الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

NATIONAL HIGHER SCHOOL FOR HYDRAULICS
"The MujahidAbdellah ARBAOUI"

المدرسة الوطنية العليا للري
"المجاهد عبد الله عرباوي"

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

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

Option : CONCEPTION DES OUVRAGES HYDROTECHNIQUES

THEME :

Etude de protection de la zone d'activité de CHORFA contre les Inondations (W. BOUIRA)

Présenté par :
MESSAD Malek

Devant les membres du jury

Nom et Prénoms	Grade	Qualité
HADJ SADOK Ahmed	**Professeur**	Président
ZAIBAK Issam	**M.C.B**	Examinateur
BOUZIANE Mamar	**M.C.B**	Examinateur
HEBBOUCHE Abdelhamid	**M.C.A**	Promoteur

Session septembre 2025

Dédicaces

À mes chers parents,

Je vous dédie ce travail en témoignage de mon profond respect, de mon immense gratitude et de mon amour inconditionnel. Vous avez été pour moi une source de courage, de persévérance et de détermination. Vos sacrifices, vos encouragements constants et vos prières sincères m'ont permis d'avancer malgré les difficultés. Ce mémoire est avant tout le fruit de vos efforts et de votre confiance en moi.

À mes frères et ma sœur,

Vous qui avez toujours cru en mes capacités et m'avez entouré d'affection et de soutien, je vous remercie pour votre présence rassurante et vos encouragements permanents.

À mes amis,

Qui ont partagé avec moi les moments de doute comme ceux de réussite, qui ont su m'apporter aide, motivation et bonne humeur durant ce long parcours académique.

À tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à mon cheminement,

Je dédie humblement ce modeste travail comme une marque de reconnaissance et d'estime

Remerciements

Avant tout, je rends grâce à Allah, Le Tout-Puissant, pour m'avoir accordé la santé, la patience et la force nécessaires afin d'entamer et d'achever ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à **Monsieur Hebbouche Abdelhamid**, mon encadrant, pour la qualité de son accompagnement, sa disponibilité et ses précieux conseils. Sa bienveillance et son soutien constant ont été déterminants dans la réalisation de ce mémoire.

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude à **Monsieur Zeroual Ayoub** pour son aide précieuse, sa disponibilité constante et sa bienveillance. Ses orientations et son soutien attentif ont largement contribué à l'enrichissement de ce travail.

J'adresse également mes sincères remerciements à , **Monsieur Maamar Brahim,** ingénieur d'état, pour son accompagnement technique, sa disponibilité et la qualité de son appui, qui ont été d'une aide considérable tout au long de la réalisation de ce mémoire

Je souhaite aussi remercier l'ensemble des enseignants de l'**École Nationale Supérieure d'Hydraulique**, pour la qualité de l'enseignement reçu, la richesse des connaissances transmises et leur contribution essentielle à ma formation académique et professionnelle.

Enfin, j'exprime toute ma reconnaissance à mes amis ainsi qu'à tous ceux qui m'ont accompagné de près ou de loin. Merci du fond du cœur pour votre amitié sincère, vos encouragements et les moments inoubliables partagés à mes côtés.

الملخص :

يهدف هذا البحث إلى دراسة خطر الفيضانات من خلال تحليل هيدرولوجي وهيدروليكي لوادي **الساحل** بهدف حماية **المنطقة الصناعية بشرفة** .تم في البداية تحليل الخصائص المورفومترية والجيولوجية والمناخية للحوض لفهم آليات الجريان السطحي وتقدير تصاريف الفيضانات لفترات عودة مختلفة باستخدام طريقة غراديكس. بعد ذلك، أُجريت نمذجة هيدروليكية باستعمال برنامج **HEC-RAS (v6.6)** لمحاكاة الجريان الطبيعي وتحديد المناطق المعرّضة للفيضانات. تمت دراسة حلّين رئيسيين للتهيئة: قناة بالخرسانة المسلحة وقناة بالجبس (الغابيون). أظهرت المقارنة أن قناة الغابيون، بفضل مرونتها الإنشائية وتكاملها البيئي، توفر أداءً هيدروليكي مرضياً وتشكل الخيار الأمثل لحماية المنطقة الصناعية بشرفة من الفيضانات بشكل مستدام, بتكلفة 372857643 دينار.
الكلمات المفتاحية : وادي الساحل، الفيضانات، HEC-RAS، الهيدرولوجيا، الهيدروليك، قناة الغابيون، الحماية من الفيضانات

Résumé :

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre de la gestion des risques d'inondation et porte sur l'étude hydrologique et hydraulique de l'**oued Sahel**, afin de protéger la **zone d'activité de Chorfa**. L'analyse des caractéristiques morphométriques, géologiques et climatiques du bassin versant a permis de comprendre les mécanismes de ruissellement et d'évaluer les débits de crue pour différentes périodes de retour, notamment à l'aide de la méthode du Gradex. Une modélisation hydraulique a ensuite été réalisée sous **HEC-RAS (v6.6)** afin de simuler l'écoulement en régime naturel et d'identifier les zones vulnérables aux crues. Deux variantes d'aménagement ont été étudiées : un canal en béton armé et un canal en gabions. L'analyse comparative a démontré que la solution en gabions, plus souple et mieux intégrée dans l'environnement, constitue l'option la plus adaptée pour assurer une protection durable de la zone d'activité, avec un cout de 372857643 DA.
Mots-clés : Oued Sahel, inondations, HEC-RAS, hydrologie, hydraulique, canal en gabions, aménagement.

Abstract:

This thesis focuses on flood risk management through the hydrological and hydraulic study of the **Oued Sahel**, with the objective of protecting the **Chorfa industrial zone**. The analysis of the watershed's morphometric, geological, and climatic characteristics provided insight into runoff dynamics and allowed the estimation of design flood discharges using the Gradex method. Hydraulic modeling was then performed with **HEC-RAS (v6.6)** to simulate natural flow conditions and identify flood-prone areas. Two flood protection alternatives were evaluated: a reinforced concrete canal and a gabion canal. The comparative analysis revealed that although reinforced concrete offers robustness, the gabion canal ensures better environmental integration, structural flexibility, and satisfactory hydraulic performance. Consequently, the gabion canal was found to be the most suitable solution for ensuring the long-term protection of the Chorfa industrial zone against floods, with a cost of 372857643 DA.
Keywords: Oued Sahel, floods, HEC-RAS, hydrology, hydraulics, gabion canal, flood protection

Table des matières

Introduction générale ……2

Chapitre I : Caractéristique du bassin versant

I.1 Introduction 16

I.2 Description de la zone d'étude 16

I.2.1 Le bassin versant de l'oued sahel 16

I.2.2 Situation Géologique 17

I.2.3 Situation Hydrographique 18

I.2.4 Sismicité 19

I.2.5 Situation climatique de la zone d'étude 20

I.2.6 Le couvert végétal 22

Chapitre II: Etude hydrologique

II.1 Introduction : 25

II.2 Caractéristiques principales du bassin versant : 25

II.2.1 Paramètres géométriques : 25

II.2.2 Paramètres de Forme : 26

II.2.3 Étude du relief 28

II.3 Etude du réseau hydrographique : 39

II.3.1 Caractéristiques du réseau hydrographique : 39

II.3.2 Paramètres hydrographiques : 40

II.3.3 CALCUL DU TEMPS DE CONCENTRATION : 41

II.3.4 La vitesse d'écoulement : 42

II.4 Etude des crues 44

II.4.1 Historique de la méthode du Gradex : 44

II.4.2 Présentation des stations utilisées dans l'étude des crues 44

II.4.3 L'analyse fréquentielles des pluies des crues maximale annuelle avec la station hydrométrique Boubirek 45

II.4.4 Détermination des débits maximums fréquentiels par la méthode du GRADEX : 52

II.4.5 Application de la méthode de GRADEX : 54

II.4.6 Hydrogramme de crue 59

II.4.7 Choix de la crue du projet : 62

II.5 Conclusion 63

Chapitre III : simulation hydraulique du cours d'eau non aménagé

III.1 Introduction : 65

III.2 Notions générales et définitions : 65

III.2.1 Type d'écoulement 67
III.2.2 Régime d'écoulement 69
III.2.3 Canaux à ciel ouvert 70
III.3 Modélisation de l'écoulement : 72
III.3.1 Choix du type de modèle hydraulique – HEC-RAS (v6.6) 73
III.4 CONCLUSION 86

Chapitre IV : Étude de variante d'aménagement

IV.1 Introduction : 88
IV.2 Divers types d'aménagements : 88
IV.2.1 Protection directe (rapprochée) 88
IV.2.2 Protection indirecte (éloignée) 89
IV.3 Calcul hydraulique des canaux 90
IV.3.1 Écoulement lentement varié et conditions du régime uniforme : 90
IV.3.2 Détermination de coefficient de Chézy 91
IV.4 Choix des variantes d'aménagement : 94
IV.5 Solutions d'aménagement destinées à la zone d'activité bordant l'oued sahel 95
IV.5.1 Canal en béton armé 96
IV.5.2 Canal en gabion 104
IV.5.3 Analyse comparative des deux variantes de conception 111
IV.6 Conclusion 112

Chapitre V: Organisation du chantier

V.1 Introduction 114
V.2 Rôles et responsabilités des intervenants sur chantier 114
V.3 Définition des engins utilisés 115
V.4 Devis quantitatif et estimatif du projet 116
V.5 La Planification : 116
V.5.1 Définition du planning 116
V.5.2 Techniques de la planification : 117
V.6 Délai de construction et programme des travaux 119
V.7 Conclusion : 120
Conclusion général 110

Liste des figures :

Chapitre I : Caractéristique du bassin versant

Figure I.1 : Carte d'orientation du bassin versant..... 17
Figure I.2: Réseau hydrographique du bassin versant..... 19
Figure I.3 : Classification sismique des wilayas d'Algérie. 20

Chapitre II : Etude hydrologique

Figure II.1 : carte hypsométrique du BV de l'oued Sahel 29
Figure II.2 : courbe hypsométrique du SBV d'oued sahel 30
Figure II.3 : carte hypsométrique du BV de l'oued Sahel 31
Figure II.4 : courbe hygrométrique de SVB d'oued ouakeur 32
Figure II.5 *:* Carte des pentes SBV d'Oued sahel..... 33
Figure II.6 : Carte des pentes du SBV d'oued ouakeur 34
Figure II.7 : Carte des courbes du SBV d'oued Sahel 34
Figure II.8 : Carte des courbes du SBV d'oued ouakeur 35
Figure II.9 : Carte du réseau hydrographique du SBV d'oued Sahel..... 39
Figure II.10 : Carte du réseau hydrographique du SBV d'oued Ouakour..... 40
Figure II.11 : Représentation graphique de la loi de GUMBEL de la station 150703..... 48
Figure II.12 : Représentation graphique de la loi de Galton de la station 150703..... 49
Figure II.13 : Graphe comparatif des résultats d'ajustement par la méthode de Gumbul et Galton 51
Figure II.14 : Graphe représente ajustement graphique pour les pluies et droit d'extrapolation pour les débits (Laborde, 2000). 54
Figure II.15 : Graphe de l'ajustement des pluies et la droite d'extrapolation des débits du SBV d'oued sahel 56
Figure II.16 : Graphe de la méthode de GRADEX 57
Figure 17:hydrogramme de crue pour période de retour 100 ans SBV d'oued sahel 61
Figure 18 : hydrogramme de crue pour période de retour 100 ans SBV d'oued ouakeur 62

Chapitre III : Étude diagnostique et simulation hydraulique du cours d'eau non aménagé

Figure III.1 : Écoulement stationnaire (permanent) 67
Figure III.2 : Écoulement non stationnaire (transitoire) 67
Figure III.3 : Écoulement rapidement varié 68
Figure III.4 : types des canaux 70
Figure III.5 : l'interface de logiciel HECRAS 74
Figure III.6 : l'importation du fichier de projection et le TIF 75
Figure III.7 : Définition du tracé de l'oued et des sections en travers. 76
Figure III.8 *:* les débits décennaux 77
Figure III.9 : les conditions aux limites 77
Figure III.10 : lancement de simulation 78
Figure III.11:Profil en long du cours d'eau à l'état naturel pour une crue centennale ... 79
Figure III.12 : Vue en Plan en 3D de l'Oued 79
Figure III.13:Courbe de tarage du tronçon modélisé d'Oued Sahel. 80
Figure III.14:carte des profondeurs avant aménagement 86

Chapitre IV : Étude de variante d'aménagement

Figure IV. 1 : Différents types des canaux avec leurs caractéristiques géométriques. 93
Figure IV. 2 : **les sections en travers d'un canal trapézoïdale en béton armé (Source : HECRAS)** 101
Figure IV. 3 : Vue 3D de l'oued sahel 102
Figure IV. 4 : Carte des profondeurs après l'aménagement. 102
Figure IV. 5 : Coupe en travers d'un canal en gabion. 104
Figure IV. 6 : les sections en travers d'un canal en gabions (Source : HECRAS) 109
Figure IV. 7 : Vue 3D de l'oued sahel (hecras) 110
Figure IV. 8 : carte des profondeurs après aménagement 110

Chapitre V : Organisation du chantier

Figure V.3 : diagramme de GANTT 119

Liste des Tableaux

Chapitre II : Etude hydrologique

Tableau II.1: paramètres géométriques 26
Tableau II.2 : Les paramètres hydro morphométriques des SBV 28
Tableau II.3 : La répartition des surfaces élémentaires et leurs cumule en fonction des altitudes ont été obtenues avec logiciel ArcGIS. 29
Tableau II.4: 31
Tableau II.5 : Détermination des altitudes ..... **Error! Bookmark not defined.**
Tableau II.6 : La répartition des surfaces élémentaires et leurs cumule en fonction des altitudes ont été obtenues avec logiciel ArcGIS. 32
Tableau II.7 : ..... **Error! Bookmark not defined.**
Tableau II.8 : détermination des altitudes 33
Tableau II.9 : Calcul de la pente moyenne du SBV d'oued ouakour 36
Tableau II.10 *:* calcul de la pente moyenne du SBV d'oued sahel 36
Tableau II.11 : calcul de l'indice des pentes de Roche 37
Tableau II.12 : calcul de l'indice des pentes de Roche 37
Tableau II.13:Classification ORSTOM du relief à partir de l'indice de pente global. ..... **Error! Bookmark not defined.**
Tableau II.14*:*Classification O.R.S.T.O.M (type de relief) 38
Tableau II.15 *:* Résultats de calculs des pentes et la dénivelée spécifique des deux sous bassins versants 38
Tableau II.16 : Résultats de calculs de temps de concentration 42
Tableau II.17 : Paramètres hydrographiques 43
Tableau II.18 : Tableau récapitulatif des caractéristiques des sous bassins Versants 43
Tableau II.19 : Caractéristiques des stations pluviométriques dans bassin versant de la zone d'étude 45
Tableau II.20 *:* Caractéristique de la station hydrométrique « Boubirek » (Source : ANRH) 45
Tableau II.21 *:* Série des débits maximales annuels prise de la station 150703 (Source : ANRH) 46
Tableau II.22 : Les caractéristiques de la série pluviométrique 46
Tableau II.23 : les différents modèles fréquentiels 46

Tableau II.24 : Résultats d'ajustement à la loi de GUMBEL de la station 150703 47
Tableau II.25 : Comparaison des caractéristiques de la loi de GUMBEL et de l'échantillon..... 48
Tableau II.26 : Résultat de l'ajustement à la loi Log-Normal de la station 150703..... 49
Tableau II.27 : La comparaison entre les caractéristiques de la loi de Log Normal et de l'échantillon..... 50
Tableau II.28 : Résultats du test de Khi carré de la station Hydrométrique 150703 52
Tableau II.29 : série de station pluviométrique de El Asnam..... 54
Tableau II.30 : résultats du logiciel HYEFRAN..... 55
Tableau II.31 :la surface et débit décennale des sous bassins versant 56
Tableau II.32 : résulats d'application de la méthode gradex..... 56
Tableau II.33: Résultats de l'ajustement pour déférentes périodes de retours pour le SBV d'oued sahel...... 57
Tableau II.34 : Résultats de l'ajustement pour déférentes périodes de retours pour le SBV d'oued ouakour...... 58
Tableau II.35 : Résultats de l'ajustement des quatre stations par la méthode de GRADEX...... 58
Tableau II.36: Valeur du coefficient de forme de l'hydrogramme de crue δ..... 59
Tableau II.37 : temps de concentration..... 60
Tableau II.38 : Résultats de calcul pour l'hydrogramme de crue SBV d'oued sahel..... 60
Tableau II.39: Résultats de calcul pour l'hydrogramme de crue SBV d'oued ouakeur . 61

Chapitre III : Étude diagnostique et simulation hydraulique du cours d'eau non aménagé

Tableau III.1 : Revue de certaines notions d'hydraulique..... **66**
Tableau III.2: Principaux paramètres hydrauliques pour l'ensemble des stations (Source : Logiciel HEC-RAS)...... **83**

Chapitre IV : Étude de variante d'aménagement

Tableau IV. 1 : Les valeurs du coefficient de rugosité 'n', (Chen et Cotton, 1986) 94
Tableau IV. 2 : Revanches utilisées (Degoutte, 2012) 95

Tableau IV. 3 : Valeurs de vitesse moyenne limite d'érosion pour les lits consolidés (Degoutte, 2012) 95
Tableau IV. 4 : caractéristiques du canal 96
Tableau IV. 5 : résultats du calcul hydraulique du canal trapézoïdal 97
Tableau IV. 6 : Résultats de la simulation d'écoulement d'un canal trapézoïdale en béton armé (Source : HECRAS) 98
Tableau IV. 7 : Résultat de calcul volume de propreté 103
Tableau IV. 8 : Résultat de calcul du volume de béton dosé à 350kg 103
Tableau IV. 9 : Les volumes de terrassement ont été calculés et sont présentés dans le tableau du devis relatif à cette variante. 103
Tableau IV. 10 : Résultats de calcul des nombres de caisses pour le canal gabionné du trançon d'oued sahel 1 105
Tableau IV. 11 : Résultats de calcul des nombres de caisses pour le canal gabionné du trançon d'oued sahel 2 106
Tableau IV. 12 : Résultats de calcul des nombres de caisses pour le canal gabionné du trançon d'oued ouakeur 106
Tableau IV. 13 : Résultats de la simulation d'écoulement d'un canal trapézoïdale en béton armé (Source : HECRAS) 107
Tableau IV. 14 : le récapitulatif du coût de réalisation du canal en gabions 111
Tableau IV. 15 : comparaison entre les deux variantes 111

Chapitre V : Organisation du chantier

Tableau V.1 : montants de réalisation de la variante retenue 116
Tableau V.3 : Récapitule les principales opérations du projet ainsi que leur durée estimée 119

Liste des planches :

1. Plan après aménagement
2. Profile en long d’oued ouakeur et oued sahel
3. Profile en travers d’oued sahel 1
4. Profile en travers d’oued sahel 2
5. Profile en travers d’oued ouakeur

Liste des abréviations :

A : Surface (m2) ;

ANRH : Agence National des Ressources Hydriques ;

BV : Bassin Versant ;

Ca : Coefficient d'allongement ;

Cp : Coefficient de pointe ;

Ct : Coefficient de torrentialité ;

DCP : date de commencement au plus tôt ;

DCPP : date de commencement au plus tard.

DFP : date de finition au plus tôt ;

Dd : Densité de drainage Km/Km2 ;

DFPP : date de finition au plus tard ;

Ds : le transport solide en (t/Km2/an) ;

F : Nombre de Froude ;

g : Accélération due à la gravité (m/s2)

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

Ic : Pente du talweg principale (%) ;

Im : Pente moyenne du bassin versant m/Km ;

Imoy : Pente moyenne du cours d'eau m/Km ;

Ip : Indice de pente de Roche % ;

Kc : Indice de compacité ;

Le : Lamme d'eau écoulée (mm)

MNT : Modèle Numérique de Terrain ;

n : Coefficient de rugosité de Manning ;

NGA : Nivellement Général de l'Algérie ;

ONM : Office National Météorologique ;

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

P : Périmètre (Km) ;

P.E.R.T : Program Evaluation and Review Technical ;

Pj.max : Pluie maximal journalière (mm) ;

PPRI : Plan de prévention du risque d'inondation.

Qmax : Débit maximal de la crues (m3/s) ;

INTRODUCTION GENERALE

Les phénomènes d'inondation constituent aujourd'hui l'une des principales menaces naturelles à l'échelle mondiale. Ils affectent chaque année des millions de personnes et entraînent des pertes économiques et sociales considérables. D'après de nombreux rapports internationaux, les inondations représentent plus de 40 % des catastrophes naturelles enregistrées au cours des dernières décennies, et leurs impacts ne cessent de croître sous l'effet conjugué du changement climatique, de l'urbanisation rapide et souvent anarchique, ainsi que de la déforestation et de la dégradation des sols.

L'Algérie, par sa position géographique en zone méditerranéenne et sa topographie contrastée, est particulièrement exposée aux risques d'inondation. Ces dernières décennies, plusieurs événements hydrologiques extrêmes ont provoqué des pertes humaines et des dégâts matériels considérables (Bab El Oued 2001, Ghardaïa 2008, Jijel 2012, etc.). Ces catastrophes rappellent l'importance d'une gestion rationnelle des eaux pluviales et de la mise en place de stratégies de protection adaptées aux spécificités de chaque bassin versant.

C'est dans ce contexte que s'inscrit le présent mémoire, qui porte sur l'étude hydraulique et l'aménagement de l'oued Sahel, situé dans la wilaya de Bouira, avec un accent particulier sur la protection de la zone d'activité de Chorfa. Cette zone, en plein essor économique, est directement menacée par les crues de l'oued, dont le régime hydrologique est fortement influencé par la topographie accidentée, la lithologie imperméable et les fortes précipitations hivernales.

L'objectif principal de ce travail est d'apporter une contribution scientifique et technique à la problématique de la maîtrise des crues de l'oued Sahel. Pour ce faire, une approche méthodologique rigoureuse a été adoptée :

- Une première étape a consisté à caractériser le bassin versant à travers l'étude de ses paramètres morphométriques, géologiques, climatiques et hydrologiques, afin de comprendre les mécanismes qui conditionnent l'écoulement des eaux.

- Dans une seconde étape, une analyse hydrologique approfondie a été menée pour estimer les débits de crues à différentes périodes de retour, en s'appuyant notamment sur la méthode du Gradex et sur les données disponibles des stations pluviométriques et hydrométriques voisines.

- Une troisième étape a porté sur la modélisation hydraulique du cours d'eau non aménagé à l'aide du logiciel HEC-RAS (v6.6), ce qui a permis de simuler différents scénarios d'écoulement et d'identifier les zones vulnérables aux inondations.

- Enfin, des solutions d'aménagement ont été étudiées et comparées, parmi lesquelles le canal en béton armé et le canal en gabions, afin de proposer une variante optimale alliant efficacité hydraulique, faisabilité technique et intégration dans le milieu naturel.

Ainsi, ce mémoire vise non seulement à proposer un projet d'aménagement hydraulique concret pour protéger la zone d'activité de Chorfa, mais également à enrichir la réflexion scientifique autour de la gestion intégrée des risques liés aux crues dans les bassins méditerranéens.

Chapitre I

Caractéristiques du bassin versant

Chapitre I : Caractéristiques du bassin versant

I.1 Introduction

Le premier chapitre se focalise sur la description globale du bassin versant de l'aire d'étude, fournissant des détails géographiques et physiographiques essentiels à la saisie des processus hydrologiques. En fait, l'altitude, la pente et la configuration d'un bassin versant associées à la lithologie fournissent des indications sur la nature de la réaction hydrologique du bassin.

I.2 Description de la zone d'étude

La vallée de l'Oued Sahel constitue la limite naturelle de la région du Djurdjura, depuis Bouïra jusqu'à son embouchure. Prenant naissance dans le massif du Dira, ce cours d'eau est appelé Oued Lekhal jusqu'au-delà de Bouïra. Il prend le nom **d'Oued Sahel** à partir de son confluent avec l'Oued Zaïane, à hauteur d'El-Adjiba. À partir de ce point, la vallée, large de 3 à 4 kilomètres, marque une frontière bien nette entre les contreforts du Djurdjura au nord et la zone montagneuse du sud.(1)

I.2.1 Le bassin versant de l'oued sahel

I.2.1.1 Notion du bassin versant

Un bassin versant est un espace géométrique dont les apports hydriques sont alimentés avec les précipitations et dont les excès en eaux et en matières solide transportées par l'eau ruisselante et se convergent vers un seul point appelé exutoire ou embouchure.

I.2.1.2 Situation géographique du bassin versant de l'oued sahel

Le bassin versant de la vallée du Sahel est situé dans la partie nord-est du pays, entre 3°60 minutes de longitude 4° 70° E, et entre les latitudes 36°00 minutes et 36°50 minutes nord. Le bassin hydrographique de la vallée du Sahel s'étend en direction du nord-ouest. Y compris la zone : Plateaux de Bouira. C'est limité :

- **Nord :** près des Grandes Montagnes de Kabylie (massif de Djorgora).
- **À l'est :** à travers les montagnes de petites tribus.
- **Au sud :** des montagnes de Biban et de Mansura, en passant vers le sud-est vers les contreforts des montagnes de la Trêve.

- **Dans la direction de l'ouest :** elle est limitée aux routes d'Iser et de Sabao. Ils se caractérisent par une forme très irrégulière.(1)

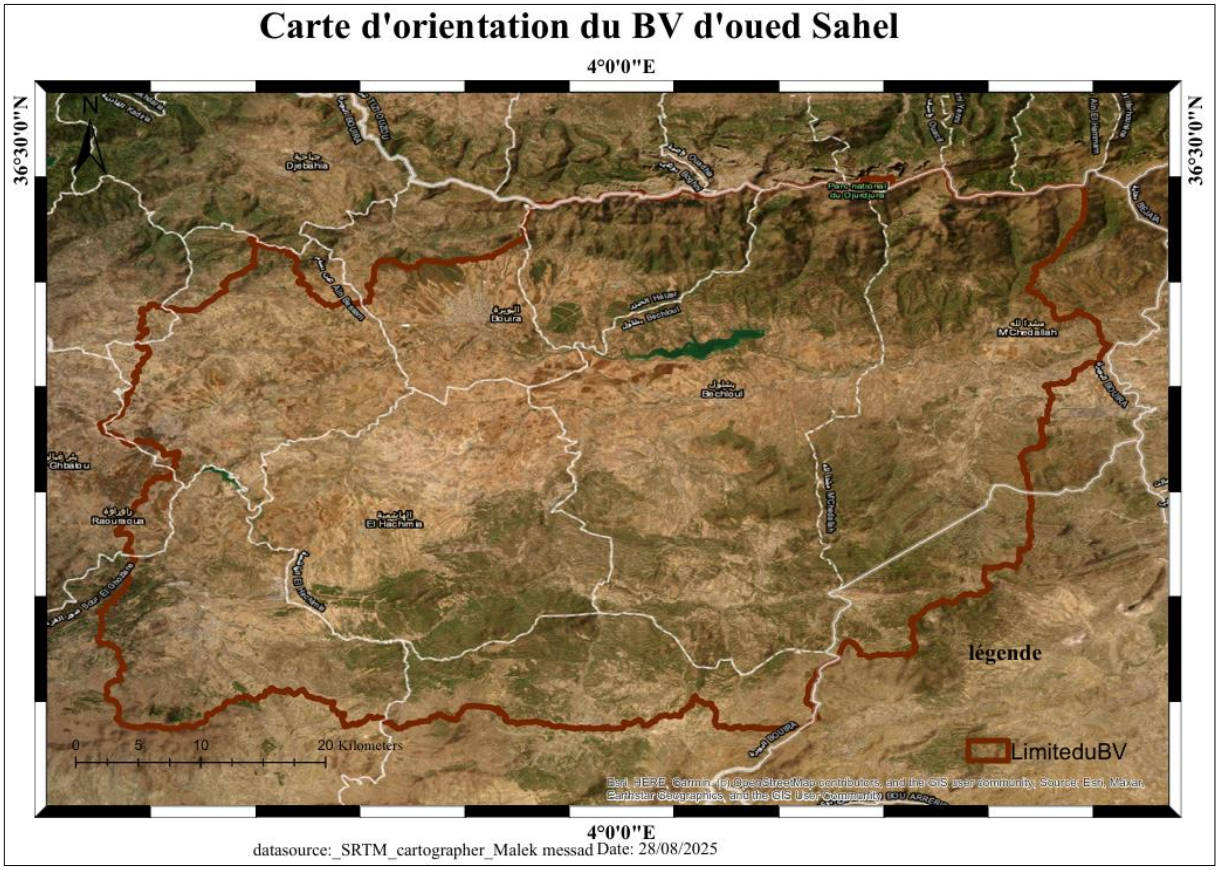


Figure I.1 : Carte d'orientation du bassin versant

I.2.2 Situation Géologique

La carte géologique de l'Algérie (1951) dont on a extrait la partie concernée par notre étude montre la complexité géologique des terrains formant le bassin versant de la Soummam, montre que ces terrains sont d'origine sédimentaire (Oligocène, Crétacé,): calcaires, marnes, grès, dolomies…, et souvent plutôt imperméables ce qui, couplé à de fortes pentes, favorise le ruissellement, représente les différentes formations géologiques de la région de la Soummam dont on rencontre :

- **Le Quaternaire :** représenté par des alluvions le long des oueds et au niveau des hautes plaines.
- **Le Pliocène Continental :** le coteau du Sahel est couronné par des graviers siliceux et fluviaux. Ailleurs, il est conglomératique sinon caillouteux.

- **Le Miocène :** il s'agit essentiellement du Miocène inférieur. Il est continu depuis l'ouest de Bejaia jusqu'aux environs de Sidi-Aich. Il affleure également du côté de Dj. Mansourah sous forme de grés.
- **L'Oligocène :** il est généralement argilo-gréseux. Il affleure en abondance à partir de Tazmalt et de part et d'autre de la vallée de la Soummam, en allant vers l'ouest. On note également sa présence au niveau de la chaîne de Gouraya et de la région de Béni-Mansour.
- **L'Eocène :** il est quasiment marneux, parfois calcaro-marneux. Il affleure surtout au niveau des hautes plaines.
- **Le Crétacé :** se présente, en général, sous forma de flyschs. Il est étendu, continu depuis la chaîne des Bibans jusqu'aux montagnes de la petite Kabylie. Le faciès est marneux au Crétacé supérieur (Sénonien). Il est schisteux, sous forme de bancs de plusieurs centaines de mètres d'épaisseur avec quelques intercalations de grés au crétacé moyen (Albien) et apparaît dans la région de Béni-Mansour et la chaîne des Bibans. Il est gréseux pélitique, parfois carbonaté-gréseux au crétacé inférieur.
- **Le Jurassique :** il affleure surtout au niveau de la chaîne calcaire et le long de sa continuité vers l'est. Il est principalement calcaro-dolomitique.

I.2.3 Situation Hydrographique

Le bassin versant est drainé par des cours d'eau présente un exutoire apparent, les écoulements se font en direction des dépressions situées en aval du bassin (Oued Sahel).

Le réseau hydrographique est très dense traduisant probablement la prédominance du ruissellement sur l'infiltration.

La carte du réseau hydrographique a été établit, á partir de la carte topographique, Le rôle du réseau hydrographique est très important dans l'écoulement superficiel.

Un bassin versant bien draine facilite l'écoulement.

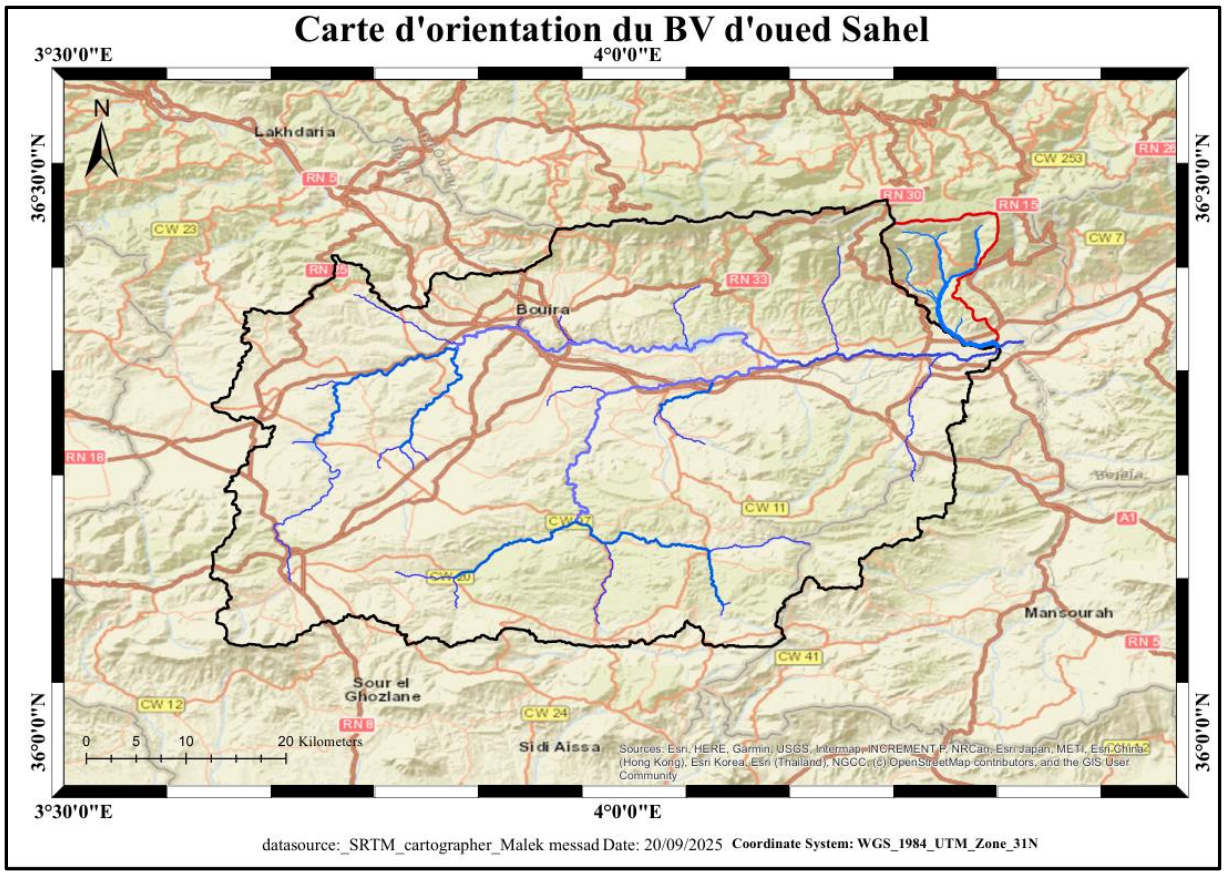


Figure I.2: Réseau hydrographique du bassin versant

I.2.4 Sismicité

En matière de sismicité, l'Algérie, en raison de sa position au niveau de la zone de convergence des plaques tectoniques, est considérée comme une région à forte activité sismique. Tout au long de son histoire, le pays a connu de nombreux séismes destructeurs. Le territoire national est classé en cinq zones de sismicité croissante, à savoir :

Zone de sismicité	Niveau de sismicité	A
0	Très faible	-
I	Faible	0.07
II	Faible à moyenne	0.10
III	Moyenne	0.15
IV	Moyenne à élevée	0.20

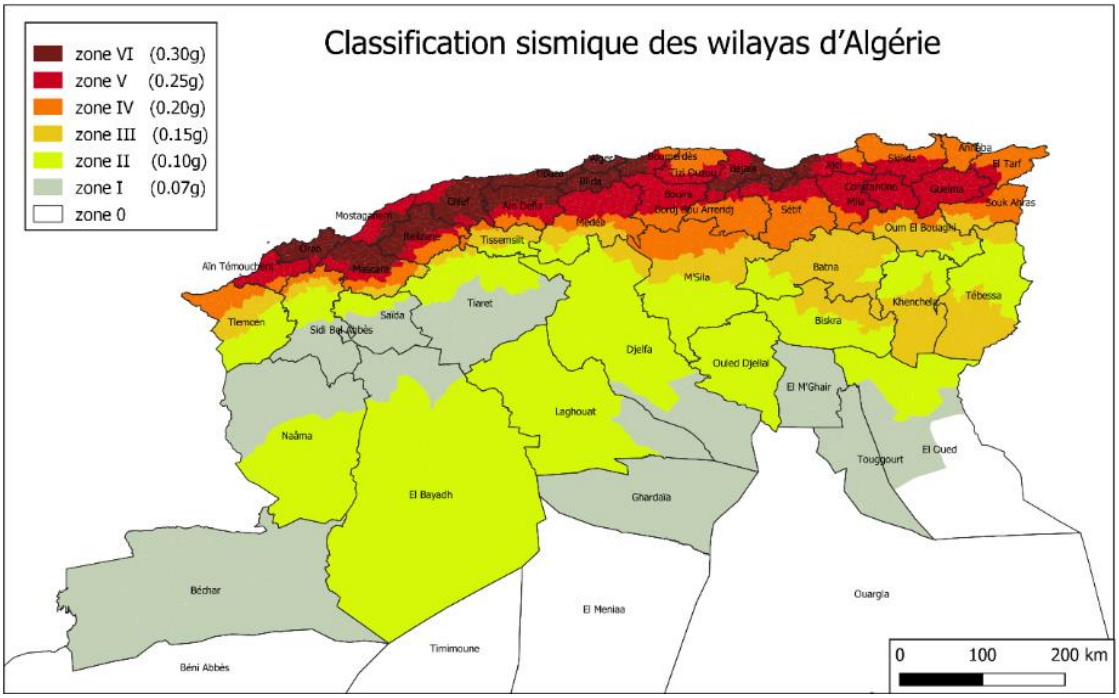


Figure I.3 : Classification sismique des wilayas d'Algérie.(RPA2024)

I.2.5 Situation climatique de la zone d'étude

I.2.5.1 Précipitations

Selon la situation géologique et la saison, les précipitations se caractérisent par des intensités, une durée et une fréquence très différentes. Les pluies peuvent être de très fortes intensités, ou alors être très faibles et persister plusieurs jours durant. Dans les montagnes, elle atteint 1000 mm et ne descend en dessous de 600 mm que dans la vallée de la Haute-Soummam et les montagnes d'Ighil Ali. En fait, plus on pénètre dans la vallée de la Soummam à partir de Béjaia, plus les précipitations diminuent. C'est la conséquence de l'effet de barrière de la chaîne de Djurdjura vis-à-vis des vents humides venant du nord-ouest, d'une part, et de l'effet de continentalité (la vapeur d'eau diminue si la distance de la mer augmente). La part prépondérante des précipitations se limite aux mois d'hiver, les mois d'été sont secs (climat méditerranéen). Dans la vallée, il ne neige pratiquement jamais. Dans les montagnes, on enregistre, en moyenne, un minimum de 5 jours/an et un maximum de 10 jours/an de précipitations neigeuses.

