bonne, mais sujette à l'érosion et au déplacement des pierres
Hydraulique	Surface lisse réduisant les pertes de charge ; débit optimisé	Surface rugueuse ; pertes de charge plus élevées ; débit limité
Perméabilité	Imperméable ; maîtrise totale de l'écoulement	Perméable ; permet l'infiltration et réduit la pression latérale
Installation	Exige des coffrages, du matériel spécialisé et du personnel qualifié	Mise en œuvre simple ; adaptable rapidement sur site
Temps de mise en œuvre	Long (séchage du béton requis)	Court ; assemblage rapide sur le terrain
Entretien	Faible entretien nécessaire	Entretien modéré ; repositionnement possible des pierres
Esthétique et intégration paysagère	Aspect industriel, uniforme et rigide	Aspect naturel, mieux intégré au paysage environnant
Flexibilité d'adaptation au terrain	Faible ; nécessite un tracé rigide et stable	Élevée ; peut épouser les formes du terrain
Impact environnemental	Élevé (production de ciment, énergie grise importante)	Réduit (utilisation de matériaux naturels, souvent locaux)

Source : (Chanson, 2004)

- **Comparaison des résultats de la simulation :**

Pour apprécier l'efficacité hydraulique des deux variantes étudiées le canal trapézoïdal en béton armé et celui en gabions, nous avons comparé les résultats issus de la simulation. Ces résultats mettent en évidence des différences notables en termes de comportement hydraulique, notamment en ce qui concerne le dimensionnement des canaux, les hauteurs d'eau, les vitesses d'écoulement, les sections mouillées, ainsi que le nombre de Froude.

Pour le canal en béton armé, les hauteurs d'eau demeurent relativement faibles grâce à un dimensionnement réduit, traduisant une bonne capacité d'écoulement. Cette performance s'explique par la rugosité intérieure très faible du canal ($n = 0,013$), limitant ainsi les pertes de charge. Les vitesses d'écoulement, plus élevées, permettent une évacuation rapide des crues. De plus, le nombre de Froude est généralement supérieur à 1, caractérisant un régime torrentiel, favorable à la prévention des dépôts solides.

En revanche, le canal en gabions se caractérise par des hauteurs d'eau et des dimensions légèrement plus importantes, en raison de la rugosité de sa paroi interne ($n = 0,03$) qui accroît la résistance à l'écoulement. Les vitesses d'écoulement y sont plus faibles, ce qui ralentit

l'évacuation des crues et peut provoquer une accumulation d'eau en amont de la section, augmentant ainsi le risque d'inondation. Le nombre de Froude y est inférieur ou proche de 1, traduisant un régime subcritique, favorable à la sédimentation au fond du canal.

Même avec l'augmentation des dimensions de la section destinée à améliorer les performances hydrauliques du canal en gabions, l'objectif de maintenir une revanche de sécurité de 0,9 mètre n'a pas pu être atteint dans la majorité des sections. Un approfondissement excessif du canal impliquerait une modification significative de la pente longitudinale, avec un risque de déséquilibres structurels. Cette contrainte est accentuée par la topographie plane du site et par le débouché direct de l'oued dans la mer, ce qui rend l'ajustement de la pente inadapté pour réduire les dimensions de l'ouvrage.

V.4. Conclusion :

À l'issue de cette étude comparative, il ressort que le canal en béton armé constitue la solution la plus adaptée pour la protection de l'aéroport Rabah Bitat contre les inondations. Cette option présente les meilleures performances hydrauliques, en assurant un contrôle efficace des hauteurs d'eau, des vitesses d'écoulement stables et une capacité d'évacuation accrue lors des crues.

La mise en œuvre de ce type d'aménagement permettrait ainsi de réduire de manière significative le risque d'inondation, tout en garantissant la sécurité et la durabilité des infrastructures aéroportuaires.

Chapitre VI : Organisation de chantier

VI.1. Introduction

L'organisation du chantier constitue une étape essentielle dans la réussite d'un projet de construction. Elle englobe la planification, la coordination et la gestion optimale des ressources humaines, matérielles et financières, afin de garantir l'exécution des travaux dans les meilleures conditions de sécurité, de qualité, de délais et de coûts. Une bonne organisation repose sur une connaissance précise du site, permettant d'anticiper les contraintes d'espace et de temps, et d'optimiser l'utilisation des engins et des équipements.

Face aux défis spécifiques que peuvent poser certains types de travaux, il est indispensable de maîtriser rigoureusement chaque aspect de l'organisation. Cela implique notamment la définition des méthodes d'exécution, la coordination des tâches entre les équipes spécialisées, la mise en place de postes de travail adaptés à une mécanisation efficace, ainsi que l'évaluation précise des besoins en main-d'œuvre, tant en quantité qu'en qualification.

