

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

NATIONAL HIGHER SCHOOL FOR
HYDRAULICS

"The MujahidAbdellah ARBAOUI"



المدرسة الوطنية العليا للري

"المجاهد عبد الله عرابوي"

ⵎⵓⵔⵉⵏⵉ ⵙⵉⵎⵓⵔⵉ ⵙⵉⵎⵓⵔⵉ ⵙⵉⵎⵓⵔⵉ ⵙⵉⵎⵓⵔⵉ

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 contre les inondations de la ville de KRISTEL
(W. d'Oran)**

Présenté par :

DRIS Ahlem

Devant les membres du jury

Nom et Prénoms	Grade	Qualité
ZEROUAL Ayoub	M.C.A	Président
TOUMI Samir	M.C.B	Examineur
BOURI Djamel Eddine	M.C.B	Examineur
LAUCHE Nassim	M.C.B	Examineur
HEBBOUCHE Abd El Hamid	M.C.A	Promoteur

Session Septembre 2024

Dédicace

Du fond du cœur, j'adresse ce travail en témoignage d'amour, de respect et de reconnaissance :

À mes chers parents, **Ali** et **Leila**, pour leur soutien indéfectible, leur patience infinie et les nombreux sacrifices qu'ils ont consentis tout au long de mes études et durant la réalisation de ce projet. Je vous dois tout ce que je suis aujourd'hui et ce que je deviendrai demain. Je m'efforcerai toujours d'être digne de votre fierté et de ne jamais vous décevoir. Que Dieu, le Tout-Puissant, vous protège, vous accorde santé, bonheur et vous garde à l'abri de tout mal.

À mes chers frères et sœur, Hanane, Anissa, Mohamed,

À mes nièces et neveux, Iyad, Iyas, Ines ,

À ma chère tante et toute sa famille : Nora, Zoheir, Sofia, Youness

À mes chers amis, Amina, Chourouk, Lamisse, Wafa, Nahida, Dounia, Sanae, Aymen,

À tous ceux qui m'ont soutenu et accompagné tout au long de cette aventure, en particulier M. Lehag de la Dre, pour leur aide précieuse.

Merci à vous tous.

Ahlem

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à exprimer ma gratitude au Dieu tout-puissant, qui m'a donné la force, le courage, et la volonté nécessaire pour mener à bien ce travail.

Je souhaite adresser mes plus sincères remerciements à mon encadrant, M. Hebbouche Abd El Hamid, dont l'accompagnement a été déterminant dans l'aboutissement de ce mémoire. Sa précieuse contribution, son expertise, ses conseils avisés et son soutien constant ont été inestimables.

Je tiens également à exprimer ma profonde reconnaissance à l'ensemble de mes professeurs, en particulier M. Zeroual, M. Ammari, ainsi qu'à tous ceux qui ont marqué mon parcours académique. Je remercie également chaleureusement les responsables et le personnel de l'École Nationale Supérieure de l'Hydraulique (ENSH) de Blida pour leur appui et leurs efforts.

J'adresse mes plus profonds remerciements et mon respect aux membres du jury, qui auront la responsabilité d'évaluer ce travail. Leur expertise et leurs observations seront une source précieuse d'enrichissement.

À mes amis, qui ont partagé les hauts et les bas de cette aventure académique, je vous remercie du fond du cœur pour votre présence, votre soutien inébranlable, et pour les moments de camaraderie qui ont rendu ce parcours bien plus agréable.

Enfin, je souhaite reconnaître l'effort que j'ai moi-même fourni. Traverser des défis aussi complexes a exigé une force intérieure et une résilience que je ne soupçonnais pas. Réaliser ce mémoire en surmontant ces obstacles a renforcé ma confiance en mes capacités. Je suis fier du chemin parcouru et de la personne que je suis devenue grâce à cette expérience. Chaque défi surmonté me pousse à aborder l'avenir avec confiance et détermination.

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

ملخص

تهدف هذه الدراسة إلى حماية مدينة كريستل (ولاية وهران)، من مخاطر الفيضانات الناجمة عن الوادي الذي يعبر المنطقة. تشمل الدراسة تحليلاً شاملاً لحوض الوادي وتقدير تدفقات الفيضانات باستخدام عدة مقاربات مختلفة. من خلال استخدام برمجيات HEC-RAS و Arc-GIS، تم إجراء محاكاة هيدروليكية لرسم خرائط المناطق المعرضة للفيضانات وتحديد المناطق الأكثر عرضة للخطر. بعد تحليل مقارن لخيارات التهيئة، تم اختيار إنشاء قناة مستطيلة من الخرسانة المسلحة كأفضل حل من حيث الجدوى التقنية والاقتصادية. بالإضافة إلى ذلك، تم اقتراح إضافة ثلاثة مخفضات للطاقة لتنظيم سرعة المياه وتجنب ترسب الأوحال في الميناء الصغير لكريستل. تُظهر المحاكاة أن هذا الإجراء سيضمن حماية السكان والبنية التحتية الحضرية والميناء. كما يمكن أن تكون هذه الدراسة مرجعاً للباحثين والمهنيين المهتمين بإدارة مخاطر الفيضانات، حيث توفر بيانات قيمة وأساليب منهجية لدراسة الأحداث الهيدرولوجية القصوى.

الكلمات المفتاحية: كريستل، فيضانات، مخفضات الطاقة، قناة من الخرسانة المسلحة، Arc-GIS، HEC-RAS.

Résumé :

Cette étude a pour objectif de protéger la ville de Kristel (wilaya d'Oran), contre les risques d'inondations liés au cours d'eau traversant la région. Elle inclut une analyse approfondie des bassins versants ainsi qu'une estimation des débits de crue selon plusieurs approches distinctes. À l'aide des logiciels HEC-RAS et ArcGIS, des simulations hydrauliques ont permis de cartographier les zones inondables et d'identifier les secteurs à risque. Après une analyse comparative des solutions d'aménagement, la construction d'un canal rectangulaire en béton armé a été retenue comme option optimale, en raison de sa viabilité technique et économique. De plus, l'ajout de trois dissipateurs d'énergie a été proposé pour réguler la vitesse de l'eau et éviter l'envasement du petit port de Kristel. Les simulations montrent que cette mesure assurera la protection des habitants, des infrastructures urbaines et du port. Cette étude pourrait également servir de référence pour les chercheurs et les professionnels intéressés par la gestion des risques d'inondation, en fournissant des données précieuses et des méthodologies pertinentes pour l'analyse des événements hydrologiques extrêmes.

Mots Clés : Kristel, Inondations, Canal en béton armé, Dissipateurs d'énergie, HEC-RA, Arc-GIS.

Abstract:

This study aims to protect the city of Kristel (Oran province), from flood risks caused by the stream that crosses the region. It includes a comprehensive analysis of watersheds and an estimation of flood flows using several different approaches. Using HEC-RAS and Arc-GIS software, hydraulic simulations were carried out to map flood-prone areas and identify high-risk zones. Following a comparative analysis of development options, the construction of a rectangular reinforced concrete channel was selected as the optimal solution, due to its technical and economic feasibility. Additionally, three energy dissipators were proposed to regulate water speed and prevent sedimentation in Kristel's small port. The simulations indicate that this measure will ensure the safety of residents, urban infrastructure, and the port. Furthermore, this study could serve as a reference for researchers and professionals interested in flood risk management, providing valuable data and relevant methodological approaches for studying extreme hydrological events.

Keywords: Kristel, Flooding, Reinforced concrete channel, Energy dissipators, HEC-RAS, Arc-GIS.

Sommaire

Introduction générale	1
I Présentation de la zone d'étude.....	3
Introduction	3
I.1 Situation géographique	3
I.2 Topographie.....	4
I.3 Caractéristiques climatiques.....	4
I.3.1 Evapotranspiration.....	5
I.3.2 Température.....	7
I.3.3 Humidité relative	7
I.3.4 Insolation.....	8
I.4 Sismicité.....	9
II Etude hydrologique	12
Introduction	12
II.1 Caractéristiques hydrographiques du bassin versant	12
II.1.1 Morphométrie	13
II.1.2 Caractéristiques morphométriques	13
II.1.3 Caractéristiques du relief.....	14
II.1.4 Temps de Concentration	20
II.1.5 Vitesse de ruissellement.....	22
II.1.6 Pluie de durée t_c	22
II.1.7 Profil en long de l'oued.....	23
II.2 Précipitations	24
II.2.1 Les précipitations mensuelles.....	24
II.2.2 Les précipitations annuelles :	26
II.2.3 Les précipitations maximales journalières	27
II.3 Ajustement des pluies maximales journalières.....	28
II.3.1 Le logiciel HYFRAN	28
II.3.2 Test de validité d'un ajustement.....	29
II.3.3 Les lois d'ajustement	29
II.3.3.6 Comparaison entre les cinq lois	38
II.4 Pluies de courte durée I.D.F (courbes : Intensité-Durée-Fréquence)	38
II.5 Calcul des débits de crue.....	43
II.5.1 Estimation des débits de crues.....	43

II.5.2	Estimations empiriques des débits de pointe et des hydrogrammes de crue.....	43
II.5.3	Hydrogramme de crue.....	46
II.5.4	Détermination du volume de la crue.....	47
II.6	Calcul des apports solides	49
II.6.1	Aspect théorique.....	49
II.6.2	Les différents aspects du transport solide	51
II.6.3	Estimation du transport solide	51
	Conclusion.....	56
III	Modélisation du cours d'eau non aménagé	58
	Introduction	58
III.1	Généralités	58
III.1.1	Écoulements à surface libre.....	58
III.1.2	Types d'écoulement.....	60
III.1.3	Régime d'écoulement	62
III.1.4	Propriétés des canaux.....	63
III.1.5	Conditions de l'Écoulement Uniforme.....	67
III.1.6	Formules de Calcul.....	67
III.2	Diagnostic et modélisation du cours d'eau non Aménagé.....	68
III.2.1	Modélisation d'écoulement	68
III.2.2	Présentation du Logiciel HEC-RAS	68
III.2.3	Étapes de la Modélisation d'Écoulement avec HEC-RAS.....	69
III.2.4	Les zones inondables :	75
III.3	La cartographie du risque d'inondation :.....	78
III.3.1	Carte des profondeurs :	79
III.3.2	Carte des vitesses.....	80
	Conclusion.....	80
IV	Etude des variantes d'aménagement	82
	Objet de l'étude.....	82
IV.1	Généralités sur l'instabilité des oueds	82
IV.1.1	Écoulement d'eau en surface libre.....	82
IV.1.2	Erosion des berges	83
IV.2	Les aménagements de protection contre les inondations	84
IV.2.1	Protection directe (Rapprochées).....	84
IV.2.2	Protection indirecte (Eloignées)	85

IV.2.3	Differents types de sections de canaux	86
IV.3	Etude des variantes.....	86
IV.3.1	Choix du débit de projet.....	87
IV.3.2	Choix des Paramètres Hydrauliques	87
IV.3.3	Variante 1 : Canal rectangulaire en béton armé	88
IV.3.4	Variante 2 : Canal trapézoïdale en enrochement	93
IV.3.5	Variante 3 : Canal trapézoïdale en béton armé.....	98
IV.3.6	Variante adoptée pour l'aménagement de l'oued Kristel.....	102
IV.4	Conclusion	102
V	Etude détaillée de la variante choisie	104
	Introduction	104
V.1	Details de la variante adoptée.....	104
V.2	Section du canal :.....	105
V.3	Canal à projetés	105
V.4	Calcul hydraulique du canal	106
V.4.1	Canal d'évacuation des eaux pluvial	106
V.4.2	Calcul du convergent :	110
V.4.3	Dissipateur d'énergie	111
V.5	La longueur du convergent et divergent :	115
V.6	Modélisation hydraulique et simulation.....	117
V.7	Les ouvrage de traversés :	120
V.7.1	Les dalots	120
V.7.2	Types de dalots.....	120
V.7.3	Processus de montage des dalots.....	121
V.7.4	Dimensionnement des ouvrages traversé :.....	122
VI	Organisation de chantier.....	130
	Introduction	130
VI.1	Rôles et responsabilités des intervenants sur chantier.....	130
VI.2	Installations du chantier.....	131
VI.2.1	Installations destinées au personnel.....	131
VI.2.2	Installations destinées au stockage des matériaux	132
VI.3	Les moyens de chantier	133
VI.3.1	Les moyens humains.....	133
VI.3.2	Les moyens matériels.....	133

VI.3.3	Installations destinées aux engins :	134
VI.4	Devis quantitatif et estimatif du projet	134
VI.5	La Planification du Projet	135
VI.5.1	Définition de la Planification	135
VI.5.2	Activités de Planification	135
VI.5.3	Étapes de Planification.....	136
VI.5.4	Méthodes de Planification.....	137
VI.5.5	Définition des Opérations et Durées.....	138
VI.5.6	Succession des tâches :	138
VI.5.7	Calcul des dates de début et de fin au plus tôt (DCP et DFP).....	139
VI.5.8	Calcul des dates de début et de fin au plus tard (DCPP et DFPP).....	139
VI.5.9	Calcul des marges totales (MT).....	139
VI.5.10	Chemin critique.....	139
	Conclusion générale.....	141

Liste des tableaux

Tableau I-1 : distribution moyenne mensuelle de l'évaporation.....	6
Tableau I-2 : Températures enregistrées à la station d'Oran (°C).....	7
Tableau I-3 : Répartition mensuelle de l'humidité relative de l'air en %.....	7
Tableau I-4 : Insolation moyenne mensuelle	8
Tableau II-1 : Distribution de la superficie en fonction de l'altitude dans les limites du Bassin versant d'Oued KRISTEL.....	16
Tableau II-2 : Détermination de la pente de Roche Ip	18
Tableau II-3 : Evaluation de la pente moyenne du bassin versant d'Oued KRISTEL.....	19
Tableau II-4 : Estimation du temps de concentration (tc, heures)	22
Tableau II-5 : Estimation de l'averse (mm) de durée tc.....	23
Tableau II-6 : Les altitudes en fonction de la distance cumulée	23
Tableau II-7 : Caractéristiques géomorphologiques du bassin versant d'Oued kristel.....	24
Tableau II-8 : Répartition mensuelle moyenne interannuelle de la précipitation	24
Tableau II-9 : Caractéristiques de la pluviométrie annuelle	26
Tableau II-10 : Les précipitations maximales journalières (station d'ORAN).....	27
Tableau II-11 : Tableau représente les cinq lois d'ajustement	29
Tableau II-12 Estimation des caractéristiques statiques des pluies maximales extrêmes(Loi de loi GUEMBEL)	30
Tableau II-13 : Résultats de l'ajustement à la loi de GEV	31
Tableau II-14 : Résultats de l'ajustement à la loi de Log normal 3 paramétrique	32
Tableau II-15 : Résultats de l'ajustement à la loi de GAMMA	34
Tableau II-16 : Résultats de l'ajustement à la loi de GUEMBEL.....	35
Tableau II-17 : Résultats de l'ajustement à la loi de LogNormale	37
Tableau II-18 : Quantiles des pluies maximales journalières	37
Tableau II-19 : Pluie de courte durée (mm).....	40
Tableau II-20 : Intensité des pluies It (mm/h)	40
Tableau II-21 : valeur de γ en fonction du bassin versant	45
Tableau II-22 : Estimation du débit de pointe fréquentiel Qmax,F (Formules empiriques)	46
Tableau II-23 : Estimation du volume de crue de l'oued KRISTEL	48
Tableau II-24 : Hydrogrammes de crues fréquentielles du bassin versant d' Oued KRISTEL.....	48
Tableau II-25 : Différents types de granulats	50
Tableau II-26 : Intensité du processus d'érosion	54
Tableau II-27 : Les données pour calculer le taux d'abrasion	55
Tableau II-28 : Estimations des taux d'abrasion (Tonnes/km ² /an)	55
Tableau III-1 : Valeurs de rugosité selon le lit	66
Tableau III-2 Principaux paramètre hydraulique de l'oued Krichtel.....	76
Tableau IV-1 : Les débits maximales du oued Kristel pour différentes période de retour.....	87
Tableau IV-2 : Valeurs de rugosité correspondantes au type de revêtement.....	88
Tableau IV-3 : Dimensions du canal rectangulaire	88
Tableau IV-4 : Dimensionnement des 6 tronçons restants via Flowmaster.....	90
Tableau IV-5 : Dimensions du canal rectangulaire en béton armé	90
Tableau IV-6 : Conception du canal en béton.....	91
Tableau IV-7 : Calcul des sections des bétons de la variante 1	92
Tableau IV-8 : Calcul des volumes de béton	92