I.2.5.2 Températures

Les conditions climatiques jouent un rôle déterminant sur le régime d'un cours d'eau, ce sont les précipitations surtout liquides, qui constituent le facteur essentiel intervenant par :

Leur répartition annuelle et mensuelle, leur total journalier et surtout les averses génératrices

Des crues. Ces différents aspects des précipitions sont plus ou moins modifiés selon un effet combiné des autres paramètres physiques (altitude et exposition) et climatiques : la température, l'évaporation, l'évapotranspiration, les vents et l'humidité aussi ; des facteurs qui influent sur l'écoulement et le régime hydrologique du bassin.

Soummam, on trouve que le climat est divisé en deux étages :

- Etage Subhumide.
- Etage Semi-aride.

Ces caractéristiques climatiques ont été déterminées à base d'analyse du bilan hydrique, c'est-à dire des précipitations moyenne mensuelles et de la variation de la température de l'air.

Le climat de la région (bassin versant) est caractérisé par 03 étages :

- Etage subhumide à hiver froid
- Subhumide à hiver doux
- Semi-aride à hiver frais (**Source : Office Nationale de la Météorologie)**

I.2.5.3 Evapotranspiration

Du point de vue répartition spatiale, l'évapotranspiration potentielle (ETP) s'accroit du Nord au Sud, contrairement à l'évapotranspiration réelle (ETR) qui évolue parallèlement à

L'augmentation des températures et des précipitations ; les plus fortes valeurs de l'ETR sont atteintes dans les bassins inferieur ou toutes les conditions favorables se trouvent réunies :

Températures élevées, précipitations abondantes et couvert forestiers denses.

Rappelons que l'évapotranspiration désigne au départ les pertes en eau par retour direct à L'atmosphère sous forme de vapeur d'eau. L'évapotranspiration est la perte complexe provenant de l'évaporation du sol, de l'interception par les feuilles des arbres et autres obstacles d'une partie des précipitations qui n'atteint jamais le sol.

L'évapotranspiration est, après les précipitations, le terme le plus important du bilan Hydrologique.

Les facteurs conditionnels de l'évapotranspiration sont :

- La température de l'air.
- La température de l'eau.

- L'humidité de l'air.
- Le rayonnement solaire.
- Le vent.

L'évapotranspiration potentielle annuelle calculée d'après l'ANRH varie entre 1214 et 1569 mm, et pour la majeure partie du bassin, elle est de l'ordre 1382mm.

I.2.6 Le couvert végétal

La végétation est un paramètre physique important des bassins versant. Suivant sa nature, sa Diversité et sa densité, il influence directement sur le cycle hydrologique, à travers la rétention des eaux de pluie et de l'évaporation de ces eaux. Le couvert végétal constitue un isolant entre le sol et l'atmosphère. Cet isolant est d'autant plus efficace quand il est plus dense et plus haut. La végétation est aussi la résultante des facteurs physico-géographiques tel que : le climat, le relief, la lithologie, auxquels s'ajoutent le facteur humain (défrichement, reboisement.).

La végétation évolue en fonction des conditions climatiques, sa densité diminue avec l'altitude.

D'une manière générale la couverture végétale conditionne et influence la rapidité du ruissellement superficiel, le taux d'évaporation et la capacité de rétention du bassin versant.

La végétation joue un rôle essentiel dans la protection du sol, elle exerce une protection Mécanique directe sur l'écoulement fluvial, en diminuant la force vive des eaux et en favorisant leur infiltration ; cette résistance à l'écoulement est d'autant plus grande que le couvert végétal est plus dense.

La basse et la moyenne Sahel sont occupés par des oliveraies et des vignobles.

Dans la région de la moyenne Sahel, le couvert végétal est moins dense.

Dans la plaine, la végétation est dense mais temporaire, formée par les grands champs de cultures diverses. Avant, les forets couvraient la région, mais actuellement ce capital tend à Disparaitre à cause des feux d'été et l'arrêt des campagnes de reboisement. **[ANRH Alger]**

1.1 Conclusion :

L'étude des caractéristiques physiques, géologiques, hydrologiques, climatiques et biologiques du bassin versant de l'Oued Sahel met en évidence la complexité et la richesse de cette zone. La diversité des formations géologiques, la densité du réseau hydrographique, ainsi que les conditions climatiques contrastées influencent directement le régime hydrologique et la dynamique des écoulements. De plus, le couvert végétal et la sismicité constituent des paramètres déterminants dans l'évolution et la stabilité du bassin.

Ainsi, la compréhension de l'ensemble de ces facteurs est essentielle pour appréhender les processus hydrologiques et envisager des stratégies de gestion et d'aménagement adaptées à ce milieu.

Chapitre II
Etude hydrologique

Chapitre II : Etude hydrologique

II.1 Introduction :

L'étude hydrologique pour la réalisation d'un ouvrage hydrotechnique relève d'une importance considérable. Son but est l'estimation des débits de pointe pour différentes périodes de retour (10ans, 20ans, 50ans, 100ans), elle consiste à :

- Délimiter les bassins versants qui débouchent dans notre site d'étude ;
- Déterminer les différentes caractéristiques des bassins versants délimités ;
- Déterminer les postes pluviométriques proches (poste de Boured) et calcul de la lame d'eau tombée moyenne annuelle, et de différentes fréquences (10, 20, 50,100 ans) ;
- Calculer les débits de fréquence 10, 20, 50 et 100 ans par des formules empiriques.

II.2 Caractéristiques principales du bassin versant :

II.2.1 Paramètres géométriques :

Les bassins versants étudiés ont été délimités à l'aide du logiciel ArcGIS 10.8, en utilisant un Modèle Numérique du terrain (MNT) à résolution de 30 × 30 m.

La délimitation hydrologique repose sur l'identification de la ligne de partage des eaux de surface, ce qui permet de projeter horizontalement l'étendue réelle du bassin sur un plan cartographique. à partir de cette analyse, plusieurs **paramètres morphométriques** ont été extraits pour chaque bassin :

- **Surface du bassin versant** : obtenue à partir de la projection horizontale du polygone délimité
- **Périmètre** : mesuré automatiquement via l'outil de géométrie dans ArcGIS ;
- **Longueur du talweg principal** : mesurée depuis le point amont le plus éloigné jusqu'à l'exutoire, suivant la ligne d'écoulement principale dérivée du MNT.

Ces paramètres sont indispensables pour les calculs hydrologiques, notamment pour estimer les temps de concentration, les coefficients d'écoulement et la réponse du bassin aux événements de pluie.

Tableau II.1: paramètres géométriques

Cordonnées du site	Symboles	Unités	SBV d'oued sahel	SBV d'oued ouakeur
Superficie	S	Km^2	2129.48	74.49
Périmètre	P	Km	258.47	46.78
Longueur du thalweg principal	L	Km	86	17.73

II.2.2 Paramètres de Forme :

Est la forme géométrique telle que projetée sur plan horizontal. Elle a une influence certaine sur l'écoulement, elle affecte directement le temps du parcours des eaux à travers le réseau de drainage et par conséquent, l'allure de L'hydrogramme, « un bassin très allonge ne réagira pas, toutes choses égales d'ailleurs, de la même manière qu'un bassin de forme très ramassée » [M. ROCH 1963].

Elle peut se traduire par :

❖ **Indice de compacité de Gravilus**

En se basant sur les attributs physiques, divers paramètres spécifiques à chaque bassin versant sont déterminés pour décrire leur hydrologie. Le coefficient de compacité de Gravilus est établi en calculant le rapport entre la circonférence du bassin versant et celle du cercle ayant une surface équivalente. La formule suivante fournit son calcul :

$$K_G = 0,28.\left(\frac{P}{\sqrt{S}}\right) \qquad (\text{II}.1)$$

Avec :

- **A :** Superficie du bassin (Km2) ;
- **P :** Périmètre du bassin (Km) ;
- **K_G :** Indice de compacité de Gravélius.

Pour :

- K_G = 1.3 On dit que le bassin est compact
- 1 < K_G < 1.3 On dit que le bassin est moins compact.
- K_G > 1.3 On dit que le bassin est allongé.

Plus le K_C est élevé, plus le bassin versant s'étendra, et plus la durée nécessaire à une goutte d'eau pour parcourir du point le plus éloigné vers l'exutoire augmentera, résultant en une crue moins intense. Ainsi, l'indice de compacité est proportionnellement associé au temps de concentration Tc. Pour notre situation, le bassin versant présente un K_C de 2.07 supérieurs à 1.3, ce qui indique qu'il a une forme plutôt étirée.(2)

❖ **Rectangle équivalent :**

Il s'agit d'une conversion strictement géométrique en un rectangle de dimensions (L, l) ayant la même superficie que celle du bassin. Le rectangle équivalent est défini par la longueur « L » et la largeur « l » selon les formules ci-après(2) :

Les dimensions et l'aire du rectangle sont, respectivement :

$$P = 2(L_r + l_r) \qquad (II.2)$$

$$A = L_r \times l_r \qquad (II.3)$$

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

$$K_G = 0.282 \frac{P}{\sqrt{A}} \qquad (II.3)$$

$$P = 2(L_r + l_r)$$

$$A = L_r \times l_r$$

De ces trois dernières équations on obtient :

$$l_r = \frac{K_G}{1.12} \times \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_G}\right)^2}\right] \qquad (II.4)$$

$$L_r = \frac{K_G}{1.12} \times \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_G}\right)^2}\right] \qquad (II.5)$$

Avec :

- **L_r et l_r :** la longueur la largeur du rectangle (km)
- **A :** la surface du bassin versant (km2).
- **K_G :** l'indice de compacité.

❖ **Le coefficient d'allongement :**

Il est donné par la relation suivante :

$$C_a = \frac{L_{cp}^2}{A} \qquad (II.6)$$

Avec :

- **Lcp :** La longueur du talweg principal (km)
- **A :** la surface du bassin versant (km2).

Les paramètres hydro morphométriques du bassin versant de l'Oued sahel sont résumés dans le tableau II.2 :

Tableau II.2 : Les paramètres hydro morphométriques des SBV

Désignation		Symbole	Unité	SBV d'oued sahel	SBV d'oued ouakeur
Indice de compacité de Gravilus		Kc	-	1.56	1.51
Longueur du Talweg principale		Lp	Km	86	17.73
Coefficient d'allongement		Ça	-	3.47	4.22
Rectangle Equivalent	Longueur	L	Km	108.73	19.38
	Largeur	l	Km	19.58	3.84

II.2.3 Étude du relief

L'écoulement est notablement influencé par le relief, étant donné que plusieurs variables hydrométéorologiques fluctuent en fonction de l'altitude et de la configuration du bassin. Par ailleurs, la déclivité a un impact sur la vitesse d'écoulement. L'analyse du relief s'effectue à l'aide d'indices et de courbes.(2)

II.2.3.1 La courbe Hypsométrique :

Concernant le relief, l'identification des altitudes maximales et minimales des bassins versants est également effectuée à l'aide de la courbe hypsométrique qui offre une représentation synthétique de la pente du bassin. Cette courbe illustre la distribution de la superficie du bassin versant selon l'altitude. Ainsi, elle représente la superficie du bassin versant au-dessus d'une altitude spécifique.(2)

A. Sous bassin versant d'oued sahel :

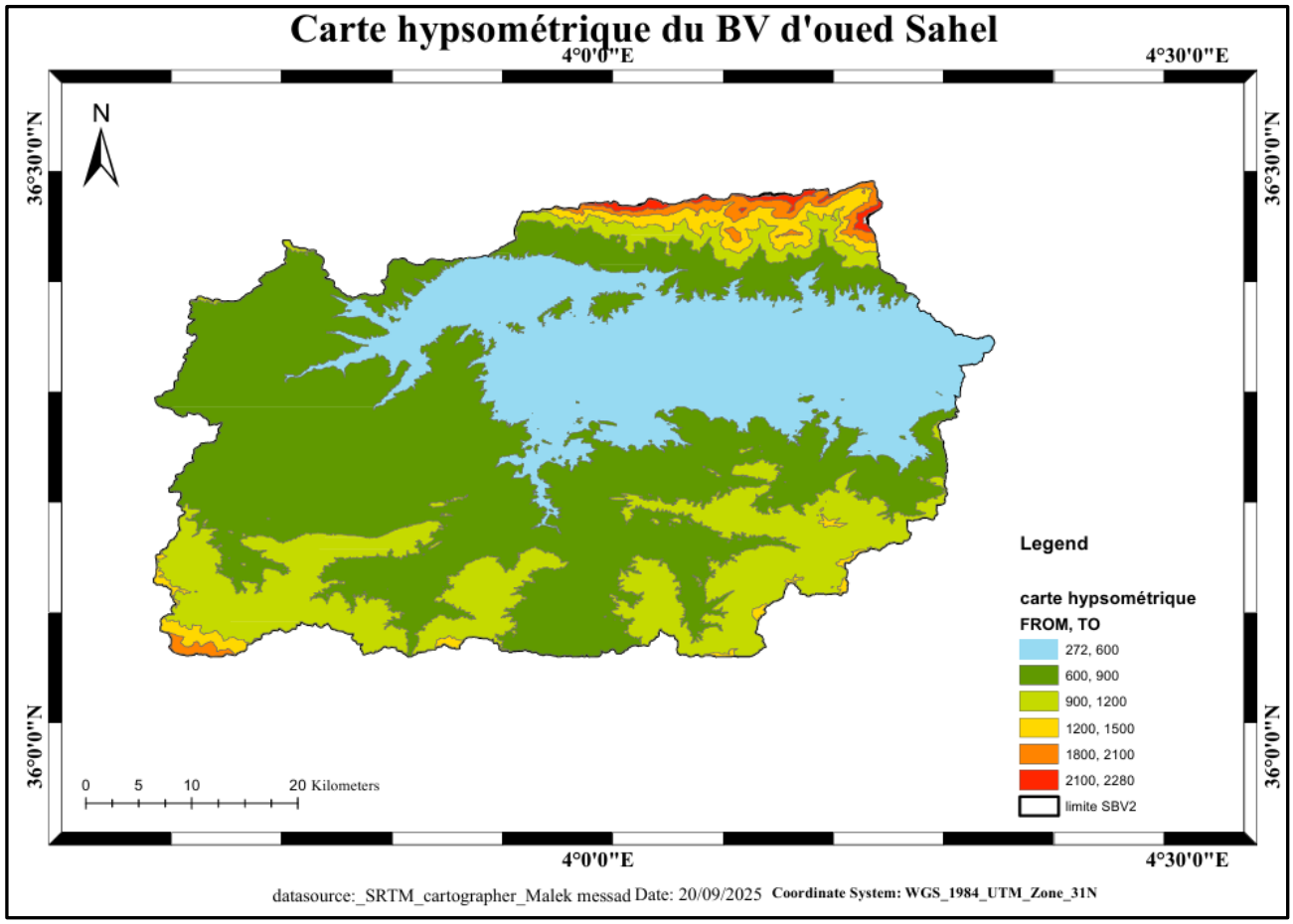


Figure II.4 : carte hypsométrique du BV de l'oued Sahel

La répartition des surfaces élémentaires et leurs cumule en fonction des altitudes ont été obtenues Avec logiciel ArcGIS.

Tableau II.3 : La répartition des surfaces élémentaires et leurs cumule en fonction des altitudes ont été obtenues avec logiciel ArcGIS.

Altitude (m)	Hi (m)	Surface (Km2)	Surfaces partielles (%)	Surfaces cumulées (Km2)	Surfaces cumulées (%)
2000 - 2280	2140	584.76	27.46	584.759476	27.46
1700 - 2000	1850	1045.86	49.11	1630.616286	76.58
1400 - 1700	1550	404.20	18.98	2034.812989	95.56
1100 - 1400	1250	56.78	2.67	2091.594441	98.22
800 - 1100	950	28.57	1.34	2120.16619	99.56
500 - 800	650	8.52	0.40	2128.683866	99.96
272 - 500	386	0.75	0.04	2129.432858	100.00

La répartition des surfaces et la courbe hypsométrique sont représentées par le graphe suivant :

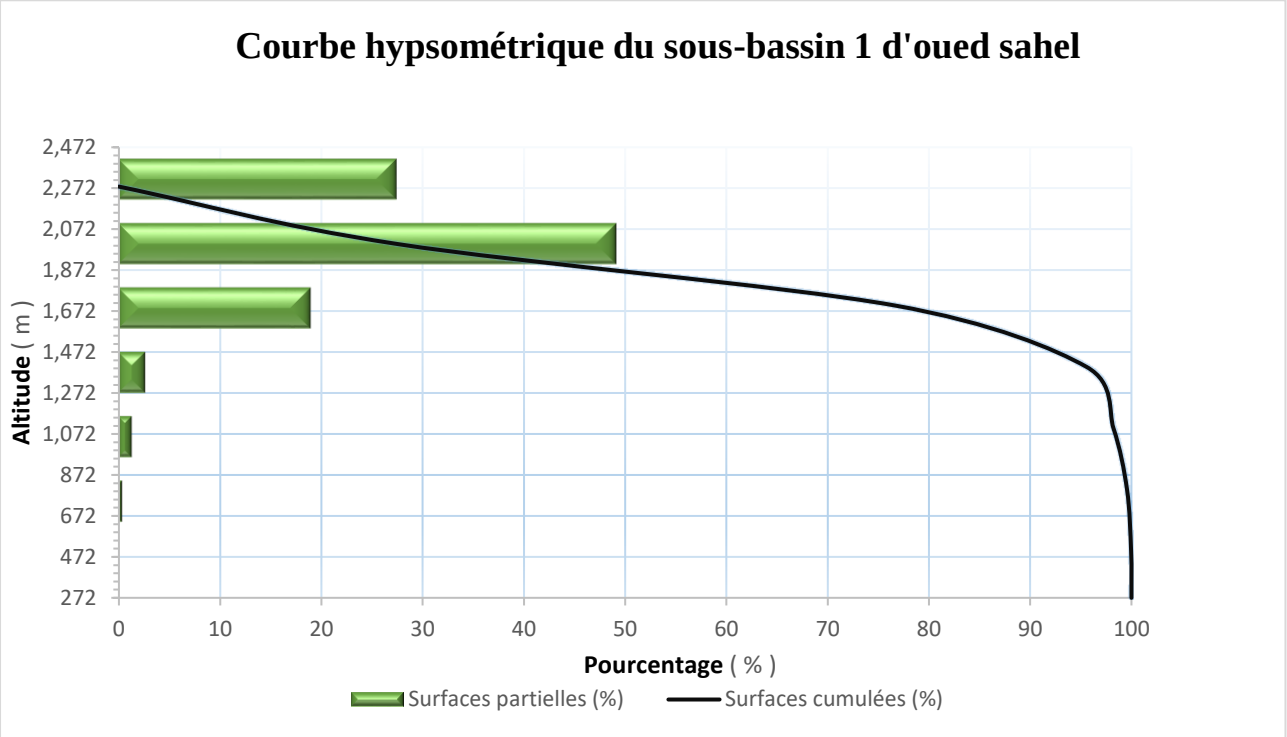


Figure II.5 : courbe hypsométrique du SBV d'oued sahel

Les principales caractéristiques altimétriques sont :

- **L'altitude maximale et minimale Hmax, Hmin :**

On obtient directement les hauteurs maximales et minimales d'un bassin versant à Partir des cartes topographiques. L'altitude maximale représente le sommet le plus haut du Bassin, alors que l'altitude minimale dénote le point le plus bas, habituellement localisé à la sortie du bassin.

- **L'altitude médiane H5%**

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

- **L'altitude médiane H50%**

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

- **L'altitude médiane H95%**

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

- **L'altitude moyenne Hmoy**

C'est le rapport entre la somme des surfaces élémentaires par l'altitude moyenne correspondante et la surface totale du bassin versant. (2)

$$H_{moy} = \frac{\sum h_i . S_I}{S} \qquad (\text{II}.7)$$

Avec :

- Ai : Surface élémentaire entre deux courbes de niveau en (Km^2).
- Hi : Altitude moyenne entre deux courbes de niveau en (m).
- A : Surface totale du bassin versant en (Km^2)

L'altitude maximale et minimale Hmax, Hmin :

Tableau II.4: Détermination des altitudes

Altitude	Valeur (m)
Hmoyenne	1839
Hmédiane	1862
H 95%	1465
H5%	2229
Hmax	2280
Hmin	272

B. Sous bassin versant d'oued ouakeur :

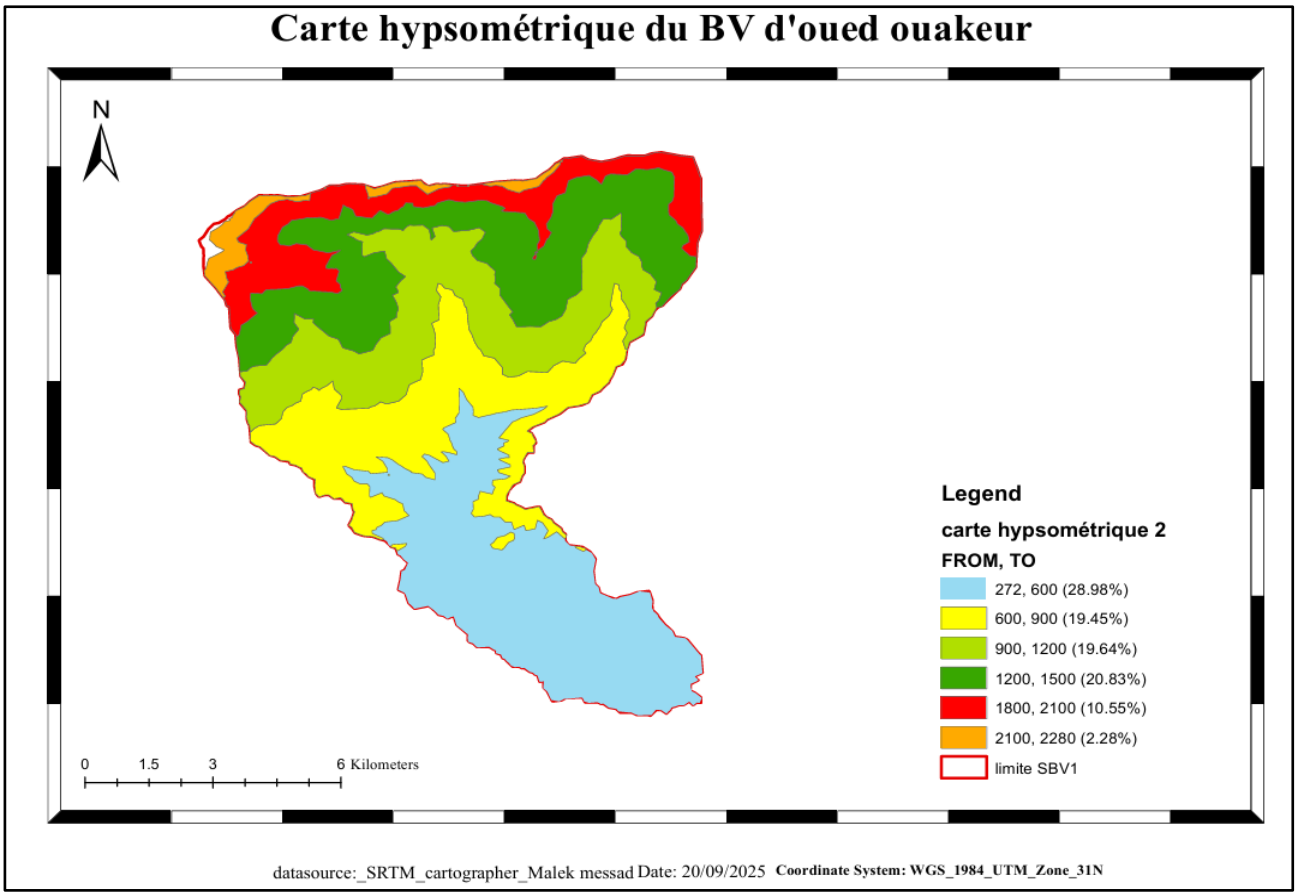


Figure II.6 : carte hypsométrique du SBV de l'oued ouakeur

Tableau II.5 : La répartition des surfaces élémentaires et leurs cumule en fonction des altitudes ont été obtenues avec logiciel ArcGIS.

Altitude (m)	Hi (m)	Surface (Km2)	Surfaces partielles (%)	Surfaces cumulées (Km2)	Surfaces cumulées (%)
2000 - 2280	2140	20.10	26.98	20.09742566	26.98
1700 - 2000	1850	14.49	19.45	34.58446176	46.43
1400 - 1700	1550	14.63	19.64	49.21280084	66.07
1100 - 1400	1250	15.52	20.83	64.72870848	86.90
800 - 1100	950	7.86	10.55	72.58755913	97.45
500 - 800	650	1.69	2.28	74.28232204	99.72
272 - 500	386	0.21	0.28	74.4899536	100.00

La répartition des surfaces et la courbe hypsométrique sont représentées par le graphe suivant :

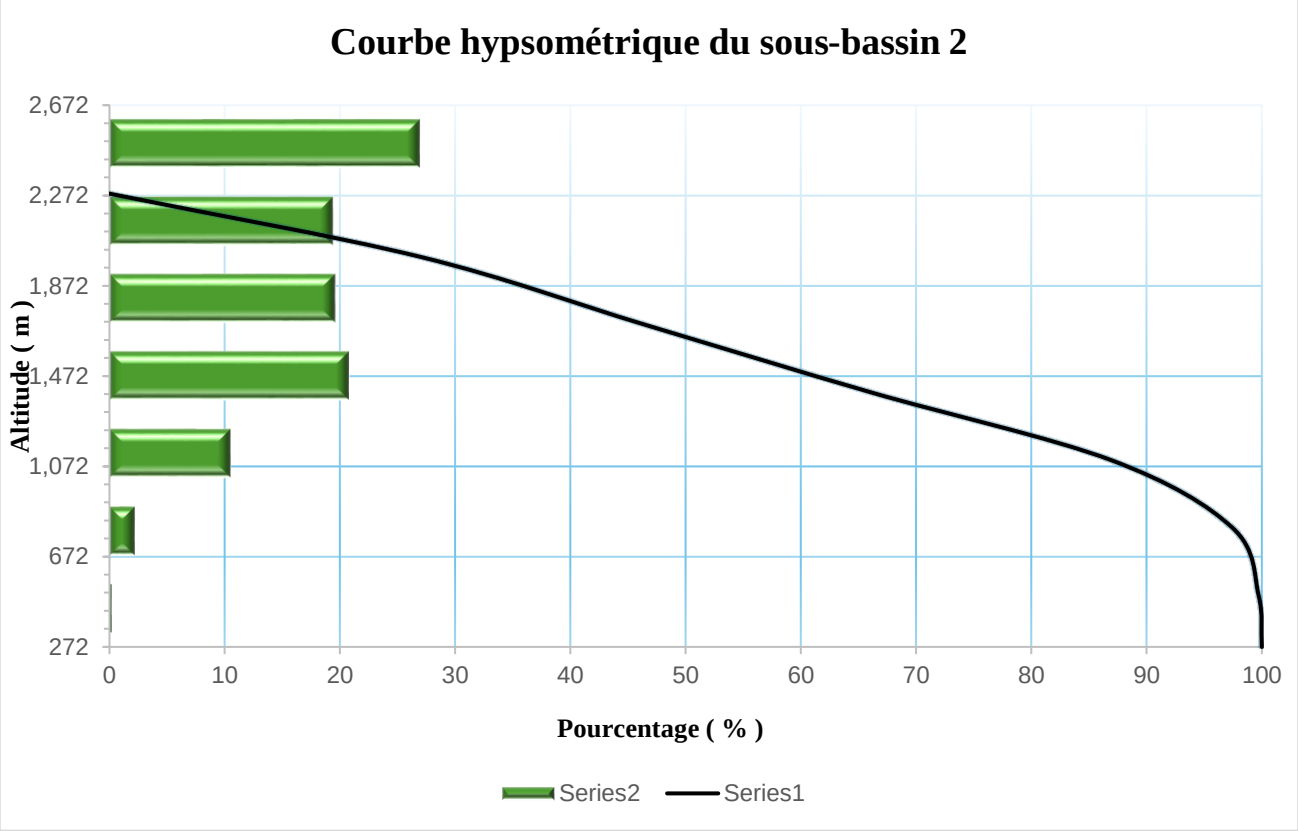


Figure II.7 : courbe hygrométrique de SVB d'oued ouakeur

Les principales caractéristiques altimétriques correspondent à :

L'altitude maximale et minimale Hmax, Hmin :

Tableau II.6 : détermination des altitudes

Altitude	Valeur (m)
Hmin (m)	272
Hmax (m)	2280
Hmoy (m)	1618
H5% (m)	2228
H50% (m)	1645
H95% (m)	870

II.2.3.2 Les indices de pente :

La détermination des pentes est décisive pour les professionnels tels que les forestiers, agriculteurs, aménageurs et gestionnaires d'espaces, ainsi que les spécialistes des risques naturels. Cela facilite l'analyse du terrain et la compréhension de la morphologie d'une montagne ou d'une vallée. La carte des pentes a été produite afin de déterminer les différents indices de pente ; elle est particulièrement bénéfique dans les régions montagneuses comme illustré par Les figures ci-après :

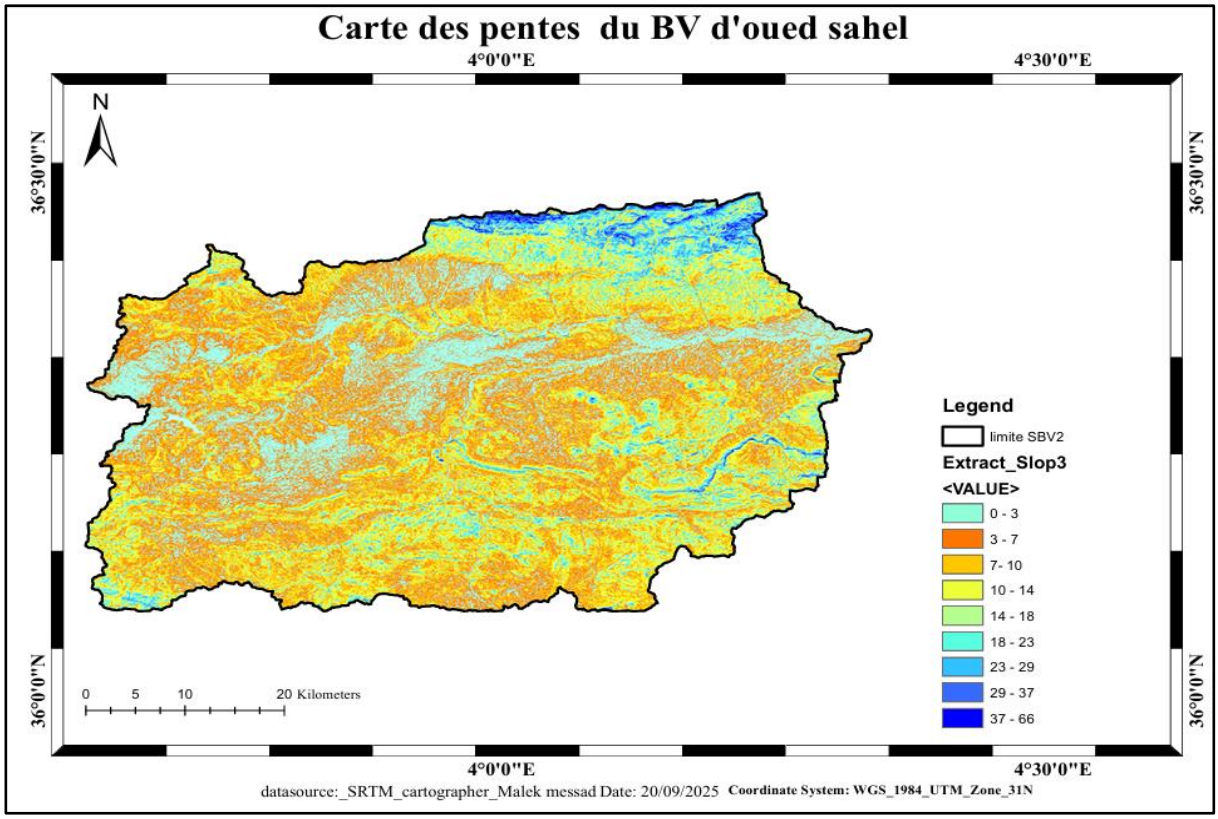


Figure II.8 *:* Carte des pentes SBV d'Oued sahel

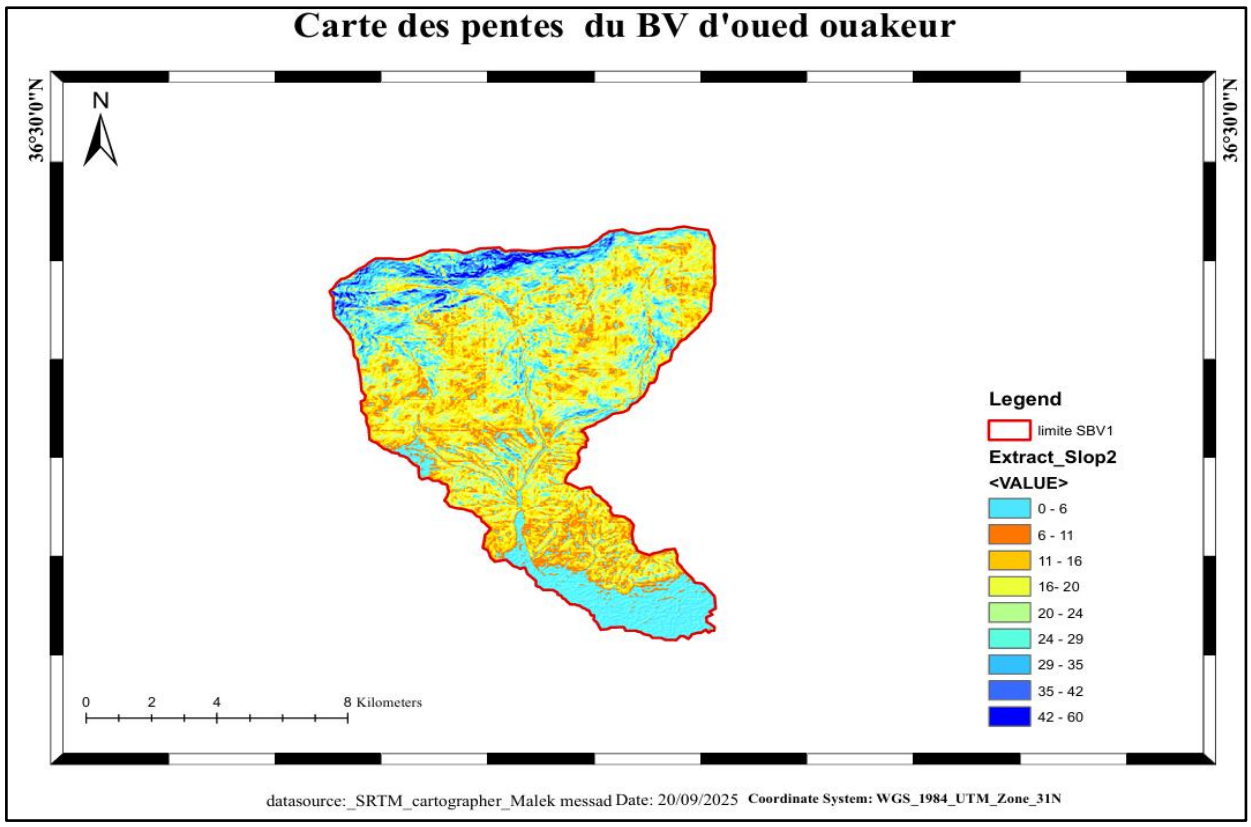


Figure II.9 : Carte des pentes du SBV d'oued ouakeur

Tout comme la carte des courbes de niveaux qui illustre une carte topographique basée sur un système de courbes de niveau à intervalles réguliers, cette représentation est présentée dans les figures ci-dessous :

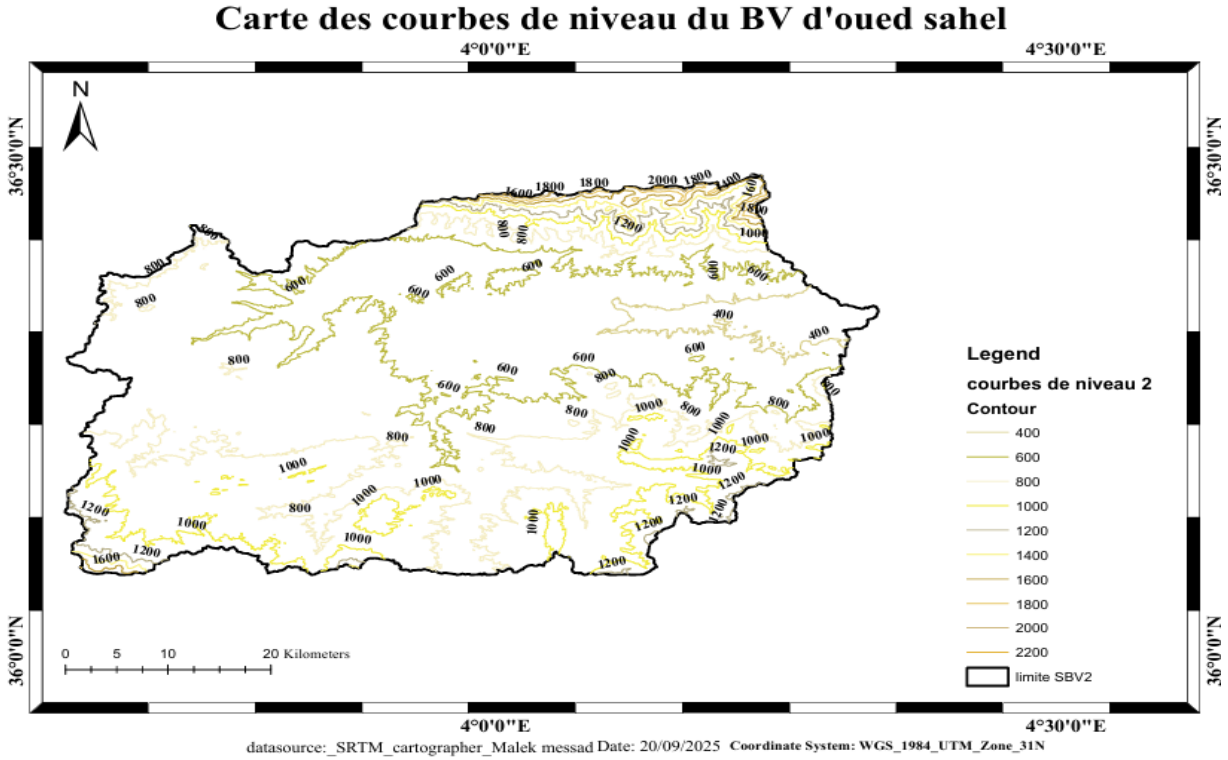


Figure II.10 : Carte des courbes du SBV d'oued Sahel

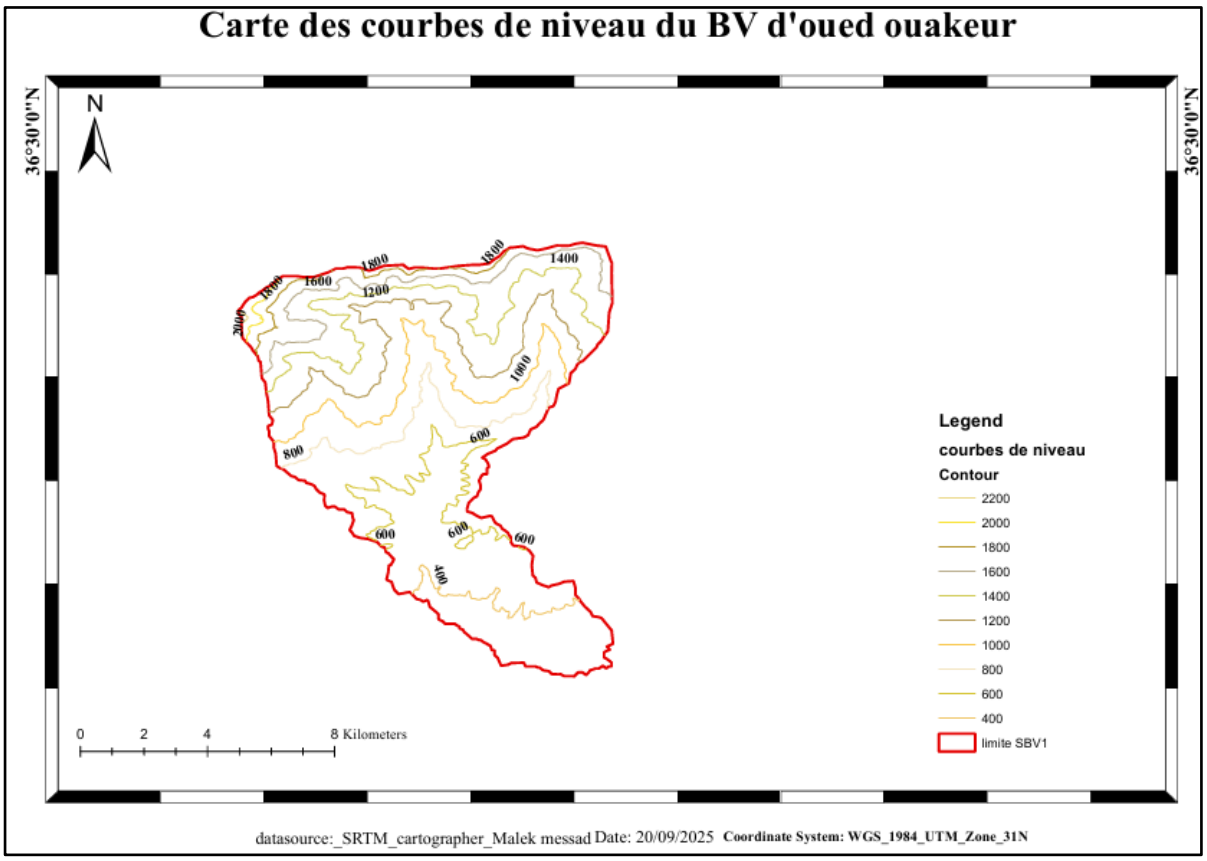


Figure II.11 : Carte des courbes du SBV d'oued ouakeur

❖ **La pente du bassin versant**

$$I_{BV} = \frac{H_{max} - H_{min}}{LTalweg} \qquad (\text{II}.8)$$

Avec :

- **LTalwegs :** Longueur de talwegs (km) ;
- **Hmax et Hmin :** Hauteur maximale et minimale (m).