VI.2. Rôles et responsabilités des intervenants sur chantier

Avant d'aborder le déroulement du chantier d'aménagement d'un oued, il est essentiel de présenter les rôles des principaux intervenants impliqués dans le processus de construction, afin de mieux comprendre l'organisation et la coordination des travaux.

VI.2.1. Le maître de l'ouvrage

Le maître de l'ouvrage est la personne physique ou morale, publique ou privée, pour le compte de laquelle les travaux sont réalisés. Il est à l'origine du projet et en assure la responsabilité globale. Son rôle consiste à définir les objectifs du projet, en termes de besoins, de budget, de qualité et de délais. Il est également chargé de financer l'opération, de choisir les intervenants (maîtrise d'œuvre, entreprises, bureaux de contrôle, etc.) et de suivre l'avancement du chantier.

Le maître de l'ouvrage peut déléguer certaines de ses missions à une entité spécialisée, appelée maître d'ouvrage délégué, tout en conservant la responsabilité finale du projet. Il est aussi le principal interlocuteur des différents partenaires durant toute la durée des travaux, depuis la phase de conception jusqu'à la réception de l'ouvrage.

VI.2.2. Le maître d'œuvre

C'est la personne physique ou morale chargée, par le maître d'ouvrage, de concevoir le projet, de diriger les travaux et d'en assurer le suivi technique. Il intervient dès la phase de conception, en élaborant les études préliminaires, les plans, les documents techniques, ainsi que le dossier de consultation des entreprises.

Durant l'exécution des travaux, le maître d'œuvre coordonne les différents intervenants, veille à la bonne application des plans et des normes, contrôle la qualité des ouvrages réalisés, et s'assure du respect des délais et du budget prévus. Il joue ainsi un rôle central dans la réussite du projet, en étant l'intermédiaire direct entre le maître d'ouvrage et les entreprises chargées de l'exécution.

VI.2.3. L'entrepreneur

L'entrepreneur, également appelé entreprise de travaux, est la personne physique ou morale responsable de l'exécution des travaux sur le chantier. Sa mission consiste à réaliser les ouvrages conformément aux documents contractuels fournis par le maître d'œuvre, en respectant les plans, les prescriptions techniques, les normes en vigueur ainsi que les délais fixés dans le marché.

L'entrepreneur mobilise les moyens humains, matériels et logistiques nécessaires à la bonne exécution du projet. Il joue un rôle clé sur le terrain en assurant la coordination de ses équipes et le suivi quotidien des travaux.

Lorsqu'il s'agit d'un groupement d'entreprises, un mandataire est désigné pour représenter l'ensemble des co-traitants auprès du maître d'ouvrage et du maître d'œuvre. Ce mandataire assure la liaison entre les différentes parties et garantit la cohérence et la bonne exécution du marché au nom du groupement.