Tableau IV-9 : Estimation du cout de la variante 1	92
Tableau IV-10 : Les résultats des tronçons restant via Flow Master	94
Tableau IV-11 : Dimensionnement du canal trapézoïdal en béton armé.....	95
Tableau IV-12 : Sections d'encrochement de la variante 2.....	96
Tableau IV-13 : Volumes d'encrochement de la variante 2.....	96
Tableau IV-14 : sections du géotextile de la variante2.....	97
Tableau IV-15 : Devis quantitatif estimatif de la variante 2.....	97
Tableau IV-16 : Les résultats des tronçons restant via Flow Master	99
Tableau IV-17 : Dimensionnement du canal adapté.....	99
Tableau IV-18 : Sections des bétons de la variante3.....	100
Tableau IV-19 : Volume des bétons	101
Tableau IV-20 : Cout de la variante 3	101
Tableau V-1 : Les dimensions du canal	106
Tableau V-2 : Calcul la hauteur critique de coursier n°01	108
Tableau V-3 : Calcul la hauteur critique de coursier n°02.....	108
Tableau V-4 : Calcul la hauteur critique de coursier n°03.....	108
Tableau V-5 : Calcule la hauteur normale (Yn) de coursier n°01	109
Tableau V-6 : Calcule la hauteur normale (Yn) de coursier n°02	109
Tableau V-7 : Calcule la hauteur normale (Yn) de coursier n°03	109
Tableau V-8 : les résultats des calculs hydrauliques du coursier	111
Tableau V-9 : Calculs hydraulique pour les trois bassins de dissipation de type I.....	115
Tableau V-10 :Principaux parametres hydraulique d'oued Kristel après aménagement	119
Tableau VI-1 : Le devis des différents travaux de l'aménagement des oueds de la zone d'étude	135
Tableau VI-2 : Paramètres de la méthode CPM.....	138
Tableau VI-3 Définition des opérations et durées	138
Tableau VI-4 : Calcul des dates de début et de fin au plus tôt (DCP et DFP)	139
Tableau VI-5 : Calcul des dates de début et de fin au plus tard (DCPP et DFPP).....	139
Tableau VI-6 : Calcul des marges totales (MT).....	139

Liste des figures :

Figure I-1 : Situation Géographique de la ville de KRISTEL.....	4
Figure I-2 : Oued KRISTEL traverse la ville de Kristel.....	4
Figure I-3 : Evaporation moyenne mensuelle à la station d’Oran.....	6
Figure I-4 : La carte des évapotranspirations potentielles du nord de l’Algérie au 1/500.000.....	6
Figure I-5 : Températures mensuelles dans la région.....	7
Figure I-6 : Humidité relative moyenne mensuelle à la station d’Oran.....	8
Figure I-7 : Insolation moyenne mensuelle à la station d’Oran.....	9
Figure I-8 : Carte de zonage sismique du territoire national.....	10
Figure II-1 : Carte hypsométrique du bassin versant. AUTOCAD.....	15
Figure II-2 : Courbe Hypsométrique du bassin versant de l’oued KRISTEL.....	16
Figure II-3 : Carte topographique du bassin versant.....	17
Figure II-4 : Profil en long du cours d'eau principale.....	23
Figure II-5 : La répartition moyenne mensuelle des précipitations.....	25
Figure II-6 : Variabilité de la pluie mensuelle.....	25
Figure II-7 : Probabilité au non dépassement (Pluies Annuelles).....	27
Figure II-9 : Histogramme de la pluie annuelle.....	27
Figure II-11 : Histogramme des pluies maximales journalière.....	28
Figure II-12 : Probabilités au non-dépassement (GEV).....	30
Figure II-13 : Probabilités au non-dépassement (Log normal 3 Param).....	32
Figure II-14 : Probabilités au non-dépassement à la loi de GAMMA.....	33
Figure II-15 : Probabilités au non-dépassement à la loi de (GUEMBEL).....	35
Figure II-16 : Probabilité au non-dépassement LogNormale.....	36
Figure II-17 : Probabilités au non-dépassement (Comparaison entre les lois).....	38
Figure II-18 Hauteur – durées – Fréquence (H.D.F).....	40
Figure II-19 : Courbe Hauteur Durée Fréquence.....	41
Figure II-20 Intensité – Durée – fréquence.....	42
Figure II-21 : Courbe des intensité fréquentielles.....	42
Figure II-22 : Hydrogramme de crues fréquentielles (oued Kristel).....	48
Figure III-1 : Canal naturel.....	59
Figure III-2 : Canaux artificiels a ciel ouvert.....	60
Figure III-3 : Représentation du gradient hydraulique.....	65
Figure III-4 : Interface utilisateur du logiciel HEC-RAS.....	68
Figure III-5 : TIN de oued Kristel.....	70
Figure III-6 : Modèle de Terrain et Sections Transversales dans RAS Mapper.....	70
Figure III-7 : Importation des données géométriques dans HEC-RAS.....	71
Figure III-8 : Introduction des valeurs de Manning (terrain naturel).....	71
Figure III-9 : Introduction du débit de projet (crues centennales).....	72
Figure III-10 : Conditions aux limites.....	72
Figure III-11 : Fin de simulation.....	73
Figure III-12 : Vue 3D de l’oued.....	73
Figure III-13 :Profils en long.....	74
Figure III-14 : Sections 19	Figure III-15 : Sections 620.....
Figure III-16 : Representation en 3D de oued Kristel.....	75
Figure III-17 : Courbe de tarage de oued Kristel.....	76

Figure III-18 : carte de vitesse d'eau pour la periode de retour de 100ans	80
Figure IV-1 : relation entre vitesse /dépôt.....	83
Figure IV-2 : Profil du cours d'eau	83
Figure IV-3 : Différents types de sections de canaux	86
Figure IV-4 : Canal rectangulaire	88
Figure IV-5 : dimensionnement du premier tronçons du canal via Flowmaster	89
Figure IV-6 : Canal rectangulaire en béton.....	91
Figure IV-7 : Profils en travers d'un canal rectangulaire pour une crue de 100ans pour oued kristel	91
Figure IV-8 : Canal trapézoïdale en enrochement	93
Figure IV-9 : résultats du tronçon 1 par Flow Master	94
Figure IV-10 : Section en travers des stations 843 et 372	95
Figure IV-11 : Canal en enrochement.....	95
Figure IV-12 : Illustration du déblai et remblai.....	97
Figure IV-13 : Canal trapézoïdal	98
Figure IV-14 : résultat du canal trapézoïdal via Flow Master.....	98
Figure IV-15 : Profiles en travers d'un canal trapézoïdale en beton armé ppour une crue centennale de oued Kristel (Station 793.6 et 818.4)	100
Figure V-1 : Profil général du canal	106
Figure V-2 : Dissipateur de type I pour $2.5 < Fr < 4.5$	112
Figure V-3 : Dissipateur de type II pour $Fr > 4.5$	113
Figure V-4 : Dissipateur de type III pour $Fr > 4.5$	113
Figure V-5 : Schéma d'un convergent	116
Figure V-6 : Section en travers de la station 843.....	118
Figure V-7 : vue en 3D de oued Kristel	118
Figure V-8 : Debit vehiculer par le dalot (obtenue via flow master).....	123
Figure V-9 : Simulation du dalot par HEC RAS	123
Figure V-10 : Debit vehiculer par le dalot elliptique (Obtenue via FLOWMASTER)	124
Figure V-11 :Simulation du dalot via HECRAS	125
Figure V-12 : Dalot elliptique sur terrain.....	125
Figure V-13 Dimensionnement des dalots et leur simulation	126
Figure V-14 Vue 3D de oued Kristel avec les dalots (via HECRAS)	127
Figure VI-1 : Relation entre les personnes du chantier.....	131

Liste des planches :

Planche n°1 : Plan de masse.

Planche n°2 : Profil en long.

Planche n°3 : Profil en travers après aménagement.

Planche n°4 : Bassin de dissipation type I.

Introduction générale

Introduction générale

L'Algérie est l'un des pays confrontés aux phénomènes de crues et d'inondations qui se manifestent de façon catastrophique constituant ainsi une contrainte majeure pour le développement économique et social.

Les régions dans l'Algérie, en générale, en connaissent ces derniers années , en relation avec les perturbations climatiques actuels, des changements notables dans le régime hydrologique des oueds de la région ,plusieurs inondations générées par des crues éphémères de ces oueds ont causés des dégâts humains et matériels considérables .Aussi la prise en considération de des catastrophes hydro climatiques naturelles a conduit l'état à la programmation d'un grand nombre de projets d'aménagement de protection des centres urbains et économiques contre les inondations.

Les systèmes d'évacuation des eaux de crue doivent être intégrés dans un aménagement global qui prendra en considérations la protection de l'ensemble du tissu urbain.

Cette protection s'articule autour d'ouvrages capables de prendre en charge les eaux de crue et les évacuer.

Dans les zones urbaines, et en absence d'aménagements adéquats pour la protection de ces zones, les crues peuvent être un danger à craindre.

A cet effet ; et afin de protéger la ville de KRISTEL wilaya d'Oran; une étude complète devait être élaboré afin de remédier à toute anomalie pouvant être un danger pour cette zone.

Les inondations provoquant des dégâts humains et matériels qui peuvent être catastrophiques, surtout dans les zones urbaines, il faut faire certains aménagements pour amortir ces dégâts.

L'étude de protection consiste à protéger le lit des oueds et les berges par des dispositifs qui supporteront tout risque d'érosion.

L'objectif général de ce travail est l'aménagement du cours d'eau d'oued KRISTE.

Chapitre 01 : Présentation de la Zone d'étude

I Présentation de la zone d'étude

Introduction

Les risques d'inondations résultent de l'interaction complexe de plusieurs composantes, notamment les facteurs topographiques, géologiques, hydrogéologiques et climatiques d'une région donnée. Pour mener à bien notre étude sur la protection contre les inondations dans cette zone, il est essentiel d'en présenter en détail les caractéristiques. Ce chapitre nous fournira des informations précieuses sur le terrain d'un point de vue topographique, géologique et hydrogéologique, ainsi que sur les conditions climatiques de la région.

I.1 Situation géographique

La wilaya d'Oran, située à 432 km de la capitale Alger, se trouve au nord-ouest de l'Algérie, en bordure du golfe d'Oran. Elle est dominée par la montagne de l'Aïdour à l'ouest et le plateau de Moulay Abdelkader al-Jilani au sud. Territorialement, la wilaya est délimitée au nord par la mer Méditerranée, au sud-est par la wilaya de Mascara, à l'ouest par la wilaya d'Aïn Témouchent, à l'est par la wilaya de Mostaganem, et au sud par la wilaya de Sidi Bel Abbès.

Le centre de la ville de KRISTEL est situé à 9.5 km à la commune de GDYEL. Il s'explique par sa position stratégique aux croisements des voies de communications importantes CW n°27 et CW n°75. Il est traversé par un oued appelé Oued de KRISTEL.

La commune de KRISTEL est délimitée comme suit :

- Au nord par le méditerranée
- Au Sud Est par la commune de GDYEL
- À l'ouest par la wilaya d'ORAN
- À l'est par la daïra d'ARZEW



Figure I-1 : Situation Géographique de la ville de KRISTEL

I.2 Topographie

Le bassin est situé entre le massif de djebel Bou Aïchem et djebel de Kristel, les monts d'Oued Kristel sont formés en grande partie de chaînons et de collines qui relèvent progressivement du nord-ouest au sud-est. Le relief est dans l'ensemble aéré et peu élevé.

En outre, l'inclinaison du relief est un facteur important en ce qui concerne son aptitude à l'érosion. Cependant, le degré d'inclinaison dépend de la roche en place, des sols, du ravinement, des pluies et de l'activité de l'homme.



Figure I-2 : Oued KRISTEL traverse la ville de Kristel

I.3 Caractéristiques climatiques

L'étude hydroclimatologique du secteur d'étude, qui comprend la région de Kristel dans la wilaya d'Oran, s'est appuyée sur des données climatiques provenant de plusieurs stations représentatives situées à proximité, en particulier la station d'Oran. Cette station, située au centre du bassin versant,

dispose de données pluviométriques (cumuls et valeurs maximales extrêmes) relativement complètes et étalées sur une longue période d'observation.

Ces données, notamment celles concernant la pluviométrie maximale extrême et les précipitations mensuelles, sont dans l'ensemble régulières et couvrent une période assez longue, de 1992 à 2021.

Le climat de la région de Kristel se caractérise par des étés chauds et secs peu orageux, ainsi que des hivers doux et humides. Il peut être qualifié de méditerranéen semi-aride. D'un point de vue climatique, la partie septentrionale de la région d'étude s'inscrit dans les régions méditerranéennes, à l'exception de certaines situations spécifiques comme les hauts plateaux méridionaux qui présentent un caractère plus aride

I.3.1 Evapotranspiration

La combinaison des précipitations et des températures place l'ensemble du Tell occidental dans le domaine méditerranéen semi-aride. Le bilan hydrique annuel des précipitations et de l'évapotranspiration potentielle (ETP) est généralement négatif, ce qui limite les possibilités de boisement ainsi que les rendements céréaliers hors irrigation. La méthode de Thornthwaite d'évaluation de l'évapotranspiration potentielle est une méthode empirique qui a été établie par ajustement statistique en 1951.

Il est souvent aisé de calculer l'ETP par cette formule car elle nécessite des données climatiques relativement simples à acquérir. La formule de Thornthwaite est la suivante :

$$ETP = 16 \left(10 \left(\frac{T}{I} \right)^a F(\lambda) \right) \quad I-1$$

Avec :

T: Température moyenne de la période considérée en °C .

I : Indice thermique annuel qui est la somme des 12 indices thermiques mensuels i .

a : est une fonction complexe.

Et :

$$ETP = 16 \left(10 \left(\frac{T}{I} \right)^a F(\lambda) \right) \quad I-2$$

$$I = \left(\frac{T}{5} \right)^{1.514} \quad I-3$$

La distribution moyenne mensuelle de l'évaporation est donnée comme suit :

Tableau I-1 : distribution moyenne mensuelle de l'évaporation

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Juil	Août	Année
ETP moy (mm)	139.9	101.9	73.7	61.1	63.9	69	87.6	127	137	154	165	168	1347.6
ETP (%)	10.381	7.562	5.47	4.53	4.74	5.12	6.5	9.43	10.1	11.4	12.2	12.5	100

L'examen de ce tableau montre que l'évaporation est importante pendant la période allant du mois de Mai à Septembre et elle est plus faible du mois de Novembre à Janvier. Le cumul annuel avoisine 1347.6 mm.

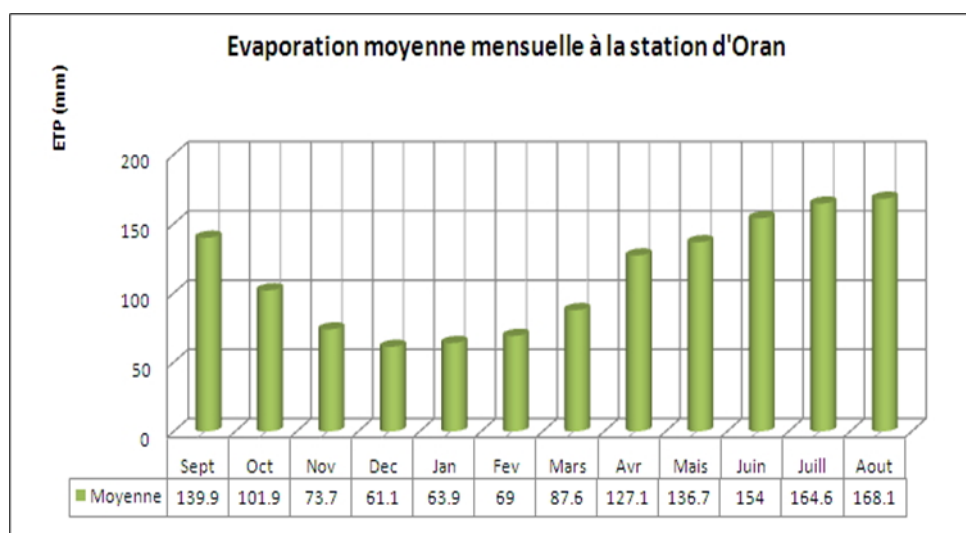


Figure I-3 : Evaporation moyenne mensuelle à la station d'Oran

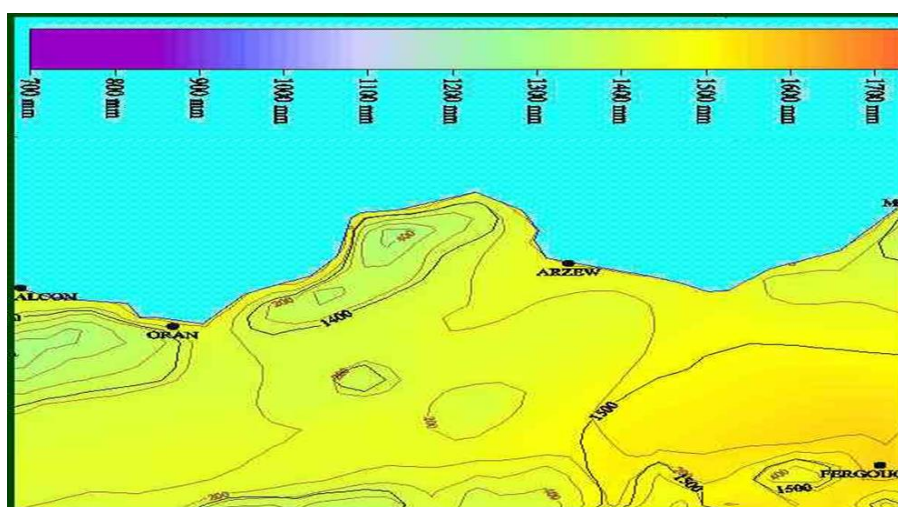


Figure I-4 : La carte des évapotranspirations potentielles du nord de l'Algérie au 1/500.000

I.3.2 Température

Le bassin versant de l'oued KRISTEL est caractérisé par une température sèche et chaude de mai à septembre et par une température relativement humide d'octobre à Avril figure (7). A titre d'exemple le tableau (6) illustre les valeurs de températures enregistrées à la station d'Oran.