❖ **Pente moyenne du bassin versant**

La pente ou le relief joue un rôle capital dans le ruissellement des eaux dans les cours d'eau.

Son appréhension est déterminée à l'aide de l'expression suivante(2) :

$$I_{mbv} = \frac{\Delta H(0.5L_1 + L_2 + \cdots .. + 0.5L_n)}{A} \qquad (\text{II}.9)$$

Avec :

- **ΔH :** Dénivelés entre deux courbes de niveaux successives (m).
- **L_1, L_2, L_n :** Les longueurs des courbes de niveaux (Km).
- **A :** Superficie du bassin versant (Km^2).

Tableau II.8 : **Calcul de la pente moyenne du SBV d'oued ouakour**

Tranche d'altitude (m)	ΔH	Longueur courbes de niveau (Km)
400		9.562214528
600	200	21.89027876
800	200	14.57876512
1000	200	18.08419985
1200	200	21.12207259
1400	200	21.85241292

Tableau II.9 *:* calcul de la pente moyenne du SBV d'oued sahel

Tranche d'altitude (m)	ΔH	Longueur courbes de niveau (Km)
400		106.7004502
600	200	523.5469157
800	200	574.32849
1000	200	384.4190117
1200	200	117.0090408
1400	200	70.1335378

❖ **Indice de pente de Roche (Ip) :**

Cet indice ce calcul à partir de la connaissance de la répartition hypsométrique sur le bassin versant, ou directement sur le rectangle équivalent. il est défini comme la moyenne de la racine carrée des pentes mesurées sur le rectangle équivalent, et pondérées par la surface.(2)

La pente moyenne entre deux lignes de niveau de cotes a_i et a_{i-1} est donné par :

$$I = \frac{a_i - a_{i-1}}{d_i} \qquad (\text{II}.10)$$

Avec :

- **di :** distance entre a_i et a_{i-1} dans le rectangle équivalent.

On peut exprimer la pente moyenne du bassin versant par :

$$I_P = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{I=1}^{n} \left[\sqrt{S_i * \Delta H_I}\right] \qquad (\text{II}.11)$$

Avec :

- **Si :** fraction de surface en (%) ;
- **ΔH :** Dénivelée entre a_i et a_{i-1} en (m) ;
- **L :** longueur du rectangle équivalent.

Tableau II.10 : calcul de l'indice des pentes de Roche

Tranche d'altitude (m)	ΔH	Si(Km2)	Si(%)	$\Delta H * S_i$(%)	$\sqrt{\Delta H * S_i}$(%)
2308-1200	1108	76,300	3,25	3605,13	60,04
1200-900	300	320,700	13,68	4102,77	64,05
900-700	200	689,800	29,42	5883,16	76,70
700-400	300	1127,800	48,09	14428,14	120,12
400-266	134	130,400	5,56	745,14	27,30
La somme		2345	100		348,21

Tableau II.11 : calcul de l'indice des pentes de Roche

Tranche d'altitude (m)	ΔH	Si(Km2)	Si(%)	$\Delta H * S_i$(%)	$\sqrt{\Delta H * S_i}$(%)
2308-1200	1108	76,300	3,25	3605,13	60,04
1200-900	300	320,700	13,68	4102,77	64,05
900-700	200	689,800	29,42	5883,16	76,70
700-400	300	1127,800	48,09	14428,14	120,12
400-266	134	130,400	5,56	745,14	27,30
La somme		2345	100		348,21

❖ **Indice de pente globale (Ig) :**

On le définit comme le rapport entre l'altitude couvrant de 5% à 95% de la surface du bassin et la longueur du rectangle équivalent. On choisit deux points S et Se sur l'axe des abscisses de manière que 90% de la superficie du bassin versant soit inclus entre ces deux valeurs, et qu'une portion de 5% de la surface totale du bassin versant soit inférieure à S, tandis qu'une autre portion soit supérieure à Se. On lit les altitudes appropriées sur la courbe hypsométrique.(2)

La formule fournit la valeur de Ig :

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

Avec :

- **H5% − H95% :** Altitude de fréquence correspondante au 5% et 95% de la surface total (m).
- **L_r :** Longueur du rectangle équivalent (km).

II.2.3.3 Dénivelée Spécifique :

La dénivelée spécifique (DS) permet d'appliquer la classification établie par l'O.R.S.T.O.M. (voir Tableau 14), laquelle distingue les différents types de relief des bassins versants, quelle que soit leur superficie. Cet indicateur offre une appréciation globale du relief d'un bassin. Il se calcule à l'aide de la formule suivante :

$$D_{SP} = I_g\sqrt{S} \qquad (\text{II}.13)$$

Tableau II.12*:* Classification O.R.S.T.O.M (type de relief)

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

O.R.S.T.O.M : Ancien Office de la recherche scientifique et technique outre-mer, devenu en 1984 Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération et en 1998 Institut de recherche pour le développement (I.R.D).(2)

Tableau II.7 *:* Résultats de calculs des pentes et la dénivelée spécifique des deux sous bassins versants

Paramètres	Symboles	Unités	SBV d'oued Sahel	SBV d'oued ouakour
Pente du bassin versant	I_{BV}	m/Km	23.35	113.25
Pente moyenne du bassin versant	I_m	m/Km	1.44	274.69
Indice de pente de Roche	I_p	%	1.3	2.89
Indice de pente moyenne	I_{pm}	m/Km	18.47	103.61
Indice de pente globale	I_g	m/Km	4.17	40.03
Dénivelée spécifique	Ds	m	192.48	345.52
Relief	/	/	Assez fort	Fort

II.3 Etude du réseau hydrographique :

II.3.1 Caractéristiques du réseau hydrographique :

Le bassin versant est drainé par un réseau de cours d'eau qui convergent vers un exutoire apparent, dirigeant les écoulements vers les zones dépressionnaires situées en aval, principalement en direction de l'oued Sahel.

Ce bassin se caractérise par un réseau hydrographique particulièrement dense, traduisant une prédominance du ruissellement superficiel sur les processus d'infiltration. Cette configuration suggère une faible perméabilité des sols ou une forte pente, favorisant ainsi l'écoulement rapide des eaux de pluie.

La carte du réseau hydrographique a été établie à partir de l'analyse de la carte topographique, permettant de visualiser avec précision la structure du drainage.

Le rôle du réseau hydrographique dans la dynamique des écoulements de surface est fondamental. Un bassin versant bien drainer facilite en effet l'acheminement des eaux vers l'exutoire, influençant directement la réponse hydrologique du bassin lors des événements pluvieux.

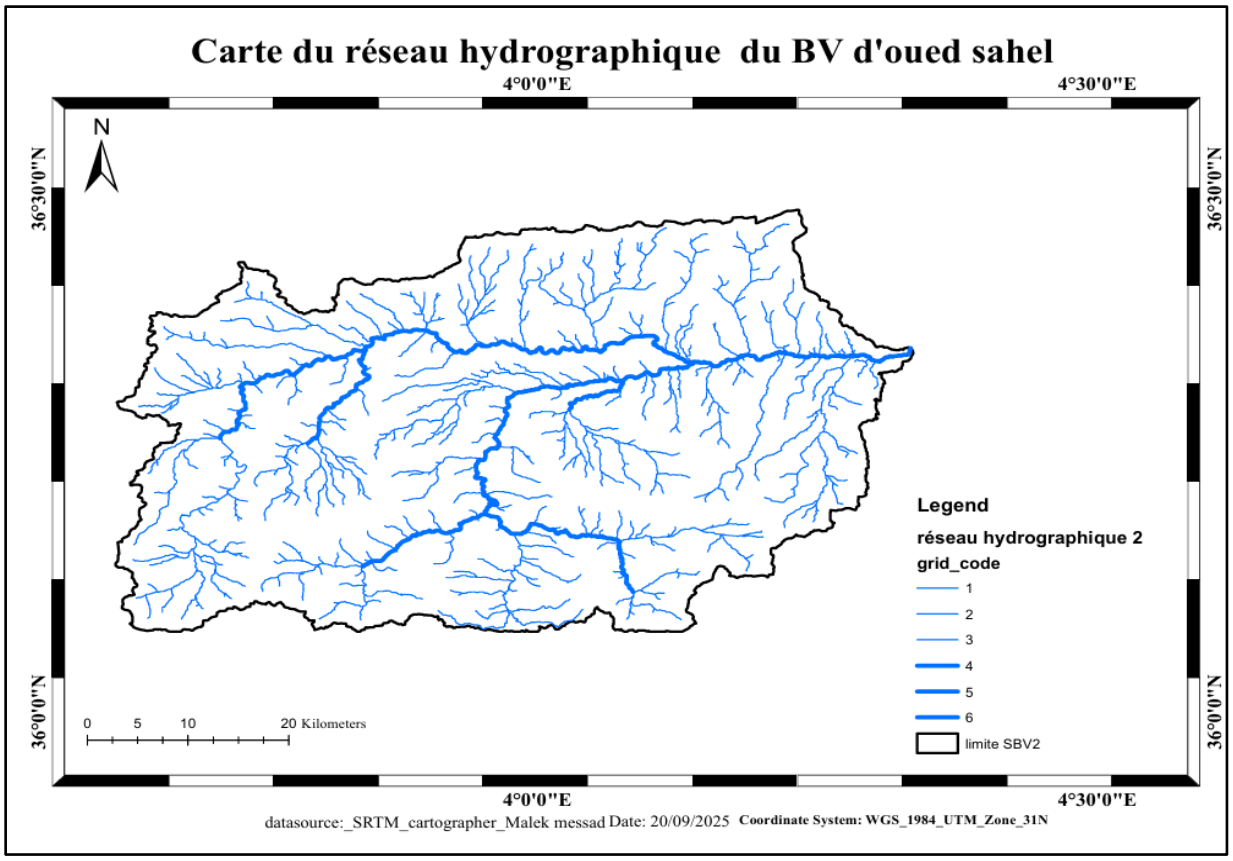


Figure II.12 : Carte du réseau hydrographique du SBV d'oued Sahel

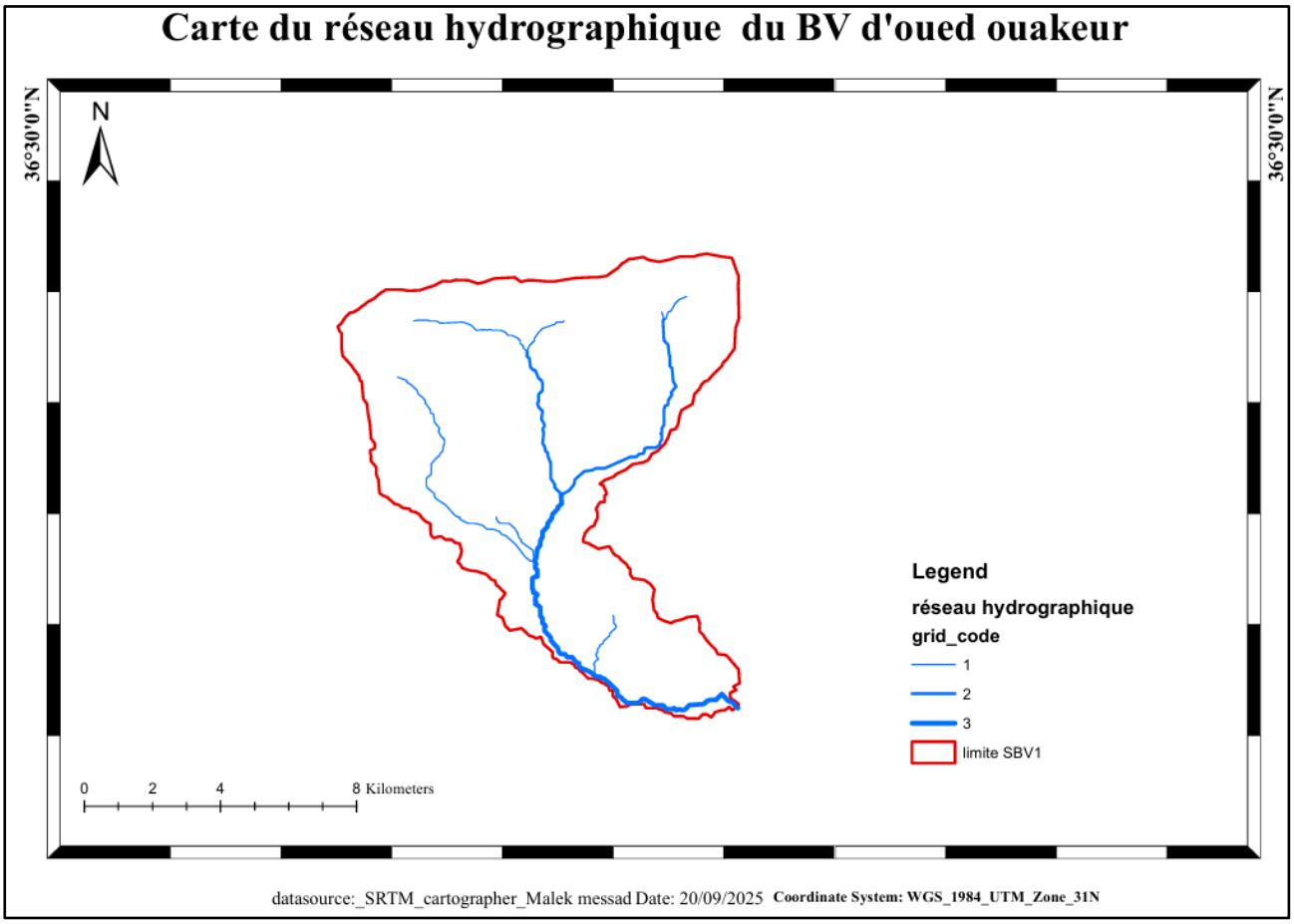


Figure II.13 : Carte du réseau hydrographique du SBV d'oued Ouakour

II.3.2 Paramètres hydrographiques :

❖ **Densité de drainage (Dd)**

$$D_d = \frac{\sum L_i}{S} = \frac{L}{S}\left[\frac{km}{km^2}\right] \qquad (\text{II}.14)$$

Ce paramètre est en quelque sorte un reflet de la dynamique du bassin, de la stabilité du réseau hydrographique et du type de ruissellement de surface.(2)

- **S :** La surface du bassin versant en (Km^2)
- **L :** La longueur total de tous les Talweg en (Km^2),

❖ **Coefficient de torrentialité**

$$C_t = D_d . F_1 \qquad (\text{II}.15)$$

Où :

$$F_1 = \frac{N_1}{S} \qquad (\text{II}.16)$$

Avec :

- **N1 :** Nombre des Thalwegs d'ordre 1 :

- **F_1 :** fréquence des Thalwegs d'ordre1.

II.3.3 CALCUL DU TEMPS DE CONCENTRATION :

Le temps de concentration **Tc** d'un bassin versant correspond à la durée maximale nécessaire pour qu'une goutte d'eau, tombée en un point quelconque du bassin, atteigne son exutoire en suivant le chemin hydrologique. Il s'agit d'une grandeur complexe à estimer avec précision.

Plusieurs formules empiriques sont couramment utilisées pour l'évaluer. Ces formules reflètent généralement des conditions régionales spécifiques, puisqu'elles ont été établies à partir de paramètres propres à leur zone d'origine. Par conséquent, lorsqu'on analyse un bassin versant donner, il est recommandé de privilégier la formule dont les conditions de développement sont les plus proches de celles du bassin étudié.(3)

Ainsi, dans le cas des bassins situés dans le nord de l'Algérie, il est préférable d'opter pour des formules élaborées dans des contextes physio géographiques similaires, afin d'assurer une estimation plus réaliste et adaptée du temps de concentration.

L'évaluation du temps de concentration s'appuie alors sur les formules empiriques suivantes :

❖ **Formule de Ventura**

$$Tc = 0,1275 \times \sqrt{\frac{S}{I}} \qquad (II.17)$$

Où :

- **Tc :** temps de concentration ;
- **S :** superficie du bassin versant en Km^2 ;
- **I :** Indice de pente globale I en m/Km.

❖ **Formule SCS l'ANRH**

$$Tc = \left(\frac{0.87.L^3}{H_{moy} - H_{min}}\right)^{0.385} \qquad (II.18)$$

Avec :

- **Tc :** Temps de concentration (h) :
- **H_{moy} et H_{min} :** Altitudes moyenne et minimale du bassin versant (m) ;
- **L :** Longueur du cours d'eau principal (Km).

❖ **Formule de Giandotti :**

$$Tc = \frac{4\sqrt{S} + 1.5L}{0.8\sqrt{H_{moy} - H_{min}}} \qquad (II.19)$$

Où :

- **H_{moy} :** altitude moyenne en m ;
- **S :** superficie du bassin versant en Km^2 ;
- **L :** longueur du talweg principal en Km.

❖ **Formule ESPAGNOLE :**

$$Tc = 0.126 * 60 * (\frac{L}{Ipm^{0.25}})^{0.76} \quad (II.20)$$

Avec :

- ❖ Tc : Temps de concentration (h) ;
- ❖ L : Longueur du cours d'eau principal (Km) :
- ❖ Ipm : Pente moyenne du cours d'eau principal (m/m)

❖ **Choix du temps de concentration**

Les résultats obtenus pour le temps de concentration, selon les différentes formules empiriques considérées, sont récapitulés dans le tableau ci-dessous :

Tableau II.8 : Résultats de calculs de temps de concentration

Formules utilisées	Unités	Temps de Concentration (SBV D'oued sahel)	Temps de Concentration (SBV D'oued ouakour)
Formule de VENTURA	h	91.10	5.50
Formule de GIANDOTTI	h	9.90	2.08
Formule ESPAGNOLE	h	7.60	1.72
Formule de SCS ANRH	h	9.57	1.64

Interprétation : Pour des raisons de sécurité on prend le temps de concentration minimal de la formule d'ESPAGNOLE qui égale à 7.6 h pour le bassin versent d'oued sahel, et la formule de SCS ANRH qui égale à 1.64 h pour le bassin versant d'oued ouakour .

II.3.4 La vitesse d'écoulement :

Cette vitesse est donnée par la formule :

$$V_R = \frac{L}{T_C} \quad (II.21)$$

Avec :

- **L :** Longueur de talweg principal en [Km] ;

- **T_c :** temps de concentration en [heure].

Tableau II.9 : Paramètres hydrographiques

Paramètres	Unités	SVB d'oued sahel	SBV d'oued ouakour
Densité de drainage Dd	Km/Km^2	0.65	0.53
Densité hydrographique des thalwegs élémentaires « F »	/	0.15	0.07
Coefficient de torrentialité Ct	/	0.10	0.04
Temps de concentration	h	7.60	1.64
Vitesse de ruissellement Vr	km/h	11.32	10.82

Tableau II.10 : Tableau récapitulatif des caractéristiques des sous bassins Versants

Coordonnées du site	Symboles	Unités	SVB d'oued sahel	SBV d'oued ouakour
Superficie	S	Km^2	2129.48	74.49
Périmètre	P	Km	258.47	46.78
Altitudes caractéristiques	H_{min}	m	272	272
	H_{max}	m	2280	2280
	H_{moy}	m	1839.30	1618
	$H_{5\%}$	m	2229.01	2228.10
	$H_{50\%}$		1862.32	1645.43
	$H_{95\%}$	m	1408.79	869.55
Indice de forme	K_c	/	1.6	1.5
Coefficient de forme	C_f	/	3.47	4.22
Rectangle équivalent	Longueur (L)	Km	108.73	19.38
	Largeur (l)	Km	19.58	3.84
Pente du bassin versant IBV	I_{BV}	M/Km	23.35	113.25
Pente moyenne du bassin versant Im	I_m	M/Km	1.44	274.69
Indice de pente de Roche Ip	I_p	%	1.3	2.89
Indice de pente moyenne Ipm	I_{pm}	m/Km	18.47	103.61
Indice de pente globale Ig	Ig	m/Km	4.17	40.03
Dénivelée spécifique Ds	Ds	m	192.48	345.52
Densité de drainage Dd	Dd	Km/Km^2	0.65	0.53
Coefficient de torrentialité Ct	Ct	/	0.10	0.04
Temps de concentration	Tc	h	7.60	1.64
Vitesse de ruissellement Vr	Vr	km/h	11.32	10.82
Relief		/	Assez fort	Fort

II.4 Etude des crues

L'analyse fréquentielle en hydrologie constitue une méthode statistique de prévision reposant sur l'exploitation des données historiques d'événements hydrologiques afin d'estimer la probabilité de leur récurrence future. La détermination des débits de crue se base prioritairement sur les mesures hydrométriques disponibles au niveau du bassin versant concerner. En l'absence de telles données, une analogie avec un bassin voisin est envisageable. Si aucune observation n'est accessible, le recours à des modèles empiriques fondés sur les précipitations s'impose. Ces modèles tiennent généralement compte de la pluviométrie et du déficit hydrique.

L'estimation du débit de crue fréquentielle d'un bassin versant peut ainsi être réalisée selon deux approches principales :

- L'exploitation des séries chronologiques enregistrées par une station hydrométrique ;
- L'application de la méthode GRADEX, qui permet d'évaluer les crues à partir des données pluviométriques extrêmes.

II.4.1 Historique de la méthode du Gradex :

La méthode Gradex, développée par Guillot et Duband en 1967, est une approche probabiliste utilisée pour estimer les débits de crues extrêmes d'un oued, correspondant à des périodes de retour allant de 100 à 10 000 ans. Pour que cette méthode soit applicable, deux conditions doivent être remplies : une répartition homogène des précipitations sur le bassin versant, et une superficie de bassin inférieure à 5 000 km².

La méthode Gradex, en s'appuyant sur l'analyse des pluies, est considérée comme plus élaborée que les méthodes classiques de prédétermination des crues, lesquelles reposent principalement sur l'exploitation des débits observés aux stations hydrométriques.(3)

II.4.2 Présentation des stations utilisées dans l'étude des crues

Dans le cadre de l'analyse des crues, plusieurs types de stations de mesure sont mobilisées pour collecter les données hydrologiques et météorologiques nécessaires. Parmi les plus couramment utilisées, on distingue :

a. Les stations pluviométriques

Ces stations sont spécialement conçues pour mesurer les précipitations. Elles utilisent des pluviomètres ou des capteurs spécifiques pour enregistrer les quantités de pluie sur une période

donnée. Les données recueillies permettent d'évaluer les apports d'eau au niveau d'un bassin versant, ce qui constitue une information essentielle pour la prévision et la modélisation des crues.

b. Les stations hydrométriques

Ces stations servent à mesurer le débit des cours d'eau. Elles jouent un rôle central dans la surveillance hydrologique et fournissent des données indispensables à l'analyse des crues, à la gestion des ressources en eau, ainsi qu'à diverses études relatives aux systèmes hydriques

Le tableau suivant présente les différentes stations utilisées :

Tableau II.11 : Caractéristiques des stations pluviométriques dans bassin versant de la zone d'étude

Station	Code	X(m)	Y (m)	Altitude (m)	Période de fonctionnement	Nombre d'année
Tikjda	15.01.12	/	/	/	1994-2024	30 ans
El Asnam sh	15.02.04	620.40	335.50	440	1994-2024	30 ans
Béni Hammad	15.03.06	/	/	/	1994-2024	30 ans

Tableau II.12 *:* Caractéristique de la station hydrométrique « Boubirek » (Source : ANRH)

Station	Code	X(m)	Y (m)	Altitude (m)	Nombre d'année
Boubirek	150703	689.45	354.5	600	35

II.4.3 L'analyse fréquentielles des pluies des crues maximale annuelle avec la station hydrométrique Boubirek

L'étude des pluies maximales annuelles constitue une étape fondamentale dans tout projet d'aménagement, car elle permet de déterminer les précipitations extrêmes correspondant à différentes périodes de retour. Pour cela, une série pluviométrique longue, qui admette les précipitations maximales annuelle pour la période la plus longue possible. En l'absence de station hydrométrique dans notre sous-bassin d'étude de l'oued Sahel, nous avons recours aux données de la station de Boubirek, située dans le même bassin versant n°15, Sous bassin N°7 de l'Oued Bou Sellam, à proximité immédiate du sous-bassin de l'oued Sahel.

Le bassin versant du Bou Sellam est fermé, au nord, à partir du confluent de la rivière avec l'oued Sahel, par le mont Gueldamane. L'oued Bou Sellam descend des versants sud du mont Megris ; il est formé de cinq ruisseaux, l'oued Mahouan, l'oued Mohammed el Hannach, oued Ouricia, l'oued Goussimet et l'oued Fermatou, qui se réunissent au nord de Sétif. La rivière prend alors le nom d'oued Bou Sellam ; elle court d'abord au sud-sudouest, passe à trois kilomètres à l'ouest de Sétif, et vient franchir la chaîne dans laquelle elle prend sa source entre djebel Tafat et le Guergour.Il s'étend sur une superficie de S= 1251 Km^2.

Le tableau II.21 représente la répartition des débits maximales annuels de la station prise pour une période de 35 ans.

Tableau II.13 : Série des débits maximales annuels prise de la station 150703 (Source : ANRH)

Années	Q_{max} (m^3/s)	Années	Q_{max} (m^3/s)	Années	Q_{max} (m^3/s)
1970	145,20	1978	52,50	1987	32,44
1971	185,60	1979	168,00	1990	34,36
1972	208,00	1980	168,00	1991	28,98
1973	652,00	1981	196,80	1992	25,69
1975	368,00	1983	298,70	1996	7,60
1976	155,17	1984	195,20	1997	94,00
1977	114,40	1985	192,00	2002	388,80

Les caractéristiques de la série pluviométrique sont déterminées à l'aide de logiciel HYFRAN, représentées dans le tableau II.22 :

Tableau II.14 : Les caractéristiques de la série pluviométrique

Caractéristiques	Valeurs
Moyenne des Qmax en (m*/s)	177
Écart type « σx » ; Pour n 30 ans	153
Coefficient de variation « Cv »	0.864

II.4.3.1 Choix du modèle fréquentiel

Dans le cadre de l'analyse des crues, plusieurs modèles fréquentiels sont employés pour mieux comprendre et anticiper le comportement des cours d'eau lors d'événements hydrologiques extrêmes. Ces modèles permettent d'estimer les débits associés à différentes périodes de retour, en s'appuyant sur l'analyse statistique des données historiques.

Ils sont basés sur l'ajustement de lois de probabilité aux valeurs maximales de débit enregistrées, et visent à évaluer la fréquence et l'intensité des crues futures. Chaque modèle repose sur des variables hydrologiques spécifiques et présente des conditions de validité particulières.

Voici les principaux modèles fréquentiels utilisés dans ce type d'étude, accompagnés des variables hydrologiques qu'ils mobilisent et de leurs domaines d'application :

Tableau II.15 : les différents modèles fréquentiels

Modèle fréquentiel	Variable hydrologique	Caractéristiques	Conditions / Validité

Loi de Gumbel	Débit maximal annuel	- Spécifique aux valeurs extrêmes- Simple à mettre en œuvre	- Données indépendantes et stationnaires- Distribution asymétrique
Loi Log-Normale	Débit (transformé en log)	- Adaptée aux séries très asymétriques- Basée sur la transformation logarithmique	- Données positives- Nécessite une bonne taille d'échantillon
Loi Normale	Débit annuel	- Distribution symétrique- Simple, mais peu réaliste pour des valeurs extrêmes	- Valable uniquement si les données sont peu asymétriques
Loi de Pearson type III	Débit maximal annuel	- Bonne capacité d'ajustement- Flexible pour divers types de distribution	- Données asymétriques- Utilisée dans de nombreuses recommandations officielles
Log-Pearson III	Logarithme du débit maximal	- Variante log-transformée de la Pearson III- Souvent imposée par la réglementation	- Données positives et asymétriques- Méthode standardisée notamment aux États-Unis

❖ **Ajustement de la série à la loi de GUMBEL**

La loi de Gumbel est largement utilisée pour modéliser la distribution des valeurs extrêmes. Elle repose sur la notion de loi limite double exponentielle, qui représente la distribution asymptotique des maximas d'un échantillon de taille n. Étant donné que le débit maximal annuel correspond généralement au maximum de 365 valeurs journalières, cette loi est particulièrement bien adaptée à la modélisation des séries de maxima annuels.(2)

Dans cette étude, l'ajustement de la série des débits maximaux annuels à la loi de Gumbel a été réalisé à l'aide du logiciel HYFRANPLUS. Les résultats obtenus à l'issue de cet ajustement sont synthétisés dans le tableau ci-dessous :

Tableau II.16 : Résultats d'ajustement à la loi de GUMBEL de la station 150703

Période de retour	Probabilité de fréquence (q)	Q_{max} (m^3/s)	Ecart type	Intervalle de confiance
10000.0	0.9999	1200	255	705 - 1700
2000.0	0.9995	1010	211	599 - 1430
1000.0	0.9990	930	193	553 - 1310
200.0	0.9950	739	149	446 - 1030
100.0	0.9900	656	131	399 - 912
50.0	0.9800	573	112	353 - 793
20.0	0.9500	462	87.9	289 - 634
10.0	0.9000	376	69.6	240 - 512
5.0	0.8000	287	51.5	186 - 388

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

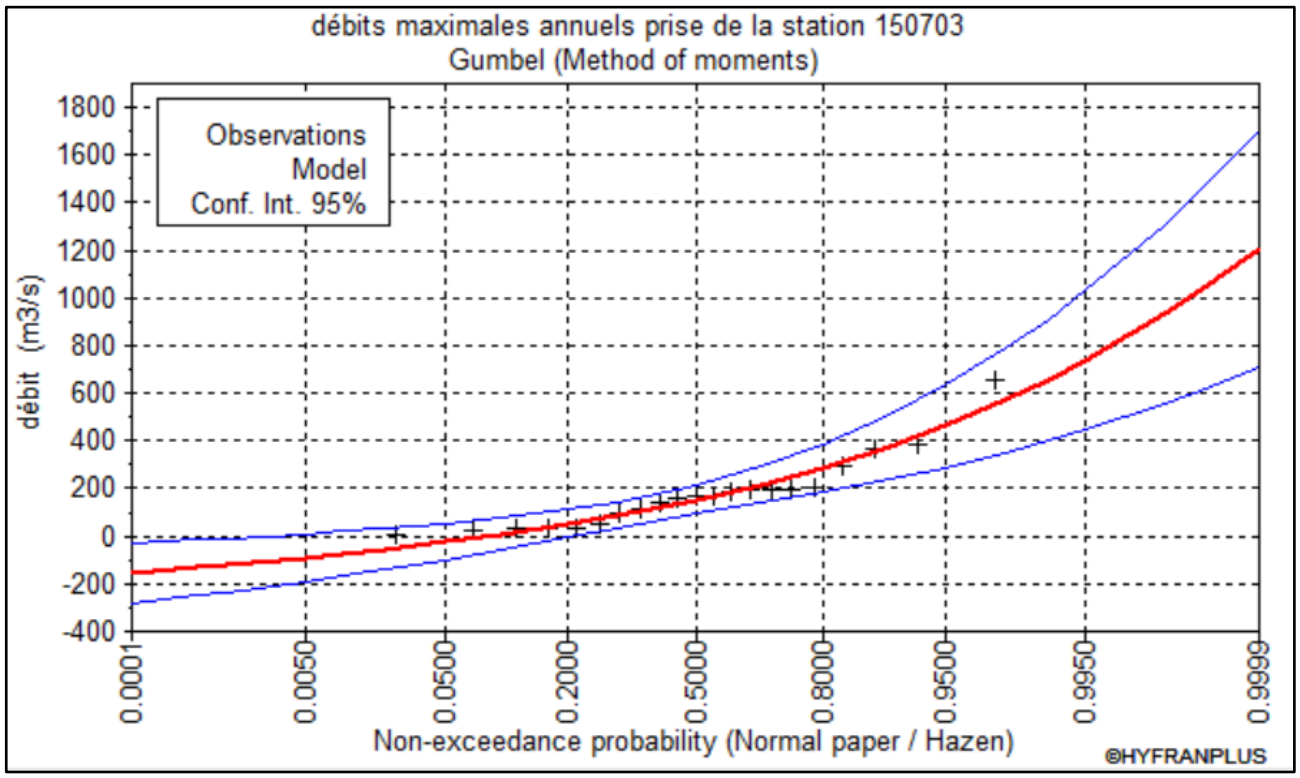


Figure II.14 : Représentation graphique de la loi de GUMBEL de la station 150703

On possède une comparaison des caractéristiques de la loi de GUMBEL et de l'échantillon, dont les résultats sont montrés dans le tableau suivant :

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

Paramètres	Caractéristiques de la loi	Caractéristiques de l'échantillon
Minimum	Aucun	7.60
Maximum	Aucun	652
Moyen	177	177
Ecart type	153	153
Médiane	152	168
Coefficient de variation Cv	0.864	0.864
Coefficient d'asymétrie Cs	1.14	1.64
Coefficient d'aplatissement Ck	2.40	5.04

❖ **Ajustement à la loi Log Normale (Loi de Galton)**

Une variable aléatoire X suit une distribution Log-Normale lorsque sa transformation logarithmique V=ln(X) suit une loi normale. Autrement dit, la loi Log-Normale est dérivée de la loi normale à travers un changement de variable, ce qui lui confère une dissymétrie adaptée à la modélisation de phénomènes naturels positifs et asymétriques, comme les débits de crue.