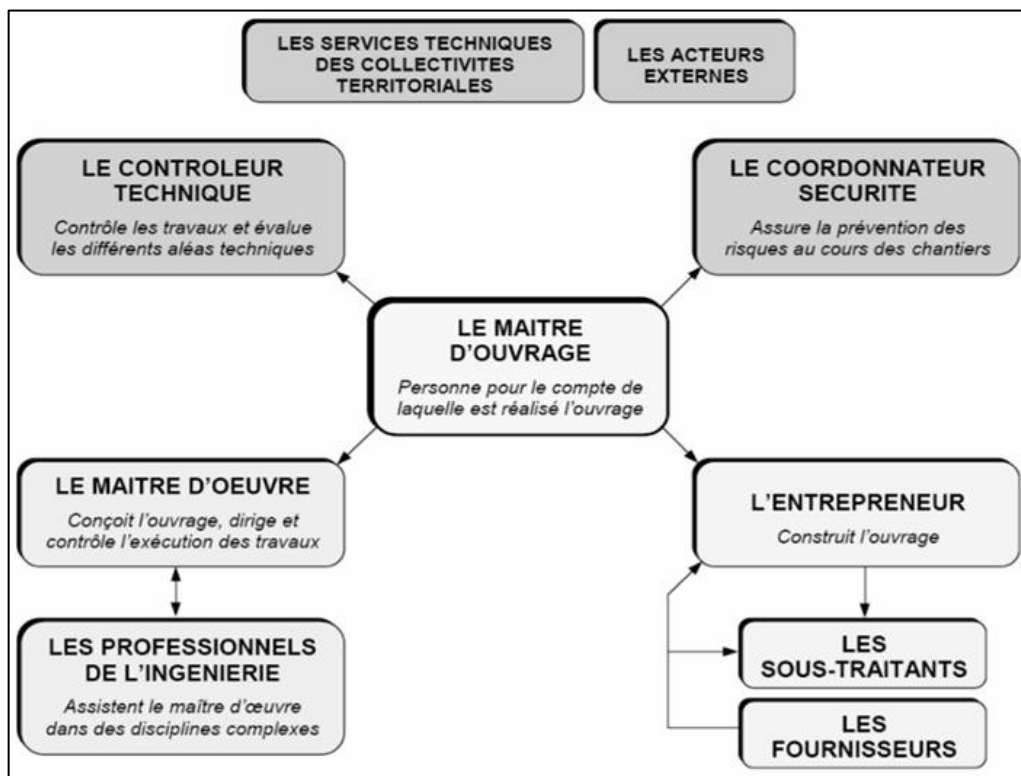


Figure VI-1 : Relation entre les personnes du chantier

VI.3. Installations du chantier

VI.3.1. Installations destinées au personnel

Les installations destinées au personnel, également appelées base vie, sont des aménagements temporaires essentiels au bon fonctionnement du chantier et au bien-être des équipes. Elles comprennent généralement des bureaux de chantier, des vestiaires, des réfectoires, des sanitaires (toilettes et douches), ainsi que des espaces de repos. Ces installations

doivent être implantées de manière à faciliter l'accès au personnel tout en respectant les normes de sécurité et d'hygiène en vigueur.

VI.3.2. Installations destinées au stockage des matériaux

- **Agrégats**

Les agrégats sont des matériaux granulaires, naturels ou artificiels, indispensables dans les travaux de construction, notamment pour la fabrication du béton. Ils comprennent principalement le sable, le gravier, les gravillons et les matériaux concassés. Leur qualité est essentielle pour assurer la résistance, la durabilité et la stabilité des ouvrages.

Les agrégats utilisés pour le béton, tels que le sable et le gravier, doivent faire l'objet d'un contrôle rigoureux dès leur réception sur le chantier. Des prélèvements sont réalisés pour vérifier leur granulométrie, leur propreté et leur conformité aux spécifications techniques. Ces contrôles permettent de garantir la qualité du béton produit, en assurant un bon enrobage des grains par le ciment et une répartition homogène des charges.

Pour éviter tout risque de contamination ou d'erreurs de dosage, les agrégats doivent être stockés séparément, de préférence selon une disposition en étoile, qui facilite l'accès et limite les mélanges accidentels. Leur teneur en eau doit également être régulièrement contrôlée, car les conditions climatiques peuvent la faire varier, influençant ainsi le dosage du béton.

Le respect de ces précautions contribue à assurer la performance des bétons et, plus largement, la qualité des ouvrages réalisés.

- **Le ciment et les aciers**

Le ciment et les aciers sont des matériaux essentiels à la construction en béton armé. Le ciment, liant hydraulique, doit être stocké à l'abri de l'humidité et contrôlé à la réception pour garantir sa qualité. Les aciers, utilisés comme armatures, reprennent les efforts de traction et doivent également être vérifiés (diamètre, résistance, état de surface) et protégés contre la corrosion.

- **L'eau de gâchage**

L'eau de gâchage active la prise du ciment et donne sa consistance au béton. Elle doit être propre, sans huiles, acides, sels ou impuretés organiques. Une eau inadéquate peut compromettre la résistance et la durabilité du béton. Le dosage doit être maîtrisé pour éviter une baisse de performance.

L'eau utilisée pour le gâchage du béton doit répondre aux exigences des normes internationales :

- Matières organiques : 0,1 (g/l) ;
- Matières en suspension : 0,2 (g/l) ;
- Sels dissous : 1,5 (g/l) ;
- Sulfates : 1,0 (g/l) ;
- Acide humique : 0,05 (g/l) ;

- Acide sulfhydrique : 0,05 (g/l) ;
- Chlorures : 0,1 (g/l).

- **Le béton**

Le béton est un matériau artificiel couramment employé de nos jours, notamment dans les travaux publics et la construction d'ouvrages en béton. Il doit atteindre une résistance à la compression à 28 jours. Sa composition comprend du sable, du gravier, un liant hydraulique comme le ciment, ainsi que de l'eau.

- **L'énergie électrique**

L'alimentation en énergie électrique sera faite par un groupe électrogène, ne justifier pas l'alimentation à partir d'un réseau de moyenne tension (SONELGAZ).

- **L'alimentation en eau potable**

L'approvisionnement en eau potable sera assuré par un réservoir de stockage dimensionné pour répondre aux besoins quotidiens du chantier. Ce réservoir sera alimenté de manière régulière afin de garantir une disponibilité constante de l'eau, notamment pour couvrir les besoins du personnel.