Tableau I-2 : Températures enregistrées à la station d'Oran (°C)

Tmoy (C°)	Mois	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avr	Mais	Juin	Juill	Aout	Moy Ann
	Moyenn e		22.89	19.56	15.00	12.18	11.10	12.13	14.11	15.93	18.84	22.66	25.06	25.97

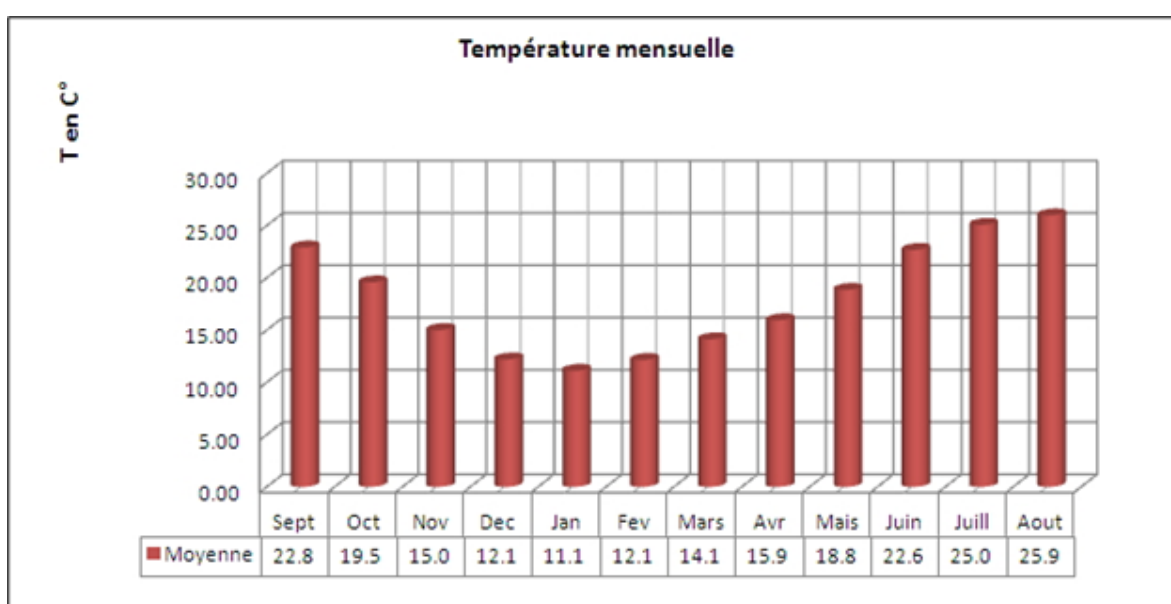


Figure I-5 : Températures mensuelles dans la région

Commentaire :

- Des minimas de température peuvent être enregistrés au mois de janvier 11.1 °C et 12.13°C et mois de février.
- Des maximas de température peuvent être enregistrés au mois d'Aout 25.97 °C et mois de Juillet 25.06 °C.

I.3.3 Humidité relative

Tableau I-3 : Répartition mensuelle de l'humidité relative de l'air en %

Mois	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avr	Mais	Juin	Juill	Aout	Moy Ann
Humidité relative %	65.7	70.7	77.3	78.7	77.3	75	74	68	68.7	67	66.3	65.7	71.2

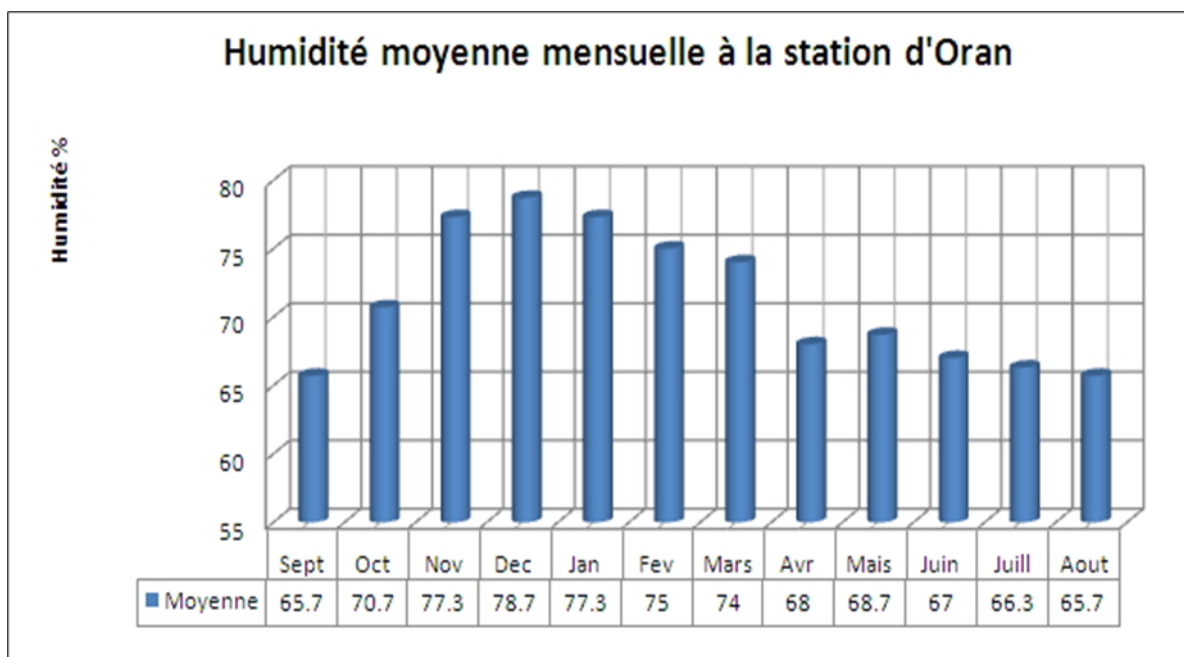


Figure I-6 : Humidité relative moyenne mensuelle à la station d'Oran

Commentaire : L'examen du graphique montre que l'humidité relative moyenne décroît de janvier (77,3 %) jusqu'à septembre (65,7 %) et remonte de manière presque symétrique jusqu'au mois de décembre.

I.3.4 Insolation

La quantité d'heure d'ensoleillement dans la région d'étude est assez élevée, la moyenne annuelle est de 8,3 heures par jours. L'ensoleillement annuel total est de 3040 heures réparties entre 1289 heures en hiver et 1751 heures en été.

Tableau I-4 : Insolation moyenne mensuelle

Année/Mois	Jan	Fèv	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aôut	Sep	Oct	Nov	Déc	total
Moy (1993-2004)	191	204	244	276	299	322	332	309	266	224	190	184	3040
Heure/jours	6,2	7,3	7,9	9,2	9,7	10,7	10,7	10,0	8,9	7,2	6,3	5,9	8,3

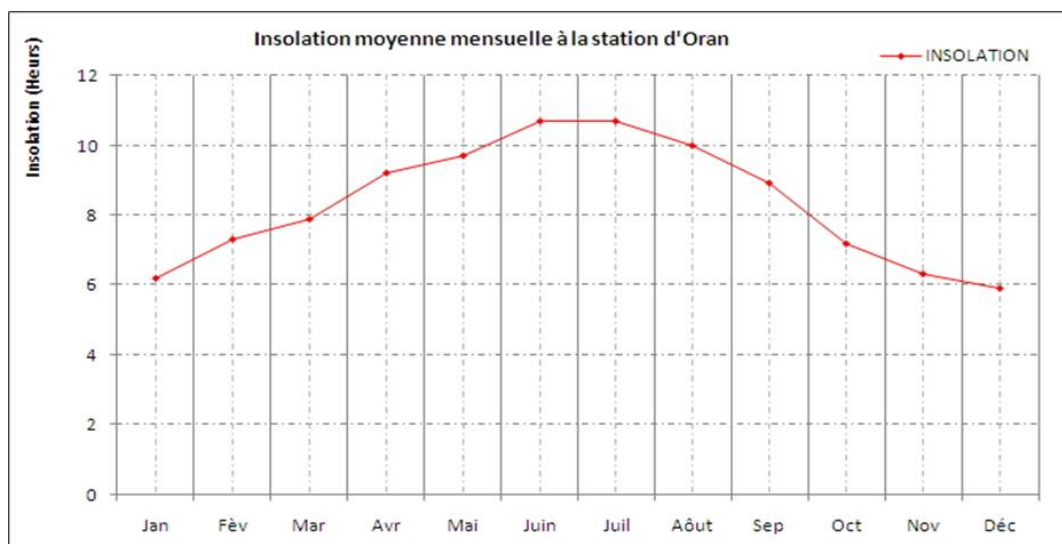


Figure I-7 : Insolation moyenne mensuelle à la station d'Oran

I.4 Sismicité

La région de Kristel, située à 26 km à l'est d'Oran, se trouve dans un contexte géologique où les plaques tectoniques africaines et eurasiatiques interagissent, entraînant des mouvements sismiques. Bien que la sismicité dans cette zone soit généralement considérée comme faible, il est important de comprendre les caractéristiques sismiques de la région pour une étude complète des risques, notamment en matière de protection contre les inondations.

Le bassin méditerranéen est une zone de convergence où les plaques tectoniques se déplacent, provoquant des séismes de différentes magnitudes :

- Faibles ($M \leq 4$)
- Modérés ($4 < M < 6.5$)
- Violents ($M > 6.5$)

Kristel est principalement classée dans la Zone II-a, correspondant à une sismicité moyenne, selon la classification établie par le C.G.S (RPA 99/version 2003). Cela signifie que, bien que des séismes puissent se produire, leur fréquence et leur intensité sont généralement moyennes.

L'Algérie est divisée en cinq zones de sismicité croissante :

- Zone 0 : Sismicité nulle
- Zone I : Sismicité faible
- Zone II-a : Sismicité moyenne
- Zone II-b : Sismicité moyenne

Chapitre 02 : Etude hydrologique

II Etude hydrologique

Introduction

L'étude hydrologique est essentielle pour comprendre les dynamiques de l'eau au sein du bassin versant d'Oued Kristel. Elle permet d'analyser les interactions complexes entre les précipitations, l'évapotranspiration, l'infiltration et les écoulements superficiels.

Dans le contexte de la ville de Kristel, cette étude est cruciale pour anticiper et gérer les risques d'inondation. Les inondations peuvent avoir des conséquences dévastatrices sur les infrastructures et les populations locales.

Les principales étapes de l'étude hydrologique incluent :

- Délimitation précise des bassins versants.
- Caractérisation des paramètres hydrologiques.
- Analyse des données climatiques et pluviométriques.
- Calcul des débits de crue pour des périodes de retour spécifiques.

En fournissant une compréhension approfondie des processus hydrologiques, cette étude vise à établir une base solide pour le dimensionnement des ouvrages de protection contre les inondations.

Les résultats obtenus permettront d'orienter les décisions d'aménagement et de gestion des ressources en eau, contribuant ainsi à la résilience de la ville de Kristel face aux aléas climatiques.

II.1 Caractéristiques hydrographiques du bassin versant

Le bassin versant d'oued KRISTEL considérés avec le chevelu hydrographique de leurs nombreux affluents. Les caractéristiques physiques, géographiques et hydrographiques du site ont été calculées sur carte d'état-major d'ARZEW (NI-30-XXIV-23 Ouest, Echelle 1 : 25 000^{ème}).

- **Définition du bassin versant**

Le bassin versant au droit d'une section de mesure est défini comme la totalité de la surface topographique drainée par ce cours d'eau et ses affluents en amont de cette section. Tous les écoulements qui prennent naissance à l'intérieur de cette surface topographique passe par la section de mesure pour poursuivre leur trajet à l'aval. Chaque bassin versant est séparé des autres par une ligne de partage des eaux. Cette limite est déterminée sur la carte topographique. En commençant par l'exutoire, on trace à main levée des segments perpendiculaires aux courbes de niveau en passant par

les crêtes, aboutissant automatiquement à l'exutoire. Les différents paramètres du bassin versant (forme, altitude, pente, relief...etc.) interviennent dans les différents écoulements.

II.1.1 Morphométrie

Les différents paramètres morpho métriques sont calculés à partir de la carte d'état major 1/25000 .

- La surface

La surface topographique est le paramètre le plus important, il permet de contrôler l'intensité de plusieurs phénomènes hydrologique (apport ; volume de précipitation ou infiltration) elle est déterminée par la carte topographique 1/25000.

- Le périmètre

Le périmètre correspond à la limite extérieure du bassin. Chaque bassin réagit d'une façon propre aux précipitations qu'il reçoit. Ces caractéristiques hydrologiques sont fonction d'une part du climat qu'il subit et d'autre part de son propre milieu physique.

II.1.2 Caractéristiques morphométriques

II.1.2.1 Indice de compacité de Gravelius

C'est la relation entre le périmètre du bassin et celui d'un cercle de la même surface. Il est déterminé par la relation suivante :

Plus ce coefficient s'approche de 1, plus la forme de bassin versant sera ramassée et plus le temps de concentration des eaux sera court. Elle sera allongée dans le cas contraire.

$$K_C = 0,28 \frac{P_{BV}}{\sqrt{S_{BV}}} \quad \text{II-1}$$

Avec :

P_{BV} : Périmètre du bassin versant.

S_{BV} : Surface du bassin versant.

Si : $K_C=1$; le bassin est ramassé.

$K_C > 1$; le bassin est allongé.

$K_C = 1.32 > 1$ (le bassin est allongé)

II.1.2.2 Le rectangle équivalent

C'est un rectangle qui a la même surface que le bassin, le même indice de compacité et de distribution hypsométrique identique. Il s'agit d'une transformation purement géométrique du bassin dans un rectangle de même périmètre, en transformant les courbes de niveau dans des droites parallèles au plus petit côté.

Le rectangle équivalent est caractérisé par la longueur « L » et la largeur « l » définit respectivement par les formules suivantes :

La longueur du rectangle équivalent :

$$L = \frac{Kc \cdot \sqrt{S}}{1,12} \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{Kc} \right)^2} \right) \quad \text{II-2}$$

La largeur du rectangle équivalent :

$$l = \frac{Kc \cdot \sqrt{S}}{1,12} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{Kc} \right)^2} \right) \quad \text{II-3}$$

AN :

$$L_r = 2.09 \text{ km} ; l_r = 0.644 \text{ km}$$

II.1.3 Caractéristiques du relief

L'influence du relief sur l'écoulement se conçoit aisément, car de nombreux paramètres hydrométéorologiques varient avec l'altitude (précipitations, températures... etc.) et la morphologie du bassin. En outre, la pente influe sur la vitesse d'écoulement. Le relief se détermine lui aussi au moyen d'indices ou de caractéristiques suivants :

Le relief est un facteur essentiel, il est caractérisé par :

- La courbe hypsométrique.
- L'altitude moyenne « H_{moy} ».
- L'indice de pente globale « I_g ».
- L'indice de pente roche « I_p ».
- L'indice de pente moyenne du bassin versant « I_m ».
- Densité de drainage « D_g ».

Le relief joue un rôle essentiel sur le régime de l'écoulement. Il est indiqué par les courbes de niveau et est caractérisé par la courbe hypsométrique.

Une pente plus forte provoque un écoulement rapide, donc un temps de concentration plus court et une montée plus rapide des crues. Notre but recherché est la détermination de la classe de relief.

II.1.3.1 Courbe hypsométrique

Pour estimer ces paramètres on doit présenter la répartition hypsométrique après planimétrie des aires partielles comprises entre les courbes de niveau maîtresses et les différentes cotes.