Également connue sous le nom de loi de Galton, elle est particulièrement utilisée lorsque les données présentent une forte variabilité et une asymétrie marquée(2).

Dans le cadre de cette étude, l'ajustement de la série des débits maximaux annuels à la loi Log-Normale a été réalisé à l'aide du logiciel HYFRANPLUS. Les résultats de cet ajustement sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau II.18 *:* Résultat de l'ajustement à la loi Log-Normal de la station 150703

Période de retour	Probabilité de fréquence (q)	Qmax (m^3/s)	Ecart type	Intervalle de confiance
10000.0	0.9999	6660	4560	N/D
2000.0	0.9995	4170	2570	N/D
1000.0	0.9990	3350	1960	N/D
200.0	0.9950	1910	965	N/D
100.0	0.9900	1460	680	N/D
50.0	0.9800	1080	462	N/D
20.0	0.9500	692	256	189 - 1190
10.0	0.9000	465	151	169 - 762
5.0	0.8000	288	80.3	130 - 445

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

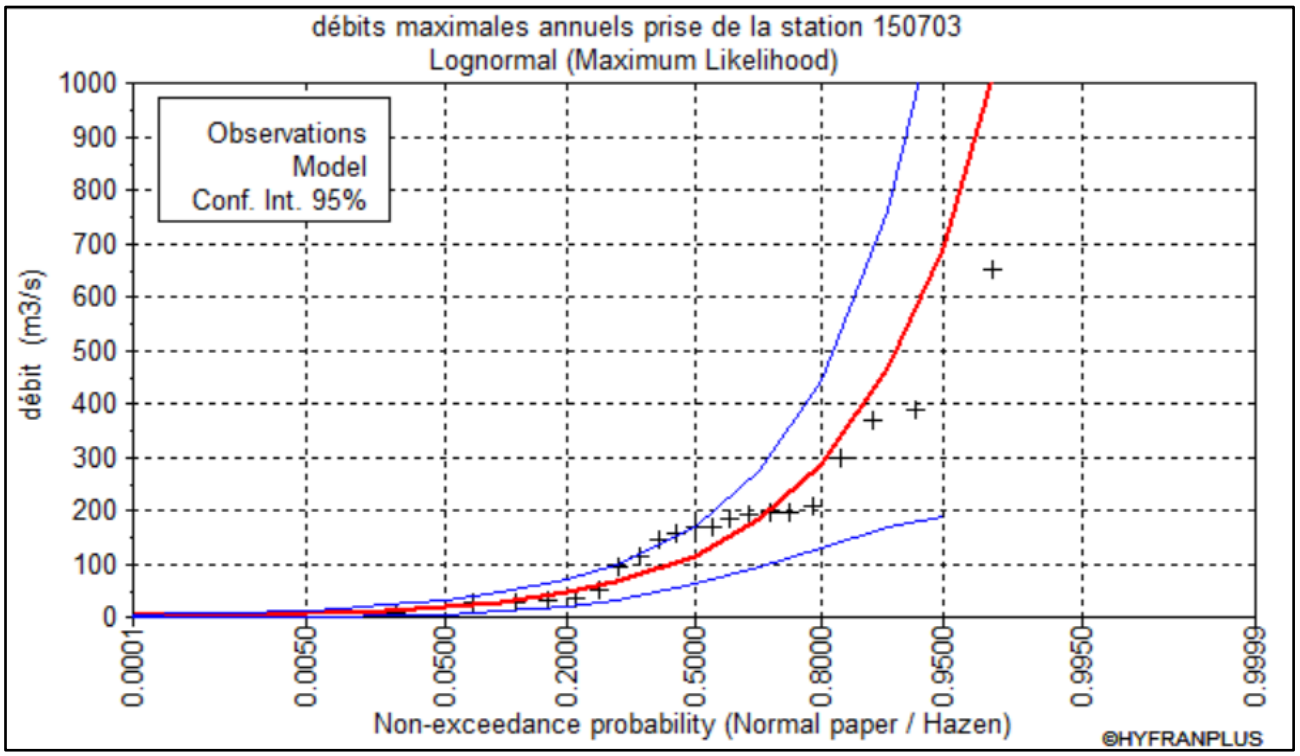


Figure II.15 : Représentation graphique de la loi de Galton de la station 150703

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

Tableau II.19 : La comparaison entre les caractéristiques de la loi de Log Normal et de l'échantillon

Paramètres	Caractéristiques de la loi	Caractéristiques de l'échantillon
Minimum	0.00	7.60
Maximum	Aucun	652
Moyen	208	177
Ecart type	315	153
Médiane	115	168
Coefficient de variation Cv	1.51	0.864
Coefficient d'asymétrie Cs	8.02	1.64
Coefficient d'aplatissement Ck	219	5.04

- **Choix de la loi d'ajustement**

Il subsiste toujours un écart entre les fréquences observées dans les données expérimentales et celles estimées à partir d'une fonction de répartition théorique. Si l'ajustement graphique constitue une première approche pour évaluer la pertinence d'un modèle, il demeure insuffisant pour justifier le choix définitif d'une loi de probabilité.

C'est pourquoi il est nécessaire de recourir à des tests statistiques d'adéquation, dont l'objectif est de comparer plusieurs lois théoriques afin de retenir celle qui offre le meilleur ajustement aux données – ou du moins, le moins mauvais.

Parmi ces tests, le plus couramment utilisé est le test du Khi-deux (χ^2), qui permet de quantifier l'écart entre les fréquences observées et celles théoriquement attendues(2)

- **Ajustement graphique visuelle (la méthode visuelle)**

Les figures 12 et 13 présentent les graphiques des résultats obtenus à partir du logiciel HYFRAN+. Ces courbes illustrent la comparaison entre les probabilités empiriques et les probabilités théoriques issues des distributions de Gumbel et de Log-Normale.

Cependant, l'analyse visuelle seule ne permet pas de trancher de manière fiable sur la qualité de l'ajustement. C'est pourquoi une évaluation statistique plus rigoureuse s'avère nécessaire pour identifier la loi la mieux adaptée aux données observée

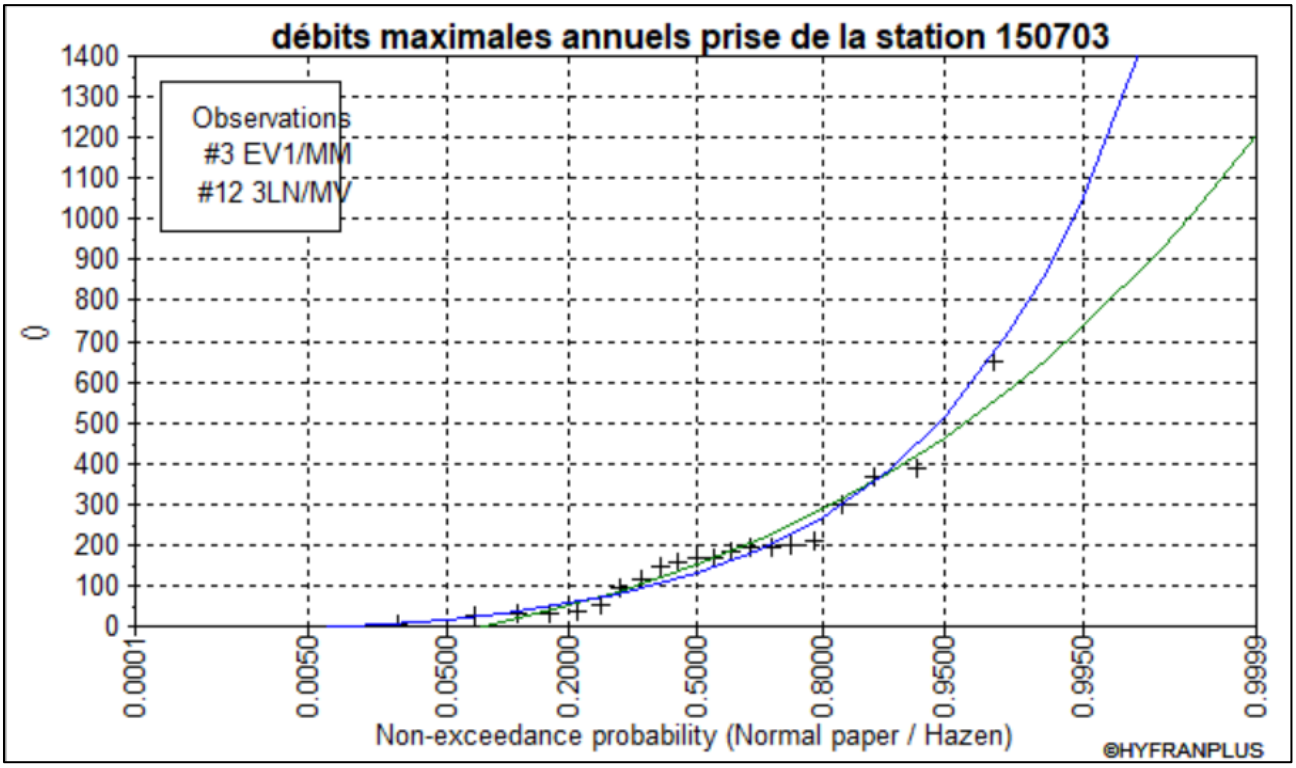


Figure II.16 : Graphe comparatif des résultats d'ajustement par la méthode de Gumbul et Galton

❖ **Le test d'adéquation du χ^2**

Le test d'adéquation (ou test d'ajustement) a pour objectif de vérifier si les données observées sont compatibles avec une loi de probabilité théorique donnée. Autrement dit, il permet de tester l'hypothèse selon laquelle les observations proviennent d'une distribution spécifique.

Parmi les tests les plus couramment utilisés, le test du Khi-deux (χ^2) est le plus répandu. Il consiste à comparer les fréquences observées à celles attendues selon la loi théorique considérée.

Pour déterminer si l'ajustement est acceptable, on compare la statistique calculée du χ^2 avec la valeur critique (χ^2 théorique) issue des tables statistiques, à un niveau de risque de 5 %, soit un seuil de confiance de 95 %.(2)

- Si la valeur calculée est inférieure à la valeur tabulée : l'ajustement est jugé acceptable.
- Si elle est supérieure : l'hypothèse d'ajustement est rejetée.

Tableau II.20 *:* Résultats du test de Khi carré de la station Hydrométrique 150703

Loi de distribution	Degré de liberté γ	Nombre de classe	Khi carré théorique	Khi carré calculé
Gumbel	3	6	9.57	7.815
Log Normale	3	6	5.00	7.815

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

II.4.4 Détermination des débits maximums fréquentiels par la méthode du GRADEX :

II.4.4.1 Hypothèses de la méthode :

Le postulat de base de la méthode est l'existence d'une relation entre la distribution des débits et celle des pluies génératrices. Cette méthode repose sur trois hypothèses suivantes(4)

- **Hypothèse 1 :** La fonction de répartition des précipitations tombant sur le bassin est asymptotiquement, décrite par une loi de Gumbel ou par une loi exponentielle selon le type d'échantillonnage utilisé. Le Gradex correspond à la pente de la fonction de répartition sur un graphique représentant la pluie en fonction du logarithme de la période de retour.
- **Hypothèse 02 :** Le déficit d'écoulement, défini comme la différence entre le volume d'eau précipité et le volume d'eau écoulé à l'exutoire du bassin versant pendant un pas de temps équivalent, n'augmentent plus, en valeur moyenne, au-delà d'une certaine valeur de pluie. En d'autres termes, nous pouvons dire que, à partir d'un certain état de saturation du bassin versant, la distribution du déficit d'écoulement ne dépend plus de la valeur de pluie ou de débit. Cette hypothèse se traduit graphiquement par un parallélisme entre la fonction de répartition des précipitations et celle des écoulements au pas de temps équivalent point de départ de cette extrapolation, nommé point pivot, est fixé à une période de retour Tp comprise, le plus souvent, entre 10 et 50 ans selon le bassin versant considérer.

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

II.4.4.2 Les étapes de la méthode :

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

$$\boldsymbol{P\,(mm) = a \times \mu + b} \qquad (\mathbf{II.22})$$

- 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 :

$$\boldsymbol{R(mm) = \frac{Q\left(\frac{m3}{s}\right) * 3.6 * n(heures)}{S(Km2)}} \qquad (\mathbf{II.23})$$

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

$$\boldsymbol{Q\mu\% = \alpha\mu + b'} \qquad (\mathbf{II.23})$$

Avec :

- α : Le Gradex de la pluie ;
- μ : la variable réduite de Gumbel :

$$\boldsymbol{\mu = -\ln(-\ln(F))\ et\ F = \frac{1}{1-T}} \qquad (\mathbf{II.24})$$

Pour T=10ans :

$$\boldsymbol{b' = Q10ans\% - \alpha\mu} \qquad (\mathbf{II.25})$$

Tracer la droite de l'équation sur le même graphe que l'ajustement de Pjmax. Ensuite tirer les Q pour chaque période de retour (en mm). Puis Exprimer ces débits en (m3/s) par la formule :

$$\boldsymbol{Q(m3/s) = \frac{Q(mm) * S(Km2)}{3.6 * n(heures)}} \qquad (\mathbf{II.26})$$

Calculer les débits de pointes de période de retour par la formule suivante :

$$\boldsymbol{Qp\left(\frac{m3}{s}\right) = Q\left(\frac{m3}{s}\right) * P} \qquad (\mathbf{II.27})$$

Avec le coefficient de pointe égal au rapport :

$$P = \frac{Qmax}{Qmoy} \qquad (\text{II}.28)$$

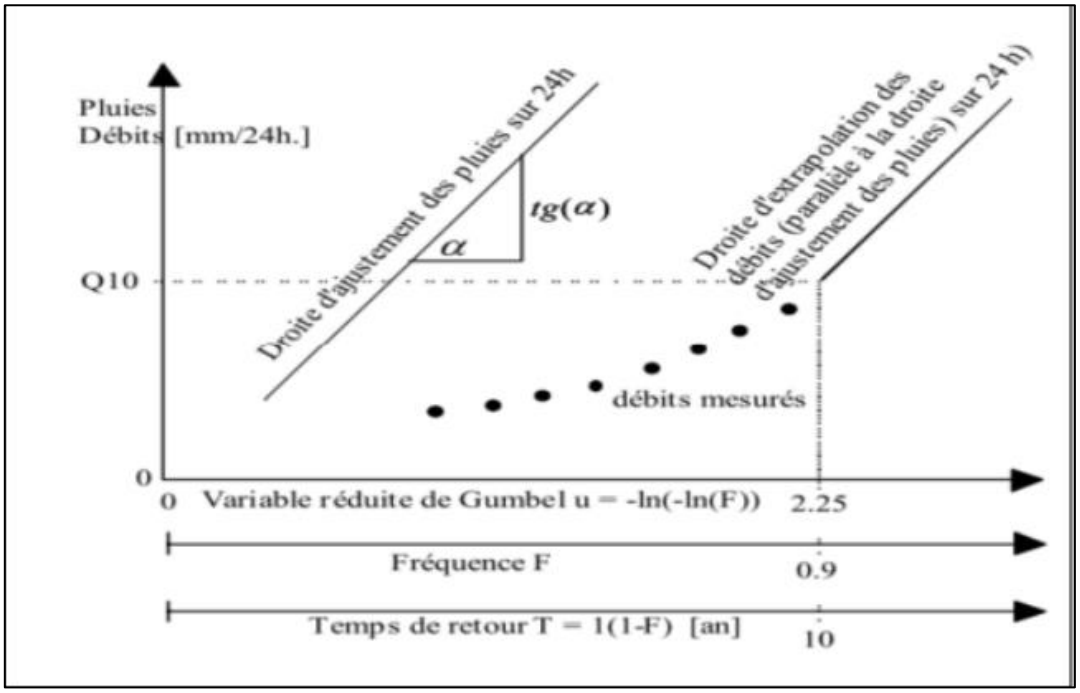


Figure II.17 : Graphe représente ajustement graphique pour les pluies et droit d'extrapolation pour les débits (Laborde, 2000).

II.4.5 Application de la méthode de GRADEX :

Nous appliquerons la méthode GRADEX à la station pluviométrique de El Asnam sh afin d'estimer les débits de crues extrêmes à partir des données de précipitations enregistrées. Cette méthode sera également utilisée sur les autres stations pluviométriques, dans le but d'estimer les débits maximaux et de permettre une comparaison entre les différentes stations.

Tableau II.21 : série de station pluviométrique de El Asnam

Années	P_{jmax} (mm)	Années	P_{jmax} (mm)
1994	**34.2**	**2012**	**32.02**
1995	**79.29**	**2013**	**53.17**
1996	**36.49**	**2014**	**58.32**
1997	**26.91**	**2015**	**36.06**
1998	**39.24**	**2016**	**44.56**
1999	**47.16**	**2017**	**38.42**
2000	**20.25**	**2018**	**45.16**
2001	**46.27**	**2019**	**78.30**
2002	**48.38**	**2020**	**44.19**

2003	**38.89**	**2021**	**73.06**
2004	**65.42**	**2022**	**27.64**
2005	**46.00**	**2023**	**28.92**
2006	**43.41**	**2024**	**32.73**
2007	**77.66**		
2008	**41.66**		
2009	**38.05**		
2010	**23.17**		
2011	**35.95**		

- Nombres d'heures : n=24h.
- Ajustement par la loi de Gumbel des pluies maximales journalières de la station pluviométrique 150204

Tableau II.22 : résultats du logiciel HYEFRAN

Période de retour	Probabilité de fréquence (q)	P_{max} (mm)	Ecart type	Intervalle de confiance
10000.0	0.9999	152	21.9	109 - 195
2000.0	0.9995	132	18.2	96.3 - 168
1000.0	0.9990	123	16.6	90.8 - 156
200.0	0.9950	103	12.8	78.1 - 128
100.0	0.9900	94.6	11.2	72.5 - 117
50.0	0.9800	85.9	9.65	67.0 - 105
20.0	0.9500	74.3	7.56	59.5 - 89.1
10.0	0.9000	65.4	5.98	53.6 - 77.1
5.0	0.8000	56.0	4.43	47.3 - 64.7

- D'après le logiciel l'HYFRAN l'équation de la droite de Gumbel est :

$$\mathbf{P(mm) = 12.4386*\mu + 37.367}$$

Le Gradex 'a' : a= 12.4386

b= 37.367

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

$$\mathbf{Q / A = Q' / A'}$$

Tableau II.23 :la surface et débit décennale des sous bassins versant

	Surface A	Q_{10ANS}
BV bousalem	**1251**	**465**
SBV SAHEL	**2129.48**	**791.53**
SBV OUKOUR	**74.49**	**27.68**

- Conversion du débit décennal (m3/s) en lame d'eau (mm)

$$R10\ ans(mm) = \frac{Q\left(\frac{m3}{s}\right) * 3.6 * n(heures)}{S(Km2)} \qquad (II.29)$$

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

$$Q_{\mu\%} = \alpha\mu + b'$$

$$b' = Q10ans\% - \alpha\mu$$

$$\mu = -\ln(-\ln(F))$$

$$F = 1 / 1-T$$

Tableau II.24 : résulats d'application de la méthode gradex

	R_{10ANS} (mm)	b'	$Q_{u\%} = \alpha\mu + b'$
SBV d'oued sahel	**32.11**	**4.14**	**=12.43μ + 4.14**
SBV d'oued ouakour	**32.11**	**4.14**	**=12.43μ + 4.14**

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

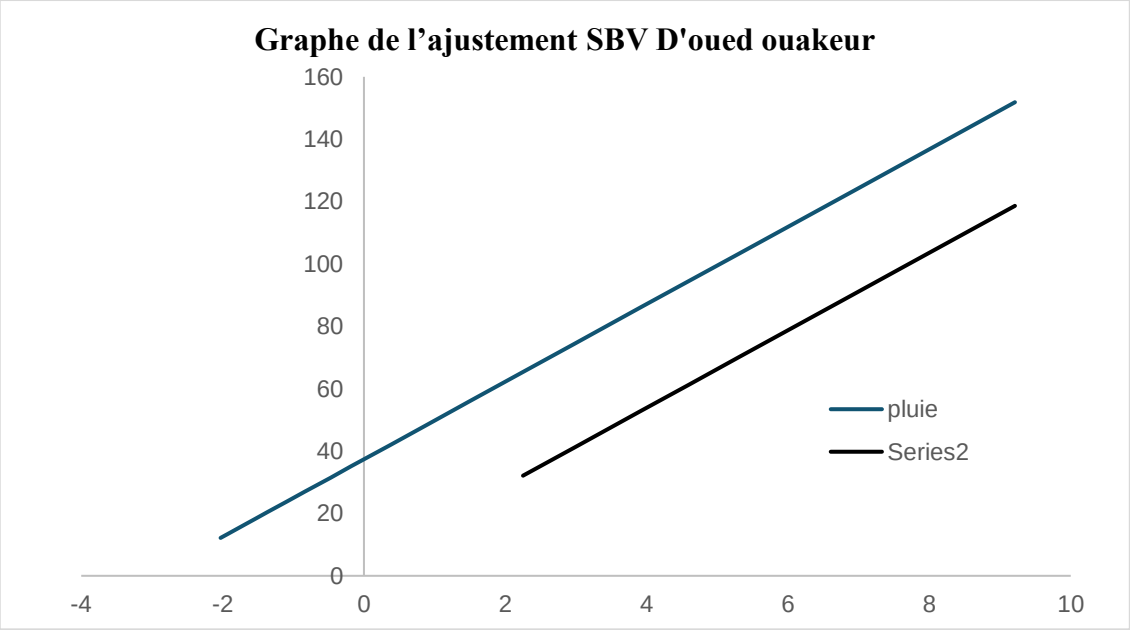


Figure II.18 : Graphe de l'ajustement des pluies et la droite d'extrapolation des débits du SBV d'oued sahel

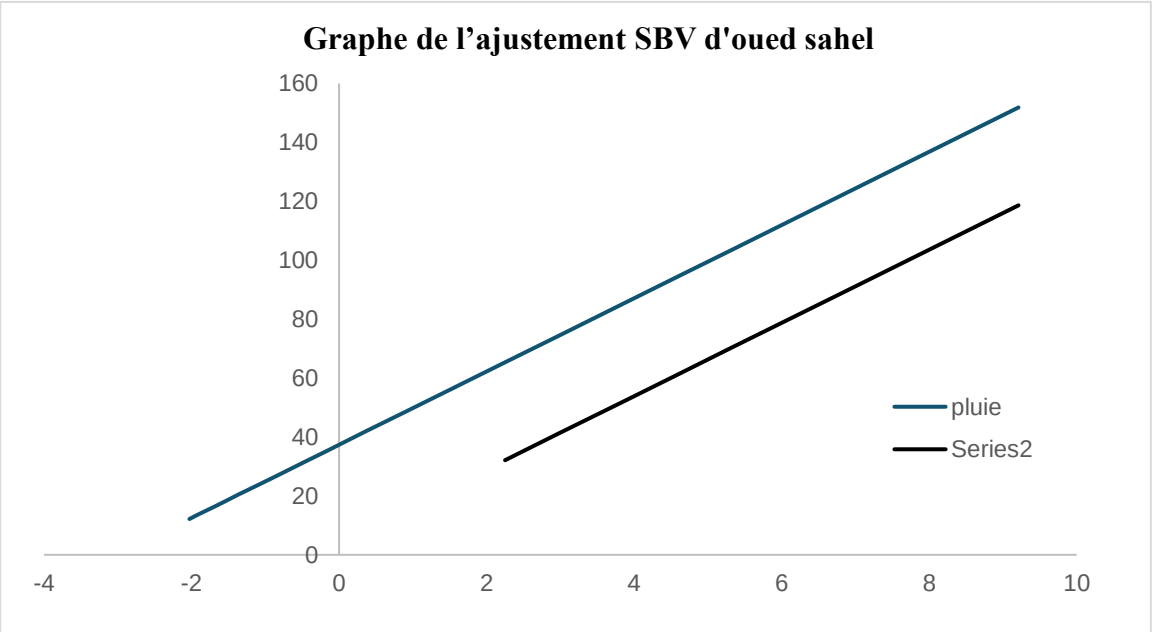


Figure II.19 : Graphe de l'ajustement des pluies et la droite d'extrapolation des débits du SBV d'oued ouakeur

- Remarque : le coefficient de pointe Cp=1, car on a utilisé les débits maximums pour calculer le débit décennal.
- Les résultats de l'ajustement pour les déférentes périodes de retours sont résumés dans le tableau 33 suivant :

Tableau 25: Résultats de l'ajustement pour déférentes périodes de retours pour le SBV d'oued sahel.

Temps de retour (ans)	Fréquence empirique selon Hazen	Variable réduit de Gembul	Précipitations estimées (mm/24h)	Débits moyen extrapolés (mm/24h)	Débits moyen extrapolés (m^3/s)	Débits de pointe extrapolés (m^3/s)
10	0.900	2.25	65.4	32.12	27.68	27.68
20	0.950	2.97	74.3	41.06	35.39	35.39
50	0.980	3.90	85.9	52.64	45.38	45.38
100	0.990	4.60	94.6	61.32	52.86	52.86
1000	0.999	6.91	123	90.00	77.59	77.59

Tableau II.26 : Résultats de l'ajustement pour déférentes périodes de retours pour le SBV d'oued ouakour.

Temps de retour (ans)	Fréquence empirique selon Hazen	Variable réduit de Gembul	Précipitations estimées (mm/24h)	Débits moyen extrapolés (mm/24h)	Débits moyen extrapolés (m3/s)	Débits de pointe extrapolés (m3/s)
10	0.900	2.25	65.4	32.12	791.45	791.45
20	0.950	2.97	74.3	41.06	1011.98	1011.98
50	0.980	3.90	85.9	52.64	1297.43	1297.43
100	0.990	4.60	94.6	61.32	1511.33	1511.33
1000	0.999	6.91	123	90.00	2218.13	2218.13

On applique la même méthode pour les stations de : (Tikjda 15.01.12) la station de (Béni Hammad 15.03.06) et dont les résultats sont dans le tableau (II.35) suivant :

Tableau II.27 *:* Résultats de l'ajustement des quatre stations par la méthode de GRADEX.

Période de Retour	Station hydrométrique Boubirek (150703)	Gradex avec El Asnam		Gradex avec (Béni Hammad 15.03.06)		Gradex avec (Tikjda 15.01.12)	
		SBV1	SBV2	SBV1	SBV2	SBV1	SBV2
10.00	462.00	791.45	27.68	791.65	27.69	791.45	27.69
20.00	573.00	1011.98	35.39	1154.46	40.38	1362.73	47.67
50.00	656.00	1297.43	45.38	1624.08	56.81	2102.18	73.54
100.00	739.00	1511.33	52.86	1976.01	69.12	2656.30	92.92
1000.00	930.00	2218.13	77.59	3138.84	109.79	4487.28	156.97

On observe que le débit centennal fourni par la station hydrométrique est inférieur à ceux obtenus par la méthode de Gradex appliquée aux stations pluviométriques. Par conséquent, le débit de projet retenu est de 2656.29 et 92.91m³/s.

II.4.6 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. (2)

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 :

- La montée de la crue

$$Qmontée = Q\max(\frac{t}{t_m})^2 \quad (II.30)$$

Avec :

- Tm = Tc (pour les petits bassins versants), avec Tc qui est le temps de concentration du bassin versant (heures) ;

- La décrue

$$Qdéc. = Q\max(\frac{t_d - t}{t_d})^3 \quad (II.31)$$

Avec :

- Qt : Débit à l'instant t (m3/s) ;
- Qmax : Débit maximal de la crues (m3/s) ;
- Tm : Temps de montée de la crue Tm=Tc= 7.60h et1.64h ;
- Tb : Temps de base ;
- m, n : puissance des paraboles (m=3, n=2) Pour les crues d'averses, c'est à dire les crues engendrées par la pluie, cette méthode prend : td = δtm
- δ : coefficient de forme de l'hydrogramme de crue.

Tableau II.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 δ= 3

$$T_d = 3 \times 7.60 , 1.64 = 22.8 \text{ et } 4.92 \quad h$$

Les valeurs sont montrées dans le tableau suivant :

Tableau II.29 : temps de concentration

	Temps de montée (h)	Temps de décrue (h)	Temps de base (h)
SBV D'oued sahel	7.6	22.8	30.4
SBV d'oued ouakeur	1.64	4.92	6.6

Les tableaux suivants présente l'hydrogramme de crue pour période de retour 100 ans les différentes stations :

Tableau II.30 *:* Résultats de calcul pour l'hydrogramme de crue SBV d'oued sahel

Temps (h)	Période de retour « 100 ans »	Période de retour « 100 ans »	Période de retour « 100 ans »	Période de retour « 100 ans »
	Station hygrométrique BOUBRIK	ASNAM	TIKAJDA	BENIHAMAD
1.00	12.79	26.16	45.99	34.21
2.00	51.17	104.66	183.95	136.84
3.00	115.14	235.49	413.90	307.90
4.00	204.70	418.65	735.81	547.37
5.00	319.85	654.14	1149.71	855.27
6.00	460.59	941.96	1655.58	1231.58
7.00	626.92	1282.11	2253.43	1676.32
8.00	739.00	1511.33	2656.29	1976.01
9.00	611.05	1249.67	2196.40	1633.90
10.00	529.33	1082.54	1902.66	1415.38
11.00	455.24	931.02	1636.35	1217.27
12.00	388.41	794.34	1396.13	1038.57
13.00	328.46	671.74	1180.64	878.28
14.00	275.02	562.45	988.56	735.39
15.00	227.72	465.71	818.53	608.90
16.00	186.17	380.75	669.20	497.82
17.00	150.02	306.81	539.24	401.14
18.00	118.87	243.12	427.30	317.87
19.00	92.38	188.92	332.04	247.00
20.00	70.13	143.43	252.10	187.54
21.00	51.78	105.91	186.15	138.47
22.00	36.95	75.58	132.83	98.81
23.00	25.26	51.67	90.82	67.56
24.00	16.34	33.43	58.75	43.70
25.00	9.81	20.08	35.29	26.25
26.00	5.31	10.86	19.09	14.20
27.00	2.45	5.01	8.81	6.55
28.00	0.86	1.76	3.10	2.30
29.00	0.17	0.35	0.61	0.46
30.40	0.00	0.00	0.00	0.00

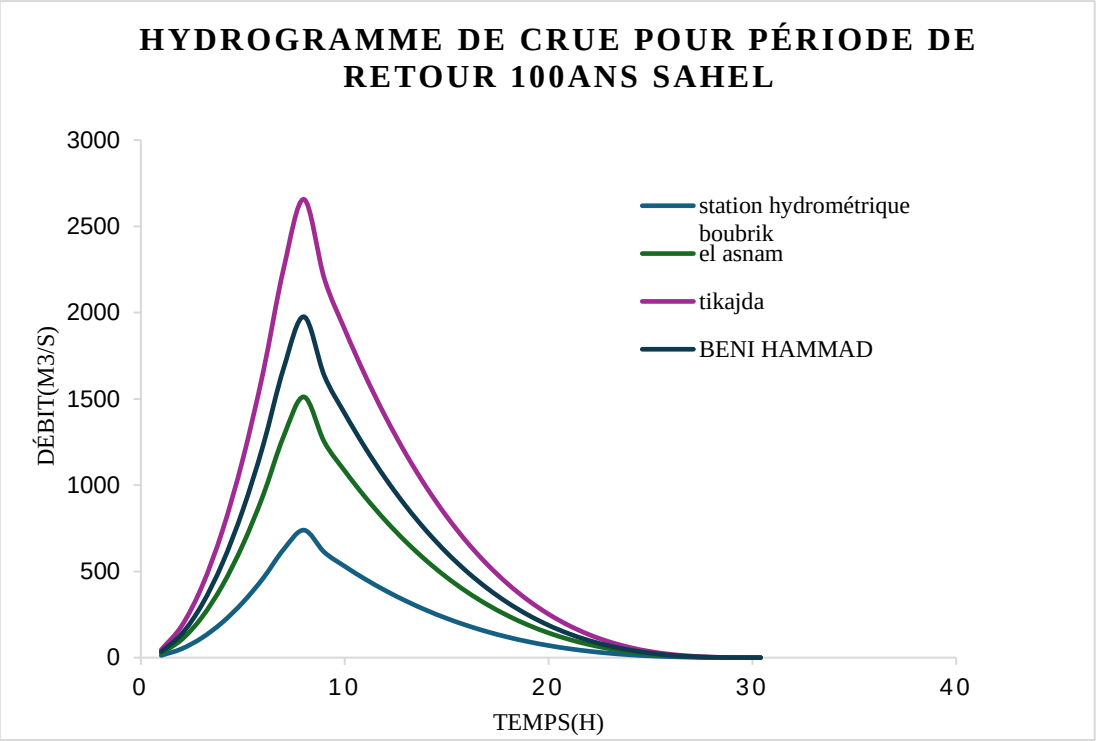


Figure 20:hydrogramme de crue pour période de retour 100 ans SBV d'oued sahel

Tableau II.31: Résultats de calcul pour l'hydrogramme de crue SBV d'oued ouakeur

Temps (h)	Période de retour « 100 ans »	Période de retour « 100 ans »	Période de retour « 100 ans »	Période de retour « 100 ans »
	Station hygrométrique BOUBRIK	ASNAM	BENI HAMMAD	TIKAJDA
1.00	288.67	20.65	27.00	36.30
2.00	603.98	54.16	70.82	95.19
3.00	289.51	20.71	27.08	36.40
4.00	109.06	7.80	10.20	13.71
5.00	25.42	1.82	2.38	3.20
6.00	1.34	0.10	0.13	0.17
6.60	0.00	0.00	0.00	0.00

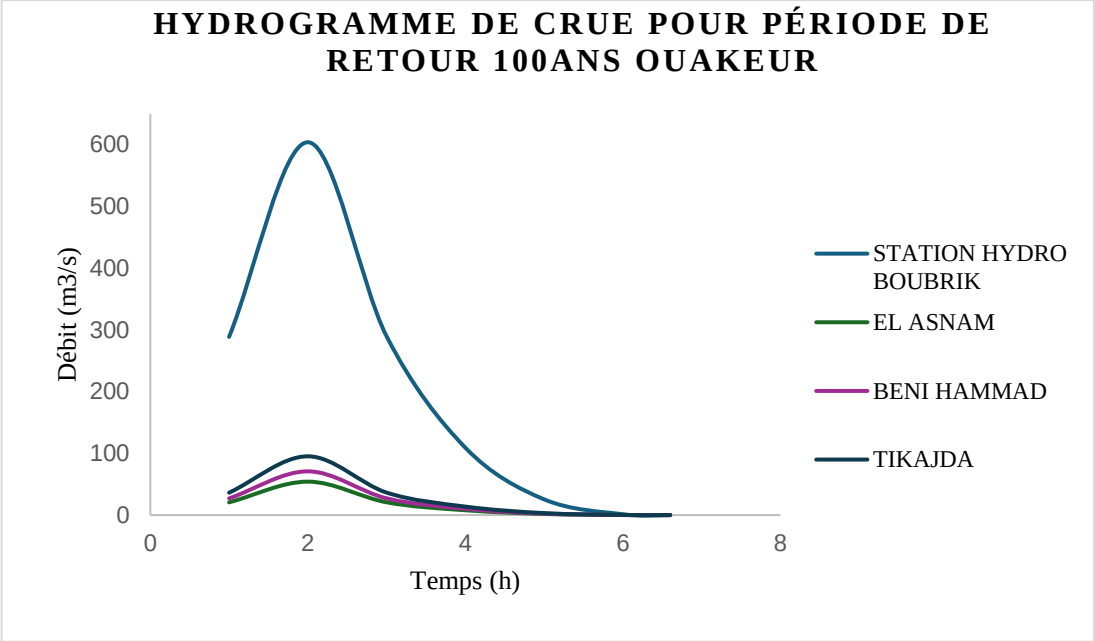


Figure 21 : hydrogramme de crue pour période de retour 100 ans SBV d'oued ouakeur

II.4.7 Choix de la crue du projet :

La crue de projet correspond à la crue maximale que l'ouvrage doit pouvoir évacuer pour une probabilité donnée. Son choix dépend principalement de plusieurs facteurs : l'importance de l'ouvrage à réaliser, les impacts potentiels en aval, ainsi que les considérations technico-économiques liées à l'aménagement et à son environnement.

- Puisqu'il s'agit d'un aménagement contre les inondations, on opte donc pour une période de retour de 100 ans.
- On constate que la station de TIKAJDA donne un débit centennal supérieure à ceux de la méthode du Gradex appliqué sur les autres stations donc le débit de projet est de 2656.29 m^3/s pour SBV d'oued Sahel et 92.91m^3/s pour SBV d'oued Ouakeur.

II.5 Conclusion

L'étude hydrologique menée sur les sous-bassins versants de l'Oued Sahel et de l'Oued Ouakeur a permis de caractériser avec précision leurs paramètres morphométriques, hydrogéologiques et climatiques. L'analyse du relief, des pentes, ainsi que du réseau hydrographique a mis en évidence la forte influence du relief et de la densité de drainage sur la dynamique des écoulements.

Le calcul du temps de concentration et des vitesses de ruissellement a montré des différences significatives entre les deux sous-bassins, confirmant l'importance de la morphologie sur la réponse hydrologique. L'étude fréquentielle des crues, complétée par l'application de la méthode du Gradex et l'ajustement statistique des lois de probabilité (notamment la loi Log-Normale), a permis d'estimer les débits de projet pour différentes périodes de retour.