- **L'alimentation en carburant**

L'alimentation sera assurée par des camions citernes, le stockage sera fait dans des réservoirs enterrés avec un accessoire de pompage.

VI.3.3. Installations destinées à la réparation des engins

Les réparations importantes des engins ne sont en général pas effectuées directement sur le chantier. Toutefois, il est primordial de disposer d'un atelier bien équipé afin d'assurer l'entretien régulier et les réparations urgentes du matériel utilisé.

VI.3.4. Installations pour la préfabrication

Il s'agit généralement de hangars équipés des outils et équipements nécessaires à la fabrication des éléments de l'ouvrage, tels que les poutres, les dalles, les conduites ou encore les murettes.

VI.4. Les moyens de chantier

VI.4.1. Les moyens humains

En ce qui concerne les ressources humaines, il est essentiel de justifier la mobilisation d'un personnel hautement qualifié, capable de prendre en charge aussi bien les études préparatoires que la réalisation des travaux, en précisant pour chaque intervenant son poste, ses compétences techniques ainsi que son parcours professionnel.

VI.4.2. Les moyens matériels

Le matériel destiné à ce projet inclut les équipements standards habituellement employés sur les chantiers de travaux publics. Pour chaque engin, il est important d'indiquer la

marque, le modèle, la puissance, la performance ainsi que le nombre d'unités déployées sur le chantier. Il convient également de préciser leur mode d'intervention en fonction des différentes phases d'exécution des travaux.

Les engins couramment utilisés peuvent inclure :

- **La pelle hydraulique** : est utilisée pour creuser la tranchée du canal en respectant le profil trapézoïdal prévu.
- **Le bulldozer** : intervient pour dégager la terre végétale, déplacer les déblais et effectuer un nivellement grossier du terrain.
- **La niveleuse** : permet d'assurer un profilage précis du fond et des talus du canal, en suivant les pentes spécifiées.
- **Le compacteur** : est employé pour compacter le sol après terrassement, afin de garantir une bonne stabilité du fond de forme.
- **Le camion benne** : sert au transport des matériaux tels que les déblais, remblais, ou granulats vers ou depuis le chantier.
- **La centrale à béton mobile et le camion malaxeur** : assurent respectivement la production sur site et le transport du béton en maintenant sa qualité jusqu'à son point d'utilisation.
- **La pompe à béton** : permet l'acheminement et la mise en place précise du béton, en particulier dans les zones difficiles d'accès ou pour les ouvrages linéaires étroits.

VI.5. Estimation du coût de la variante en béton armé

Le devis de la variante en béton armé est établi sur la base des quantités issues des calculs hydrauliques et géométriques réalisés à l'aide du logiciel HEC-RAS. Ces données comprennent notamment les volumes de terrassement, les déblais et les remblais nécessaires à la mise en forme du canal trapézoïdal. Pour la structure en béton armé, une épaisseur uniforme de 15 cm est retenue, ce qui permet d'assurer à la fois la résistance mécanique et la durabilité de l'ouvrage face aux sollicitations hydrauliques et aux conditions environnementales.

En complément, une couche de béton de propreté d'une épaisseur de 5 cm est prévue sous le radier et éventuellement sous les parois, afin de garantir une surface stable, propre et plane pour le coulage du béton armé, tout en protégeant ce dernier contre les remontées d'humidité du sol. L'ensemble de ces éléments est intégré dans le calcul du coût global, en tenant compte des prix unitaires des matériaux, de la main-d'œuvre, du matériel de mise en œuvre, ainsi que des frais annexes liés au chantier.

Tableau VI-1 : Devis quantitatif et estimatif de la variante en béton armé

Désignation	Unité	Quantité	Prix Unitaire (DA)	Montant (DA)
Déblai	m ³	4086	300	1225800
Remblai	m ³	12785	200	2557000
Béton de propreté dosé à 150 kg/m ³	m ³	16853.125	8000	134825000
Béton armé dosé à 350 kg/m ³	m ³	50559.375	35000	1769578125
Total				1908185925
TVA (19%)				3625553258
Total TTC				2270741251

Arrêté le présent devis à la somme de : **Deux milliards deux cent soixante-dix millions sept cent quarante et un mille deux cent cinquante et un dinars algériens.**

VI.6. Planification des travaux

La planification des travaux dans un chantier de construction de canal consiste à organiser et coordonner l'ensemble des activités, afin d'assurer une utilisation rationnelle des ressources humaines, matérielles et financières. Elle a pour objectif de garantir la continuité, la qualité et le respect des délais d'exécution.