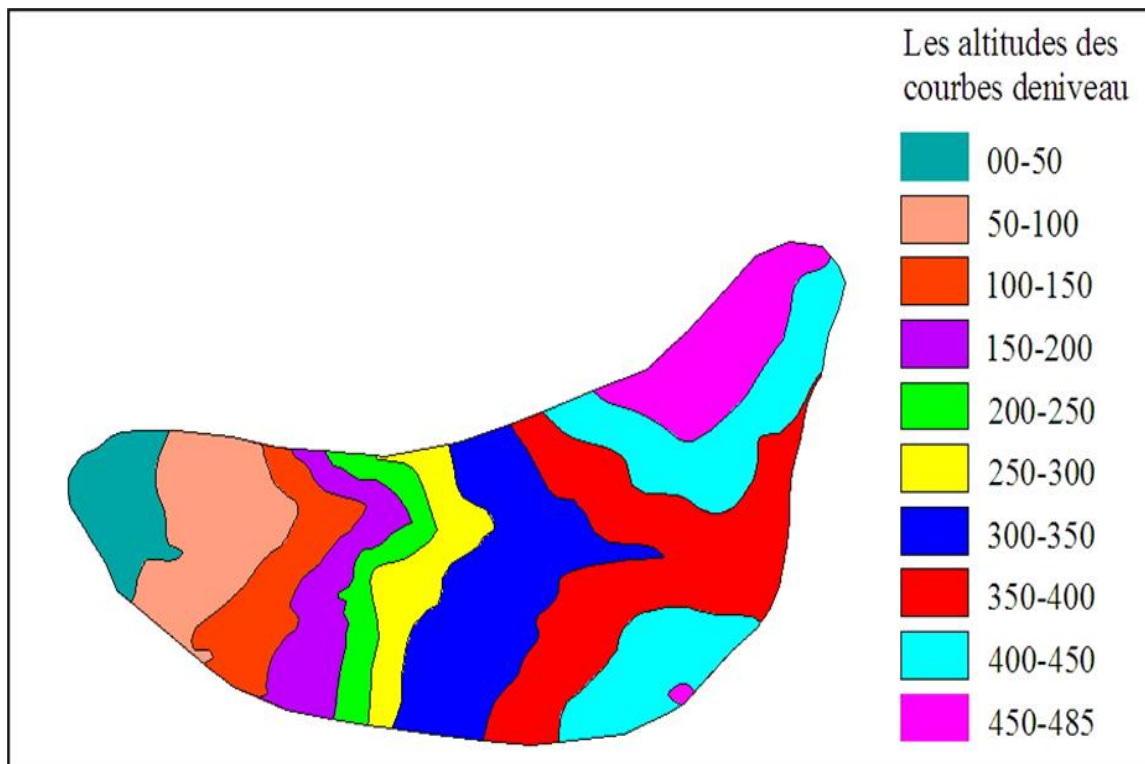
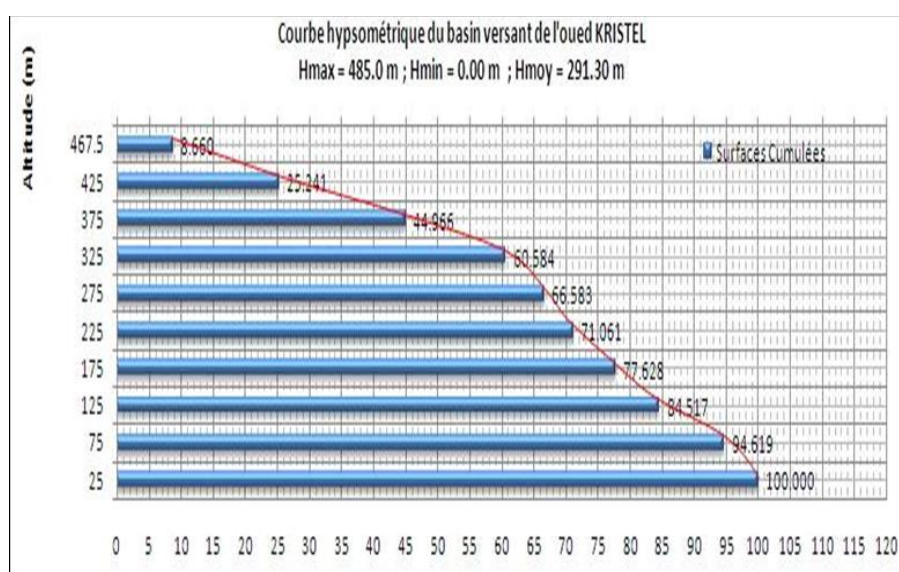


Figure II-1 : Carte hypsométrique du bassin versant. AUTOCAD.

Tableau II-1 : Distribution de la superficie en fonction de l'altitude dans les limites du Bassin versant d'Oued KRISTEL

Altitude (m.NGA)	Altitude Moyenne	Surface Partielle		Surface Cumulées		La Somme	
		$H_i - H_{i+1}$	$H_i(m)$	$S_i (km^2)$	$S_i (%)$		$\sum S_i (km^2)$
485 - 450	467.5	0.11657	8.660	0.117	8.660	54.495	
450 - 400	425	0.22319	16.582	0.340	25.241	94.857	
400 - 350	375	0.26552	19.726	0.605	44.966	99.568	
350 - 300	325	0.21022	15.618	0.815	60.584	68.322	
300 - 250	275	0.08075	5.999	0.896	66.583	22.206	
250 - 200	225	0.06028	4.478	0.957	71.061	13.562	
200 - 150	175	0.08839	6.567	1.045	77.628	15.468	
150 - 100	125	0.09274	6.890	1.138	84.517	11.593	
100 - 50	75	0.13597	10.102	1.274	94.619	10.198	
50 - 00	25	0.07243	5.381	1.346	100.000	1.811	
$H_{moy} = \sum S_i * H_i (m. km^2) / S_{bv} Km^2$						Total =	392.080
						$H_{moy} =$	291.293

**Figure II-2** : Courbe Hypsométrique du bassin versant de l'oued KRISTEL

II.1.3.2 L'altitude maximale et minimale

Elles sont obtenues directement à partir de cartes topographiques. L'altitude maximale représente le point le plus élevé du bassin tandis que l'altitude minimale considère le point le plus bas, généralement à l'exutoire. Ces deux données deviennent surtout importantes lors du développement de certaines relations faisant intervenir des variables climatologiques telles que la température et la précipitation. Donc d'après la carte d'état-major d'ARZEW (NI-30-XXIV-23 Ouest, Echelle 1 : 25 000^{ème}), on a :

$$H_{\max} = 485.00 \text{ m}; H_{\min} = 0.00 \text{ m}$$

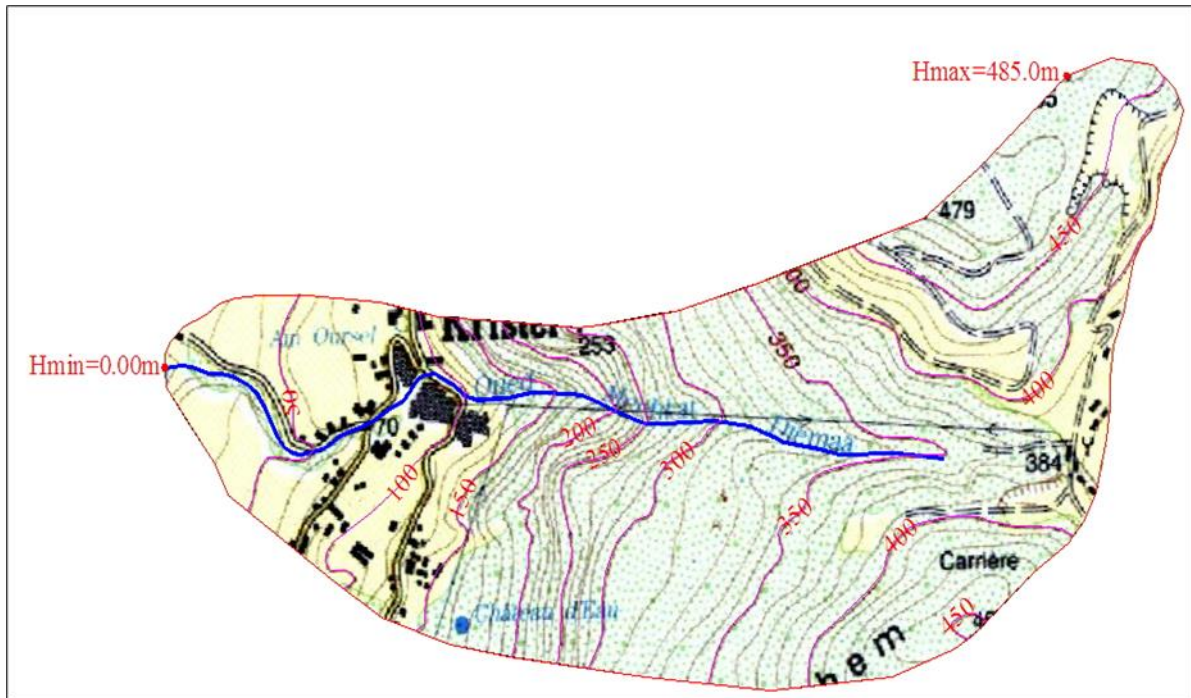


Figure II-3 : Carte topographique du bassin versant

II.1.3.3 Altitude moyenne du bassin versant

L'altitude moyenne du bassin est un indice important qui intègre et présente l'influence de la zonalité climatique verticale et elle est déterminée par la somme du Produit des surfaces partielles S_i comprises entre les courbes de niveau, et des altitudes moyennes correspondantes H_i .

$$H_{moy} = \frac{\sum(H_i \times S_i)}{S_{BV}} \quad \text{II-4}$$

Avec :

S_i : surface partielle entre deux courbes de niveau (Km^2).

H_i : Altitude moyenne entre deux courbes de niveau consécutives (n-1) et (n) en (m).

S_{BV} : Superficie du bassin versant (Km^2).

$$H_{moy} = 291.30 \text{ m}$$

II.1.3.4 La pente du bassin versant

$$I_{BV} = \frac{H_{\max} - H_{\min}}{L_{\text{Talwegs}}} \quad \text{II-5}$$

Avec :

L_{Talwegs} : Longueur de talwegs en km.

H_{\max} et H_{\min} : Hauteur maximale et minimale en m.

$$I_{bv} = 26.885 \text{ m/km}$$

II.1.3.5 L'indice de pente de roche

C'est la moyenne de la racine carrée des pentes mesurées sur le rectangle équivalent, et pondérée par les surfaces comprises entre deux courbes de niveau H_i et H_{i-1} . Il est donné par la formule suivante :

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_i^n (S_i \times H_i) \quad \text{II-6}$$

Avec :

L_r : longueur de rectangle équivalent (m).

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

Tableau II-2 : Détermination de la pente de Roche I_p

Altitude (m)	Surface Partielle (km ²)	Surface Partielle (km ²)	La Somme
$H_i - H_{i+1}$	$S_i (\text{km}^2)$	$S_i (\%)$	La Racine ($S_i\% \cdot (H_i - H_{i+1})$)
485 - 450	0.11657	8.660	17.410
450 - 400	0.22319	16.581	28.793
400 - 350	0.26552	19.725	31.405
350 - 300	0.21022	15.618	27.944
300 -250	0.08075	5.999	17.319
250 - 200	0.06028	4.478	14.963
200 -150	0.08839	6.567	18.120
150 - 100	0.09274	6.890	18.560
100 - 50	0.13597	10.102	22.474
50 - 00	0.07243	5.381	16.403
La Somme	1.346	100.000	213.391

II.1.3.6 L'indice de pente moyenne

$$I_{pm} = \frac{H_{\max} - H_{\min}}{L_R} \quad \text{II-7}$$

Avec :

L_R : Longueur de rectangle équivalent en km.

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

II.1.3.7 Pente moyenne du bassin versant

$$I_m = \frac{\Delta H(0.5L_1 + L_2 + \dots + 0.5L_n)}{S_{BV}} \quad \text{II-8}$$

Avec :

ΔH : dénivelés entre deux courbes de niveaux successives (m).

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

S_{BV} : superficie du bassin versant (Km^2).

Les résultats des mesures sont logés dans le tableau suivant.

Tableau II-3 : Evaluation de la pente moyenne du bassin versant d'Oued KRISTEL

N°	Courbe de niveau (m)	ΔH (m)	Longueur (km)
1	50	50	0.539
2	100		0.736
3	150		0.844
4	200		0.91
5	250		0.836
6	300		0.832
7	350		1.311
8	400		1.779
9	450		1.039

II.1.3.8 L'indice de pente globale : I_g

L'indice de Roche étant cependant trop long à évaluer pour des études rapides, on a proposé un indice encore plus simple ; c'est l'indice de pente globale A partir de la courbe hypsométrique, nous déduisons les altitudes $H_{5\%}$ et $H_{95\%}$.

$$I_g = \frac{H_{5\%} - H_{95\%}}{L_R} \quad \text{II-9}$$

Avec :

$H_{5\%}$: Altitude de fréquence correspondante au 5% de la surface total.

$H_{95\%}$: Altitude de fréquence correspondante au 95% de la surface total.

L_R : longueur de rectangle équivalent en km

II.1.4 Temps de Concentration

C'est le temps que met une particule d'eau provenant de point hydrauliquement le plus éloigné du bassin pour arriver à l'exutoire considéré.

Le tableau II-4 ci-dessous donne les différentes valeurs des temps de concentration pour le bassin versant. Ces valeurs de temps de concentration sont utilisées dans le calcul de l'hydrogramme de crue. La vitesse moyenne de crue estimée est similaire à celle observée pour les bassins versants les plus proches du secteur d'étude (conditions orographiques quasi semblables). Ces valeurs de temps de concentration paraissent plausibles compte tenu des caractéristiques morpho métriques et hydrographiques (pente, dénivelée, densité de drainage, ...) assez variables d'un sous-bassin à un autre, pouvant être à l'origine de crues à concentration rapide et à régime torrentiel.

Pour sa détermination, on utilise les formules suivantes :

- **La formule de GIANDOTTI (sud Italie 1937)**

$$T_c = \frac{4\sqrt{S_{BV}} + 1.5L_{CP}}{0.8\sqrt{H_{moy} - H_{min}}} \quad \text{II-10}$$

Avec :

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

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

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

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

- **La formule de SOKOLOVSKY**

$$T_c = 4 \left[\frac{(S_{BV} \times L_{CP})^{0.333}}{\sqrt{I_{BV}}} \right]^{0.75} \quad \text{II-11}$$

Avec :

I_{BV} : La pente du bassin versant en (m/km).

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

S_{BV} : La superficie du bassin versant (Km^2).

- La formule de KIRPICH

$$T_C = 0.6615(L_{CP})^{0.77} \times (I_g)^{-0.385} \quad \text{II-12}$$

Avec :

I_g : Indice de pente globale en (%).

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

- **La formule de TURRAZA**

$$T_C = 0.108 \times \frac{\sqrt[3]{A \times L}}{\sqrt{I_{BV}}} \quad \text{II-13}$$

Avec :

T_c : Temps de concentration en (heurs).

L : Longueur du talweg principal en Km.

A : Surface du bassin versant en Km^2 .

I_{BV} : La pente moyenne du bassin versant.

- **La formule de CALIFORNIENNE**

$$T_C = \left[\frac{0.87 \times L^3}{H_{moy}} \right]^{0.386} \quad \text{II-14}$$

Avec :

L : Longueur du talweg principal en Km.

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

- **La formule de VENTURRA**

$$T_C = 0.1275 \left[\frac{\sqrt{S_{BV}}}{\sqrt{I_{BV}}} \right] \quad \text{II-15}$$

Avec :

I_{BV} : La pente du bassin versant d'oued Sidi Aissa ($I_{BV} = 0.0282$)

- **La formule de L'ANRH :**

Une formule a été développée par Sogreah (1986/1989) sur demande de l'ANRH, elle est vérifiée et recommandée pour les petits bassins versants de l'Algérie, s'écrit :

$$T_C = 3 \left[\frac{S_{BV} \times L_{CP}}{(10I_{BV})^{\frac{3}{2}}} \right]^{\frac{1}{4}} \quad \text{II-15}$$

Avec :

I_{BV} : La pente du bassin versant en (%)

Tableau II-4 : Estimation du temps de concentration (t_c , heures)

Les Formules	Temps de concentration (heures)
1. Formule de GIONDOTTI	0.538
2. Formule de SOKOLOVSKY	0.613
3. Formule de KIRPICH	0.337
4. Formule de TURRAZA	0.241
5. Formule de CALIFORNIENNE	0.210
6. Formule de VENTURRA	0.285
7. Formule de L'ANRH	0.460

Commentaire :

Le tableau au-dessus donne des résultats très rapprochées du temps de concentration T_c du bassin versant. Sur la base de ces résultats, et la considération du talweg principale nous nous proposons la moyenne entre les deux formules, TURRAZA , CALIFORNIENNE .