Les résultats obtenus indiquent que, pour une période de retour de 100 ans, les débits de crue atteignent environ 2656,29 m^3/s pour le sous-bassin de l'Oued Sahel et 92,91 m^3/s pour celui de l'Oued Ouakeur. Ces valeurs constituent une base essentielle pour le dimensionnement des ouvrages hydrotechniques et la mise en place de stratégies efficaces de gestion et de protection contre les inondations.

Chapitre lll :

Simulation hydraulique du cours d'eau non aménagé

Chapitre III : simulation hydraulique du cours d'eau non aménagé

III.1 Introduction :

La protection contre les crues pose avant tout la question des fortes hauteurs d'eau, parfois aussi des vitesses d'écoulement élevées. Lorsqu'on dimensionne des ouvrages de protection, on se concentre généralement sur la hauteur d'eau ; les phénomènes d'érosion, même s'ils ne peuvent être négligés, ne constituent pas la finalité première de ces ouvrages.

En période de crue, l'onde déferlante a besoin d'espace pour se déployer, ce qui provoque une élévation du niveau d'eau et l'inondation des terrains riverains.

Un modèle hydraulique a été développé pour le cours d'eau Sahel et son affluent Ouakour afin de vérifier la cohérence des débits de crue issus du modèle hydrologique avec les observations de terrain (hauteurs d'eau, extension des zones inondées, etc.), de simuler les crues de projet pour analyser les conditions d'écoulement (niveaux, vitesses, …) sur l'ensemble du réseau hydrographique, de cartographier les zones inondables et de caractériser l'aléa inondation sur le secteur étudié, ainsi que d'orienter le choix des aménagements et d'évaluer leurs impacts hydrauliques .

III.2 Notions générales et définitions :

L'hydraulique à surface libre se différencie de l'hydraulique en charge par la présence d'une surface exposée à l'air, constituant une interface libre. Dans ce type d'écoulement, le gradient de pression ne représente plus la force motrice principale, celle-ci étant assurée principalement par l'action de la gravité. L'hydraulique fluviale s'intéresse plus particulièrement aux écoulements qui se produisent dans les cours d'eau (oueds, rivières, fleuves, etc.), dans les systèmes de drainage tels que les réseaux d'assainissement pluvial, ainsi que dans divers aménagements hydrauliques comme les barrages-réservoirs, les centrales hydroélectriques ou encore les infrastructures portuaires. Ces écoulements se caractérisent par une hauteur relativement faible par rapport à leur longueur de propagation, ce qui conduit à les considérer comme des écoulements filaires ou unidimensionnels (x, t).

Tableau III.32 : Revue de certaines notions d'hydraulique(5)

Notion	Définition
Bief	**Tronçon homogène d'un cours d'eau ou d'un canal, caractérisé par une pente et des sections relativement constantes.**
Types de cours d'eau	**Classification des cours d'eau selon leur pente (I), généralement comprise entre 3 et 6 ‰.**
Section d'écoulement (S)	**Partie de la section transversale limitée par les parois du canal et la surface libre.**
Périmètre mouillé (P)	**Longueur de la ligne de contact entre l'eau et le lit (fond + berges), soit le périmètre total moins la largeur au miroir.**
Largeur au miroir (B)	**Largeur de l'écoulement au niveau de la surface libre. La pression y est égale à celle de l'atmosphère.**
Hauteur d'écoulement (h)	**Hauteur moyenne d'eau définie par h = S / B.**
Hauteur normale (hn)	**Hauteur d'un écoulement uniforme et permanent dans un bief, fonction de Q, K et I.**
Rayon hydraulique (R)	**Grandeur caractéristique définie par R = S / P.**
Débit (Q)	**Volume d'eau écoulé par unité de temps à travers une section.**
Vitesse moyenne (V)	**Vitesse obtenue par V = Q / S.**
Coefficient de rugosité	**Paramètre traduisant l'irrégularité des parois, exprimé par le coefficient de Chézy (C) ou de Manning-Strickler (K).**
Lit mineur	**Portion du lit occupée habituellement par l'écoulement, par opposition au lit majeur (plaine inondable).**
Lit majeur	**Espace occupé par le cours d'eau lors des crues, incluant les zones inondées. Le lit d'étiage correspond au chenal des basses eaux.**
Berges ou rives	**Talus naturels ou artificiels séparant le lit mineur du lit majeur.**
Étiage	**Période de basses eaux correspondant au débit minimal. On distingue : débit de plein bord (sortie du lit mineur) et débit de pointe (crue maximale).**
Tirant d'eau	**Profondeur maximale de l'eau dans une section d'écoulement.**

III.2.1 Type d'écoulement

Variables dans le temps et dans l'espace. L'écoulement d'un fluide à surface libre peut être classé en fonction de son évolution dans le temps et dans l'espace :

III.2.1.1 Variable dans le temps

Écoulement stationnaire (permanent) : Un écoulement est dit permanent lorsque les vitesses (moyenne et ponctuelle), la profondeur d'eau ainsi que les autres paramètres caractéristiques demeurent constantes dans le temps en tout point du canal. Dans ce cas, le débit reste identique d'une section à l'autre, en l'absence d'apports latéraux.(5)

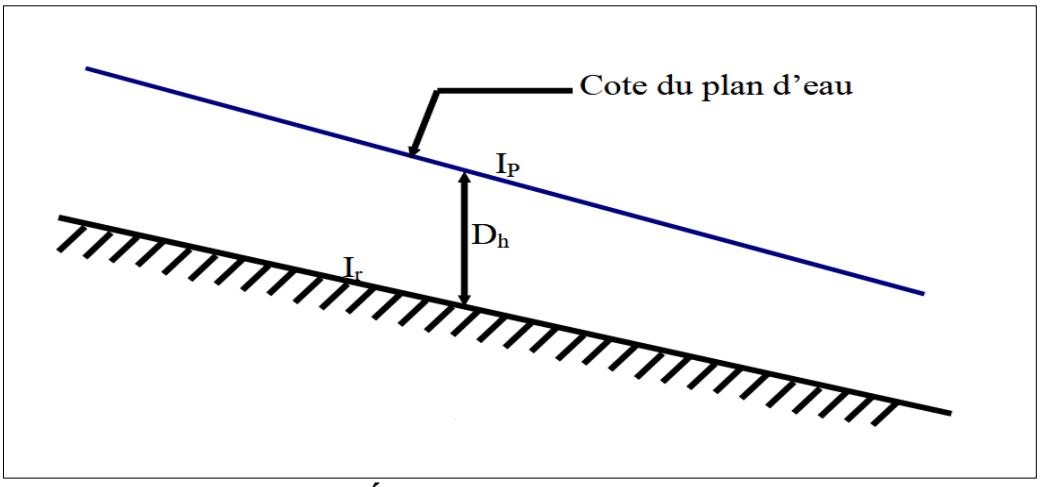


Figure III.22 : Écoulement stationnaire (permanent)

Écoulement non stationnaire (transitoire) : Un écoulement est qualifié de non permanent lorsque les vitesses, la profondeur d'eau ou le débit varient avec le temps en un point donné du canal. Ce type d'écoulement se produit par exemple lors d'une crue ou d'une vidange.(5)

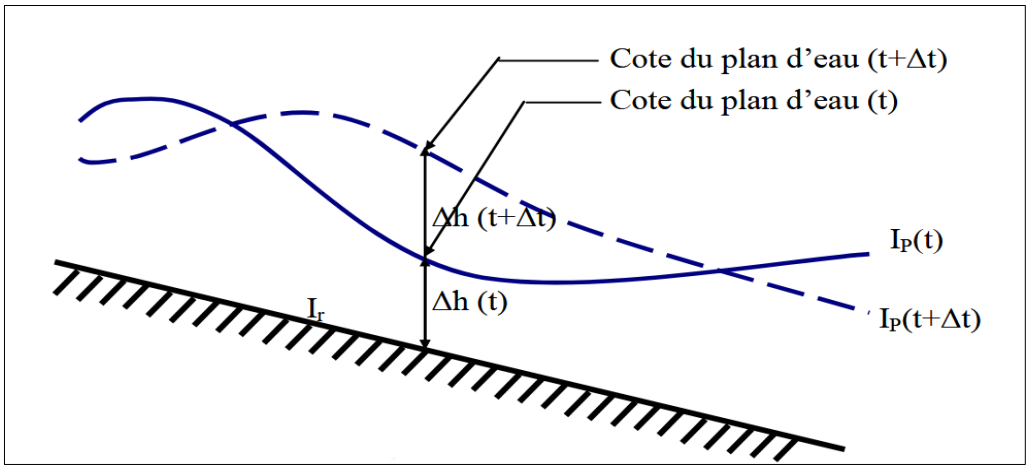


Figure III.23 : Écoulement non stationnaire (transitoire)

III.2.1.2 Variable dans l'espace

Un écoulement uniforme se produit lorsque les caractéristiques (profondeur, vitesse, tirant d'eau, etc.) restent identiques d'une section à l'autre le long du bief.(5)

Un écoulement non uniforme traduit une variation spatiale de ces paramètres. On distingue alors :

❖ **Écoulement progressivement varié (E.P.V.) :**

- Les paramètres de l'écoulement (profondeur, vitesse…) varient de façon graduelle le long du cours d'eau.
- C'est le cas le plus fréquent dans les rivières naturelles ou les canaux à faible pente.
- Exemple : remontée progressive de la ligne d'eau en amont d'un barrage ou d'un seuil.

❖ **Écoulement rapidement varié (E.R.V.) :**

- Les caractéristiques de l'écoulement changent brusquement sur une courte distance.
- Cela se produit souvent lorsqu'il y a un obstacle ou une forte variation de pente.
- Exemple : ressaut hydraulique, écoulement à l'entrée ou sortie d'un ouvrage hydraulique

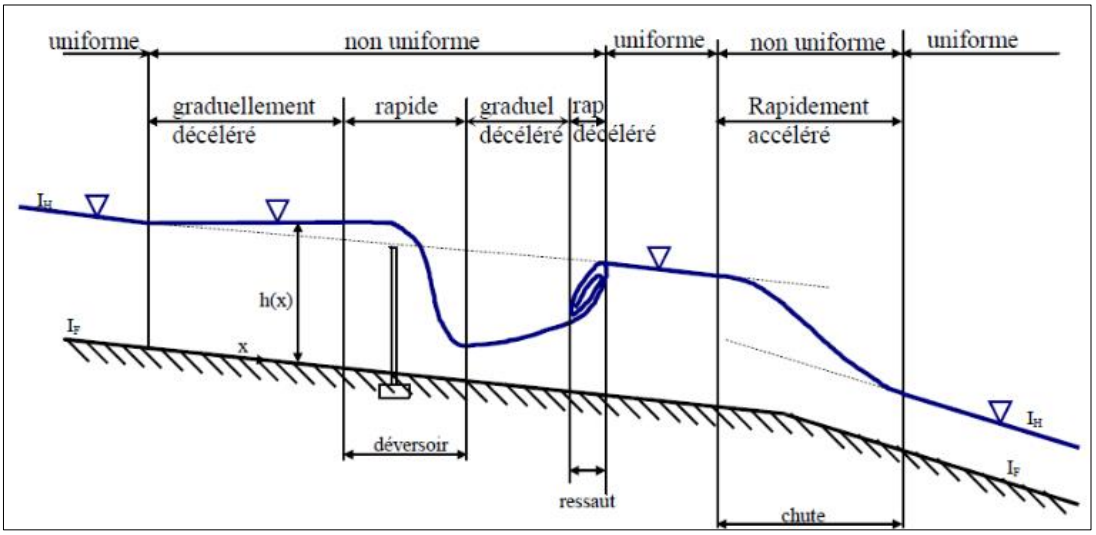


Figure III.24 : Écoulement rapidement varié

III.2.2 Régime d'écoulement

Un écoulement à surface libre se définit comme un écoulement de liquide présentant une interface entre l'air et l'eau. La pression au niveau de cette surface est généralement égale à la pression atmosphérique. Ce type d'écoulement est essentiellement régi par la force de gravité, liée à la présence d'une pente dans le canal.(5)

Pour analyser ce type d'écoulement, on introduit le nombre de Reynolds (Re), qui représente le rapport entre les forces d'inertie et les forces de frottement. Il est défini comme suit :

$$\boldsymbol{Re = \frac{V \cdot D}{\mu}} \qquad (\textbf{III.1})$$

Où :

- **V :** vitesse moyenne de l'écoulement ;
- **D :** diamètre hydraulique, défini par $D = 4R$;
- **R :** rayon hydraulique, donné par le rapport de la section mouillée sur le périmètre mouillé $\boldsymbol{R = \frac{S}{P}}$;
- **μ :** viscosité cinématique du fluide.

Dans le cas particulier d'un canal de largeur infinie, le rayon hydraulique est équivalent au tirant d'eau :

$$\boldsymbol{R = h} \qquad (\textbf{III.2})$$

Avec h représentant la profondeur d'eau.

Le nombre de Froude, appliqué aux écoulements à surface libre, s'exprime par :

$$\boldsymbol{Fr = \frac{V}{\sqrt{(g \cdot H)}}} \qquad (\textbf{III.3})$$

Avec :

- **V :** vitesse moyenne de l'écoulement,
- **H :** profondeur hydraulique,
- **g :** accélération de la pesanteur.

Il permet de classer les régimes d'écoulement en trois catégories :

- Écoulement fluvial : Fr<1
- Écoulement critique : Fr=1
- Écoulement torrentiel : Fr>1

De son côté, le nombre de Reynolds (Re') sert à différencier les types d'écoulement selon l'influence relative des forces visqueuses et inertielles :(5)

- Écoulement laminaire : Re'<580,
- Écoulement de transition : 580<Re'<2000,
- Écoulement turbulent : Re'>2320.

La combinaison des deux nombres (Froude et Reynolds) permet de distinguer quatre régimes d'écoulement :(5)

- Fluvial – Laminaire : Fr<1et Re'<580,
- Fluvial – Turbulent : Fr<1et Re'>2320,
- Torrentiel – Laminaire : Fr>1et Re'<580,
- Torrentiel – Turbulent : Fr>1et Re'>2320

III.2.3 Canaux à ciel ouvert

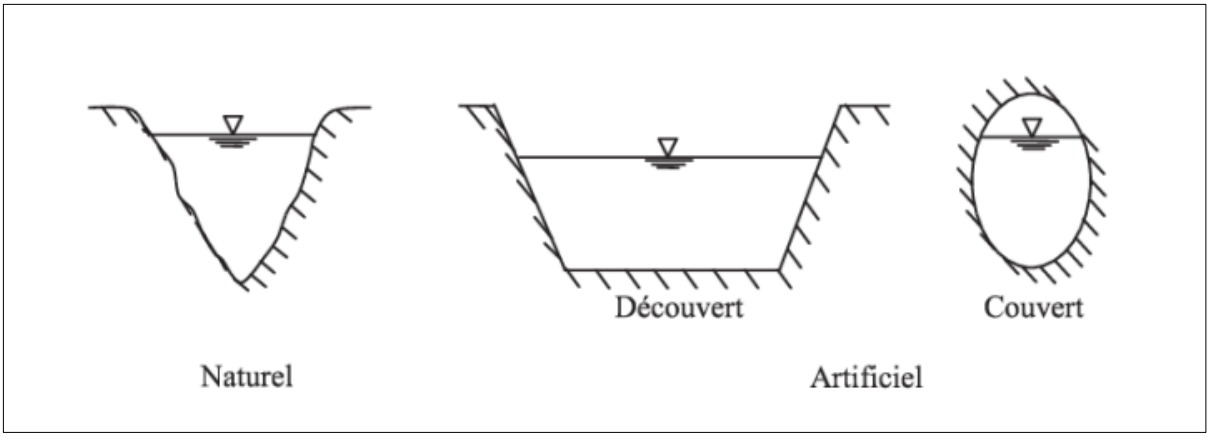
Un canal désigne un ouvrage hydraulique destiné à l'écoulement d'un liquide dont la surface libre reste en contact direct avec l'atmosphère et donc soumise à la pression atmosphérique.(5)

III.2.3.1 Type des canaux :

a. Canaux naturels : Les canaux naturels regroupent les cours d'eau existant naturellement à la surface ou en profondeur, tels que les ruisseaux, torrents, rivières, fleuves et estuaires. Leurs caractéristiques géométriques et hydrauliques sont en général irrégulières, en raison de la variabilité du relief, des dépôts et de la végétation.(5)

b. Canaux artificiels : Les canaux artificiels sont aménagés par l'homme et comprennent aussi bien les canaux découverts construits au niveau du sol (canaux de navigation, d'irrigation, de drainage, d'adduction ou d'évacuation) que les canaux couverts, dans lesquels l'écoulement ne remplit pas totalement la section (tunnels hydrauliques, aqueducs, drains, égouts). Leurs propriétés hydrauliques sont généralement régulières, ce qui rend l'application des théories hydrauliques plus précise et souvent satisfaisante.(5)

Figure III.25 : types des canaux



III.2.3.2 Propriétés des canaux

a. Propriétés géométriques d'un canal

- **Section transversale (A) :** Surface totale de la section perpendiculaire à l'écoulement.
- **Section mouillée (S_m) :** Surface de la section effectivement occupée par l'eau.
- **Périmètre mouillé (P_m) :** Longueur de la ligne de contact entre l'eau et les parois du canal.
- **Rayon hydraulique (R_h) :** Rapport entre la section mouillée et le périmètre mouillé. définie par la formule :

$$R_h = \frac{S_m}{P_m} \qquad (\mathbf{III.4})$$

- **Largeur en surface (b) :** Distance séparant les deux berges du canal au niveau de la surface libre.
- **Profondeur hydraulique (D_h) :** Rapport de la section mouillée à la largeur en surface, définie par la formule :

$$D_h = \frac{S_m}{b} \qquad (\mathbf{III.5})$$

- **Profondeur d'eau (H) :** Tirant d'eau mesuré verticalement entre la surface libre et le fond du canal.
- **Pente de la surface libre (Sw) :** Variation de la cote de la surface libre par unité de longueur.
- **Pente du fond (S_0) :** Variation de la cote du fond par unité de longueur.

b. Propriétés Hydrauliques

- **Poids volumique de l'eau (γw)**

$$\gamma_w = \rho_w \times g \quad (III.6)$$

Avec:

- ρ_w = 1000 kg/m³,
- g = 9.81 m/s².

Donc : $\gamma_w \approx 9.81$ kN/m³

- **Débit (Q) :** Volume d'eau traversant une section par unité de temps.

$$Q = V \times S_m \quad (III.7)$$

- **Vitesse en un point (V) :** Vitesse instantanée d'une particule d'eau au point considéré.
- **Vitesse moyenne (Vmoy) :** Rapport entre le débit et la section mouillée.

$$V_{moy} = \frac{V_{moy}}{s_m} \quad (III.8)$$

- **Charge hydraulique en un point (Hp) :** Énergie par unité de poids en un point de l'écoulement.

$$H_p = Z_p + \frac{p}{\gamma_w} + \frac{V^2}{2g} \quad (III.9)$$

Avec :

- **Zp :** cote du point [m]
- **p :** pression [Pa]
- **γw :** poids volumique [N/m³]
- **V :** vitesse [m/s]

- **Poussée sur une paroi :** La pression exercée est identique à celle au repos hydrostatique.

$$F = P \times S \quad (III.10)$$

- **Frottement sur une paroi :** Force tangentielle exercée par l'écoulement sur les parois.

$$d_F = \tau_0 \times d_S \quad (III.11)$$

Avec

- τ_0 **:** contrainte tangentielle (N/m²).

III.3 Modélisation de l'écoulement :

La modélisation de l'écoulement à surface libre constitue un outil fondamental en hydraulique et en ingénierie fluviale. Elle vise à représenter de manière mathématique et

numérique le comportement d'un cours d'eau ou d'un canal, afin de mieux comprendre son fonctionnement et de prévoir son évolution dans différentes conditions

III.3.1 Choix du type de modèle hydraulique – HEC-RAS (v6.6)

- **Modélisation complète des écoulements :** permet de simuler les écoulements à surface libre en régime permanent et non permanent, y compris en cas de débordement du lit mineur vers la plaine d'inondation.
- **Gratuité et accessibilité :** logiciel libre et gratuit, développé par le Corps des ingénieurs de l'armée américaine, ce qui le rend accessible pour les projets à budget limité.
- **Intégration d'aménagements hydrauliques :** possibilité de modéliser divers ouvrages tels que digues, ponts, buses, vannes…, ce qui permet une analyse fine des impacts des infrastructures sur les écoulements.
- **Exploitation cartographique des résultats :** génère des cartes d'inondation précises, facilitant l'identification des zones à risque et soutenant la prise de décision en matière d'aménagement et de gestion du risque

III.3.1.1 Présentation du logiciel HEC-RAS :

HEC-RAS est un logiciel spécialisé dans la modélisation hydraulique à surface libre, développé par le Hydrologic Engineering Center du U.S. Army Corps of Engineers. Il constitue une version améliorée de l'ancien modèle HEC-2, désormais doté d'une interface graphique intuitive permettant la création, la modification et la visualisation des données d'entrée ainsi que l'analyse des résultats de simulation.(6)

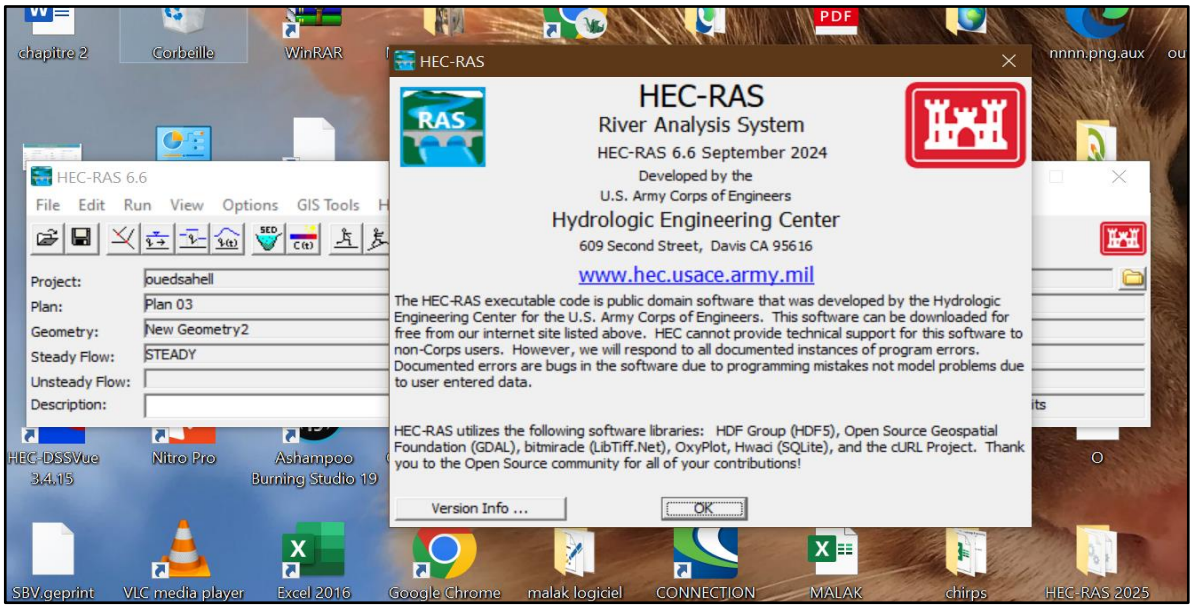
Couramment utilisé par les bureaux d'ingénierie et les organismes publics, HEC-RAS prend en charge de nombreux aspects de l'analyse hydraulique, notamment :

- Le ruissellement des précipitations ;
- L'hydraulique fluviale ;
- L'analyse des inondations et des dommages associés ;
- La modélisation des écoulements en régime permanent et non permanent ;
- Le transport de sédiments ;
- L'évaluation de la qualité de l'eau ;

- La conception d'ouvrages hydrauliques (ponts, digues, vannes, etc.).

Figure III.26 : l'interface de logiciel HECRAS

III.3.1.2 L'intérêt d'utiliser ce logiciel :



HEC-RAS a pour vocation de simuler les écoulements unidimensionnels dans des réseaux de canaux naturels ou artificiels, en calculant :

- Les profils de surface libre pour des conditions en régime permanent ;
- La propagation des crues à travers des hydrogrammes dans le cadre du régime non permanent.(6)

Il repose sur le modèle 1D de Saint-Venant, capable de modéliser la ligne d'eau en régime graduellement varié, en utilisant :

- L'équation de l'énergie unidimensionnelle (avec pertes évaluées par la formule de Manning-Strickler et des coefficients de contraction/expansion) ;
- L'équation de quantité de mouvement pour des situations rapidement variées telles que les ressauts hydrauliques, les confluences ou les zones proches des ponts.

III.3.1.3 Fonctionnement du logiciel :

Hec-ras permet une modélisation fine et précise des conditions d'écoulement à travers son centre de contrôle**,** qui constitue le cœur de l'application. Ce module assure l'organisation, la gestion et la combinaison des données nécessaires à une simulation hydraulique, notamment :

- La géométrie du cours d'eau ;
- Les débits et les conditions aux limites ;
- Les conditions initiales de calcul.
- Les résultats de simulation.

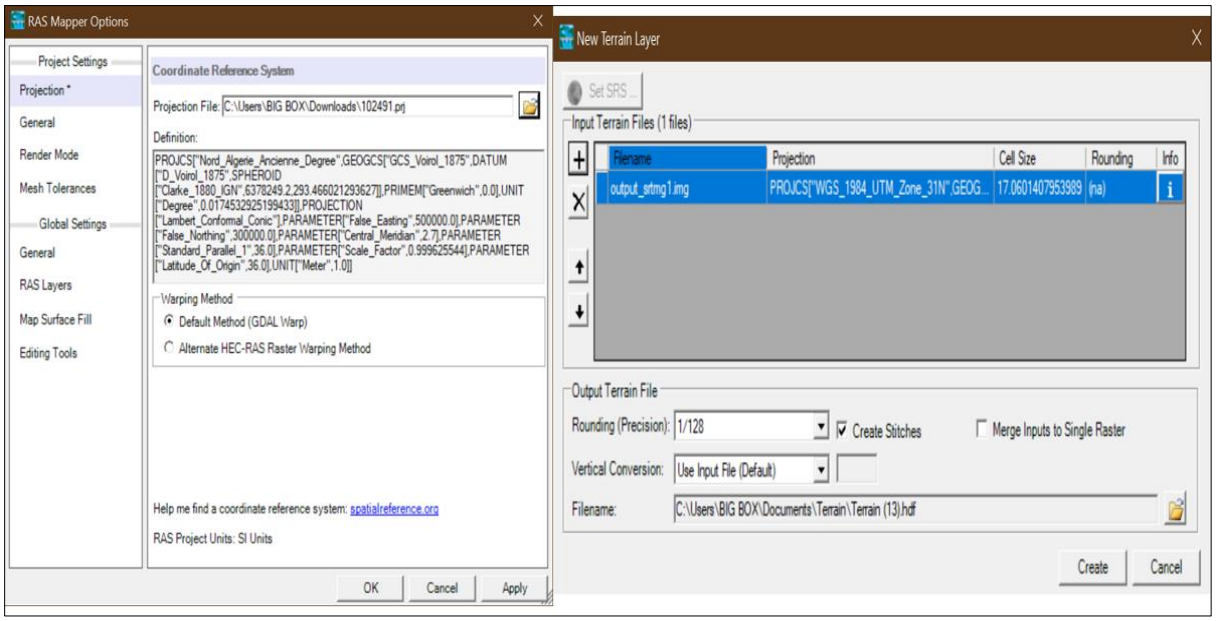
III.3.1.4 Les démarches à suivre en utilisant HEC-RAS sur un Oued :

Avant de commencer toute modélisation, il est nécessaire de créer un nouveau projet, ce qui implique de définir un nom, d'indiquer un titre descriptif et de spécifier l'emplacement du fichier sur le disque.

III.3.1.5 Modélisation de la rivière (données géométriques) :

La modélisation hydraulique d'un cours d'eau repose en premier lieu sur la définition précise de sa géométrie. Cela inclut la caractérisation des sections en travers (largeur, profondeur, pente, forme), ainsi que l'intégration des ouvrages existants situés le long de la rivière, tels que les ponts, déversoirs, buses ou autres structures hydrauliques. Ces éléments sont indispensables pour représenter fidèlement le comportement de l'écoulement. (6)

Figure III.27 : l'importation du fichier de projection et le TIF



On introduit le fichier (.TIF) dans le logiciel HEC-RAS accompagné par un fichier de projection ESRI (extension de fichier. PRJ), qui contient des informations sur un système de coordonnées particulier adéquat à notre zone d'étude, qu'on a téléchargé à partir du site-web 'Spatial Reference'. En effet, ce fichier est nécessaire pour accéder aux cartes de base disponibles dans RAS Mapper.(6)

III.3.1.6 Étapes réalisées dans RAS Mapper :

- Traçage de l'axe principal de l'oued ;
- Délimitation du lit mineur et du lit majeur ;
- Implantation des sections transversales perpendiculairement à l'axe d'écoulement.

III.3.1.7 Les données de l'écoulement et les conditions aux limites :

- Après la saisie des données géométriques pour chaque section, l'étape suivante consiste à définir les débits d'entrée et les conditions aux limites requises.
- Ces conditions sont essentielles pour permettre à HEC-RAS de calculer les profils de la surface libre le long du système fluvial.
    - En écoulement permanent, il est nécessaire d'indiquer :
    - Des conditions amont (débit, niveau d'eau, etc.) ;
    - Des conditions aval (cote de surface, tirant d'eau, etc.) ;
    - Ou les deux, selon le cas.
- Ces paramètres permettent d'initialiser correctement le modèle et de lancer les calculs hydrauliques sur l'ensemble du tronçon étudié.

III.3.1.8 Etape de Simulation

a. **Les Données géométriques : Les** sections transversales tirées à partir du RAS MAPPER sont représentées dans la figure III.7

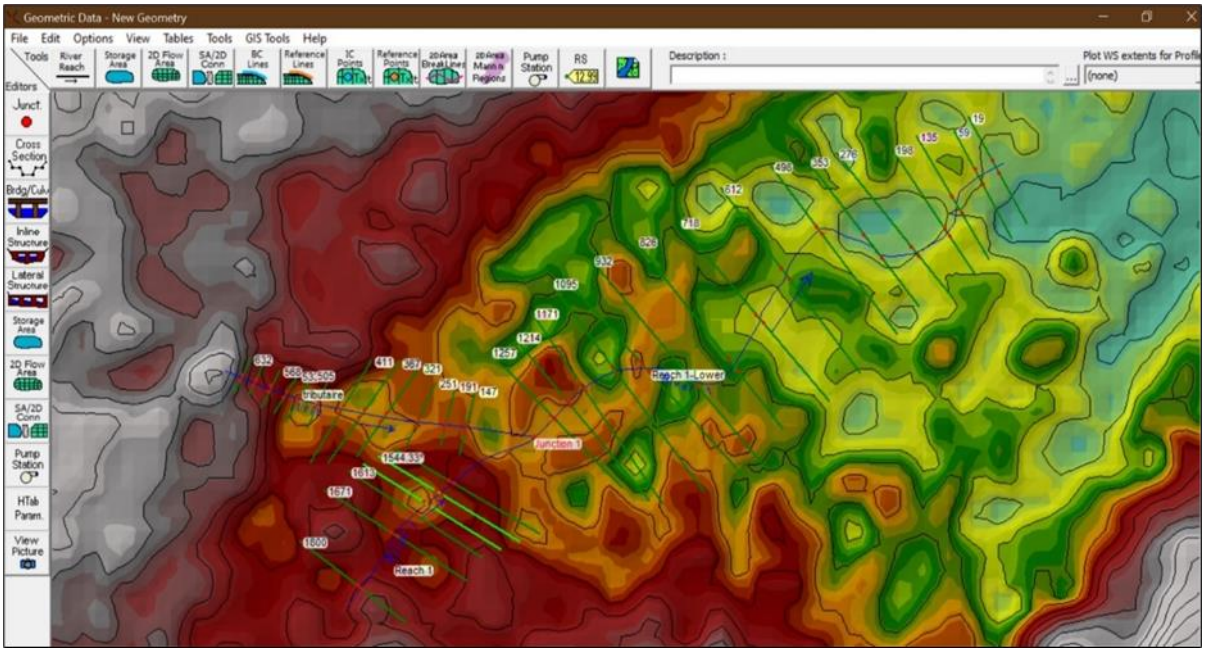


Figure III.28 : Définition du tracé de l'oued et des sections en travers.

b. Débit et conditions aux limites :

À cette étape, l'intégration du débit de crue ainsi que la définition des conditions aux limites aux extrémités du modèle (amont et aval) ont été réalisées.

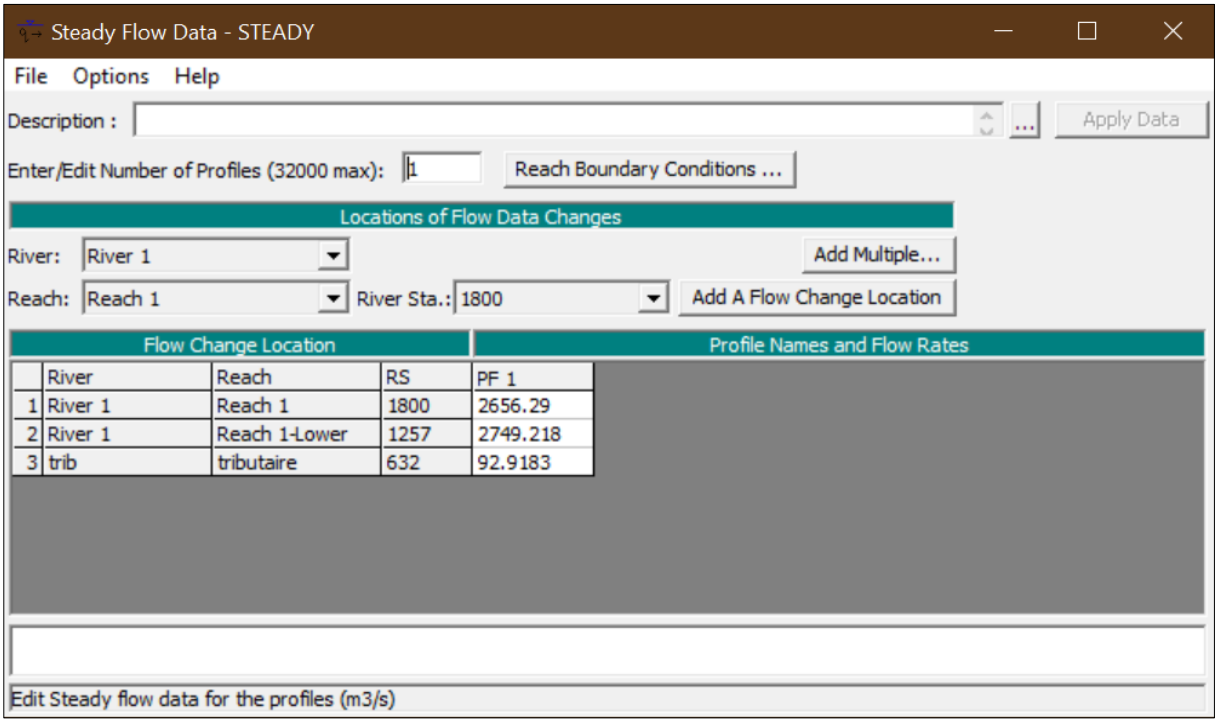


Figure III.29 : les débits décennaux

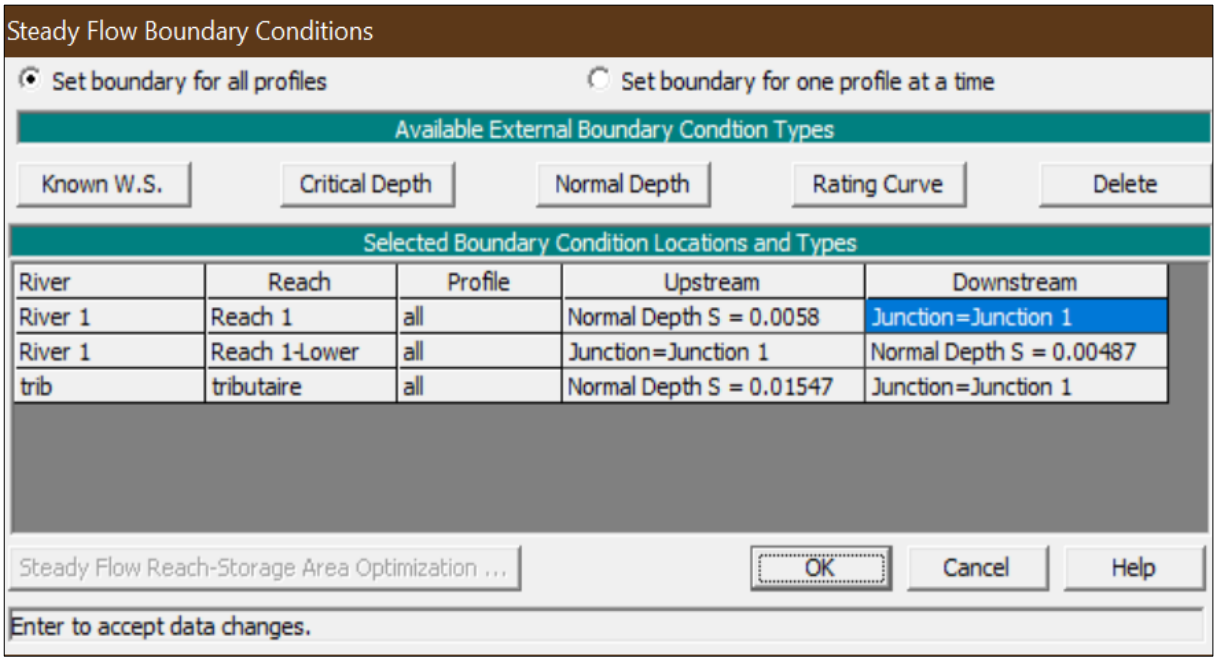


Figure III.30 : les conditions aux limites

c. Lancer la Simulation :

Une fois les données géométriques, le débit et les conditions aux limites intégrés, le choix du régime d'écoulement constitue l'étape suivante du calcul. Pour notre étude, un régime mixte a été adopté avant de procéder à la simulation.