Elle se traduit notamment par :

- **Implantation et installation du chantier** : mise en place des postes de travail, des accès et de la base-vie.
- **Organisation des équipes** : répartition des tâches entre les différentes équipes (terrassement, ouvrages annexes, revêtement).
- **Ordonnancement des travaux** : définition des priorités (terrassements, puis revêtement, puis finitions) et identification des chevauchements possibles entre tâches.
- **Gestion du temps** : établissement d'un calendrier (planning ou diagramme de Gantt) précisant les délais de chaque phase.
- **Suivi et contrôle** : observations sur le terrain, chronométrage des opérations critiques et suivi de la productivité.
- **Optimisation des méthodes** : simplification des procédés constructifs, amélioration des rendements des engins et stabilisation des postes de travail.
- **Définition des objectifs** : clarification des responsabilités de chaque intervenant et fixation des critères de qualité.

VI.6.1. Techniques de la planification

Il existe deux principales méthodes de planification à savoir :

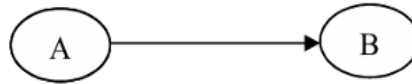
- Méthodes basées sur le réseau.
- Méthodes basées sur le graphique.

VI.6.1.1 Méthodes basées sur le réseau

Le réseau est une représentation graphique du projet qui met en évidence les relations existantes entre les différentes opérations. Ces dernières peuvent être réalisées de manière successive, parallèle ou convergente, mais restent toutes indispensables pour atteindre l'objectif défini par la planification. On distingue généralement deux catégories de réseaux :

a. Réseau à nœuds

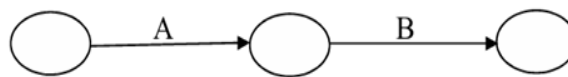
L'opération est représentée par un nœud et la succession des opérations par des flèches.



L'opération (B) ne peut commencer que si l'opération (A) est complètement achevée.

b. Réseau à flèche

L'opération est représentée par une flèche et la succession des opérations par des nœuds.



L'opération A précède l'opération B.

VI.6.1.2 Méthode de calcul de C.P.M

La méthode du chemin critique (CPM) est une technique de planification et de gestion de projets qui permet d'identifier la durée minimale du projet et les tâches critiques.

• Les paramètres de la méthode C.P.M

Les paramètres indispensables dans l'exécution de cette méthode sont donnés à l'aide de la grille qui est constituée de six cellules.

DCP	TR
DFP	DCPP
DFPP	MT

TR : temps de réalisation ;

DCP : date de commencement au plus tôt ;

DCPP : date de commencement au plus tard ;

DFP : date de finition au plus tôt ;

DFPP : date de finition au plus tard ;

MT : marge totale.

• Chemin critique C.C

Il s'agit du chemin déterminant la durée totale du projet (DTP), reliant les opérations dont la marge totale est nulle. Pour identifier ce chemin critique, il convient de vérifier simultanément les deux conditions suivantes :

$$MT = 0$$

$$\sum TR_{CC} = DTP$$

VI.6.2. Délai de construction et programme des travaux

La construction d'un réseau exige au préalable une définition précise des différentes tâches à exécuter. Le tableau ci-après récapitule ces opérations ainsi que leurs durées.

Tableau VI-2 : Durée estimée des opérations principales du projet

Désignation de l'opération	Code	Durée (jours)
Installation du chantier	A	15
Travaux de terrassement	B	60
Compactage	C	30
Exécution du lit de béton de propreté	D	25
Exécution du béton armé pour le canal	E	50
Déménagement du chantier	F	15

À partir de notre estimation, la DTP est de 195 jours.

Le diagramme de GANTT est présenté dans la figure suivante :