II.1.5 Vitesse de ruissellement

La vitesse de propagation moyenne dans le bassin versant est :

$$V_R = \frac{L_{CP}}{T_C} \quad \text{II-17}$$

Avec :

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

T_c : Temps de concentration (h).

II.1.6 Pluie de durée t_c

Le tableau II-5 suivant donne les estimations de « $P_{\max, t_c, p}$ » en mm (où $t_{c,p}\%$ est le temps de concentration en heures et P la probabilité en %).

Tableau II-5 : Estimation de l'averse (mm) de durée t_c

Fréquences	Période de retour	Oued KRISTEL	
		$P_{t_c,p\%}$ ($T_c = 0.2255 h$)	$i_{t_c,p\%}$ ($T_c = 0.2255 h$)
10%	10 ans	20.75	36.09
5%	20 ans	24.87	43.25
2%	50 ans	30.61	53.24
1%	100 ans	34.95	60.78
0.10%	1000 ans	51.20	89.04
0.01%	10000 ans	70.16	122.02

II.1.7 Profil en long de l'oued

Ce profil est tracé à partir de la carte topographique à l'échelle 1/25 000^{ème} (les cartes d'état-major du bassin versant d'oued kristel), en tenant compte de l'altitude et de la longueur de cours d'eau à l'exutoire.

Tableau II-6 : Les altitudes en fonction de la distance cumulée

$H_i - H_{i+1}$	H_i moy (m)	Dist (km)	DistCumulée (km)
485 - 450	467.5	0.000	0.000
450 - 400	425	0.000	0.000
400 - 350	375	0.045	0.045
350 - 300	325	0.439	0.484
300 - 250	275	0.157	0.641
250 - 200	225	0.066	0.707
200 - 150	175	0.137	0.844
150 - 100	125	0.190	1.034
100 - 50	75	0.384	1.418
50 - 00	25	0.383	1.801

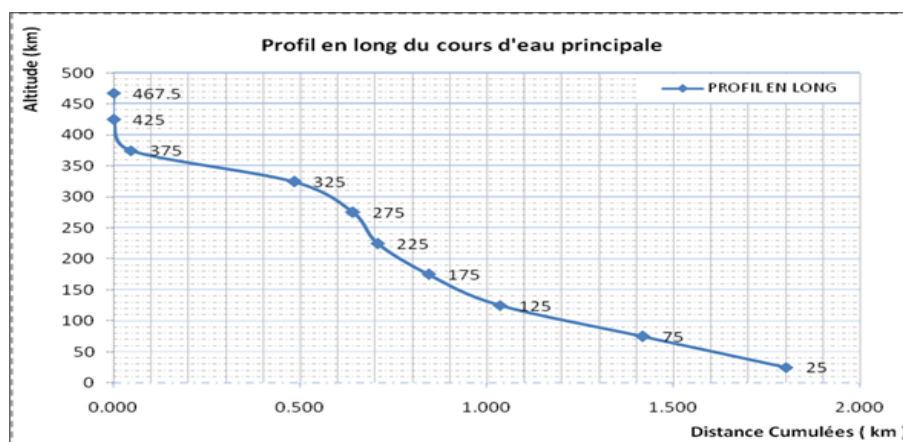


Figure II-4 : Profil en long du cours d'eau principale

Tableau II-7 : Caractéristiques géomorphologiques du bassin versant d'Oued kristel

Désignation		Symbole	Unités	Oued KRISTEL
Superficie du bassin versant		S	Km ²	1.346
Périmètre du bassin versant		P	Km	5.468
Longueur du thalweg principal		L	Km	1.804
Coefficient de compacité		Kc	-	1.320
Rectangle équivalent	longueur	Lr	Km	2.090
	largeur	Ir	Km	2.084
Surface du rectangle équivalent		Seq	Km ²	1.346
Périmètre du rectangle équivalent		Peq	Km	5.468
Coefficient d'allongement		δ	-	2.418
Altitudes	maximale	H _{max}	m	485.000
	moyenne	H _{moy}	m	291.300
	minimale	H _{min}	m	0.000
	altitudes de fréquence 95%	H _{95%}	m	75.000
	altitudes de fréquence 50%	H _{50%}	m	372.000
Indice de pente globale		Ig	m/Km	18.780
Pente du bassin versant		I _{bv}	m/Km	26.885
Indice de pente de M Roche		I _p	%	4.668
Pente moyenne de B. V		Im	%	29.855
Indice de pente moyenne du BV		I _{pm}	%	23.206
Dénivelée spécifique		Ds	m	217.882
Temps de concentration		T _c	h	0.225
Vitesse de ruissellement		V _r	Km/h	3.13

II.2 Précipitations

II.2.1 Les précipitations mensuelles

Tableau II-8 : Répartition mensuelle moyenne interannuelle de la précipitation

Mois	SEP T	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MARS	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOU T	P _{moy ann} (mm/an)
P _{moy mens} (mm)	16.85	28.93	70.34	49.57	51.65	42.96	42.30	37.24	20.29	2.66	2.21	1.83	366.83
P _{cum} (mm)	16.85	45.78	116.12	165.69	217.34	260.30	302.60	339.84	360.13	362.79	365.00	366.83	
P (%)	4.59	7.89	19.17	13.51	14.08	11.71	11.53	10.15	5.53	0.73	0.60	0.50	100.00

Source : L'A.N.R.H d'Oran « Agence National des Ressources Hydriques »

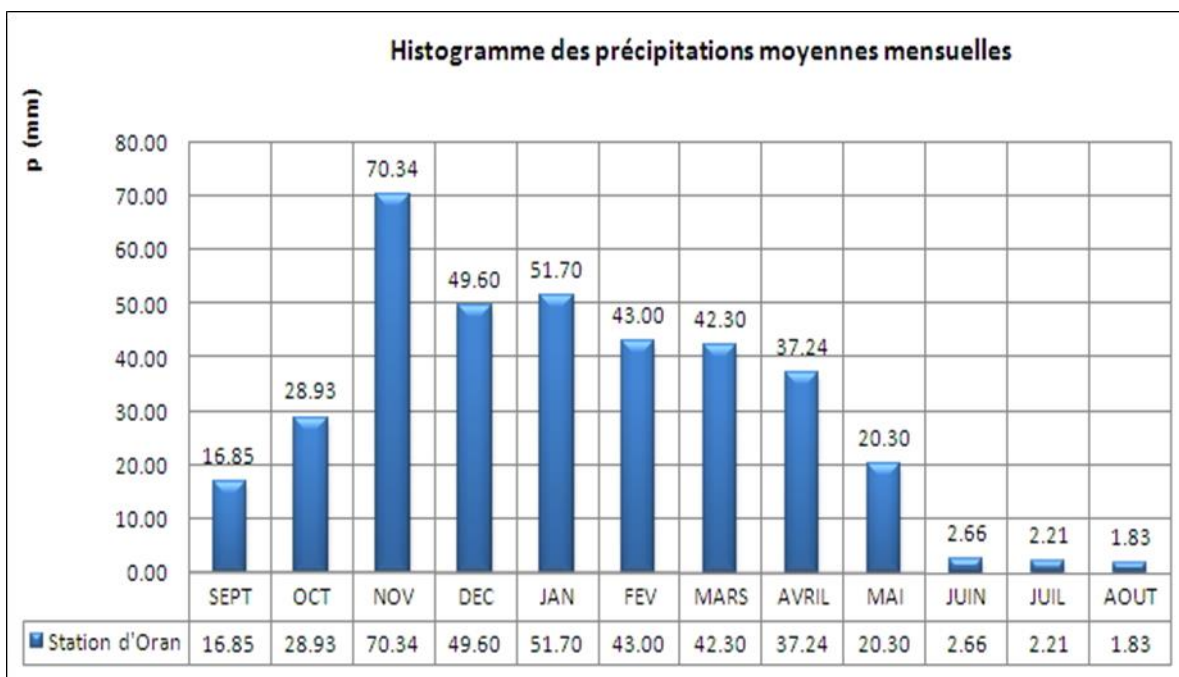


Figure II-5 : La répartition moyenne mensuelle des précipitations.

Les régimes pluviométriques mensuels se distinguent par deux maxima pluviométriques, le premier en décembre. Le second intervient au début de l'hiver en novembre; ce phénomène est provoqué par le passage du front des alizés et les pluies orageuses du front qui tombent sur les reliefs. Les pluies sont localisées et souvent violentes, et la majeure partie de la pluie tombe sous forme d'averse.

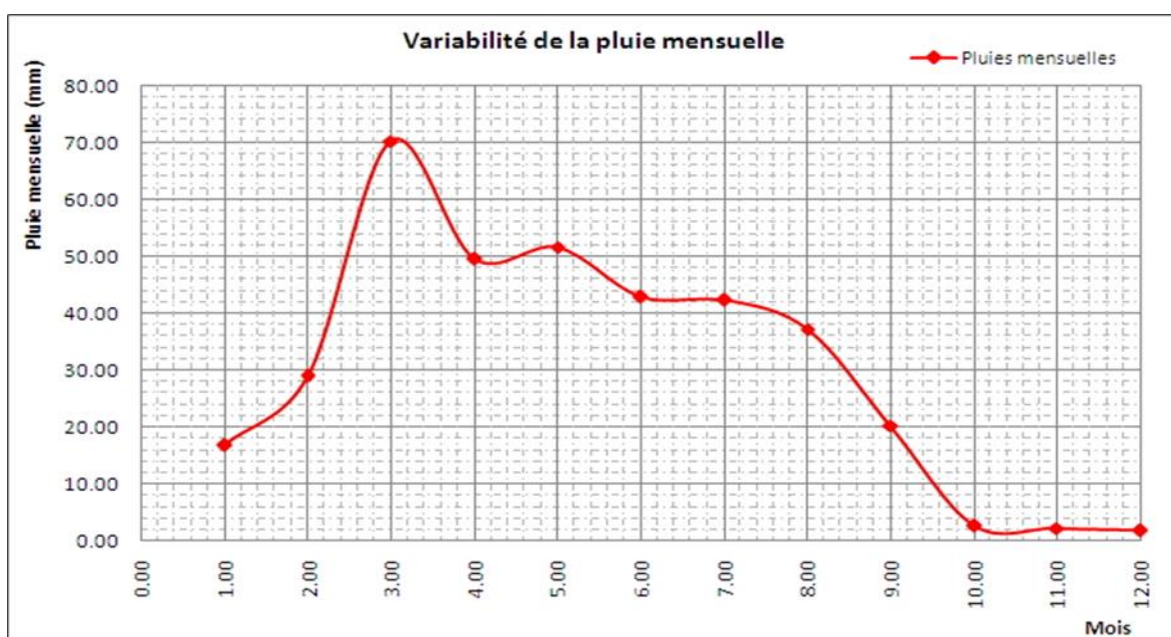


Figure II-6 : Variabilité de la pluie mensuelle

On peut exprimer la variation de la pluviosité par le coefficient de variation (C_v). La variabilité de la pluviosité, exprimée le plus souvent par le coefficient de variation, est inversement proportionnelle à l'aridité. Cette variabilité connaît des différences en relation avec les types de climat et les situations géographiques.

II.2.2 Les précipitations annuelles :

Les caractères du climat de la commune de KRISTEL sont bien connus depuis fort longtemps déjà, et leurs effets contraignants sur la vie économique, sociale ou sur le milieu naturel ont été suffisamment bien montrés.

La moyenne annuelle des précipitations varie entre 90 et 625 mm. Ce déficit pluviométrique est accentué par l'irrégularité, bien connue en Méditerranée, des précipitations.

Les précipitations moyennes annuelles supérieures à 300 mm.

Tableau II-9 : Caractéristiques de la pluviométrie annuelle

	Statistiques de base
Minimum	92.4
Maximum	624
Moyenne	358
Ecart-type	103
Médiane	360
Coefficient de variation (C_v)	0.288
Coefficient d'asymétrie (C_s)	0.15
Coefficient d'aplatissement (C_k)	3.81

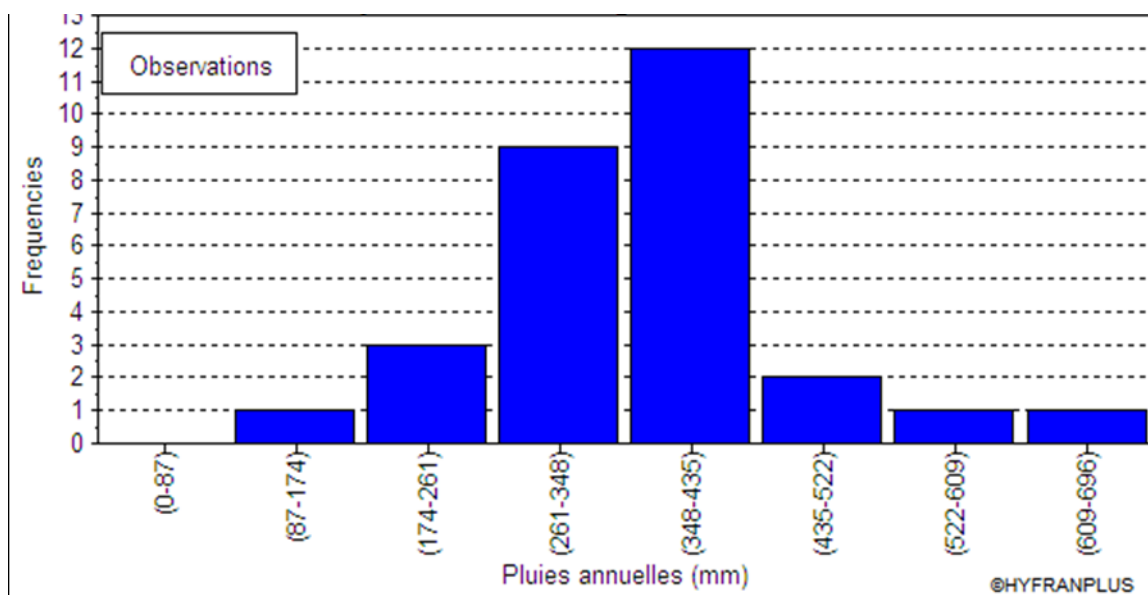


Figure II-8 : Histogramme de la pluie annuelle

II.2.3 Les précipitations maximales journalières

Les données d'ANRH (Agence National des Ressources Hydriques) de la station de d'Oran ont été utilisées. La série de pluie maximale extrême étudiée s'étend de 1992 à 2021, soit 29 années hydrologiques ce qui permet une plus adéquat analyse statique des pluies maximales extrême génératrices des crues.

L'analyse des pluies maximales extrême est nécessaire pour l'estimation des débits de pointe des crues. On a utilisé les données d'ANRH de la station d'Oran II du code: 0354.

Les pluies maximales extrêmes sont souvent génératrices de crues exceptionnelles. Pour cela, il est important d'effectuer un ajustement statistique d'une loi de probabilité à la série d'observation afin de déterminer les précipitations maximales extrême fréquentielles.

Tableau II-10 : Les précipitations maximales journalières (station d'ORAN)

Années	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Pjmax (mm)	19	17.5	56.9	21.2	36.7	67	33	25	26	85.1
Années	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Pjmax (mm)	35.5	35.8	23.1	37	57.7	62	53.8	40	38.9	33.8
Années	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Pjmax (mm)	37.4	34.8	72.4	40.5	79.8	24.5	91	103	59	18.6

Source : L'A.N.R.H d'Oran « Agence National des Ressources Hydriques »

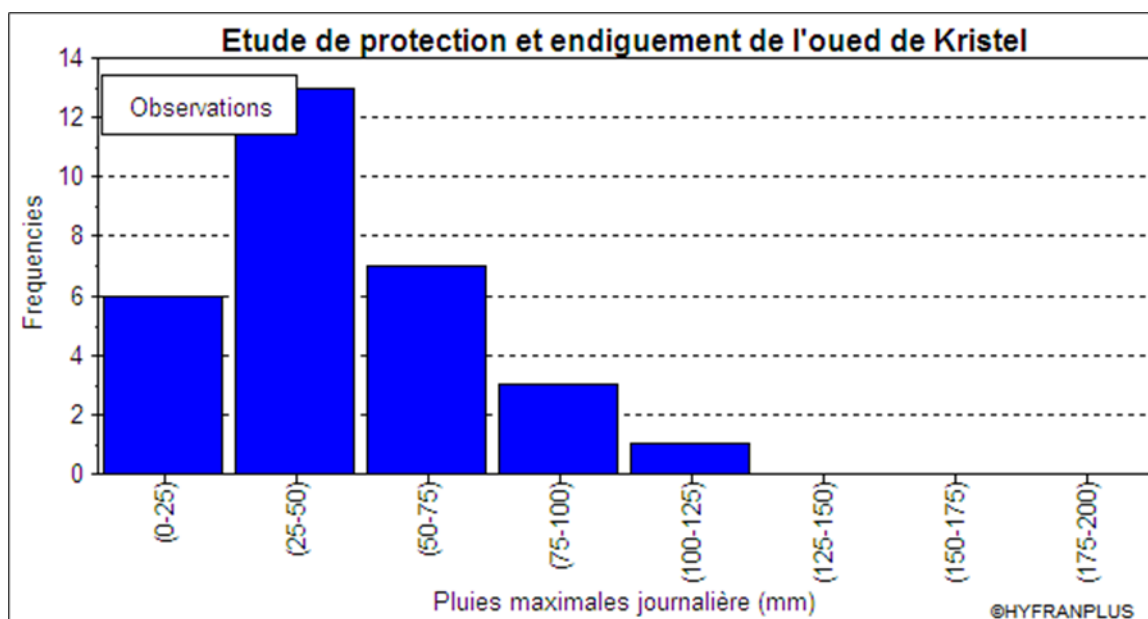


Figure II-9 : Histogramme des pluies maximales journalière

L'histogramme de la figure II-12, représente l'ensemble des données d'observations des pluies maximales extrême enregistrées au niveau de station considérée.