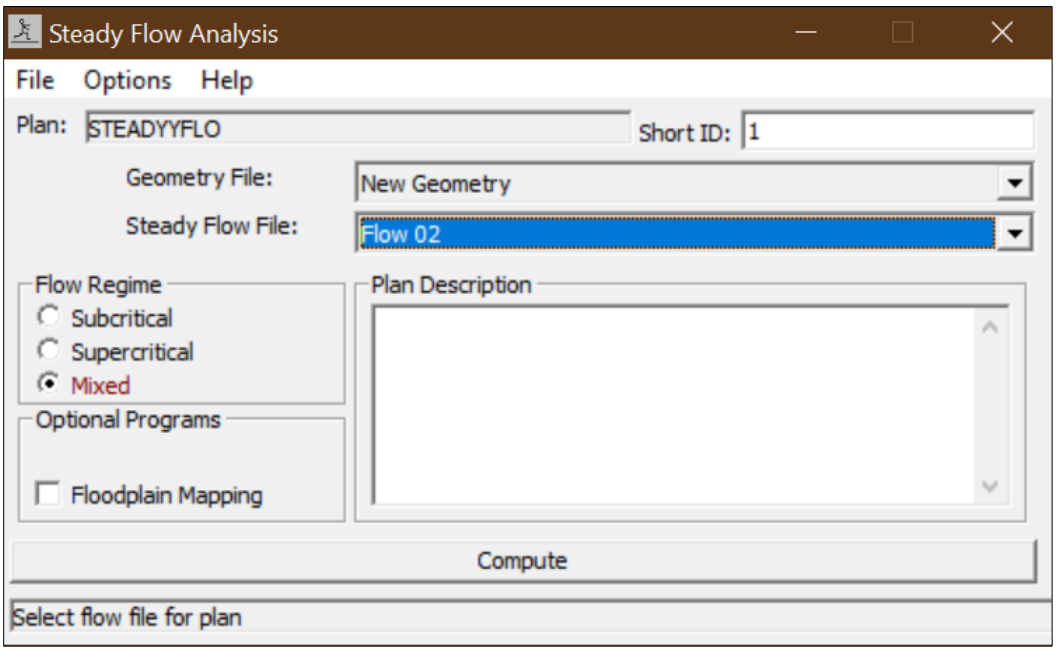


Figure III.31 : lancement de simulation

III.3.1.9 Résultat de la simulation :

La saisie des données géométriques (profils des sections transversales), des débits de pointe correspondant à différentes périodes de retour, ainsi que des conditions aux limites, permet permis au logiciel HEC-RAS d'effectuer les calculs hydrauliques et de générer divers résultats d'analyse, notamment :

- Une vue en profil longitudinal du tronçon simulé ;
- Les niveaux d'eau associés à chaque période de retour, superposés aux profils transversaux ;
- Une visualisation en trois dimensions de l'écoulement dans le tronçon étudié ;
- Des tableaux descriptifs détaillés (vitesses, hauteurs, largeurs, etc.) ;
- Et la courbe de tarage, représentant la relation entre débit et hauteur d'eau.

Profil en long :

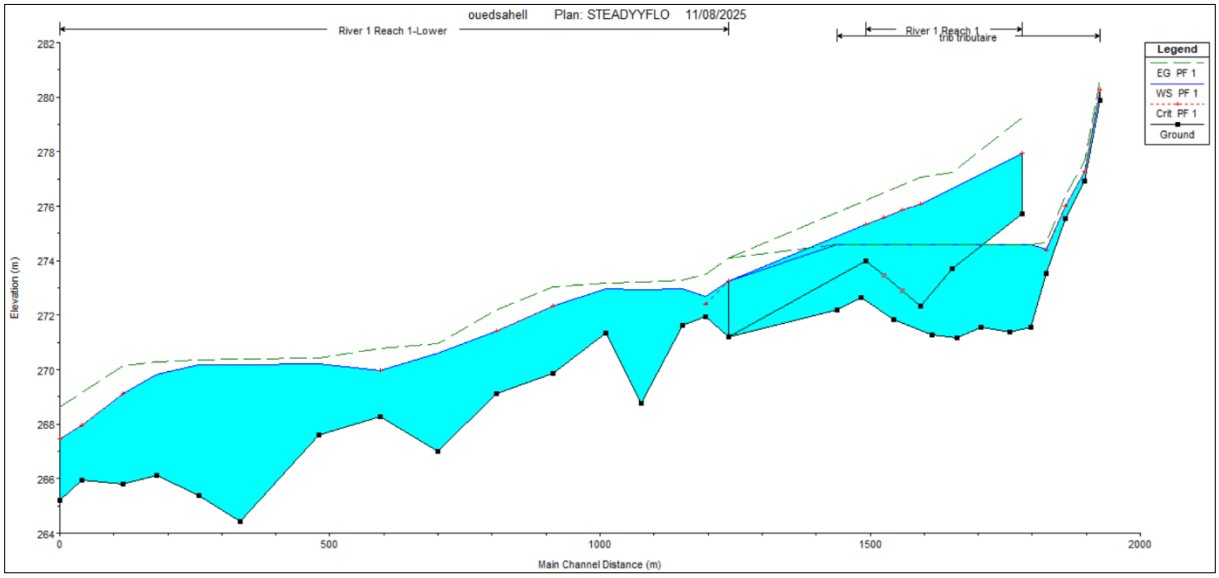


Figure III.32: Profil en long du cours d'eau à l'état naturel pour une crue centennale

Vue en trois dimensions du tronçon modélisé :

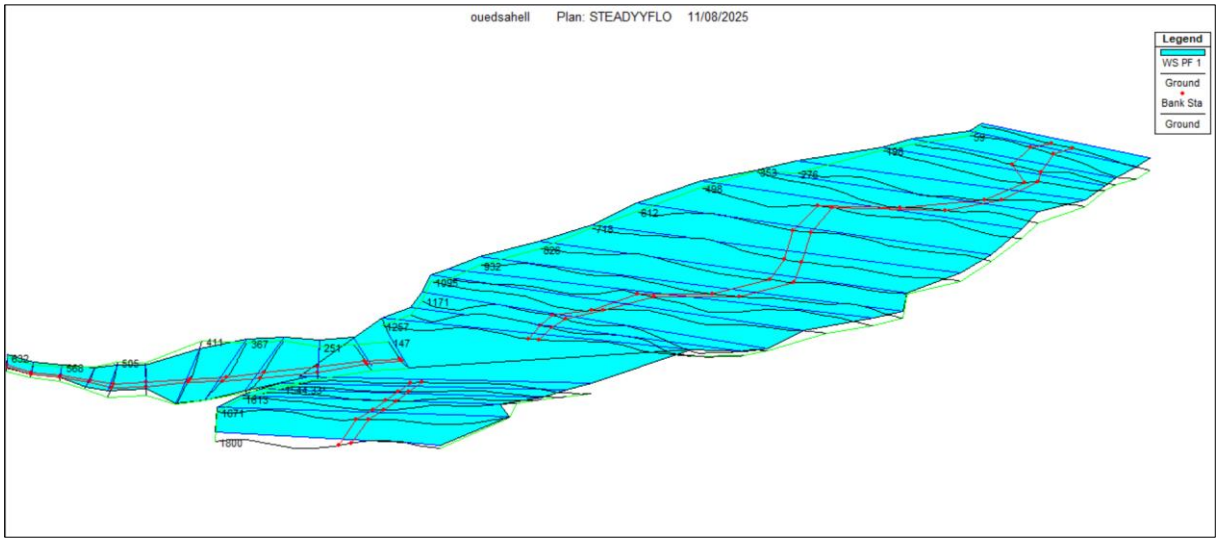


Figure III.33 : Vue en Plan en 3D de l'Oued

Restitution de la courbe de tarage :

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

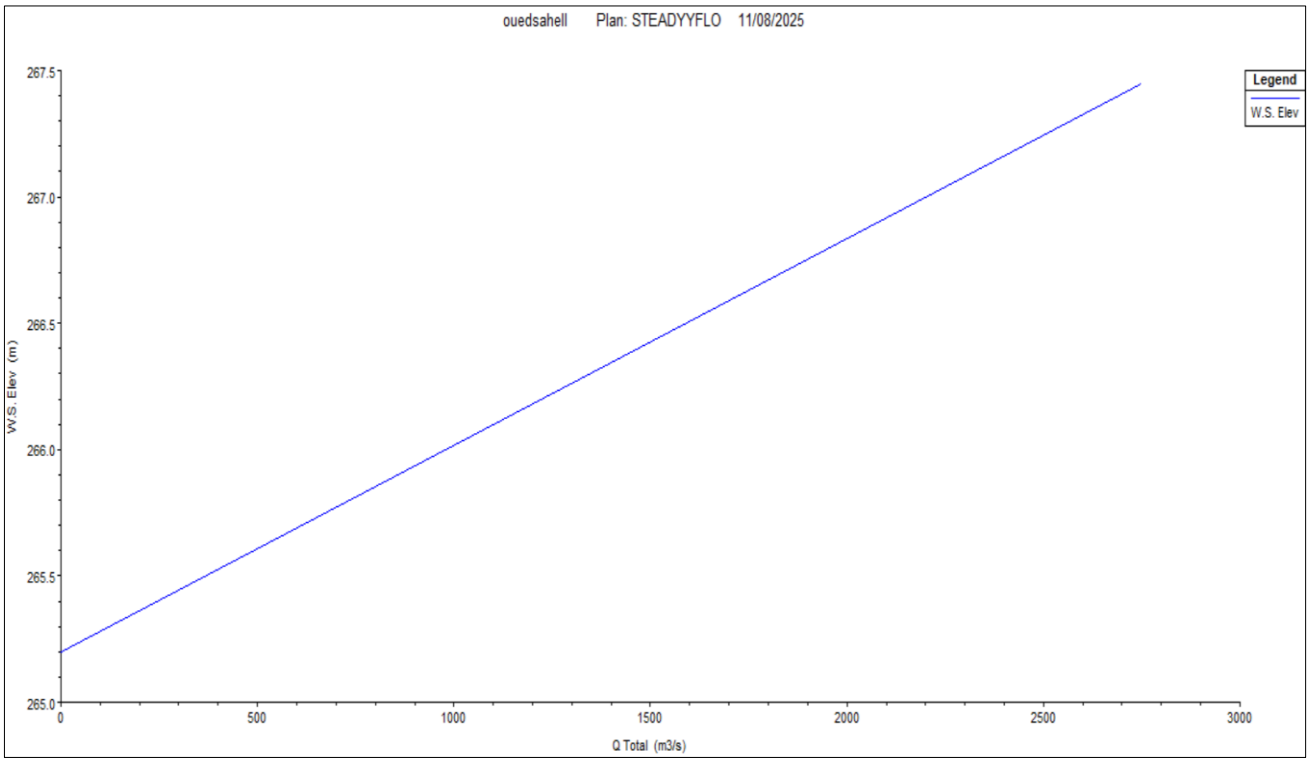
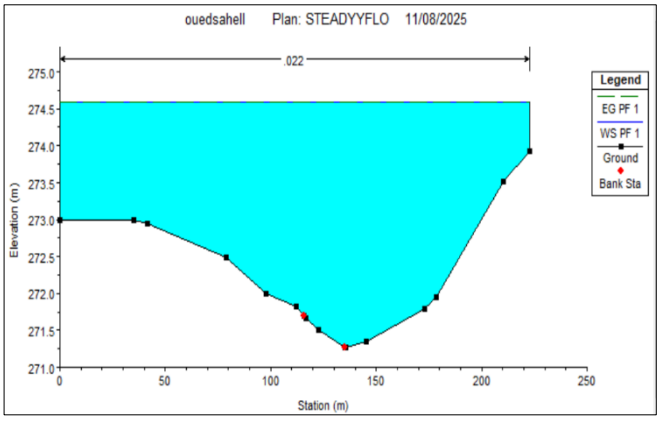
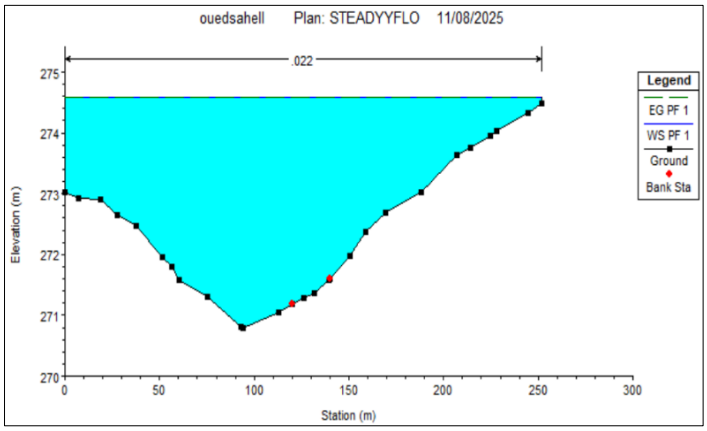


Figure III.34:Courbe de tarage du tronçon modélisé d'Oued Sahel.

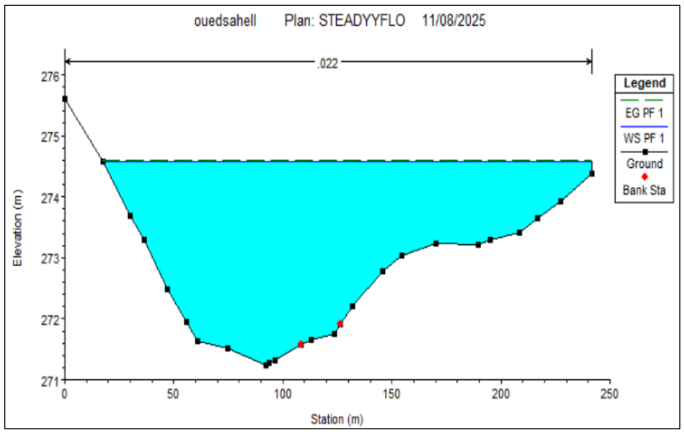
Profile en travers :

L'affichage des résultats sous forme de profils transversaux a permis d'obtenir un niveau de détail élevé à chaque point d'analyse le long du tracé du cours d'eau. Cette visualisation a révélé que la majorité des sections étudiées sont submersibles, c'est-à-dire susceptibles d'être entièrement recouvertes par l'eau en période de crue.



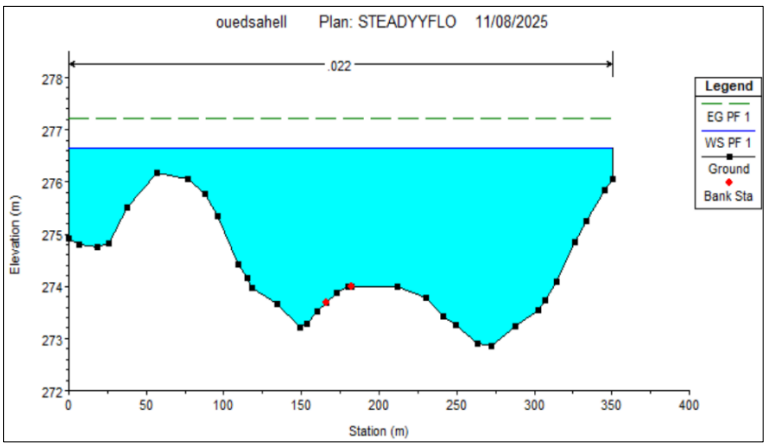


(a) Oued ouakeur
(b) oued Ouakeur

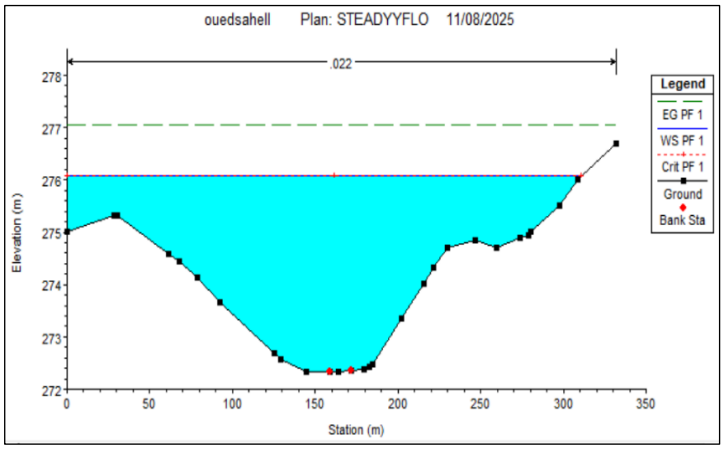


(c) oued Ouakeur

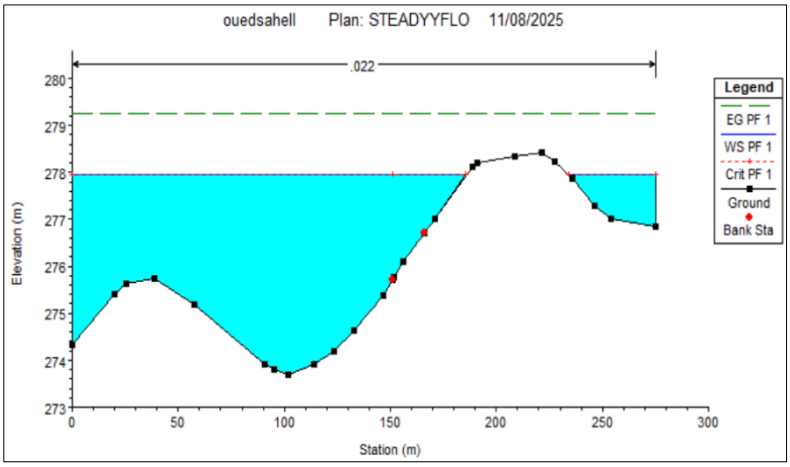
Figure III.14: coupe en travers d'Oued Ouakeur.



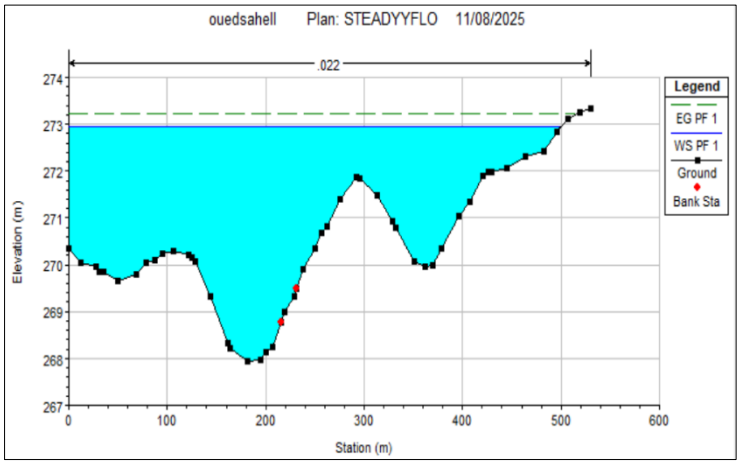
(d) oued sahel 1



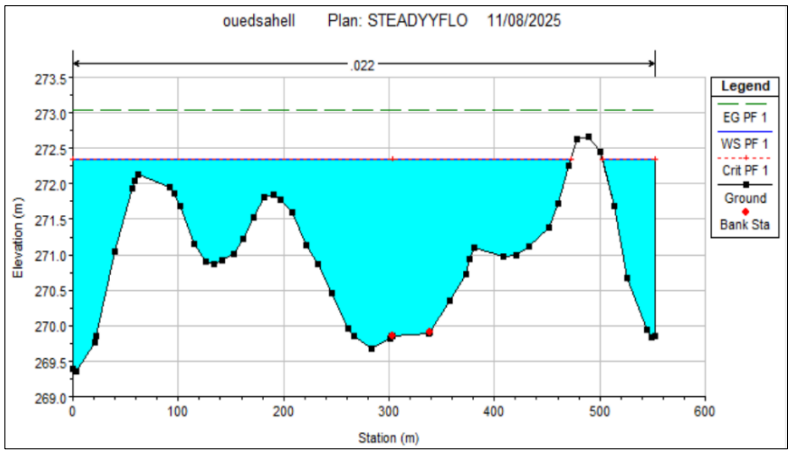
(e) oued sahel 1



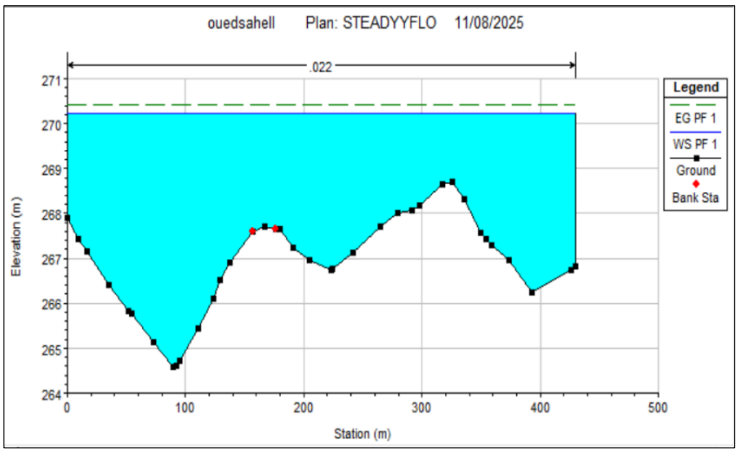
(f) oued sahel 1



(g) oued sahel 2



(h) oued sahel 2



(i) oued sahel 2

Figure III.14: coupe en travers d'Oued Sahel

Le logiciel offre, également, la possibilité de générer des tableaux récapitulatifs regroupant l'ensemble des paramètres hydrauliques :

Tableau III.33: Principaux paramètres hydrauliques pour l'ensemble des stations (Source : Logiciel HEC-RAS).

Reach	River Sta	Q Total	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
		92.92	279.87	280.27	280.27	280.63	0.004249	1.07	36.47	56.29	0.73
Tributaire	632	92.92	276.91	277.27	277.27	277.65	0.004265	0.94	35.29	49.82	0.71
Tributaire	603	92.92	275.55	276.01	276.01	276.37	0.004348	1.12	35.96	50.45	0.75
Tributaire	568	92.92	273.52	274.41	274.39	274.67	0.004401	2.41	42.29	76.37	0.91
Tributaire	533	92.92	271.57	274.58		274.59	0.000026	0.48	233.12	104.92	0.09
Tributaire	505	92.92	271.36	274.58		274.59	0.000021	0.44	236.84	96.74	0.08
Tributaire	464	92.92	271.57	274.59		274.59	0.000009	0.28	421.42	224.66	0.05
Tributaire	411	92.92	271.18	274.59		274.59	0.000004	0.21	548.56	251.90	0.04
Tributaire	367	92.92	271.28	274.59		274.59	0.000006	0.24	490.63	222.90	0.04
Tributaire	321	92.92	271.82	274.58		274.59	0.000016	0.33	309.19	140.10	0.07
Tributaire	251	92.92	272.66	274.58		274.58	0.000030	0.38	243.40	124.80	0.09
Tributaire	191	92.92	272.19	274.58		274.58	0.000019	0.34	280.25	134.50	0.07
Tributaire	147	2656.29	275.72	277.95	277.95	279.24	0.002814	3.44	552.07	226.32	0.84
Reach 1	1800	2656.29	273.69	276.65		277.22	0.001620	3.61	813.37	350.80	0.69
Reach 1	1671	2656.29	272.34	276.07	276.07	277.05	0.003263	6.23	628.07	310.65	1.03
Reach 1	1613	2656.29	272.89	275.87	275.87	276.79	0.003611	5.63	635.65	338.17	1.04
Reach 1	1578.67*	2656.29	273.44	275.58	275.58	276.50	0.003943	4.67	628.22	344.63	1.03
Reach 1	1544.33*	2656.29	274.00	275.33	275.33	276.23	0.003696	3.23	641.98	351.10	0.92

Reach 1	1510	2749.22	271.20	273.24	273.24	274.11	0.004008	4.55	671.11	393.00	1.03
Reach 1-Lower	1257	2749.22	271.95	272.70	272.39	273.49	0.002701	1.53	707.99	351.04	0.68
Reach 1-Lower	1214	2749.22	271.61	272.95		273.29	0.001030	1.46	1079.04	472.20	0.47
Reach 1-Lower	1171	2749.22	268.78	272.94		273.21	0.000583	2.67	1262.05	499.71	0.44
Reach 1-Lower	1095	2749.22	271.33	272.96		273.16	0.000508	1.20	1410.85	546.50	0.34
Reach 1-Lower	1030	2749.22	269.85	272.34	272.34	273.04	0.003677	5.03	764.73	522.02	1.02
Reach 1-Lower	932	2749.22	269.11	271.41	271.41	272.18	0.003218	4.39	735.92	459.23	0.94
Reach 1-Lower	826	2749.22	267.00	270.59		270.94	0.000706	2.78	1116.55	447.26	0.48
Reach 1-Lower	718	2749.22	268.28	269.98	269.98	270.76	0.003948	3.93	704.18	463.35	0.99
Reach 1-Lower	612	2749.22	267.59	270.22		270.43	0.000367	1.63	1413.91	430.00	0.33
Reach 1-Lower	498	2749.22	264.42	270.18		270.39	0.000343	2.50	1367.59	376.00	0.35
Reach 1-Lower	353	2749.22	265.37	270.19		270.36	0.000239	1.89	1526.76	380.30	0.29
Reach 1-Lower	276	2749.22	266.12	269.81		270.29	0.001059	3.26	904.69	308.90	0.58
Reach 1-Lower	198	2749.22	265.79	269.10	269.10	270.14	0.003362	5.39	622.73	290.00	1.01
Reach 1-Lower	135	2749.22	265.95	267.95	267.95	269.15	0.002219	3.02	614.38	246.40	0.74
Reach 1-Lower	59	2749.22	265.20	267.45	267.45	268.61	0.002562	3.92	611.46	245.00	0.84

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

Interprétation des résultats :

Vue le niveau d'eau dans toutes les sections en travers de l'oued, nous remarquons que ce dernier est inondé sur toute sa longueur, selon les paramètres suivants :

- La vitesse d'écoulement varie entre 0.21 et 6.23 m/s ;
- La hauteur d'eau variée entre 0.1 et 6 m ;
- La variation du régime d'écoulement le long de l'Oued. Cette constatation est confirmée par les valeurs du nombre de Froude qui variant entre 0.04 et 1.04.

Les zones inondables :

Après le calcul des profils d'inondation avec HEC-RAS, l'objectif de cette étape est de délimiter les zones potentiellement inondables. Pour y parvenir, il est nécessaire de déterminer les hauteurs d'eau en différents points de l'oued.

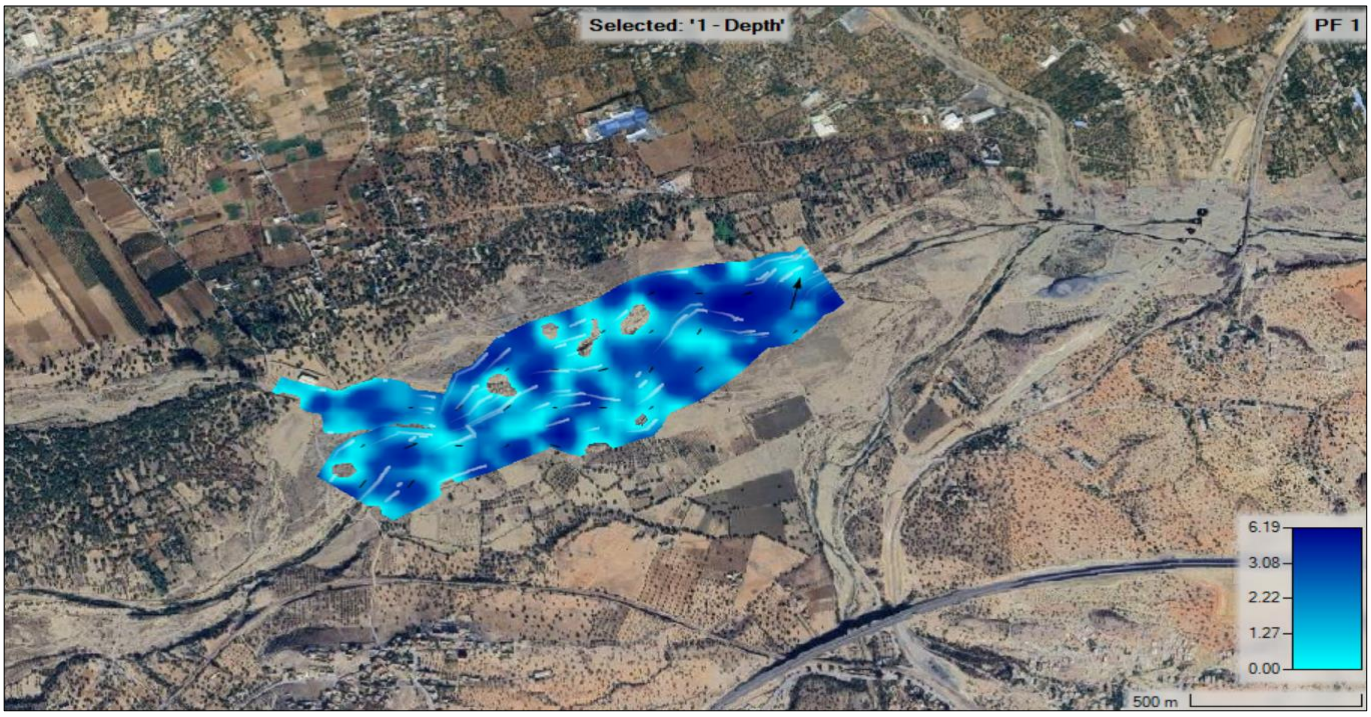


Figure III.16: carte des profondeurs avant aménagement

III.4 CONCLUSION

La simulation hydraulique du cours d'eau Sahel a mis en évidence une forte vulnérabilité aux crues, avec des sections largement submersibles et des vitesses d'écoulement élevées. Les résultats obtenus soulignent la complexité du régime hydraulique et confirment la nécessité d'aménagements adaptés pour réduire les risques d'inondation. Cette étape constitue ainsi une base essentielle pour orienter les choix d'aménagement présentés dans le chapitre suivant.

Chapitre IV
Étude de variante d'aménagement

Chapitre IV : Étude de variante d'aménagement

IV.1 Introduction :

L'objectif principal de cette étude est d'assurer une protection efficace des zones urbaines situées le long de l'Oued sahel face aux risques d'inondation. Cette protection repose sur la sélection des solutions d'aménagement les plus appropriées, en s'appuyant sur les résultats issus des analyses hydrologiques et hydrauliques précédentes, ainsi que sur une étude approfondie des caractéristiques naturelles de la zone.

Les différentes variantes d'aménagement proposées seront évaluées et comparées en tenant compte des critères suivants :

- La capacité d'évacuation des eaux de crue vers l'exutoire ;
- Le respect des conditions d'écoulement et de la stabilité des berges ;
- La préservation de l'environnement et la réduction des impacts négatifs sur le milieu naturel et les populations riveraines.

Le choix final de la variante optimale résultera d'un processus de sélection rigoureux, combinant l'analyse technique, les contraintes naturelles, et les exigences de durabilité.

IV.2 Divers types d'aménagements :

IV.2.1 Protection directe (rapprochée)

La protection directe consiste à agir immédiatement sur les zones menacées par les crues, en mettant en œuvre des actions ciblées visant à améliorer les conditions d'écoulement et à réduire la vulnérabilité locale. Ces interventions incluent :

❖ **Curage du lit du cours d'eau**

Cette opération vise à retirer les dépôts, sédiments et obstacles (branches, végétation, déchets) qui entravent l'écoulement. Le curage permet ainsi une meilleure circulation de l'eau, surtout en période de crue.

Le débroussaillage est également nécessaire, notamment dans les zones traversant les agglomérations, pour des raisons sanitaires et afin de réduire la rugosité du lit, ce qui augmente la capacité d'écoulement.

❖ **Recalibrage des sections**

Cette opération consiste à élargir et approfondir les sections du cours d'eau, dans le but d'augmenter la section mouillée et la capacité d'évacuation des eaux de crue. Elle permet d'adapter le lit aux nouvelles exigences hydrauliques tout en respectant les critères de sécurité.

❖ **Création de canaux de dérivation ou de régénération**

Lorsqu'un cours d'eau est fortement anthropisé (occupation par des constructions, voiries, etc.), la création de canaux artificiels permet de restaurer son couloir hydraulique naturel. Cette mesure vise à récupérer la continuité hydraulique indispensable au bon fonctionnement du système fluvial.

❖ **Protection des berges**

Elle regroupe l'ensemble des techniques visant à stabiliser les rives contre l'érosion provoquée par les crues.

Les berges sont souvent soumises à des courants turbulents, susceptibles d'en déstabiliser les talus. De plus, l'infiltration post-crue peut provoquer des glissements de terrain.

❖ **Endiguement des oueds**

L'endiguement consiste à construire des digues longitudinales de part et d'autre du cours d'eau, suivant ses berges. Cette méthode est facilement réalisable grâce à l'utilisation de ressources locales, tant en main-d'œuvre qu'en matériaux disponibles sur place.

Ce type d'ouvrage permet de mettre en œuvre une protection progressive et sélective : il est possible de commencer par sécuriser en priorité les zones les plus densément peuplées ou économiquement sensibles, avant d'étendre la protection à l'ensemble du territoire exposé.

Cependant, l'endiguement présente certaines limites**,** notamment :

- Une élévation significative du niveau de l'eau dans le lit canalisé, pouvant aggraver le risque en cas de débordement ;
- Une difficulté accrue pour le drainage des zones basses, surtout en période de crue prolongée.

IV.2.2 Protection indirecte (éloignée)

Contrairement aux mesures rapprochées, la protection indirecte vise à réduire le risque d'inondation à la source, en agissant en amont ou en dehors du périmètre directement menacé. Elle repose sur la mise en place d'ouvrages destinés à moduler, détourner ou contenir les écoulements des oueds à l'origine des crues. Parmi les principales actions, on distingue :

❖ **Création de canaux périphériques**

Cette solution consiste à dériver les eaux excédentaires vers d'autres cours d'eau ou vers des zones non urbanisées, situées en dehors des aires à protéger**.** La déviation peut concerner une partie ou la totalité du débit d'un oued, selon les besoins, afin de limiter la pression hydraulique en aval.

❖ **Construction de barrages de rétention ou de seuils de laminage**

Implantés à l'amont des zones sensibles, ces ouvrages permettent le stockage temporaire des eaux de crue et leur évacuation progressive. Le volume utile et la capacité de régulation doivent être

dimensionnés de manière à optimiser l'effet de protection sans compromettre l'équilibre hydrologique en aval.

❖ **Aménagement des bassins versants**

Cette démarche comprend des actions de lutte contre l'érosion et la régulation naturelle des écoulements**,** par des méthodes

- **Biologiques** : reboisement, végétalisation des pentes ;
- **Techniques** : installation de seuils en gabions, qui ralentissent les vitesses d'écoulement et favorisent le dépôt des sédiments dans les zones amont, réduisant ainsi la charge solide et les risques en aval.

IV.3 Calcul hydraulique des canaux

IV.3.1 Écoulement lentement varié et conditions du régime uniforme :

Dans le cas d'un écoulement lentement variable, on peut considérer que, localement, chaque section se comporte comme en régime uniforme. Cela signifie que la pente de la ligne de charge (ou ligne d'énergie) est équivalente à celle d'un écoulement uniforme.

Conditions nécessaires pour qu'un écoulement soit uniforme :

1. Le débit est constant dans chaque section du tronçon considéré ;
2. Le canal est prismatique, c'est-à-dire que sa forme géométrique ne varie pas le long de l'écoulement ;
3. La profondeur de l'eau (*h*) reste constante sur toute la longueur du tronçon ;
4. La pente du fond du canal est uniforme ;
5. La rugosité des parois (fond et berges) est homogène ;
6. Il n'existe aucune résistance locale (comme les obstacles, les changements brusques de section ou de direction).

❖ **Formules de calcul**

La formule fondamentale utilisée pour le calcul d'un écoulement permanent et uniforme est celle de Chézy, qui exprime la vitesse moyenne de l'écoulement sous la forme suivante

$$\boldsymbol{V = C \times \sqrt{R \cdot I}} \qquad (\boldsymbol{IV.1})$$

En utilisant le produit suivant :

$$\boldsymbol{Q = V \times S} \qquad (\boldsymbol{IV.2})$$

On obtient :

$$Q = C \times S \times \sqrt{R.I} \qquad (IV.3)$$

Avec :

- **C :** Coefficient de Chézy (m0.5/s) ;
- **R_h :** Rayon hydraulique étant la surface mouillée Sm sur le périmètre mouillé Pm ;
- **n :** Coefficient de rugosité ;
- **I :** Pente de fond du canal (radier).

IV.3.2 Détermination de coefficient de Chézy

En utilisant les formules empiriques pour la détermination du coefficient de Chézy :

❖ **Formule d'AGROSKINE**

$$C = \frac{1}{n} + 17,72 \log(R_h) \qquad (IV.4)$$

- **C :** Coefficient de Chézy (m0.5/s) ;
- **Rh :** Rayon hydraulique ;
- **n :** Coefficient de rugosité.

❖ **Formule de PAVLOVSKY**

$$C = \frac{1}{n} \times R_h^{\frac{1}{y}} \qquad (IV.5)$$

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

$$M = 2,5 \times \sqrt{n} - 0,13 - 0.75 \times \sqrt{R_h} \times (\sqrt{n} - 0.1)$$

❖ **Formule de BAZIN**

$$C = \frac{87}{1 + \frac{mb}{\sqrt{R_h}}} \qquad (IV.6)$$

- **mb :** Coefficient de BAZIN, mb est entre 0,06 et 1.75m 0.75.