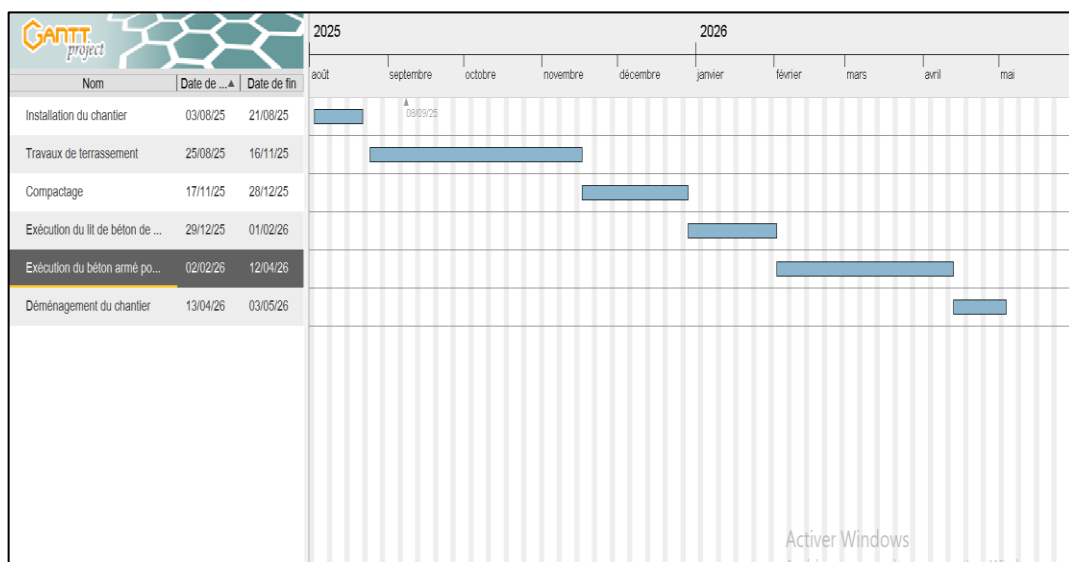


Figure VI-2 : Diagramme de GANTT

VI.7. Conclusion

L'organisation du chantier représente une phase clé pour la réussite d'un projet. Elle assure la planification des tâches et l'optimisation des ressources humaines et matérielles. Une bonne organisation permet de respecter les délais contractuels, de réduire les surcoûts et d'améliorer l'efficacité de l'exécution.

Dans ce chapitre, une planification rigoureuse des opérations a été élaborée, incluant l'établissement du diagramme de Gantt, l'identification des chemins critiques, ainsi que la répartition méthodique des tâches en fonction de leur nature et de leur durée. Le projet a été planifié sur une durée estimative de 195 jours, pour un budget de 2270741251 DA.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les inondations demeurent l'un des risques naturels les plus préoccupants en Algérie, en raison de leur fréquence croissante et de l'ampleur des dégâts humains, matériels et économiques qu'elles engendrent. Cette problématique s'intensifie particulièrement dans les zones urbanisées, où l'expansion démographique et l'insuffisance des infrastructures hydrauliques accroissent la vulnérabilité des populations. Le cas de l'Oued Boukhmira, situé à proximité immédiate de l'aéroport international Rabah Bitat d'Annaba, illustre parfaitement cette situation critique, du fait de la récurrence des débordements et de l'importance stratégique des infrastructures menacées.

Le présent travail a permis de développer une approche intégrée pour la gestion du risque d'inondation, reposant sur une analyse détaillée du bassin versant, une modélisation hydrologique et hydraulique rigoureuse, ainsi qu'une évaluation technique et économique des solutions d'aménagement. L'utilisation combinée des outils ArcGIS, HYFRAN et HEC-RAS a permis d'obtenir une compréhension complète du fonctionnement hydrologique du bassin et de simuler avec précision les scénarios de crue. Le débit de pointe de 151,11 m³/s pour la crue centennale a servi de base au dimensionnement des ouvrages de protection.

L'étude comparative des différentes variantes d'aménagement a conduit au choix d'un canal trapézoïdal en béton armé, jugé le plus efficace pour garantir la sécurité hydraulique du site tout en optimisant le rapport coût-efficacité. Ce choix constitue une réponse concrète et durable à la problématique d'inondation dans cette zone sensible.

Au-delà des résultats techniques obtenus, ce travail apporte une contribution méthodologique en illustrant la pertinence de l'intégration de la modélisation numérique et des outils SIG dans la conception des ouvrages hydrauliques. Il met également en évidence la nécessité d'une planification préventive et d'une gestion durable des eaux pluviales dans les zones à enjeux stratégiques comme les infrastructures aéroportuaires.

Enfin, il convient de souligner que des investigations complémentaires pourraient être envisagées, notamment à travers la modélisation non permanente des écoulements, la prise en compte des effets du changement climatique sur les régimes pluviométriques, ou encore l'évaluation de solutions fondées sur la nature pour renforcer la résilience du bassin. Ces perspectives ouvrent la voie à une approche plus globale et durable de la maîtrise du risque d'inondation dans la région d'Annaba et, plus largement, en Algérie.