II.3 Ajustement des pluies maximales journalières

II.3.1 Le logiciel HYFRAN

HYFRAN est un logiciel permettant d'ajuster différentes lois statistiques à un échantillon d'observations indépendantes et identiquement distribuées. Ce logiciel a été développée par l'équipe de la chaire CRSNG /Hydro-Québec en hydrologie statistique, située à l'institut nationale de la recherche scientifique (Québec).

L'ajustement des pluies maximales extrême sera effectué à l'aide du logiciel **HYFRAN**. On a effectué l'ajustement de la série des pluies maximales extrême à des lois différentes, en utilisant le logiciel HYFRAN, avec une comparaison entre les lois.

La courbe de distribution expérimentale de la série annuelle des pluies maximales extrême à été ajusté à différentes lois statiques communément utilisées, notamment les lois GEV, Gumbel, Log normal, Log normal tri paramétrique et la loi de Gamma.

II.3.2 Test de validité d'un ajustement

La loi choisie pour ajuster la distribution statistique de l'échantillon, ne représente qu'approximativement l'échantillon étudié, l'erreur commise en adoptant une loi donnée est une erreur d'adéquation. Il convient par conséquent de comparer l'adéquation de ces lois afin d'adopter le meilleur ajustement. L'un des tests le plus employé, est le test du Khi carré " χ^2 "

II.3.3 Les lois d'ajustement

Une loi d'ajustement est une équation modélisant le comportement statistique d'un processus, avec un modèle graphique décrive la probabilité d'apparition d'un événement de valeur donnée. Le but de cette étude est de trouver une loi de probabilité suivant la quelle peuvent s'ajuster au mieux les échantillons et pour notre étude, nous avons testés les cinq lois représentées dans le tableau suivant II-11.

Tableau II-11 : Tableau représente les cinq lois d'ajustement

Loi	Fonction de densité de probabilité	Références	Paramètres
1- GEV	$f(x) = \frac{1}{\alpha} \left[1 - \frac{k}{\alpha}(x-u) \right]^{1/k-1} \exp \left\{ - \left[1 - \frac{k}{\alpha}(x-u) \right]^{1/k} \right\}$	Perreault et al. (1992a)	α, u, k
2- Gumbel	$f(x) = \frac{1}{\alpha} \exp \left[- \frac{x-u}{\alpha} - \exp \left(\frac{x-u}{\alpha} \right) \right]$	Perreault et al. (1992a)	u, α
3- Log Normal	$F(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_u^{+\infty} e^{-\frac{1}{2}u^2} du$	Perreault et al. (1992a)	u
4- Log-Normal 3P	$f(x) = \frac{1}{(x-m)\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left\{ - \frac{[\ln(x-m) - \mu]^2}{2\sigma^2} \right\}$	Aitchison et Brown (1957)	m, μ, σ
5- Pearson type 3	$f(x) = \frac{\alpha^\lambda}{\Gamma(\lambda)} (x-m)^{\lambda-1} e^{-\alpha(x-m)}$	Bobée et Ashkar (1991), Perreault et al. (1992c)	α, λ, m

Les résultats des ajustements, illustrent les ajustements de la courbe expérimentale aux cinq lois statiques les plus utilisées en hydrologie. Cet ajustement a été contrôlé à l'aide du teste de Khi carré. Il permet d'étudier la vraisemblance de l'hypothèse que les observations proviennent bien de la distribution utilisée.

Les lois s'ajustent le mieux aux données d'observation et dont les quantiles sont situés dans l'intervalle des estimations des différentes autres lois appliquées sont la **loi de Log normal**.

Tableau II-12 Estimation des caractéristiques statiques des pluies maximales extrêmes(Loi de loi GUEMBEL)

	Caractéristique de l'échantillon
Minimum	17.5
Maximum	103
Moyenne	45.5
Ecart-type	23.2
Médiane	37.2
Coefficient de variation (Cv)	0.509
Coefficient d'asymétrie (Cs)	0.91
Coefficient d'aplatissement (Ck)	2.64

II.3.3.1 Résultats de l'ajustement de la loi de GEV (Maximum de vraisemblance)

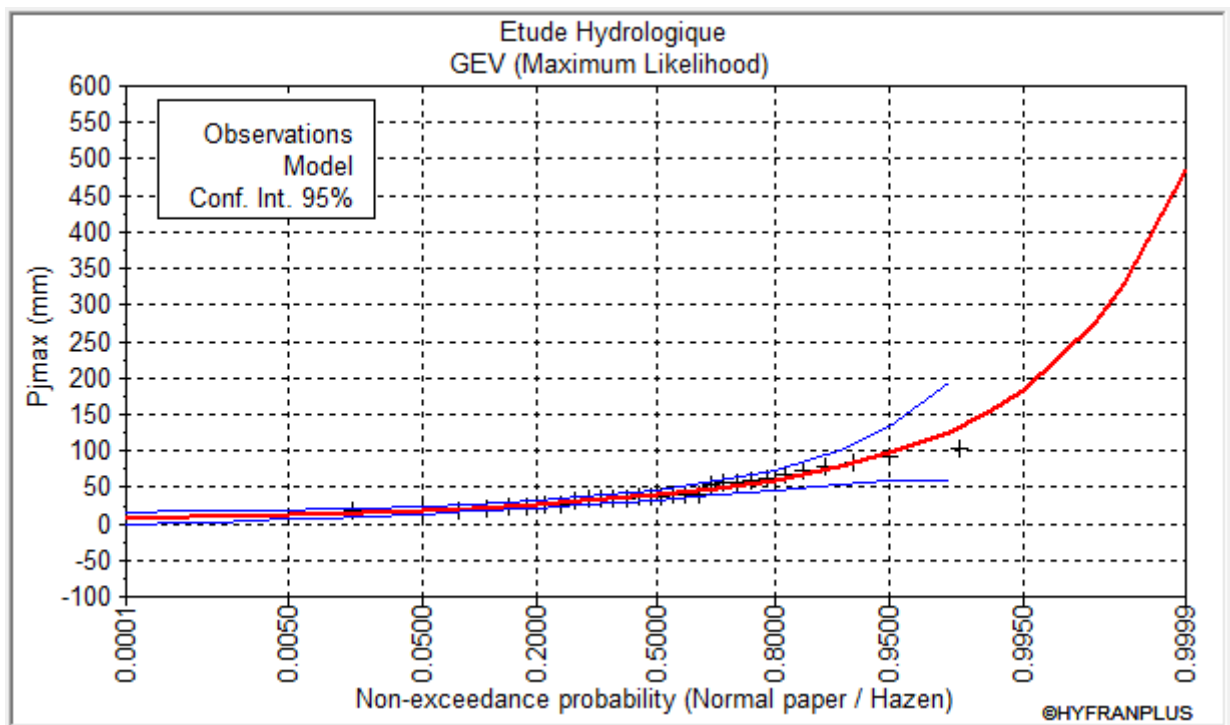


Figure II-10 : Probabilités au non-dépassement (GEV)

- Nombre d'observations : 29

T	q	XT	Standard	Confidence interval
10000.0	0.9999	484	409	N/D
2000.0	0.9995	329	214	N/D
1000.0	0.9990	277	159	N/D
200.0	0.9950	184	73.6	N/D
100.0	0.9900	153	50.7	N/D
50.0	0.9800	126	33.9	59.8 - 193
20.0	0.9500	96.3	18.7	59.6 - 133
10.0	0.9000	77.1	11.5	54.6 - 99.5
5.0	0.8000	60.0	6.92	46.5 - 73.6
3.0	0.6667	48.3	4.86	38.8 - 57.9
2.0	0.5000	39.1	3.69	31.8 - 46.3

Tableau II-13 : Résultats de l'ajustement à la loi de GEV

✓ **Test d'adéquation :**

GEV (Maximum de vraisemblance)

Hypothèses :

H0 : L'échantillon provient d'une loi GEV

H1 : L'échantillon ne provient pas d'une loi GEV

Résultat de la statistique :

$$X^2_{\text{calculé}} < X^2_{\text{théorique}}$$

$$6.4 < 7.82$$

Degrés de liberté : 3 ; Nombre de classes : 7

Nous pouvons accepter H₀ au niveau de signification de 5 % .

II.3.3.2 Résultats de l'ajustement de la loi de Log normal 3 paramétrique (Maximum de vraisemblance) :

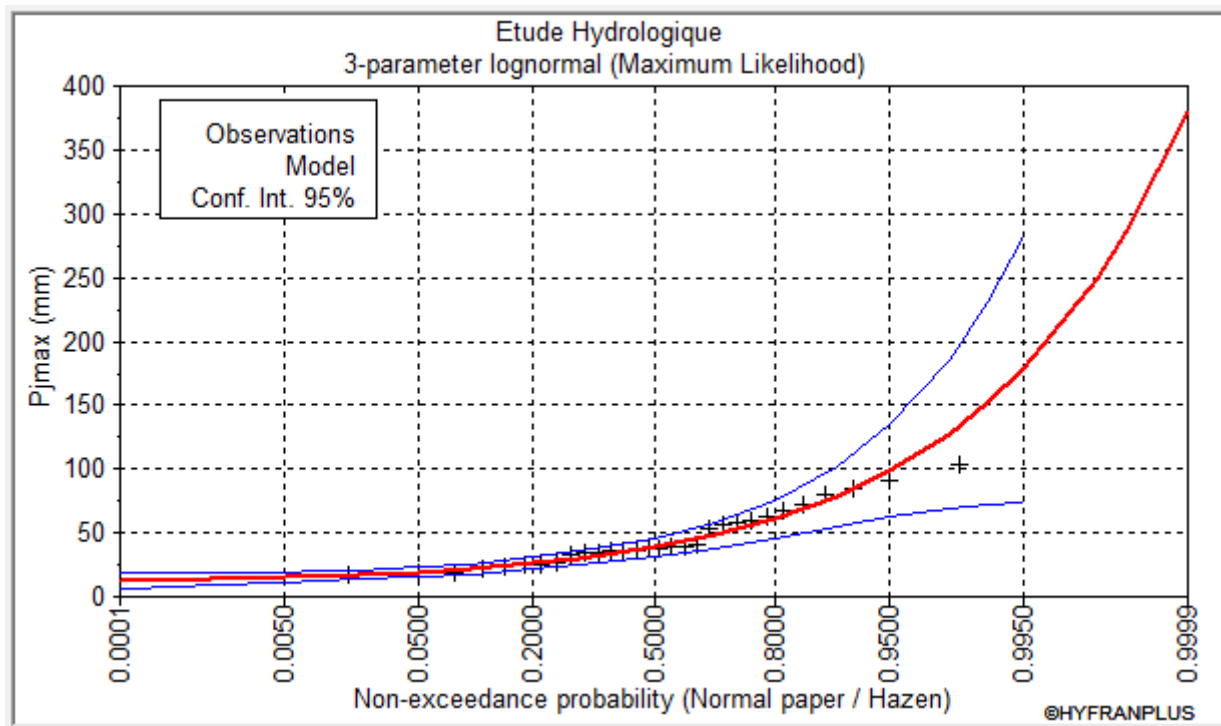


Figure II-11 : Probabilités au non-dépassement (Log normal 3 Param)

Nombre d'observations : 29

Quantiles : $q = F(X)$ (probabilité au non-dépassement) ; $T = 1 / (1-q)$

Tableau II-14 : Résultats de l'ajustement à la loi de Log normal 3 paramétrique

T	q	XT	Standard	Confidence interval
10000.0	0.9999	380	176	N/D
2000.0	0.9995	285	114	N/D
1000.0	0.9990	250	92.3	N/D
200.0	0.9950	178	53.1	74.1 - 282
100.0	0.9900	152	40.2	72.7 - 230
50.0	0.9800	127	29.5	69.5 - 185
20.0	0.9500	98.5	18.3	62.5 - 134
10.0	0.9000	78.9	12.0	55.3 - 102
5.0	0.8000	60.8	7.44	46.3 - 75.4
3.0	0.6667	48.3	5.10	38.3 - 58.3
2.0	0.5000	38.5	3.75	31.2 - 45.9

✓ **Test d'adéquation :**

Log normal 3 paramétrique (Maximum de vraisemblance)

Résultat de la statistique :

$$X^2_{\text{calculé}} < X^2_{\text{théorique}}$$

$$9.2 > 7.82$$

Degrés de liberté : 3 ; Nombre de classes : 7

II.3.3.3 Résultats de l'ajustement de la loi GAMMA (Maximum de vraisemblance)

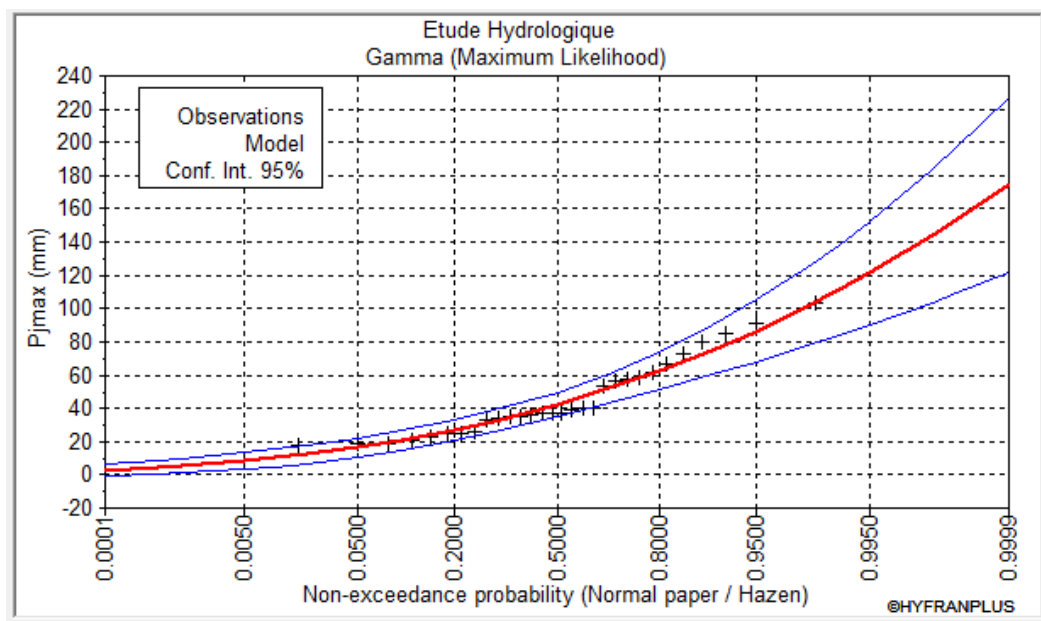


Figure II-12 : Probabilités au non-dépassement à la loi de GAMMA

Nombre d'observations : 29

Paramètres : $\alpha = 0.055236$; $\lambda = 6.147587$, $\mu = 4.632113$

Quantiles : $q = F(X)$ (probabilité au non-dépassement) ; $T = 1 / (1 - q)$

Tableau II-15 : Résultats de l'ajustement à la loi de GAMMA

T	q	XT	Standard	Confidence interval
10000.0	0.9999	174	26.8	122 - 227
2000.0	0.9995	153	22.3	109 - 197
1000.0	0.9990	144	20.4	104 - 184
200.0	0.9950	121	15.8	90.2 - 152
100.0	0.9900	111	13.9	84.0 - 139
50.0	0.9800	101	12.0	77.4 - 124
20.0	0.9500	86.5	9.43	68.0 - 105
10.0	0.9000	74.9	7.55	60.1 - 89.7
5.0	0.8000	62.2	5.75	51.0 - 73.5
3.0	0.6667	52.0	4.59	43.0 - 61.0
2.0	0.5000	42.1	3.79	34.6 - 49.5

✓ **Test d'adéquation :**

$$X^2_{\text{calculé}} < X^2_{\text{théorique}}$$

$$6.87 < 9.49$$

L'ajustement par la lois GAMMA (Maximum de vraisemblance) :