❖ **Formule de MANING-STRICKLER :**

$$C = \frac{1}{n} \times R_h^{\frac{1}{6}} \qquad (IV.7)$$

La formule de MANING-STRICKLER permet de transformer la formule de Chézy pour obtenir :

$$V = Ks \times R_h^{\frac{2}{3}} \times \sqrt{I} \qquad (IV.8)$$

Avec :

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

Cette formule est la plus utilisée pour le dimensionnement, pour toutes les formes géométriques pour des sections ouvertes diverses. Elle est donnée par la relation suivante :

$$\boldsymbol{Q = \frac{1}{n} \times R_h \times \frac{2}{3} \times S_m \times \sqrt{I}} \qquad (\boldsymbol{IV.9})$$

Avec :

- **Q :** débit de dimensionnement (m3/s) ;
- **n :** rugosité du canal ;
- **S_m :** section mouillée du canal en (m2) ;
- **I :** pente du tronçon de cours d'eau (pente du fond) en (m/m).
- **R_h :** rayon hydraulique en (m)

La figure suivante donne les formules des éléments géométriques pour cinq différents types de section de canaux :

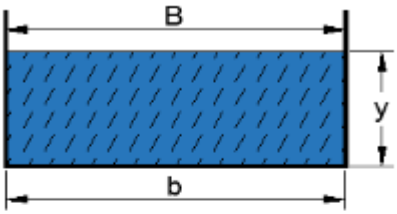
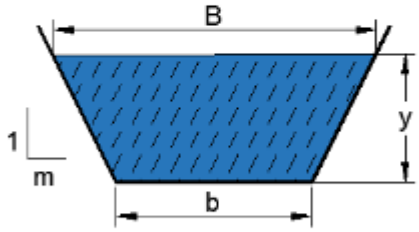
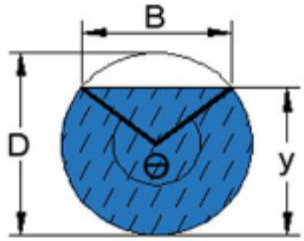
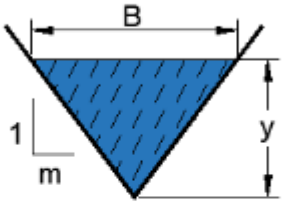
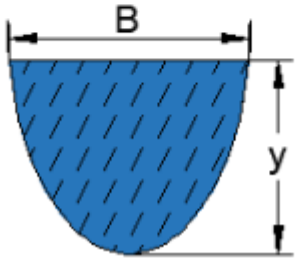
	**Type**	Rectangulaire
	Largeur au miroir B	b
	Surface S	$b*y$
	Périmètre P	$b+2y$
	Rayon hydraulique R	$\frac{b*y}{b+2y}$
	**Type**	Trapézoïdale
	Largeur au miroir B	$b+2m*y$
	Surface S	$(b+my)*y$
	Périmètre P	$b+2y\sqrt{1+m^2}$
	Rayon hydraulique R	$\frac{(b+my)*y}{b+2y\sqrt{(1+m^2)}}$
	**Type**	Circulaire
	Largeur au miroir B	$2\sqrt{y(D-y)}$
	Surface S	$\frac{1}{8}(\theta-\sin\theta)D^2$
	Périmètre P	$\frac{1}{2}\theta D$
	Rayon hydraulique R	$\frac{1}{4}\left[1-\frac{\sin\theta}{\theta}\right]D$
	**Type**	Triangulaire
	Largeur au miroir B	$2my$
	Surface S	my^2
	Périmètre P	$2y\sqrt{1+m^2}$
	Rayon hydraulique R	$\frac{my}{2\sqrt{1+m^2}}$
	**Type**	Parabolique
	Largeur au miroir B	$\frac{3S}{2y}$
	Surface S	$\frac{2}{3}By$
	Périmètre P	$B+\frac{8y^2}{3B}$
	Rayon hydraulique R	$\frac{2B^2y}{3B^2+8y^2}$

Figure IV. 35 : Différents types des canaux avec leurs caractéristiques géométriques.

IV.4 Choix des variantes d'aménagement :

❖ **La pente du projet**

Le choix de la pente constitue une étape essentielle préalable à tout calcul hydraulique, car elle conditionne les caractéristiques de l'écoulement dans le canal.

Dans le cadre de cette étude, une pente uniforme a été adoptée pour chaque tronçon du cours d'eau. Ce choix vise à simplifier la modélisation tout en assurant une représentation réaliste des conditions d'écoulement.

❖ **Le coefficient de rugosité**

La rugosité hydraulique du canal dépend principalement de la nature du revêtement de son lit et de ses parois. Elle influence directement les pertes de charge et donc les conditions d'écoulement. À titre indicatif, les valeurs de rugosité associées à différents types de revêtements sont présentées dans le tableau :

Tableau IV. 34 : Les valeurs du coefficient de rugosité 'n', (annexe 1)

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

❖ **Marge de sécurité dans les canaux (Revanche)**

Dans les canaux à surface libre, toute perte de charge imprévue peut entraîner une élévation du niveau d'eau, augmentant ainsi le risque de débordement. Pour cette raison, il est impératif de prévoir une marge de sécurité au-dessus de la ligne d'eau théorique obtenue par les calculs.

Cette marge permet de tenir compte de divers facteurs susceptibles d'altérer les conditions d'écoulement, notamment :

- L'accumulation de dépôts solides,
- La croissance de la végétation,
- Les vagues induites par le vent,
- Ou encore les variations accidentelles de débit.

En général, cette marge de sécurité varie :

- De 0,30 mètre pour les petits canaux,
- à 0,60 à 1,20 mètre pour les grands ouvrages, selon leur configuration.

Il convient néanmoins d'adapter cette valeur en fonction du contexte local, des caractéristiques géométriques du canal et des risques spécifiques (Lencastre, 2008)

Tableau IV. 35 : Revanches utilisées (7)

Débit (m3/s)	Q <0.75	0.75 < Q < 1.5	1.5 < Q < 8.5	Q >8.5
Revanche (m)	0.45	0.6	0.75	0.9

❖ **Vitesse d'érosion**

Pour préserver l'intégrité du lit et des berges des canaux face à l'action érosive du courant, il est essentiel de veiller à ce que la vitesse d'écoulement ne dépasse pas une valeur critique, appelée vitesse limite d'érosion.

Au-delà de ce seuil, le risque de dégradation ou de rupture des structures du canal devient significatif. Les valeurs moyennes de vitesse limite admissible pour différents types de lits consolidés sont présentées dans le tableau suivant, selon les données de Degoutte (2012).

Tableau IV. 36 : Valeurs de vitesse moyenne limite d'érosion pour les lits consolidés (7)

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

IV.5 Solutions d'aménagement destinées à la zone d'activité bordant l'oued sahel

Un prototype d'aménagement a été retenu pour réduire le risque d'inondation dans les zones actuellement exposées. Deux solutions structurelles sont envisagées :

- La réalisation d'un canal trapézoïdal en béton ;
- La réalisation d'un canal en gabions.

Chaque variante fera l'objet d'un calcul hydraulique à l'aide d'une simulation sous HEC-RAS, permettant de vérifier l'état d'écoulement sur l'ensemble des tronçons concernés. Une description détaillée de ces solutions sera présentée, afin d'identifier l'option la plus adaptée d'un point de vue technico-économique.

En complément, des mesures non-structurelles sont prévues :

- Mesures organisationnelles, visant à améliorer l'intervention de la protection civile en cas de crue, à renforcer la sécurité des populations grâce à un dispositif d'alerte, à une planification des actions et à l'élaboration de scénarios de crise ;
- Mesures techniques, portant sur la maîtrise de la phase de submersion éventuelle du canal afin de limiter la formation d'une vague et réduire les impacts en aval.

IV.5.1 Canal en béton armé

La variante retenue consiste en la conception d'un canal trapézoïdal en béton armé. Le fruit de talus est fixé à **m = 1**, ce qui correspond à un angle de 45°, choix motivé par la simplicité technique de sa réalisation sur le terrain.

Un canal en béton présente plusieurs avantages :

- Une durée de vie élevée ;
- Une forme étroite, bien adaptée au milieu urbain ;
- De bonnes performances hydrauliques ;
- Un temps de réalisation réduit, tout en assurant une protection efficace contre les crues.

L'évaluation hydraulique de ce canal est effectuée à l'aide du logiciel FLOWMASTER, qui permet de déterminer ses caractéristiques dimensionnelles. Ces résultats sont ensuite intégrés dans HEC-RAS pour la simulation de l'écoulement.

IV.5.1.1 Dimensionnement :

Le calcul des caractéristiques du canal est fait à l'aide du logiciel FLOW MASTER, résumé dans le tableau suivant :

Tableau IV. 37 : caractéristiques du canal

Paramètre	Oued ouakour	Oued sahel a	Oued sahel b
Débit (m3/s)	**92.92**	**2 656.30**	**2 749.21**
Longueur (m)	**668**	**550**	**1300**
Largeur au fond (m)	**10**	**40**	**45**
Hauteur du canal (m)	**1.5**	**4.3**	**4.3**
Rugosité (n de Manning)	**0.013**	**0.013**	**0.013**

Et Les résultats du calcul hydraulique du canal trapézoïdal sont présentés ci-dessous :

Tableau IV. 38 : résultats du calcul hydraulique du canal trapézoïdal

Paramètre	Oued ouakour	Oued sahel a	Oued sahel b
Débit Q (m3/s)	**92.92**	**2 656.30**	**2 749.21**
Largeur au miroir B (m)	**13.22**	**48.53**	**53.57**
Section S (m2)	**18.7**	**188.8**	**211.3**
Périmètre P (m	**14.6**	**52.1**	**57.1**
Hauteur critique yc (m)	**1.9**	**7.2**	**6.9**
La vitesse V (m/s)	**4.98**	**14.07**	**13.01**
Energie spécifique (m)	**2.87**	**14.35**	**12.92**
Nombre de Froude Fr	**1.337**	**2.277**	**2.092**
Régime d'écoulement	**Torrentiel**	**Torrentiel**	**Torrentiel**

IV.5.1.2 Analyse des résultats de la simulation

❖ **Paramètres d'écoulement**

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

Tableau IV. 39 : Résultats de la simulation d'écoulement d'un canal trapézoïdale en béton armé (Source : HECRAS)

River Sta	Q Total (m^3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m^2)	Top Width (m)	Froude # Chl
632	92.92	279.00	279.95	280.78	283.35	0.015489	8.17	11.38	14.01	2.89
583.5	92.92	278.30	279.25	280.07	282.59	0.015040	8.09	11.49	14.05	2.86
535	92.92	277.59	278.55	279.37	281.85	0.014789	8.04	11.55	14.06	2.83
486.5	92.92	276.89	277.85	278.67	281.13	0.014669	8.02	11.59	14.07	2.82
438	92.92	276.19	277.15	277.97	280.42	0.014589	8.00	11.61	14.08	2.82
389.5	92.92	275.49	276.45	277.26	279.71	0.014542	8.00	11.62	14.09	2.81
341	92.92	274.78	275.75	276.56	279.00	0.014511	7.99	11.63	14.09	2.81
292.5	92.92	274.08	275.04	275.86	278.30	0.014512	7.99	11.63	14.09	2.81
244	92.92	273.38	274.34	275.15	277.60	0.014511	7.99	11.63	14.09	2.81
195.5	92.92	272.67	273.64	274.45	276.89	0.014512	7.99	11.63	14.09	2.81
147	92.92	271.97	272.94	273.75	276.19	0.014511	7.99	11.63	14.09	2.81
1800	2656.29	275.51	279.83	282.62	289.73	0.005802	13.94	190.61	48.26	2.24
1751.67	2656.29	275.09	279.38	282.20	289.43	0.005943	14.04	189.18	48.28	2.27
1703.33	2656.29	274.67	278.93	281.77	289.13	0.006077	14.14	187.84	48.26	2.29
1655	2656.29	274.26	278.48	281.35	288.82	0.006204	14.24	186.60	48.26	2.31
1606.67	2656.29	273.84	278.04	280.93	288.50	0.006327	14.32	185.45	48.25	2.33
1558.33	2656.29	273.42	277.60	280.51	288.18	0.006444	14.41	184.38	48.25	2.35

1510	**2656.29**	**273.00**	**277.16**	**280.09**	**287.85**	**0.006556**	**14.48**	**183.38**	**48.24**	**2.37**
1257	**2749.22**	**271.00**	**274.81**	**277.81**	**286.03**	**0.007469**	**14.84**	**185.29**	**52.33**	**2.52**
1207.48	**2749.22**	**270.68**	**274.50**	**277.48**	**285.64**	**0.007378**	**14.78**	**186.03**	**52.37**	**2.50**
1157.96	**2749.22**	**270.36**	**274.20**	**277.16**	**285.25**	**0.007296**	**14.72**	**186.72**	**52.41**	**2.49**
1108.44	**2749.22**	**270.04**	**273.89**	**276.84**	**284.87**	**0.007219**	**14.67**	**187.37**	**52.44**	**2.48**
1058.92	**2749.22**	**269.73**	**273.58**	**276.52**	**284.49**	**0.007151**	**14.63**	**187.96**	**52.48**	**2.47**
1009.4	**2749.22**	**269.41**	**273.27**	**276.20**	**284.12**	**0.007095**	**14.59**	**188.45**	**52.50**	**2.46**
959.88	**2749.22**	**269.09**	**272.96**	**275.88**	**283.76**	**0.007043**	**14.55**	**188.91**	**52.53**	**2.45**
910.36	**2749.22**	**268.77**	**272.65**	**275.56**	**283.40**	**0.006994**	**14.52**	**189.34**	**52.56**	**2.44**
860.84	**2749.22**	**268.45**	**272.34**	**275.24**	**283.04**	**0.006948**	**14.49**	**189.76**	**52.59**	**2.44**
811.32	**2749.22**	**268.13**	**272.03**	**274.92**	**282.69**	**0.006907**	**14.46**	**190.13**	**52.61**	**2.43**
761.80	**2749.22**	**267.81**	**271.71**	**274.60**	**282.34**	**0.006869**	**14.43**	**190.47**	**52.64**	**2.42**
712.28	**2749.22**	**267.49**	**271.40**	**274.28**	**281.99**	**0.006834**	**14.41**	**190.80**	**52.66**	**2.42**
662.76	**2749.22**	**267.17**	**271.09**	**273.96**	**281.64**	**0.006803**	**14.39**	**191.10**	**52.68**	**2.41**
613.24	**2749.22**	**266.86**	**270.77**	**273.65**	**281.29**	**0.006772**	**14.36**	**191.39**	**52.71**	**2.41**
563.72	**2749.22**	**266.54**	**270.46**	**273.33**	**280.95**	**0.006745**	**14.35**	**191.65**	**52.73**	**2.40**
514.20	**2749.22**	**266.22**	**270.14**	**273.01**	**280.61**	**0.006720**	**14.33**	**191.89**	**52.75**	**2.40**
464.68	**2749.22**	**265.90**	**269.83**	**272.69**	**280.27**	**0.006698**	**14.31**	**192.10**	**52.77**	**2.40**
415.16	**2749.22**	**265.58**	**269.51**	**272.37**	**279.93**	**0.006678**	**14.30**	**192.30**	**52.78**	**2.39**
365.64	**2749.22**	**265.26**	**269.20**	**272.05**	**279.60**	**0.006657**	**14.28**	**192.51**	**52.80**	**2.39**
316.12	**2749.22**	**264.94**	**268.88**	**271.73**	**279.26**	**0.006640**	**14.27**	**192.68**	**52.82**	**2.39**
266.60	**2749.22**	**264.62**	**268.57**	**271.41**	**278.93**	**0.006624**	**14.26**	**192.84**	**52.84**	**2.38**
217.08	**2749.22**	**264.30**	**268.25**	**271.09**	**278.60**	**0.006610**	**14.25**	**192.98**	**52.86**	**2.38**

167.56	**2749.22**	**263.99**	**267.93**	**270.77**	**278.27**	**0.006597**	**14.24**	**193.12**	**52.87**	**2.38**
118.04	**2749.22**	**263.67**	**267.62**	**270.45**	**277.93**	**0.006584**	**14.23**	**193.25**	**52.89**	**2.38**
68.52	**2749.22**	**263.35**	**267.30**	**270.13**	**277.61**	**0.006573**	**14.22**	**193.37**	**52.91**	**2.37**
19	**2749.22**	**263.03**	**266.98**	**269.81**	**277.28**	**0.006563**	**14.21**	**193.47**	**52.92**	**2.37**

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

❖ **Interprétation**

L'analyse du nombre de Froude montre que l'écoulement est de type torrentiel (Fr > 1), avec une vitesse inférieure à 15 m/s, ce qui reste compatible avec la résistance hydraulique du béton, non sujet à l'érosion dans ces conditions. Le périmètre mouillé atteint un maximum de 53 m. D'un point de vue technique, le canal trapézoïdal en béton armé constitue ainsi une solution de protection fiable et durable.

Les sections en travers :

Pour une crue centennale, le canal trapézoïdal en béton armé assure la capacité d'écoulement sans débordement, garantissant ainsi une protection hydraulique efficace.

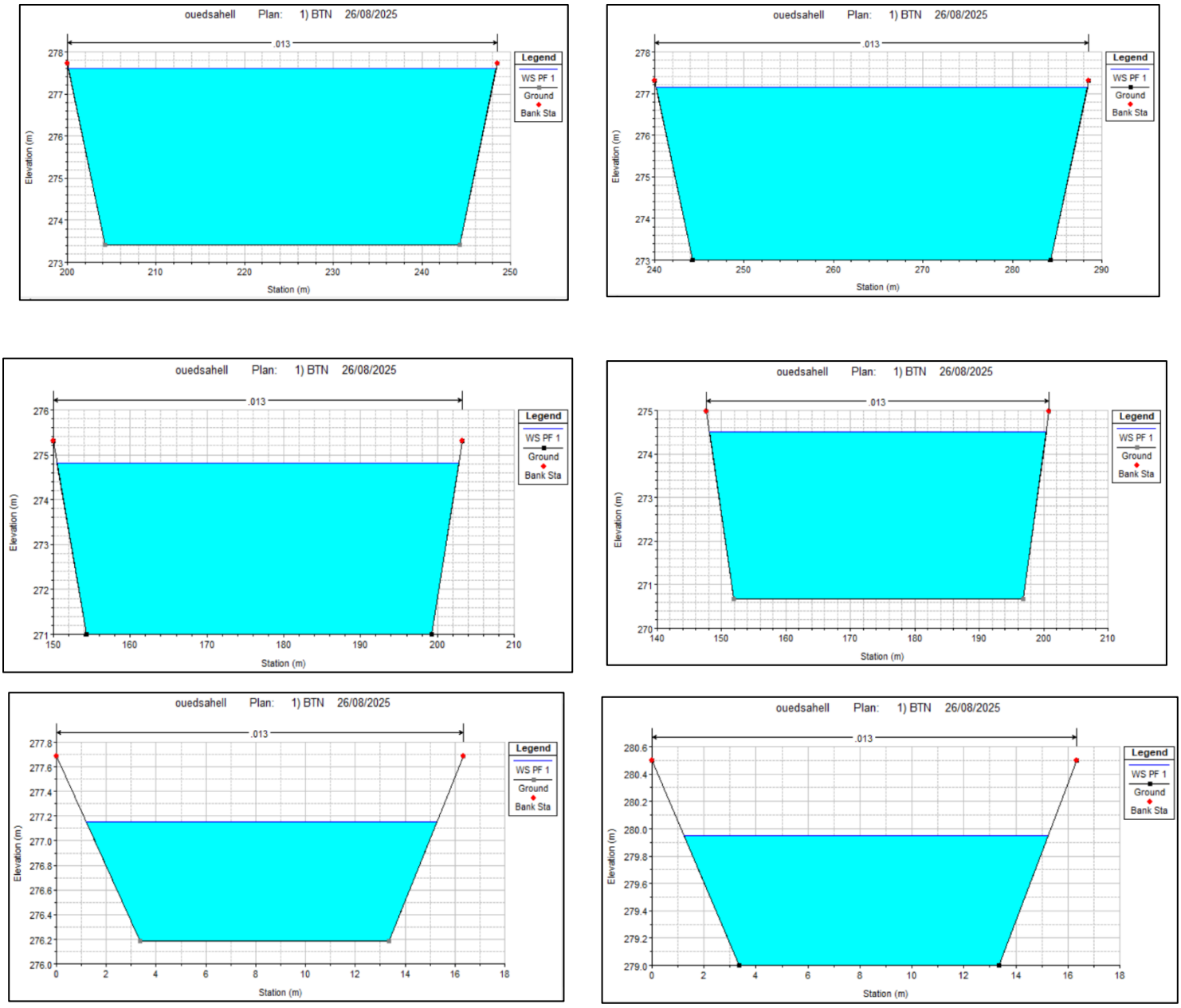


Figure IV. 36 : les sections en travers d'un canal trapézoïdale en béton armé (Source : HECRAS)

Vue en plan 3D :

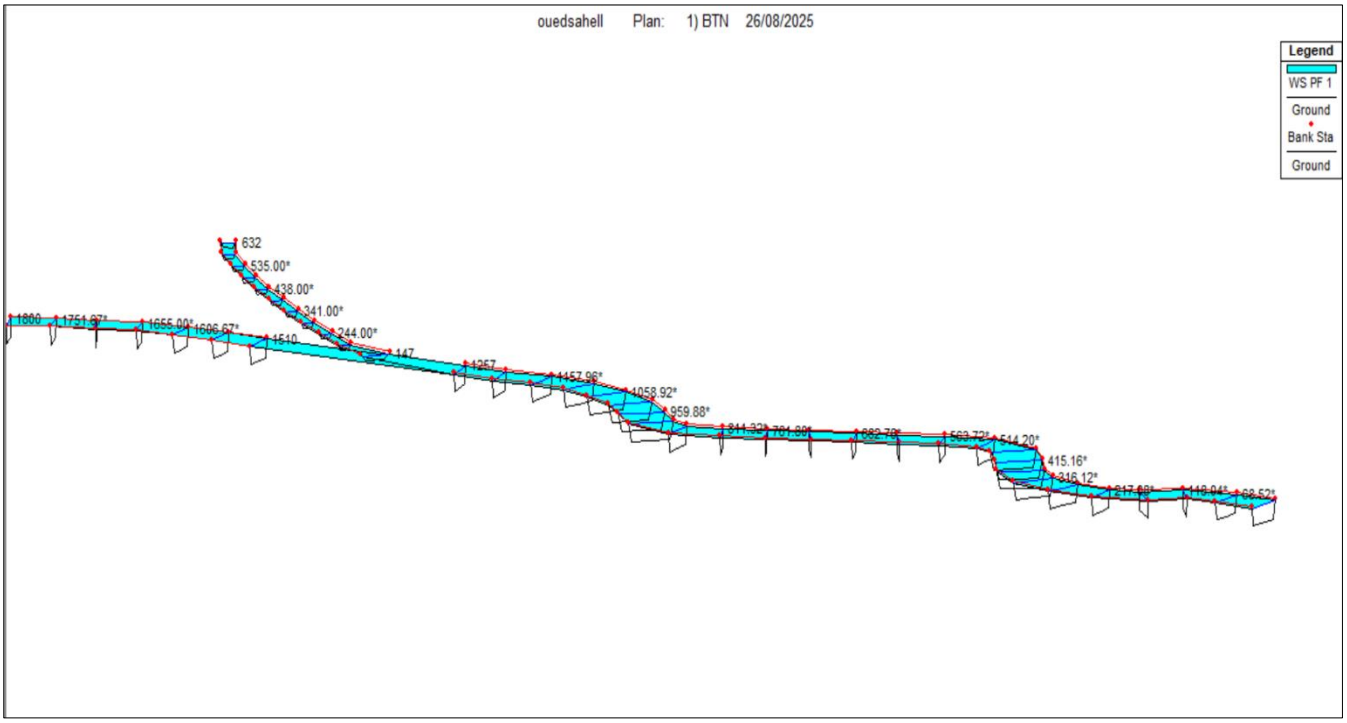


Figure IV. 37 : Vue 3D de l'oued sahel

Carte des profondeurs :



Figure IV. 38 : Carte des profondeurs après l'aménagement.

IV.5.1.3 Estimation du coût de la variante :

❖ **Volume de béton :**

Le devis de la variante « canal en béton armé » est établi à partir des quantités de terrassement (volumes de déblais et de remblais) calculées sous HEC-RAS, auxquelles s'ajoute une épaisseur de 15 cm pour le revêtement en béton armé. Une couche de béton de propreté de 5 cm est également prise en compte.

Tableau IV. 40 : Résultat de calcul volume de propreté

	Largeur	Longueur	S_{BP}	V_{BP}
Oued ouakour	**10**	**668**	**0.5**	**334**
Oued sahel a	**40**	**550**	**2**	**1100**
Oued sahel b	**45**	**1300**	**2.25**	**2925**

Tableau IV. 41 : Résultat de calcul du volume de béton dosé à 350kg

	Largeur	Longueur	Radier	Berges	TOTAL
Oued ouakour	**10**	**668**	**1002**	**425.1125**	**1427.112**
Oued sahel a	**40**	**550**	**3300**	**1003.384**	**4303.384**
Oued sahel b	**45**	**1300**	**8775**	**2371.636**	**11146.63**

Tableau IV. 42 : Les volumes de terrassement ont été calculés et sont présentés dans le tableau du devis relatif à cette variante.

Désignation des travaux		Unité	Quantité	Prix unitaire (DA)	Montant (DA/ml)
Terrassement	**Déblai**	**m^3**	**46115**	**250**	**11528750**
	Remblai	**m^3**	**0**	**700**	**0**
Béton de propreté		**m^3**	**4359**	**8000**	**348,720,00**
Béton armé dosé 350 kg/m^3		**m^3**	**16877.13**	**32000**	**540,068,160**
Montant Total					**586,468,910**

Bien que cette variante assure une protection efficace et présente une meilleure performance hydraulique, sa réalisation demeure difficile et son coût reste très élevé, d'autant plus qu'il a été estimé sans inclure les frais liés à la démolition des zones urbaines

IV.5.2 Canal en gabion

Les matelas en gabions sont principalement utilisés pour le revêtement des berges et la protection contre l'affouillement.

Ils se présentent sous différentes dimensions, les plus couramment employées étant :

- 2,0 × 1,0 × 0,5 m ;
- 2,0 × 1,0 × 1,0 m.

Dans le cas des canaux en gabions, la mise en œuvre obéit à une technique particulière : les casiers en gabion sont disposés de manière à former une structure en escalier, assurant ainsi la stabilité des berges tout en facilitant l'écoulement.

❖ **Avantages des structures en gabion :**

- **Flexibilité :** les gabions s'adaptent aux déformations du terrain (zones d'affouillement, bajoyers, organes de dissipation d'énergie).
- **Facilité de mise en œuvre :** possibilité de construire progressivement (par exemple sur deux ans) sans risque majeur pendant les saisons pluvieuses intermédiaires.
- Surélévation possible : l'ouvrage peut être rehaussé ultérieurement sans difficulté.
- **Simplicité géométrique :** les formes utilisées sont relativement simples à concevoir et à réaliser.
- **Économie :** les ouvrages en gabions sont bien moins coûteux que leurs équivalents en béton.
- **Ouvrages déversant :** possibilité de réaliser des structures totalement déversâtes avec une efficacité hydraulique satisfaisante.

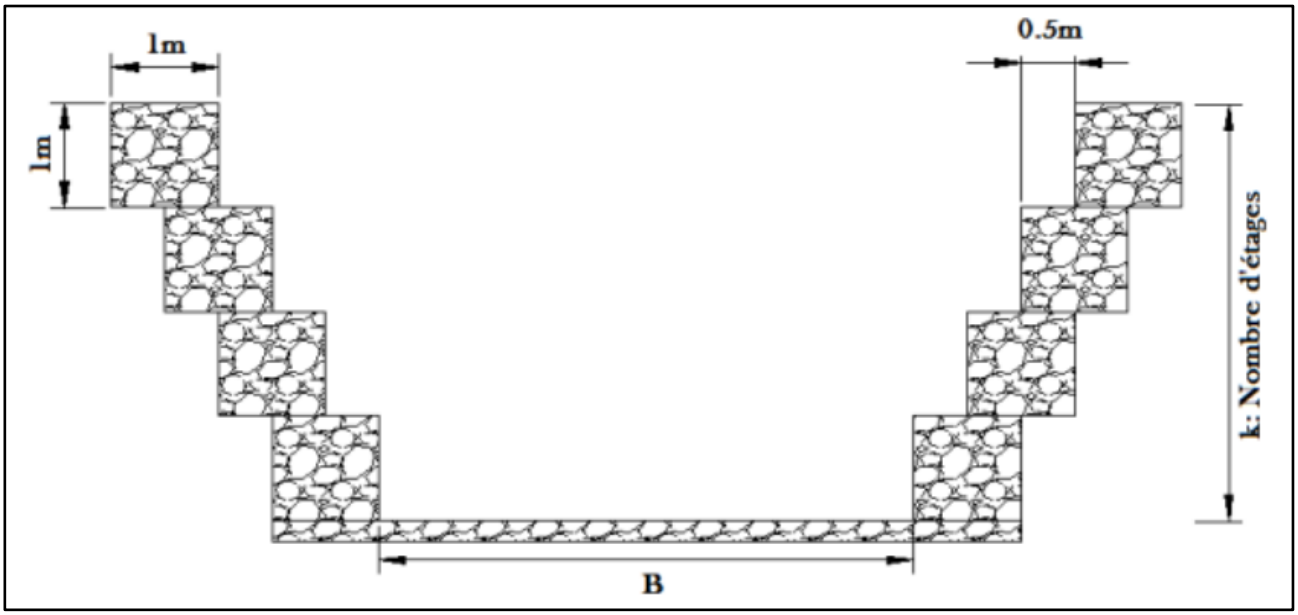


Figure IV. 39 : Coupe en travers d'un canal en gabion.

Les caractéristiques d'une section gabionnée sont les suivantes :

- **Section Sm (m2) :**

$$Sm = \frac{k(k-1)}{2} + bk \qquad (IV.10)$$

- **Périmètre Pm (m) :**

$$Pm = b + 3k - 1 \qquad (IV.11)$$

- **Rayon hydraulique Rh (m) :**

$$Rh = \frac{0.5k\,(k-1) + bk}{b + 3k - 1} \qquad (IV.12)$$

Avec

- **K :** est le nombre d'étages.

La largeur de la base est fixée au préalable, puis le nombre de niveaux nécessaires à l'évacuation du débit de crue est déterminé par calcul.

IV.5.2.1 Dimensionnement :

Les dimensions du canal en gabions ont été établies en fixant une largeur de fond *Bm*. Cette valeur a permis de déterminer, par la suite, le nombre de niveaux de gabions requis pour assurer l'écoulement d'un débit au moins égal au débit de projet.

- **Pour l'Oued Sahel 1**

Avec une largeur de fond B_1 = 80 m, une pente longitudinale i = 0,6 % et un coefficient de rugosité de Manning n = 0,03, les résultats du calcul sont présentés dans le tableau ci-dessus. :

Tableau IV. 43 : Résultats de calcul des nombres de caisses pour le canal gabionné du tronçon d'oued sahel 1

K	S	P	R	Q
6	495	97	5.10309278	3787.92487
5	410	94	4.36170213	2825.74468
4	326	91	3.58241758	1970.54261
3	243	88	2.76136364	1234.84838
2	161	85	1.89411765	636.355379

❖ **Pour l'Oued Sahel 2**

Avec une largeur de fond B_1 = 90 m, une pente longitudinale i = 0,5 % et un coefficient de rugosité de Manning n = 0,03, les résultats du calcul sont présentés dans le tableau ci-dessus. :

Tableau IV. 44 : Résultats de calcul des nombres de caisses pour le canal gabionné du trançon d'oued sahel 2

K	S	P	R	Q
6	**555**	**107**	**5.18691589**	**3919.36046**
5	**460**	**104**	**4.42307692**	**2921.20157**
4	**366**	**101**	**3.62376238**	**2035.0763**
3	**273**	**98**	**2.78571429**	**1273.85828**
2	**181**	**95**	**1.90526316**	**655.632246**

❖ **Pour l'Oued Ouakeur**

Avec une largeur de fond B_1 = 10 m, une pente longitudinale i = 1.5% et un coefficient de rugosité de Manning n = 0,03, les résultats du calcul sont présentés dans le tableau ci-dessus. :

Tableau IV. 45 : Résultats de calcul des nombres de caisses pour le canal gabionné du trançon d'oued Ouakeur

K	S	P	R	Q
6	**75**	**27**	**2.77777778**	**604.99863**
5	**60**	**24**	**2.5**	**451.172307**
4	**46**	**21**	**2.19047619**	**316.727079**
3	**33**	**18**	**1.83333333**	**201.797162**

Pour oued sahel 1et oued sahel 2 on prendre un canal de 5 caisses qui nous assure un débit supérieur au débit de dimensionnement. Et pour oued Ouakour on prend un canal de 3 caisses qui nous assure aussi un débit supérieur au débit de dimensionnement.

IV.5.2.2 Analyse des résultats de la simulation

❖ **Paramètre d'écoulement**

Tableau IV. 46 : Résultats de la simulation d'écoulement d'un canal trapézoïdale en béton armé (Source : HECRAS)

River Sta	Q Total (m^3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m^2)	Top Width (m)	Froude # Chl
632	92.92	279.00	280.78	281.08	281.95	0.015470	4.80	19.37	12.00	1.21
583.5	92.92	278.28	280.10	280.35	281.21	0.014269	4.67	19.89	12.00	1.16
535	92.92	277.55	279.35	279.63	280.50	0.015005	4.75	19.56	12.00	1.19
486.5	92.92	276.83	278.63	278.90	279.77	0.014842	4.73	19.63	12.00	1.18
438	92.92	276.10	277.90	278.18	279.05	0.014891	4.74	19.61	12.00	1.18
389.5	92.92	275.37	277.17	277.45	278.32	0.014975	4.75	19.58	12.00	1.19
341	92.92	274.65	276.45	276.73	277.60	0.014975	4.75	19.58	12.00	1.19
292.5	92.92	273.93	275.72	276.00	276.87	0.014975	4.75	19.58	12.00	1.19
244	92.92	273.20	275.00	275.28	276.15	0.014974	4.75	19.58	12.00	1.19
195.5	92.92	272.48	274.27	274.55	275.42	0.014975	4.75	19.58	12.00	1.19
147	92.92	271.75	273.55	273.83	274.70	0.014975	4.75	19.58	12.00	1.19
1800	2656.29	275.72	280.53	280.47	282.74	0.005884	6.58	403.41	88.00	0.98
1751.67	2656.29	275.43	280.25	280.18	282.46	0.005863	6.58	403.86	88.00	0.98
1703.33	2656.29	275.15	279.97	279.89	282.17	0.005833	6.57	404.52	88.00	0.98
1655	2656.29	274.86	279.70	279.61	281.88	0.005771	6.54	405.86	88.00	0.97
1606.67	2656.29	274.57	279.45	279.32	281.60	0.005640	6.50	408.78	88.00	0.96
1558.33	2656.29	274.29	279.21	279.03	281.32	0.005451	6.43	413.14	88.00	0.95
1510	2656.29	274.00	278.75	278.75	281.02	0.006159	6.68	397.71	88.00	1.00
1257	2749.22	271.20	274.60	275.71	278.50	0.015493	8.74	314.45	96.00	1.54
1207.48	2749.22	270.96	275.80	275.46	277.67	0.004844	6.06	454.04	98.00	0.90
1157.96	2749.22	270.72	275.56		277.43	0.004844	6.06	454.03	98.00	0.90
1108.44	2749.22	270.48	275.32	274.98	277.19	0.004844	6.06	454.01	98.00	0.90
1058.92	2749.22	270.24	275.08		276.95	0.004844	6.06	454.03	98.00	0.90
1009.4	2749.22	270.00	274.84	274.51	276.71	0.004844	6.06	454.02	98.00	0.90
959.88	2749.22	269.76	274.60		276.47	0.004844	6.06	454.04	98.00	0.90
910.36	2749.22	269.52	274.36		276.23	0.004844	6.06	454.03	98.00	0.90

860.84	**2749.22**	**269.28**	**274.12**	**273.79**	**275.99**	**0.004844**	**6.06**	**454.01**	**98.00**	**0.90**
811.32	**2749.22**	**269.04**	**273.88**		**275.75**	**0.004844**	**6.06**	**454.03**	**98.00**	**0.90**
761.80	**2749.22**	**268.80**	**273.64**	**273.31**	**275.51**	**0.004844**	**6.06**	**454.03**	**98.00**	**0.90**
712.28	**2749.22**	**268.56**	**273.40**		**275.27**	**0.004843**	**6.05**	**454.05**	**98.00**	**0.90**
662.76	**2749.22**	**268.32**	**273.16**		**275.03**	**0.004843**	**6.06**	**454.04**	**98.00**	**0.90**
613.24	**2749.22**	**268.08**	**272.92**	**272.59**	**274.79**	**0.004844**	**6.06**	**454.04**	**98.00**	**0.90**
563.72	**2749.22**	**267.84**	**272.68**	**272.35**	**274.55**	**0.004843**	**6.05**	**454.06**	**98.00**	**0.90**
514.20	**2749.22**	**267.60**	**272.44**	**272.11**	**274.31**	**0.004843**	**6.05**	**454.06**	**98.00**	**0.90**
464.68	**2749.22**	**267.36**	**272.20**	**271.87**	**274.07**	**0.004842**	**6.05**	**454.09**	**98.00**	**0.90**
415.16	**2749.22**	**267.12**	**271.96**	**271.63**	**273.83**	**0.004842**	**6.05**	**454.10**	**98.00**	**0.90**
365.64	**2749.22**	**266.88**	**271.72**	**271.39**	**273.59**	**0.004841**	**6.05**	**454.10**	**98.00**	**0.90**
316.12	**2749.22**	**266.64**	**271.48**	**271.15**	**273.35**	**0.004840**	**6.05**	**454.14**	**98.00**	**0.90**
266.60	**2749.22**	**266.40**	**271.24**	**270.91**	**273.11**	**0.004839**	**6.05**	**454.16**	**98.00**	**0.90**
217.08	**2749.22**	**266.16**	**271.00**	**270.67**	**272.87**	**0.004838**	**6.05**	**454.21**	**98.00**	**0.90**
167.56	**2749.22**	**265.92**	**270.76**	**270.43**	**272.63**	**0.004837**	**6.05**	**454.24**	**98.00**	**0.90**
118.04	**2749.22**	**265.68**	**270.52**	**270.19**	**272.39**	**0.004836**	**6.05**	**454.27**	**98.00**	**0.90**
68.52	**2749.22**	**265.44**	**270.28**	**269.95**	**272.15**	**0.004834**	**6.05**	**454.33**	**98.00**	**0.90**
19	**2749.22**	**265.20**	**270.03**	**269.71**	**271.91**	**0.004870**	**6.07**	**453.27**	**98.00**	**0.90**

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

❖ **Interprétation :**

L'analyse du nombre de Froude montre que l'écoulement est de type torrentiel (Fr > 1), avec une vitesse inférieure à 7 m/s, ce qui reste compatible avec la résistance hydraulique du gabion, non sujet à l'érosion dans ces conditions. Le périmètre mouillé atteint un maximum de 98 m. D'un point de vue technique, le canal trapézoïdal en gabion constitue ainsi une solution de protection fiable et durable.