Références Bibliographiques

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] J. I. Barredo, « Normalised flood losses in Europe: 1970–2006 », *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, vol. 9, n° 1, p. 97-104, 2009, doi: 10.5194/nhess-9-97-2009.
- [2] E. Gaume *et al.*, « A compilation of data on European flash floods », *J. Hydrol.*, vol. 367, n° 1, p. 70-78, mars 2009, doi: 10.1016/j.jhydrol.2008.12.028.
- [3] S. N. Jonkman, « Global Perspectives on Loss of Human Life Caused by Floods », *Nat. Hazards*, vol. 34, n° 2, p. 151-175, févr. 2005, doi: 10.1007/s11069-004-8891-3.
- [4] M. C. Llasat *et al.*, « High-impact floods and flash floods in Mediterranean countries: the FLASH preliminary database », *Adv. Geosci.*, vol. 23, p. 47-55, 2010, doi: 10.5194/adgeo-23-47-2010.
- [5] Z. W. Kundzewicz *et al.*, « Flood risk and climate change: global and regional perspectives », *Hydrol. Sci. J.*, vol. 59, n° 1, p. 1-28, 2014, doi: 10.1080/02626667.2013.857411.
- [6] M. C. Llasat, R. Marcos, M. Llasat-Botija, J. Gilabert, M. Turco, et P. Quintana-Seguí, « Flash flood evolution in North-Western Mediterranean », *Atmospheric Res.*, vol. 149, p. 230-243, nov. 2014, doi: 10.1016/j.atmosres.2014.05.024.
- [7] L. Marchi, M. Borga, E. Preciso, et E. Gaume, « Characterisation of selected extreme flash floods in Europe and implications for flood risk management », *Flash Floods Obs. Anal. Hydrometeorol. Controls*, vol. 394, n° 1, p. 118-133, nov. 2010, doi: 10.1016/j.jhydrol.2010.07.017.
- [8] J. Ould Kaci et J. Oumokrane, « Développement de l'assurance contre les catastrophes naturelles en Algérie. Cas de la Cat-Nat de l'agence SAA 2004 de Ain El Hammam de Tizi-Ouzou », Université Mouloud Mammeri, 2018.

- [9] F. Leone et F. Vinet, « La vulnérabilité des sociétés et des territoires face aux menaces naturelles », *Anal. Géographiques Coll«Géorisques*, vol. 1, p. 1-71, 2006.
- [10] C.-P. Péguy et I. Brissaud, « Dauphiné André (2001). Risques et catastrophes. Observer, spatialiser, comprendre, gérer. Paris : Armand Colin, 288 p. », *L'Espace Géographique*, vol. tome 31, n° 3, p. II-II, 2002, doi: 10.3917/eg.313.0283b.
- [11] Y. Djellouli et A. Saci, « Catastrophe «naturelle»: les inondations dévastatrices du 9 et 10 novembre 2001 à Bab El Oued (Alger, Algérie) », *Publ. L'Association Int. Climatol.*, vol. 23, p. 236-242, 2003.
- [12] « THESE-Beloulou-Dec-2008 ».
- [13] M. Arabi *et al.*, « Aménagements antiérosifs susceptibles de réduire l'intensité des crues dans le bassin versant de Ghardaïa en Algérie », *Ann. Rech. For. En Algér.*, vol. 11, n° 2, p. 16-30, 2021.
- [14] H. Lamarre, « Musy, André et Higy, Christophe, 2004. Hydrologie, une science de la nature. Coll. Gérer l'environnement, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 314 p., 250 fig. et tabl., 16 x 24 cm, 54,00 € (env. 86,50 CAD). ISBN 2-88074-546-2. », *Géographie Phys. Quat.*, vol. 57, n° 2-3, p. 257-257, 2003, doi: 10.7202/011323ar.
- [15] D. R. Maidment, « GIS and hydrologic modeling-an assessment of progress », in *Third International Conference on GIS and Environmental Modeling, Santa Fe, New Mexico*, 1996.
- [16] M. Jacky, M. Lhoussaine, et Y. Mr, « Typologie et analyse hydrologique des eaux superficielles à partir de quelques bassins versants représentatifs du Maroc », *Ecole Polytechnique*, 2003.
- [17] D. Baize, « Guide des analyses courantes en pédologie », 1988.

- [18] W. Luo, « Hypsometric analysis with a geographic information system », *Comput. Geosci.*, vol. 24, n° 8, p. 815-821, oct. 1998, doi: 10.1016/S0098-3004(98)00076-4.
- [19] M. Mietton et J. Humbert, « DANS LE DELTA DU SÉNÉGAL », *Enregist. Indic. L'évolution Environ. En Zone Trop.*, n° 13, p. 345, 1994.
- [20] B. Layan, A. Dridri, L. Benaabidate, et M. Zemzami, « DETERMINATION DES CRUES DE PROJET PAR LES ASPECTS DU DEBIT DE POINTE ET DE L'HYDROGRAMME DE CRUE AU NIVEAU DE LA COMMUNE AIN BOUKELLAL, BASSIN VERSANT DE L'OUED LARBAA, MAROC », 1857.
- [21] F. HALLOUZ, S. ALIRAHMANI, H. KARAHACANE, M. MEDDI, et G. MAHE, « Variabilité climatique et événements extrêmes et l'impact sur les ressources en eau dans le Nord-Ouest d'Algérie. Climate variability and extreme events and the impact on water resources in the Northwest of Algeria ».
- [22] B. Touaibia, *Manuel pratique d'hydrologie*. 2004.
- [23] G. E. Moglen, *Fundamentals of open channel flow*. CRC Press, 2022.
- [24] W. H. Graf, *Hydraulics of sediment transport*. Water Resources Publication, 1984.
- [25] G. W. Brunner, *HEC-RAS river analysis system: User's manual*. US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic ..., 2002.
- [26] A. Lencastre, « VULTOS PORTUGUESES EM HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS ».