Degrés de liberté : 4 ; Nombre de classes : 7

II.3.3.4 Résultats de l'ajustement de la loi Guembel (Maximum de vraisemblance) :

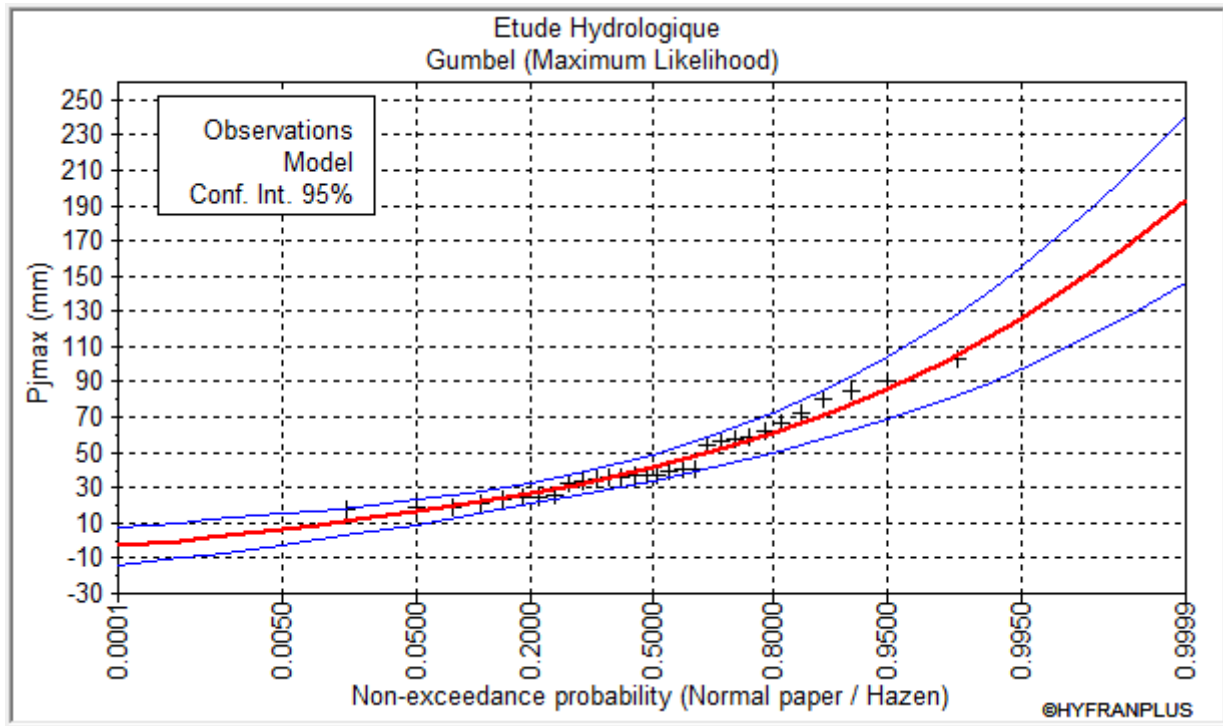


Figure II-13 : Probabilités au non-dépassement à la loi de (GUEMBEL)

Nombre d'observations : 29

Quantiles : $q = F(X)$ (probabilité au non-dépassement) ; $T = 1 / (1-q)$

Tableau II-16 : Résultats de l'ajustement à la loi de GUEMBEL

T	q	XT	Standard	Confidence interval
10000.0	0.9999	193	24.4	146 - 241
2000.0	0.9995	166	20.3	126 - 206
1000.0	0.9990	154	18.6	117 - 190
200.0	0.9950	126	14.6	97.4 - 155
100.0	0.9900	114	12.9	88.8 - 140
50.0	0.9800	102	11.2	80.1 - 124
20.0	0.9500	86.1	9.02	68.4 - 104
10.0	0.9000	73.7	7.35	59.3 - 88.1
5.0	0.8000	60.8	5.70	49.6 - 72.0
3.0	0.6667	50.5	4.52	41.7 - 59.4
2.0	0.5000	41.3	3.67	34.1 - 48.5

✓ **Test d'adéquation :**

GUEMBEL (Maximum de vraisemblance)

Résultat de la statistique :

$$X^2_{\text{calculé}} < X^2_{\text{théorique}}$$

$$9.2 < 9.49$$

Degrés de liberté : 4 ; Nombre de classes : 7

II.3.3.5 Résultats de l'ajustement de la loi de Log normal

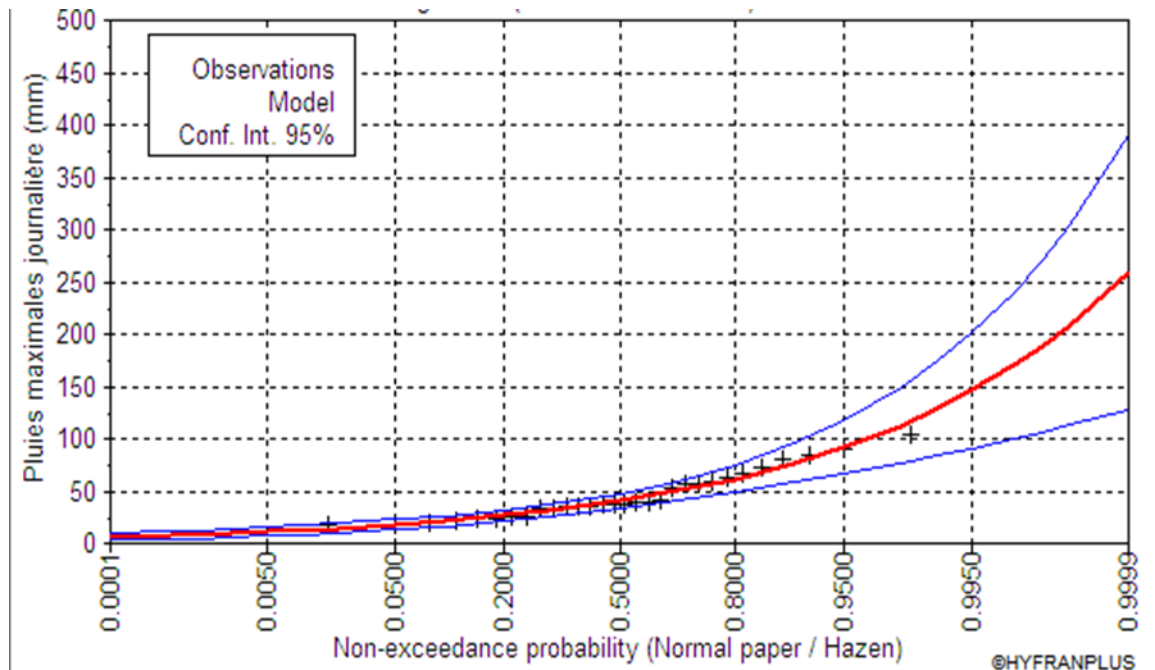


Figure II-14 : Probabilité au non-dépassement LogNormale

N.B : Maximum de vraisemblance (Maximum Likelihood)

Résultat de la statistique :

$$X^2_{\text{calculé}} < X^2_{\text{théorique}}$$

$$6.4 < 9.49$$

Degrés de liberté : 4 ; Nombre de classes : 7

Le tableau (20) donne les différents quantiles des pluies maximales extrême ($P_{j,\max}$, $p\%$) aux fréquences de retour à 1% (100ans), 2% (50ans), 5% (20ans), et 10% (10ans), valeurs utilisées dans l'estimation des débits de pointe des crues de même fréquence de retour pour le dimensionnement des ouvrages de protection.

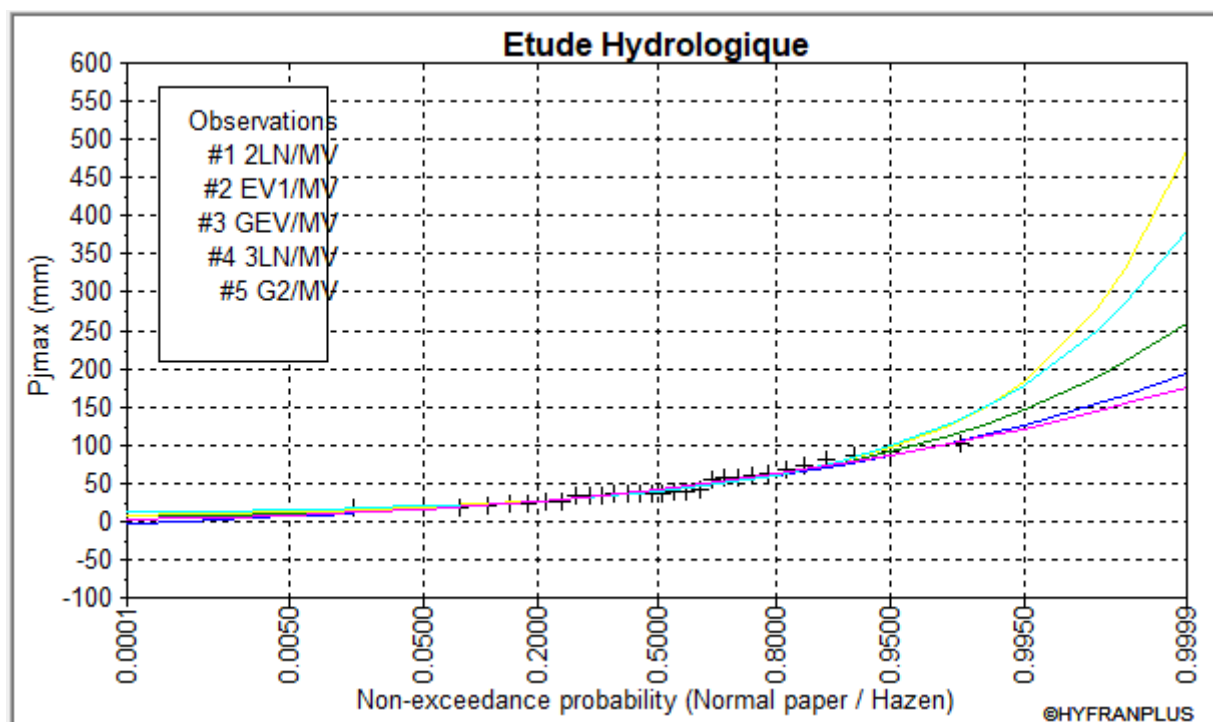
Tableau II-17 : Résultats de l'ajustement à la loi de LogNormale

T	q	XT(PJ max) mm	Ecart-type	Intervalle de confiance (95%)	
10000	0.9999	259	67.3	127	391
2000	0.9995	209	48.9	113	305
1000	0.999	189	42	107	271
500	0.998	170	35.6	100	240
200	0.995	146	28.1	91.1	201
100	0.99	129	22.9	84.1	174
50	0.98	113	18.3	76.7	149
20	0.95	91.8	13	66.4	117
10	0.9	76.6	9.49	58	95.2
5	0.8	61.5	6.55	48.6	74.3
3	0.6667	50	4.78	40.7	59.4
2	0.5	40.4	3.68	33.2	47.6

Tableau II-18 : Quantiles des pluies maximales journalières

Fréquences	Période de retour	<i>Station d'Oran</i>
		<i>PJ max (mm)</i>
10%	10 ans	76.6
5%	20 ans	91.8
2%	50 ans	113
1%	100 ans	129
0.10%	1000 ans	189
0.01%	10000 ans	259

II.3.3.6 Comparaison entre les cinq lois



Commentaires

D'après les résultats de calcul effectués à l'aide du logiciel HYFRAN, la série des pluies maximales extrême s'ajuste bien avec la loi de Log Normal, et le calcul se fait par les résultats des pluies maximales extrême fréquentielles obtenus par cette loi.

II.4 Pluies de courte durée I.D.F (courbes : Intensité-Durée-Fréquence)

La relation Intensité – Durée – Fréquence recherché est de la forme :

$$P_t = P_{jmax} \left(\frac{t}{24} \right)^b \quad \text{II-18}$$

Avec :

P_t : Pluie correspondante à un pas de temps t (mm).

P_{jmax} : Pluie maximale journalière pour la même fréquence (mm).

t : Durée de la pluie (heures).

b : Exposant climatique (le coefficient b régional est égal à 0.35)

L'intensité des pluies est donnée par la formule suivante :

$$I = \frac{P_t}{t}$$

II-19

Les résultats de calcul sont représentés dans les tableaux suivants :

Tableau II-19 : Pluie de courte durée (mm)

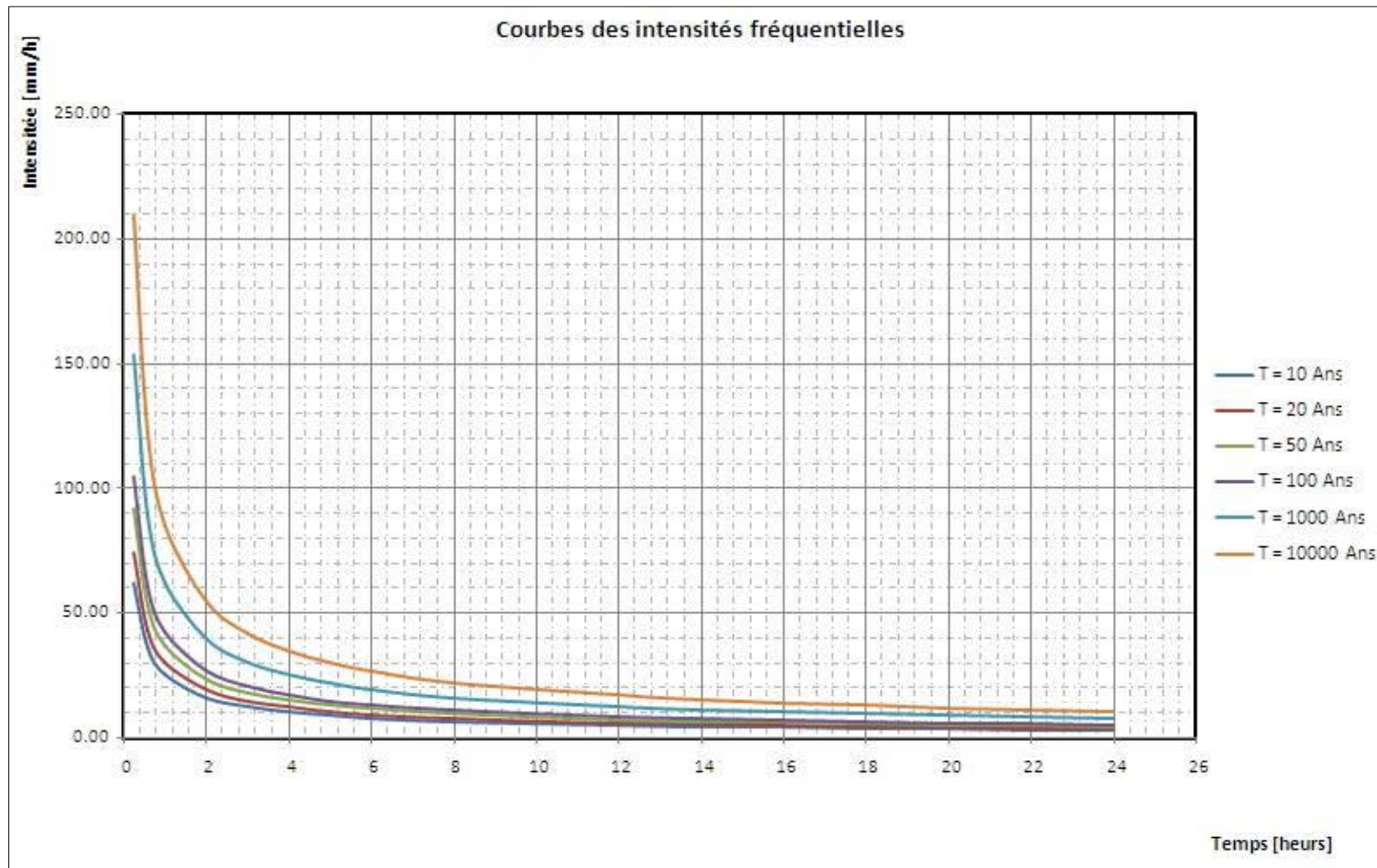
Fréquences	Période de retour	Temps															
		0.225	1	2	3	4	5	6	7	8	12	14	16	18	20	22	24
10%	10ans	20.75	25.19	32.10	37.00	40.91	44.24	47.15	49.77	52.15	60.10	63.43	66.47	69.26	71.86	74.30	76.60
5%	20ans	24.87	30.18	38.47	44.34	49.03	53.02	56.51	59.64	62.50	72.02	76.02	79.65	83.01	86.13	89.05	91.80
2%	50ans	30.61	37.15	47.35	54.58	60.36	65.26	69.56	73.42	76.93	88.66	93.57	98.05	102.18	106.01	109.61	113.00
1%	100ans	34.95	42.41	54.06	62.30	68.90	74.50	79.41	83.81	87.82	101.21	106.82	111.93	116.64	121.03	125.13	129.00
0.10%	1000ans	51.20	62.14	79.20	91.28	100.95	109.15	116.34	122.79	128.67	148.29	156.51	163.99	170.90	177.32	183.33	189.00
0.01%	10000ans	70.16	85.16	108.54	125.09	138.34	149.58	159.43	168.27	176.32	203.21	214.47	224.73	234.19	242.99	251.23	259.00

Tableau II-20 : Intensité des pluies It (mm/h)

Fréquences	Période de retour	Temps (h)															
		0.225	1	2	3	4	5	6	8	12	14	16	18	20	22	24	
10%	10ans	36.09	25.19	16.05	12.33	10.23	8.85	7.86	6.52	5.01	4.53	4.15	3.85	3.59	3.38	3.19	
5%	20ans	43.25	30.18	19.24	14.78	12.26	10.60	9.42	7.81	6.00	5.43	4.98	4.61	4.31	4.05	3.83	
2%	50ans	53.24	37.15	23.68	18.19	15.09	13.05	11.59	9.62	7.39	6.68	6.13	5.68	5.30	4.98	4.71	
1%	100ans	60.78	42.41	27.03	20.77	17.23	14.90	13.23	10.98	8.43	7.63	7.00	6.48	6.05	5.69	5.38	
0.10%	1000ans	89.04	62.14	39.60	30.43	25.24	21.83	19.39	16.08	12.36	11.18	10.25	9.49	8.87	8.33	7.88	
0.01%	10000ans	122.02	85.16	54.27	41.70	34.58	29.92	26.57	22.04	16.93	15.32	14.05	13.01	12.15	11.42	10.79	



Figure II-17 : Courbe Hauteur Durée Fréquence



Fi,

Figure II-19 : Courbe des intensité fréquentielles

II.5 Calcul des débits de crue

Introduction

Les crues dans les régions montagneuses sont rapides, se caractérisant par une montée brusque des eaux en phase de crue et une descente plus lente, plus régularisée, en phase de décrue.