❖ **Les sections en travers :**

Pour une crue centennale, le canal trapézoïdal en béton armé assure la capacité d'écoulement sans débordement, garantissant ainsi une protection hydraulique efficace.

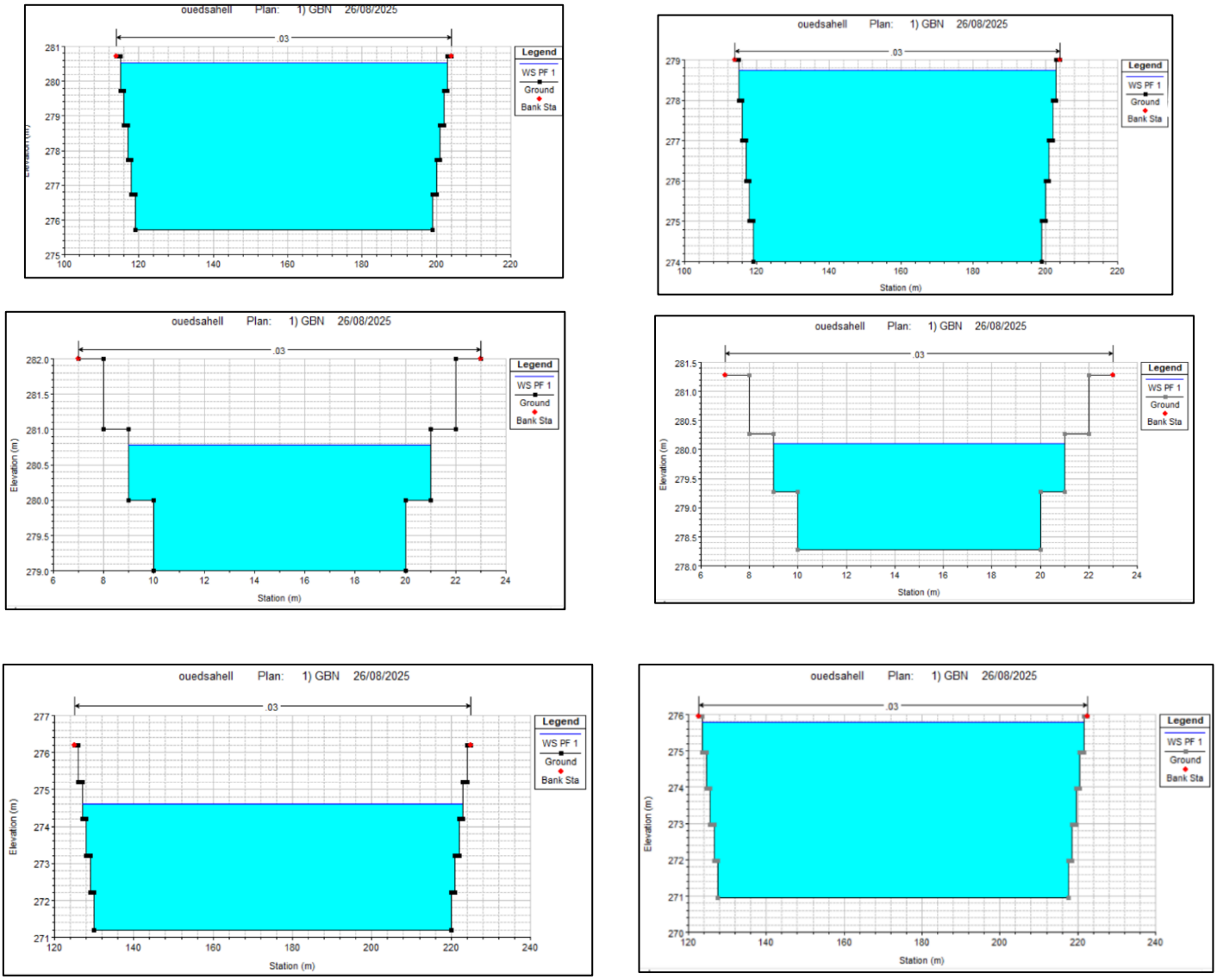


Figure IV. 40 : les sections en travers d'un canal en gabions (Source : HECRAS)

Vue en plan 3D :

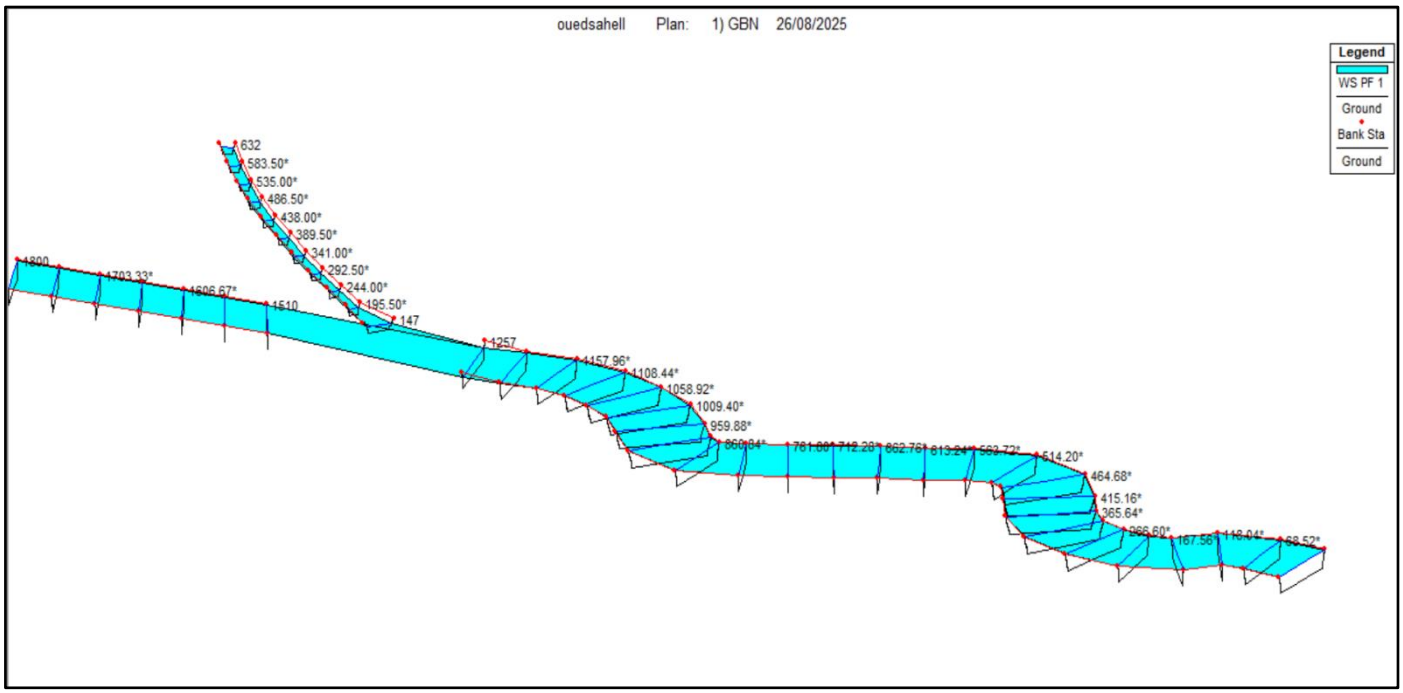


Figure IV. 41 : Vue 3D de l'oued sahel (hecras)

Carte des profondeurs :

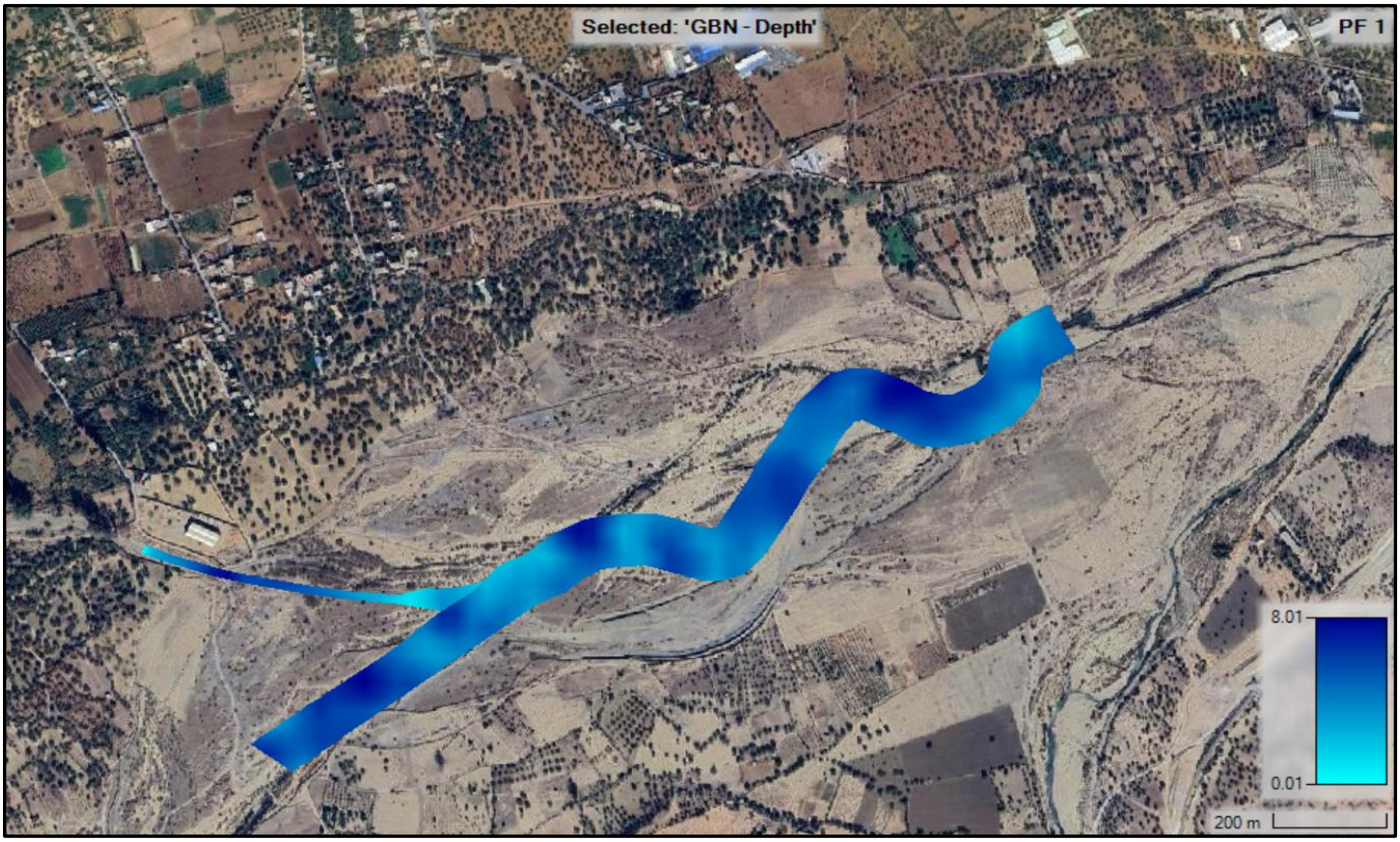


Figure IV. 42 : carte des profondeurs après aménagement

IV.5.2.3 Estimation du coût de la variante

❖ **Volume de terrassement**

L'estimation des volumes de terrassements (déblai et remblai) a été réalisée à l'aide du logiciel HEC-RAS, en superposant la section en travers du canal en gabions à celle du lit naturel de l'oued. Les résultats obtenus indiquent un volume de déblai de 90905 m³ et un volume de remblai 6825 m³.

❖ **Volume du gabion**

Dans notre étude, des gabions de dimensions (2 m × 1 m × 1 m) ont été disposés comme suit : cinq (05) étage sur une longueur de 550 m, cinq (05) étage également sur une longueur de 1300 m, et trois (03) étage sur une longueur de 668 m.

Donc le volume total de gabion et : 63 516 m^3

Tableau IV. 47 : le récapitulatif du coût de réalisation du canal en gabions

Désignation des travaux		Unité	Quantité	Prix unitaire (DA)	Montant (DA/ml)
Terrassement	Déblai	m^3	90905	250	227,262,50
	Remblai	m^3	6825	700	477,7500
Gabion		m^3	63 516	4500	285,822,000
Montant Total					313,325,750

Cette variante garantit une protection efficace de notre tronçon, tout en offrant un coût inférieur par rapport au canal trapézoïdal.

IV.5.3 Analyse comparative des deux variantes de conception

Tableau IV. 48 : comparaison entre les deux variantes

Critère	Canal trapézoïdal en béton armé	Canal trapézoïdal en gabions
Matériau	Béton armé (C25/30 ou équivalent)	Gabions remplis de pierres locales
Rugosité (Manning n)	Faible (n ≈ 0,015) → meilleure hydraulique	Moyenne (n ≈ 0,030) → écoulement ralenti
Stabilité des parois	Très bonne rigidité, mais sensible aux fissurations	Souple, s'adapte aux déformations du sol
Durabilité	Longue durée de vie (50–80 ans) si bien entretenu	Bonne durée (30–50 ans), mais dépend de la corrosion des fils
Entretien	Faible, mais réparations coûteuses	Facile, remplacement localisé des cages

Résistance aux affouillements	**Bonne avec radier en béton**	**Bonne grâce à la perméabilité et flexibilité**
Perméabilité	**Imperméable → nécessite des dispositifs de drainage**	**Perméable → réduit la pression interstitielle**
Impact environnemental	**Plus artificiel, faible intégration paysagère**	**Intégration paysagère et écologique élevée**
Coût de réalisation	**Élevé (béton + coffrage + armatures)**	**Modéré à faible (matériau local disponible)**
Délai de construction	**Plus long (coffrage, ferraillage, bétonnage, cure)**	**Plus court (assemblage simple des gabions)**

IV.6 Conclusion

À l'issue de cette étude comparative, il ressort que les deux variantes proposées – le canal trapézoïdal en béton armé et le canal trapézoïdal en gabions – présentent toutes deux une capacité hydraulique satisfaisante pour assurer la protection contre les crues. Cependant, au regard des critères technico-économiques et environnementaux, le choix de la solution en gabions s'avère le plus pertinent.

En effet, bien que le canal en béton offre de bonnes performances hydrauliques et une grande durabilité, son coût de réalisation reste particulièrement élevé, avoisinant près de cinq cent quatre-vingt-six millions de dinars algériens. À l'inverse, la variante en gabions garantit une efficacité hydraulique tout en présentant une flexibilité structurelle, une meilleure intégration environnementale et un coût global bien plus réduit, estimé à environ trois cent treize millions de dinars algériens.

Ainsi, le choix final s'oriente vers la réalisation d'un canal trapézoïdal en gabions, qui constitue une solution techniquement fiable, économiquement avantageuse et durable, tout en répondant aux exigences de protection des zones à risque le long de l'Oued Sahel.

Chapitre V

Organisation du chantier

Chapitre V : Organisation du chantier

V.1 Introduction

L'organisation d'un chantier regroupe l'ensemble des dispositions mises en place afin d'assurer l'exécution des travaux dans les meilleures conditions possibles. Elle vise principalement à réduire les coûts de production tout en offrant à l'homme et à la machine un environnement favorable, permettant ainsi d'accroître la productivité.

Une reconnaissance approfondie du site constitue une étape essentielle, car elle facilite l'élaboration d'un planning technologique adapté aux engins, en assurant leur utilisation rationnelle dans les différentes opérations. De cette manière, il est possible de répondre efficacement aux contraintes d'espace et de temps imposées par le marché. Ainsi, une bonne organisation de chantier contribue directement à la réduction du prix de revient de l'ouvrage, évitant qu'il ne devienne trop onéreux.

Cependant, la mise en œuvre de telles constructions présente souvent des difficultés importantes. Pour y faire face, et quel que soit le niveau des contraintes rencontrées, il demeure indispensable de maîtriser parfaitement les principes d'organisation du chantier.

Afin d'atteindre ces objectifs, il est nécessaire de :

- Définir avec précision les méthodes d'exécution et les modes opératoires, en intégrant les techniques modernes de construction à haut rendement ;
- Répartir et coordonner les tâches grâce à l'intervention d'une main-d'œuvre qualifiée et spécialisée ;
- Structurer efficacement les postes de travail stabilisés, en favorisant une mécanisation de plus en plus poussée ;
- Déterminer en quantité et en qualité le personnel requis, en tenant compte du coût de la main-d'œuvre, facteur déterminant du prix de revient

V.2 Rôles et responsabilités des intervenants sur chantier

Avant d'aborder le cœur du sujet relatif au chantier de réalisation d'un barrage, il est essentiel de rappeler les rôles et responsabilités des différents acteurs impliqués dans l'acte de construction. La réussite d'un tel projet repose en grande partie sur la coordination, la complémentarité et la rigueur de ces intervenants, chacun jouant une fonction précise dans le déroulement du chantier.

Les principaux acteurs sont :

- **Le maître d'ouvrage** : il représente le commanditaire du projet. C'est lui qui définit les besoins, fixe les objectifs, assure le financement et valide les choix techniques et administratifs. Il est le garant de la finalité du projet.(8)
- **Le maître d'œuvre** : il conçoit l'ouvrage, élabore les études techniques et veille à la conformité du projet avec les exigences réglementaires, économiques et environnementales. Il assure également le suivi technique du chantier.(8)
- **L'entreprise de réalisation** : responsable de l'exécution des travaux conformément aux plans et prescriptions, elle mobilise les moyens humains, matériels et financiers nécessaires. Son rôle est d'assurer la bonne progression du chantier dans les délais fixés.(8)

V.3 Définition des engins utilisés

Le matériel mobilisé pour ce chantier correspond au matériel classique des travaux publics. L'utilisation d'engins mécaniques lourds permet de réduire considérablement le coût et la durée des terrassements, tout en assurant une meilleure précision et un rendement élevé. Les principaux engins utilisés sont présentés ci-après :

❖ **Travaux de préparation**

- **Bulldozers :** employés pour dégager le terrain, enlever les obstacles naturels (rochers, souches, herbes) et préparer la plateforme.
- **Pelles mécaniques, chargeurs et camions :** assurent l'excavation initiale, le chargement et le transport des déblais hors de la zone de travail.(8)

❖ **Travaux de terrassement**

- **Pelles hydrauliques :** utilisées pour excaver et donner la forme exacte du canal ou des fouilles.
- **Niveleuses :** permettent d'égaliser le sol et de garantir une finition précise des surfaces.
- **Dozers, chargeurs et dumpers :** assurent le déplacement, le chargement et l'évacuation des matériaux excavés, en complément des camions de transport.

❖ **Travaux de compactage**

- **Compacteurs à pied de mouton :** adaptés au compactage des sols argileux ou cohésifs, afin de garantir une bonne portance.

- **Compacteurs à rouleaux lisses :** utilisés pour les couches de finition et le compactage des sols granulaires.
- **Autres types de compacteurs :** mobilisés selon la nature du terrain et la zone d'intervention, afin de consolider les berges de l'oued et éviter tout risque d'affaissement.(8)

V.4 Devis quantitatif et estimatif du projet

Le tableau suivant donne les montants de réalisation de la variante retenue :

Tableau V.49 : montants de réalisation de la variante retenue

Désignation des travaux		Unité	Quantité	Prix unitaire (DA)	Montant (DA/ml)
Terrassement	Déblai	m^3	90905	250	22, 726 ,250
	Remblai	m^3	6825	700	4 ,777, 500
Gabion		m^3	63 516	4500	285, 822 ,000
Montant Total					313 ,325 ,750
TVA (19%)					59 ,531 ,893
Montant Total TTC					372, 857, 643

Le montant total du projet revient à **372857643 DA ;** Trois cent soixante-douze millions huit cent cinquante-sept mille six cent quarante-trois dinars algériens.

V.5 La Planification :

V.5.1 Définition du planning

Le planning est l'activité qui consiste à identifier, organiser et ordonnancer l'ensemble des tâches d'un projet, tout en définissant les ressources humaines et matérielles nécessaires à leur réalisation. Autrement dit, il constitue un outil de gestion dont dispose le responsable opérationnel afin de planifier, contrôler et optimiser l'avancement des travaux, garantissant ainsi efficacité et rendement.(8)

Les principaux objectifs du planning sont les suivants :

- Installer les postes de travail ;
- Observer instantanément l'avancement des tâches ;
- Analyser les opérations à réaliser ;
- Chronométrer et contrôler la durée des activités ;
- Simplifier les méthodes de travail.

V.5.2 Techniques de la planification :

Il existe deux principales méthodes de planification à savoir :

V.5.2.1 Méthodes basées sur le réseau :

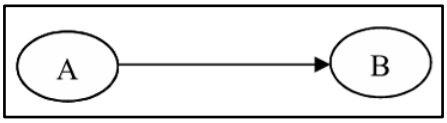
Le réseau est une représentation graphique d'un projet qui met en évidence les relations entre les différentes opérations. Il permet d'indiquer si celles-ci sont :

- Successives **(**enchaînement d'une tâche après l'autre),
- Simultanées (exécution de plusieurs tâches en parallèle),
- Convergentes (plusieurs tâches s'achevant vers une même opération).

Le réseau précise également la durée nécessaire à la réalisation de chaque opération et sert d'outil de planification et de contrôle.

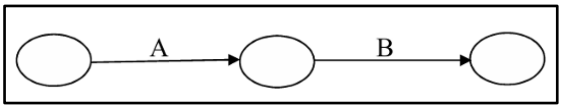
❖ **Réseau à nœuds**

L'opération est symbolisée par un nœud, tandis que les flèches indiquent la succession des opérations.(8)



❖ **Réseau à flèches**

Dans ce type de représentation, chaque opération est symbolisée par une flèche, tandis que les nœuds traduisent la succession et l'enchaînement des opérations.



V.5.2.2 Construction du réseau

La mise en place d'un réseau de planification se fait en plusieurs étapes successives :

❖ **Établissement de la liste des tâches**

Recenser de manière précise et détaillée l'ensemble des opérations nécessaires à la réalisation du projet.

❖ **Détermination des dépendances (tâches antérieures)**

Identifier les relations logiques entre les tâches, en distinguant celles qui doivent être successives, simultanées ou convergentes.

❖ **Construction des graphes partiels**

Représenter graphiquement les sous-ensembles de tâches en fonction de leurs relations.

❖ **Regroupement des graphes partiels**

Assembler les différents graphes pour former une structure globale cohérente.

❖ **Identification des tâches de début et de fin**

Déterminer les opérations qui marquent le lancement et l'achèvement du projet.

❖ **Élaboration du réseau complet**

Construire le réseau final, qui servira de base à la planification, à l'ordonnancement et au suivi du projet**.**

V.5.2.3 Méthode de calcul de C.P.M

❖ **Les paramètres de la méthode C.P.M :**

Dans la méthode C.P.M. (*Critical Path Method*), certains paramètres sont indispensables pour l'exécution et le suivi du projet. Ils sont généralement présentés sous forme d'une grille comportant six cellules, permettant de regrouper et de visualiser les informations essentielles liées à chaque tâche. (8)

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)**

Le chemin critique représente la suite des opérations déterminant la durée totale du projet (DTP). Il relie les tâches dont la marge totale est nulle, c'est-à-dire celles qui ne peuvent subir aucun retard sans allonger la durée globale du projet.

Pour identifier ce chemin, deux conditions doivent être vérifiées simultanément :

- La date de début au plus tôt est égale à la date de début au plus tard ;
- La date de fin au plus tôt est égale à la date de fin au plus tard.

V.6 Délai de construction et programme des travaux

La méthode de planification C.P.M. (Critical Path Method) a pour objectif d'optimiser le rendement du travail, tout en réduisant le délai d'exécution et les coûts du projet. La construction du réseau nécessite avant tout une identification précise et ordonnée des différentes tâches à réaliser.(8)

Le tableau suivant récapitule les principales opérations du projet ainsi que leur durée estimée

Tableau V.50 : Récapitule les principales opérations du projet ainsi que leur durée estimée

Désignation d'opération	Code	Durée (Jours)
Installation du chantier	**A**	**15**
Travaux de terrassement	**B**	**50**
Exécution de lit de gravier de l'oued	**C**	**25**
Pose de gabion	**D**	**85**
Déménagement du chantier	**E**	**15**

À partir de notre estimation, la DTP est de 190 jours.

Le diagramme de GANTT est présenté dans la figure suivante

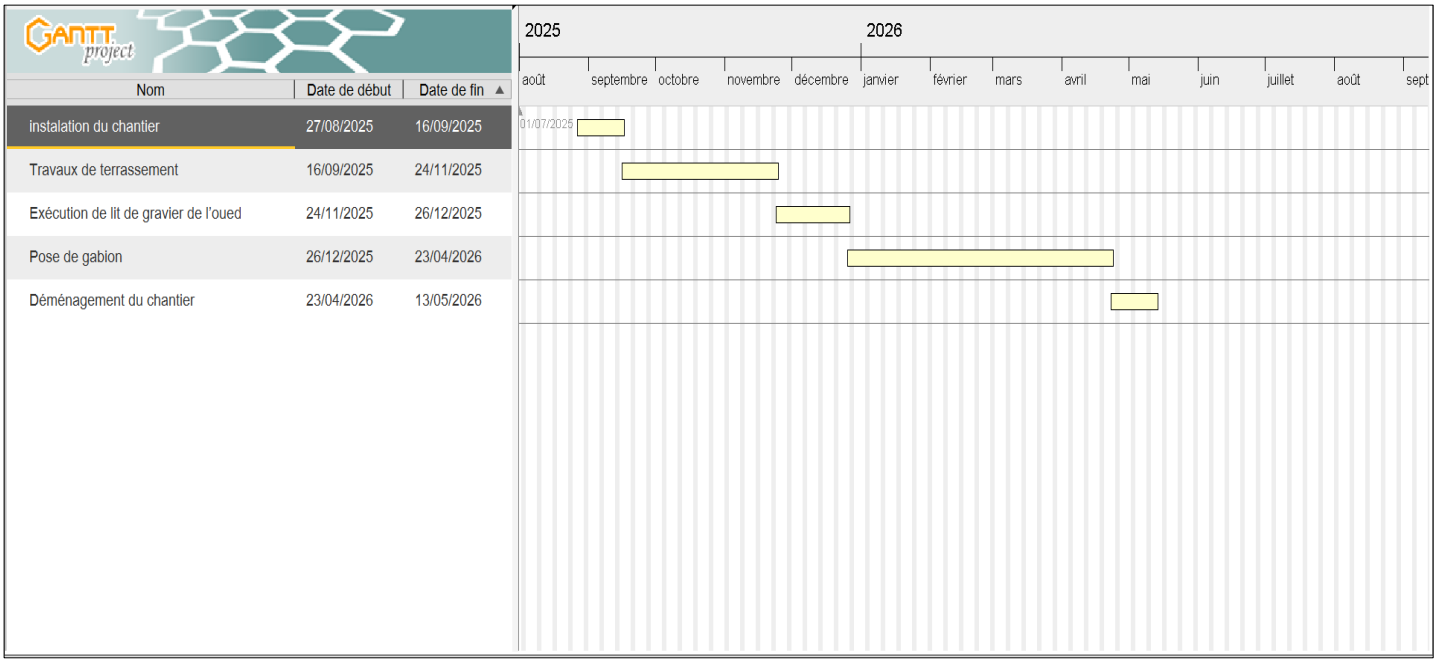


Figure V.43 : diagramme de GANTT

V.7 Conclusion :

L’organisation du chantier est une étape déterminante pour assurer la qualité, le respect des délais et la maîtrise des coûts. L’estimation financière a fixé le montant total du projet à trois cent soixante-douze millions huit cent cinquante-sept mille six cent quarante-trois dinars algériens, tandis que la planification par la méthode C.P.M. a permis de définir une durée totale de cent quatre-vingt-dix jours. Ces résultats confirment l’importance d’une gestion rigoureuse pour la réussite de l’ouvrage.

CONCLUSION GENERAL

L'étude menée dans le cadre de ce mémoire a permis de mettre en évidence la complexité et l'importance de la problématique des inondations dans le bassin versant de l'oued Sahel. À travers une démarche scientifique intégrant l'analyse hydrologique, la modélisation hydraulique et l'évaluation comparative des variantes d'aménagement, il a été possible de mieux comprendre le comportement du cours d'eau et de proposer des solutions de protection adaptées.

Les principaux enseignements tirés de ce travail peuvent être résumés comme suit :

1. Caractérisation du bassin versant : L'étude morphométrique et climatique a montré que le bassin de l'oued Sahel est particulièrement vulnérable aux crues, en raison de son relief accidenté, de ses sols imperméables et de la concentration des précipitations sur de courtes périodes.
2. Analyse hydrologique : L'évaluation fréquentielle des crues à partir des données pluviométriques et hydrométriques a permis d'estimer les débits de projet pour différentes périodes de retour. Ces résultats constituent une base indispensable pour le dimensionnement des ouvrages de protection.
3. Simulation hydraulique : L'utilisation du logiciel HEC-RAS a permis de visualiser l'extension spatiale des inondations et d'analyser le comportement de l'oued en régime non aménagé. Cette étape a été essentielle pour identifier les zones les plus exposées, notamment la zone d'activité de Chorfa.
4. Étude de variantes d'aménagement : Deux solutions principales ont été comparées : le canal en béton armé et le canal en gabions. L'analyse a montré que, bien que le béton armé offre une grande robustesse, la solution en gabions présente plusieurs avantages, notamment une meilleure intégration dans le milieu naturel, une souplesse structurelle et une durabilité en cas de variations hydrauliques.

De manière générale, il ressort de cette étude que la mise en œuvre d'un aménagement hydraulique adapté, combinée à une planification urbaine raisonnée et à une gestion durable du bassin versant, permettrait de réduire considérablement le risque d'inondation et de garantir la protection des infrastructures stratégiques de Chorfa.

Toutefois, il convient de rappeler que la protection contre les inondations ne peut se limiter à des ouvrages de génie civil. Elle doit s'inscrire dans une approche intégrée et multidisciplinaire, associant :

- La préservation et la restauration des écosystèmes naturels (reboisement, lutte contre l'érosion),
- La mise en place d'un système de surveillance et d'alerte précoce,
- Et la sensibilisation des populations locales aux risques et aux mesures de prévention.

En conclusion, ce mémoire constitue une contribution modeste mais utile à la compréhension et à la maîtrise du risque d'inondation dans le bassin de l'oued Sahel. Changement voie à des perspectives de recherche et d'action future, notamment l'intégration des scénarios de changement climatique dans la modélisation hydraulique, ainsi que l'étude de solutions innovantes basées sur les infrastructures vertes et la gestion durable des eaux pluvia

Références Bibliographiques

1. TOUMI, Rachid, BOUCHIBANE, Mebarek, REBBAS, Khellaf, ZOUGGAGHE, Fatah et VELA, Errol. Nouveaux taxons pour la Kabylie dans le bassin de l'oued Sahel. .

2. *Touaibia Bénina, 2004. Manuel Pratique d'Hydrologie. Presse Madani frères, Blida, Algérie. 166p.*

3. PERDIKARIS, John, GHARABAGHI, Bahram et RUDRA, Ramesh. Reference Time of Concentration Estimation for Ungauged Catchments. . .

4. DEGOUTTE, Gérard. *Petits barrages recommandations pour la conception, la réalisation et le suivi*. . 2002.

5. TOUMI, Abdelouaheb. Hydraulique à surface libre (cours & exercices). . octobre 2016.

6. U.S. Army Corps of Engineers, 2016a. HEC-RAS River Analysis System – User's Manual, Hydrologic Engineering Center, CPD-68, Version 5.0. 960p. .

7. DEGOUTTE, Gérard. *Diagnostic, aménagement et gestion des rivières: hydraulique et morphologie fluviales appliquées*. . 2012. 627.12

8. RAFIK, Dr MADI. ORGANISATION DES CHANTIERS. .

ANNEXES :

Annexes 1 : Valeur de rugosité de Manning

Nature des surfaces	Etats des parois			
	Parfait	Bon	Assez bon	Mauvais
A) Canaux artificiels				
Ciment lissé	0,01	0,011	0,012	0,013
Mortier de ciment	0,011	0,012	0,013	0,015
Aqueducs en bois raboté	0,01	0,012	0,013	0,014
Aqueducs en bois non raboté	0,011	0,013	0,014	0,015
Canaux revêtus de béton	0,012	0,014	0,016	0,018
Moëllons bruts	0,017	0,02	0,025	0,03
Pierres sèches	0,025	0,03	0.033	0.035
Moëllons dressés	0.013	0.014	0.015	0.017
Aqueducs métalliques à section demi-circulaire lisse	0.011	0.012	0.013	0.015
Aqueducs métalliques à section demi-circulaire plissée	0.0225	0.025	0.0275	0.030
Canaux en terre droits et uniformes	0.017	0.020	0.0225	0.025
Canaux avec pierres, lisses et uniformes	0.025	0.030	0.033	0.035
Canaux avec pierres, rugueux et irréguliers	0.035	0.040	0.045	-
Canaux en terre à larges méandres	0.0225	0.025	0.0275	0.030
Canaux en terre dragués	0.025	0.0275	0.030	0.033
Canaux à fond en terre, côtés avec pierres	0.028	0.030	0.033	0.035
B) Cours d'eau naturels				
1) Propres, rives en ligne droite	0.025	0.0275	0.030	0.033
2) Idem 1 avec quelques herbes et pierres	0.030	0.033	0.035	0.040
3) Avec méandres, avec quelques étangs et endroits peu profonds, propres	0.035	0.040	0.045	0.050
4) Idem 3, l'eau à l'étiage, pente et sections plus faibles	0.040	0.045	0.050	0.055
5) Idem 3, avec quelques herbes et pierres	0.033	0.035	0.040	0.045
6) Idem 4, avec pierres	0.045	0.050	0.055	0.060
7) Zones à eau coulant lentement avec herbes ou fosses très profondes	0.050	0.060	0.070	0.080
8) Zones avec beaucoup de mauvaises herbes	0.075	0.100	0.125	0.150

Annexes 2 :

Table du χ^2

P / γ	0.9	0.5	0.3	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01	0.001
1	0.016	0.455	1.074	1.642	2.705	3.841	5.412	6.635	10.827
2	0.211	1.386	2.408	3.219	4.605	5.991	7.824	9.210	13.815
3	0.584	2.366	3.665	4.642	6.251	7.815	9.837	11.345	16.266
4	1.064	3.357	4.878	5.989	7.779	9.488	11.668	13.277	18.467
5	1.610	4.351	6.064	7.289	9.236	11.070	13.388	15.086	20.515
6	2.204	5.348	7.231	8.558	10.645	12.592	15.033	16.812	22.457
7	2.833	6.346	8.383	9.803	12.017	14.067	16.622	18.475	24.322
8	3.490	7.344	9.524	11.030	13.362	15.507	18.168	20.090	26.125
9	4.168	8.343	10.656	12.242	14.684	16.919	19.679	21.666	27.877
10	4.865	9.342	11.781	13.442	15.987	18.307	21.161	23.209	29.588
11	5.578	10.341	12.899	14.631	17.275	19.675	22.618	24.725	31.264
12	6.304	11.340	14.011	15.812	18.549	21.026	24.054	26.217	32.909
13	7.042	12.340	15.119	16.985	19.812	22.362	25.472	27.688	34.528
14	7.790	13.339	16.222	18.151	21.064	23.685	26.873	29.141	36.123
15	8.547	14.339	17.322	19.311	22.307	24.996	28.259	30.578	37.697
16	9.312	15.338	18.418	20.465	23.542	26.296	29.633	32.000	39.252
17	10.085	16.338	19.511	21.615	24.769	27.587	30.995	33.409	40.790
18	10.865	17.338	20.601	22.760	25.989	28.869	32.346	34.805	42.312
19	11.651	18.338	21.689	23.900	27.204	30.144	33.687	36.191	43.820
20	12.443	19.337	22.775	25.038	28.412	31.410	35.020	37.566	45.315
21	13.240	20.337	23.858	26.171	29.615	32.671	36.343	38.932	46.797
22	14.041	21.337	24.939	27.301	30.813	33.924	37.659	40.289	48.268
23	14.848	22.337	26.018	28.429	32.007	35.172	38.968	41.638	49.728
24	15.659	23.337	27.096	29.553	33.196	36.415	40.270	42.980	51.179
25	16.473	24.337	28.172	30.675	34.382	37.652	41.566	44.314	52.620
26	17.292	25.336	29.246	31.795	35.563	38.885	42.856	45.642	54.052
27	18.114	26.336	30.319	32.912	36.741	40.113	44.140	46.963	55.476
28	18.939	27.336	31.391	34.027	37.916	41.337	54.419	48.278	56.893
29	19.768	28.336	32.461	35.139	39.087	42.557	46.693	49.588	58.302
30	20.599	29.336	33.530	36.250	40.256	43.773	47.962	50.892	59.703

La table donne la probabilité α pour que χ^2 égale ou dépasse une valeur donnée en fonction du nombre de degré de liberté γ