REFERENCES SITOGRAPHIQUES

EarthExplorer (consulté le 09 Mars 2025).

Disponible sur : <https://earthexplorer.usgs.gov/>

Climate Engine (consulté le 12 Juin 2025).

Disponible sur : <https://www.climateengine.org/>

NASA POWER (consulté le 17 Juin 2025).

Disponible sur : <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

Climate Engine (consulté le 20 Juin 2025).

Disponible sur : <https://code.earthengine.google.com/>

Spatial Reference (consulté le 4 Juillet 2025).

Disponible sur : <https://spatialreference.org/>

ANNEXES

Annexe N° 1

Tableau des valeurs du Khi carré χ^2

α	0.995	0.99	0.975	0.95	0.90	0.10	0.05	0.025	0.01	0.005
df	---	---	0.001	0.004	0.016	2.706	3.841	5.024	6.635	7.879
=1										
2	0.010	0.020	0.051	0.103	0.211	4.605	5.991	7.378	9.210	10.597
3	0.072	0.115	0.216	0.352	0.584	6.251	7.815	9.348	11.345	12.838
4	0.207	0.297	0.484	0.711	1.064	7.779	9.488	11.143	13.277	14.860
5	0.412	0.554	0.831	1.145	1.610	9.236	11.070	12.833	15.086	16.750
6	0.676	0.872	1.237	1.635	2.204	10.645	12.592	14.449	16.812	18.548
7	0.989	1.239	1.690	2.167	2.833	12.017	14.067	16.013	18.475	20.278
8	1.344	1.646	2.180	2.733	3.490	13.362	15.507	17.535	20.090	21.955
9	1.735	2.088	2.700	3.325	4.168	14.684	16.919	19.023	21.666	23.589
10	2.156	2.558	3.247	3.940	4.865	15.987	18.307	20.483	23.209	25.188
11	2.603	3.053	3.816	4.575	5.578	17.275	19.675	21.920	24.725	26.757
12	3.074	3.571	4.404	5.226	6.304	18.549	21.026	23.337	26.217	28.300
13	3.565	4.107	5.009	5.892	7.042	19.812	22.362	24.736	27.688	29.819
14	4.075	4.660	5.629	6.571	7.790	21.064	23.685	26.119	29.141	31.319
15	4.601	5.229	6.262	7.261	8.547	22.307	24.996	27.488	30.578	32.801
16	5.142	5.812	6.908	7.962	9.312	23.542	26.296	28.845	32.000	34.267
17	5.697	6.408	7.564	8.672	10.085	24.769	27.587	30.191	33.409	35.718
18	6.265	7.015	8.231	9.390	10.865	25.989	28.869	31.526	34.805	37.156
19	6.844	7.633	8.907	10.117	11.651	27.204	30.144	32.852	36.191	38.582
20	7.434	8.260	9.591	10.851	12.443	28.412	31.410	34.170	37.566	39.997
21	8.034	8.897	10.283	11.591	13.240	29.615	32.671	35.479	38.932	41.401
22	8.643	9.542	10.982	12.338	14.041	30.813	33.924	36.781	40.289	42.796
23	9.260	10.196	11.689	13.091	14.848	32.007	35.172	38.076	41.638	44.181
24	9.886	10.856	12.401	13.848	15.659	33.196	36.415	39.364	42.980	45.559
25	10.520	11.524	13.120	14.611	16.473	34.382	37.652	40.646	44.314	46.928
26	11.160	12.198	13.844	15.379	17.292	35.563	38.885	41.923	45.642	48.290
27	11.808	12.879	14.573	16.151	18.114	36.741	40.113	43.195	46.963	49.645
28	12.461	13.565	15.308	16.928	18.939	37.916	41.337	44.461	48.278	50.993
29	13.121	14.256	16.047	17.708	19.768	39.087	42.557	45.722	49.588	52.336
30	13.787	14.953	16.791	18.493	20.599	40.256	43.773	46.979	50.892	53.672
40	20.707	22.164	24.433	26.509	29.051	51.805	55.758	59.342	63.691	66.766
50	27.991	29.707	32.357	34.764	37.689	63.167	67.505	71.420	76.154	79.490
60	35.534	37.485	40.482	43.188	46.459	74.397	79.082	83.298	88.379	91.952
70	43.275	45.442	48.758	51.739	55.329	85.527	90.531	95.023	100.425	104.215