On voit la différence entre les deux périodes de la crue : une phase de montée plus rapide et une phase de descente plus longue.

II.5.1 Estimation des débits de crues

L'étude des crues a pour but d'estimer les débits de pointe fréquents et de définir la forme de l'hydrogramme de crue. Dans cette analyse des crues, en vue de l'estimation de la crue de projet, on procèdera par des formules empiriques.

L'objectif de toute étude hydrologique est de déterminer pour un bassin versant donnée les hydrogrammes de crues à différentes périodes de retour et de définir les débits maxima probables correspondants.

II.5.2 Estimations empiriques des débits de pointe et des hydrogrammes de crue

Le débit maximum instantané Q_{max} peut être estimé pour différentes fréquences de retour à partir des nombreuses formules empiriques appliquées aux conditions de l'Algérie (formules de MALLET GAUTHIER, TURRAZA, POSSENTI, SOKOLOVSKY). Ces formules utilisent les estimations de la pluie maximale journalière et celle pour une durée égale au temps de concentration (t_c).

Les formules empiriques utilisent des coefficients de ruissellement de 0.6 pour la fréquence 10% et 0.7 pour la fréquence 1% et 0.8 pour la fréquence 0.1%. On peut donc appliquer ces formules en utilisant les valeurs correspondantes du coefficient de ruissellement pour l'estimation du débit maximum de crue des bassins d'oueds considérés.

- **Formule de MALLET GAUTHIER :**

$$Q_{\max \%} = 2. K. \text{Log}(1 + A. \bar{P}) \cdot \frac{S_{BV}}{\sqrt{L_{CP}}} \cdot \sqrt{1 + 4 \text{Log}(T) - \text{Log}(S)} \quad II-20$$

Avec :

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

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

A: coefficient régional varie entre 20 et 30.

k: constante qui dépend des caractéristiques du bassin versant varie entre 1 et 3(k=2).

\bar{P} : Précipitation moyenne interannuelle en mètre.

T: période de retour en années.

- **Formule de TURRAZA :**

$$Q_{max, f\%} = \frac{C \cdot S_{BV} \cdot I_t}{3.6} \quad \text{II-16}$$

Avec :

S_{bv} : superficie du bassin versant (Km²).

I_t : intensité des pluies pendant une durée égale au temps de concentration pour une fréquence donnée (mm/h).

C : coefficient de ruissellement en fonction de la probabilité donnée

C=0.6 pour P= 5%, P= 10%

C=0.7 pour P= 1%, P= 2%

C=0.8 pour P= 0.1 %

- **Formule de POSSENTI :**

$$Q_{max, f\%} = \frac{\mu \cdot P_{max, p\%} \cdot S_{bv}}{L_p} \quad \text{II-22}$$

Avec :

μ : Coefficient compris entre 700 -800 ; On prend $\mu = 750$.

$P_{max, p\%}$:Pluie maximale journalière correspondante à la période de retour donnée.

S_{bv} : superficie du bassin versant (Km²).

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

- **Formule de SOKOLOVSKI :**

$$Q_{max, f\%} = 0.28 \frac{(P_{tc, p\%} - H_0) \cdot \alpha_{p\%} \cdot S_{bv} \cdot f}{T_c = T_m} \quad \text{II-17}$$

$$f = \frac{12}{4 + 3\gamma} \quad \text{II-18}$$

$$\alpha = \frac{\sqrt{P_{tc; p\%}} - \sqrt{H_0}}{\sqrt{P_{tc; p\%}} + \sqrt{H_0}} \quad \text{II-19}$$

,Avec :

0.28 : Coefficient de changement d'unité

$P_{tc; p\%}$: Précipitation en mm ,de probabilité p% correspondante à un temps T_c .

H_0 : Pertes initiales ($H_0 = 7$ mm).

$\alpha_{p\%}$: coefficient de ruissellement pour la crue probable

S_{bv} : superficie du bassin versant en Km^2 .

f: coefficient de forme de la crue

T_c : temps de concentration du bassin versant en heurs.

Tableau II-21 : valeur de γ en fonction du bassin versant

Condition	γ
Surface du B.V compris entre 1 et 50 km^2	$\gamma = 2$
Pour un bassin boisé avec un sol peut perméable	$2 \leq \gamma \leq 2.5$
Pour un bassin boisé	$3 \leq \gamma \leq 4$
Pour les grands bassins	$4 \leq \gamma \leq 7$

Commentaire :

D'après les résultats de calcul hydrologique, la surface du bassin versant d'Oued **KRISTEL** est inférieur à 50 km^2 , donc on prend la valeur de ($\gamma = 2.0$).

Tableau II-22 : Estimation du débit de pointe fréquentiel $Q_{max,F}$ (Formules empiriques)

	Fréquences	Période de retour	MALLET GAUTHIER	TURRAZA	POSSENTI	SOKOLOVSKY	Moyenne
Oued KRISTEL	0.10	10ans	14.33	8.10	42.86	4.33	8.92
	0.05	20ans	16.00	9.70	51.37	6.00	10.57
	0.02	50ans	17.97	13.93	63.23	8.50	13.47
	0.01	100ans	19.33	15.91	72.19	10.49	15.24
	0.00	1000ans	23.29	26.63	105.76	18.53	22.82

Commentaire :

En vue de comparaison entre les cinq méthodes de calcul de débit de crue fréquentiel, nous pouvons faire les constatations suivantes :

-La formule de Sokolovsky est d'usage très répandue chez les hydrologues d'Afrique du nord, celle-ci tient compte de plusieurs paramètres caractérisant le bassin versant (la pluie fréquentielle qui correspond au temps de concentration, perte d'eau initiale, le coefficient de ruissellement, la surface du bassin versant, la forme de la crue et du temps de montée de la crue) et c'est pour cette raison qu'on a adopté la méthode de Sokolovsky.

- On peut remarquer aussi que la méthode de **Possenti** et ne tient pas compte des paramètres topographiques du bassin versant, ainsi que la méthode de ce dernier donne des résultats plus élevés.

Nous adoptons la valeur moyenne de débit maximal de crue centennale ($Q_{100\text{ ans}}=15.24\text{ m}^3/\text{s}$), donnée par les trois formules *SOKOLOVSKI*, *MALLET GAUTHIER* et *TURRAZA* étant donné que la méthode adoptée pour le tracé de l'hydrogramme de crue.

II.5.3 Hydrogramme de crue

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

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

- Branche de crue (montée) :

$$Q(t) = Q_{\max} [t/T_m]^n$$

II-26

- Branche de décrue (descente) :

$$Q(t) = Q_{\max} [(T_d + T_c - t) / T_d]^m \quad \text{II-27}$$

Avec :

Q_{\max} (%): débit maximum de fréquence donnée.

Q_t : débit instantané au moment (t).

t_m , t_d : temps de montée et de décrue.

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

- Temps de base :

$$t_b = t_m + t_d \quad \text{II-28}$$

On considère généralement que:

$$t_d = 2 t_m, \text{ et } t_m = t_c$$

Pour construire l'hydrogrammes des crues de l'Oued KRISTEL, nous avons utilisé les valeurs des débits de crues de fréquence 10%, 5%, 2%, 1% , 0.1%, 0.01%, les résultats obtenus ainsi que l'hydrogrammes de crues sont exposées dans le tableau et la figure suivantes.

II.5.4 Détermination du volume de la crue

Le volume de crue donnée par la relation suivante :

$$W_1 = \frac{(Q_{\max} \times t_m)}{m + 1} \quad \text{II-29}$$

$$W_2 = \frac{(Q_{\max} \times t_d)}{n + 1} \quad \text{II-30}$$

$$W_t = W_1 + W_2 \quad \text{II-31}$$

Avec :

W_1 : apport pendant la crue (Hm^3)

W_2 : apport pendant la décrue

W_t : apport total (Hm^3)

Tableau II-23 : Estimation du volume de crue de l’oued KRISTEL

Q max (m ³ /s)	8.92	10.57	13.47	15.24	22.82
Période de Retour	10.00 ans	20.00 ans	50.00 ans	100.00 ans	1000.00 ans
$W_1=[tm/(m+1)].Q_{max}(Hm^3)$	4616.10	5469.98	6970.73	7886.70	11809.35
$W_2=[td/(n+1)].Q_{max}(Hm^3)$	12309.60	14586.60	18588.60	21031.20	31491.60
$W_t = W_1 + W_2 (m^3)$	16925.70	20056.58	25559.33	28917.90	43300.95
$W_t = W_1 + W_2 (Hm^3)$	0.0169257	0.0200566	0.0255593	0.0289179	0.0433010

Commentaire : L’analyse des apports totaux des crues fréquentielles montre que le volume des crues pour une période de retour de 100 ans, pour le bassin versant d’Oued KRISTEL, tableaux (22), est de 28917.90 m³.

Tableau II-24 : Hydrogrammes de crues fréquentielles du bassin versant d’ Oued KRISTEL

Temps	10 ans	20 ans	100 ans	1000 ans
0	0	0	0	0
0.1	1.762	2.088	3.010	4.508
0.2	7.048	8.352	12.041	18.031
0.225	8.920	10.570	15.240	22.820
0.3	5.162	6.117	8.819	13.206
0.4	2.036	2.412	3.478	5.208
0.5	0.525	0.622	0.896	1.342
0.6	0.041	0.049	0.071	0.106
0.675	0.000	0	0	0

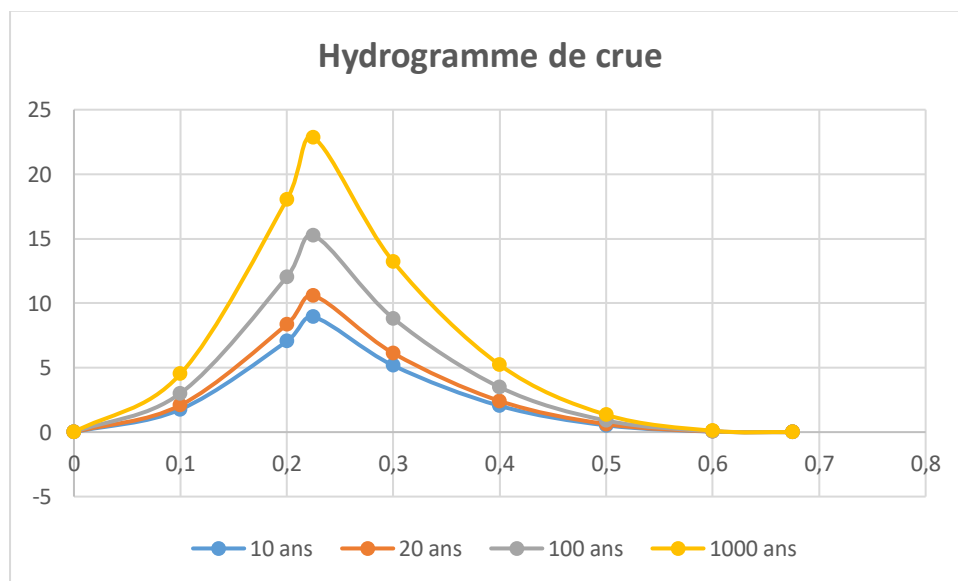


Figure II-20 : Hydrogramme de crues fréquentielles (oued Kristel)

II.6 Calcul des apports solides

L'écoulement de sédiments est le composant solide du torrent qui coule par la voie. Le transport des solides est entamé avec les processus d'érosion qui se produisent dans les cours d'eau du bassin versant vers le courant hydrique. Du point de vue hydrologique pratique, ce qui nous intéresse c'est l'écoulement qui afflue au réseau de drainage ; lequel comprend à son tour, par rapport à la rivière et à la vallée d'inondation, l'érosion des berges, le transport par le courant et la déposition du matériau dans différents tronçons.

Les crues des oueds de la région se caractérisent, compte tenu de leurs volumes d'apports et des grandes vitesses d'écoulement (vitesse moyenne en crue dépassant les 1,5 m/s, surtout en montagne, par leur extrême violence et leur force de charriage de matériaux solides).

L'étude du débit solide occupe une place très importante et très vaste dans le domaine de l'hydrologie de surface et de régularisation des débits. La matière première du débit solide est principalement l'érosion continentale.

En Algérie du Nord, l'aspect le plus important de l'érosion est l'érosion pluviale et plus précisément l'érosion par ruissellement. Les terrains étant nus, pour une raison ou pour une autre (défrichage, jachère, labour...), le ruissellement dû aux eaux de pluie et surtout à la suite d'averses torrentielles décape progressivement les horizons supérieurs du sol jusqu'à atteindre parfois la roche mère. La lame d'eau en mouvement le long des versants se divise progressivement, les filets d'eau se regroupent dans les petites dénivellations du sol. Concentrée cette eau déploie une force lui permettant d'arracher les obstacles (grains de sable, pierre, végétaux...). Cet obstacle emporté par l'eau se mélange à elle. La faculté d'érosion augmente et la force de l'érosion augmente avec :

- Epaisseur de la lame d'eau ruisselée donc l'intensité de la pluie.
- Longueur du bassin versant

Cette force diminue avec le nombre et l'importance des obstacles rencontrés. Cette érosion fluviale entre dans la catégorie des phénomènes qui, une fois déclenchés tendent par eux-mêmes à s'accélérer en une chaîne inexorable. Les matériaux arrachés au sol par l'érosion finissent par atteindre le réseau hydrographique.

II.6.1 Aspect théorique

Généralités

La dynamique des matériaux arrachés au sol et transportés dans le réseau d'écoulement dépend essentiellement de la vitesse d'écoulement et de la granulométrie.

Le champ d'exploration des vitesses varie tout au long du profil de l'oued d'amont en aval. La capacité de transport est liée à la nature granulométrique des matériaux et varie dans le temps et dans l'espace avec le débit liquide.

American Géophysique Union a classé les granulats en 19 catégories, d'après leur diamètre (Tab. 24). Ce même organisme définit le granulat comme étant un matériau non cohérent, plus ou moins roulé ou brisé, tapissant tout ou une partie des berges et du fond et qui conserve son individualité propre au cours de son transport dans les rivières.

Les différents types de granulats sont cités dans le tableau 1 en fonction de leur diamètre.

La dimension d'une particule est définie par son diamètre apparent mesuré au tamis pour les particules supérieures à 0.1 mm.

Pour les particules les plus petites (jusqu'à 4 microns environ); leur diamètre est mesuré au microscope ou évalué par la formule de Stokes au moyen de la vitesse de sédimentation et ceci pour les matériaux homogènes.

Tableau II-25 : Différents types de granulats

Nature du granulat	Diamètre du granulat en mm
Bloc	très gros 4000 ÷ 2000
	gros 2000 ÷ 1000
	moyen 1000 ÷ 500
	petit 500 ÷ 250
Moellon	gros 250 ÷ 130
	petit 130 ÷ 64
Gravier	très gros 64 ÷ 32
	gros 32 ÷ 16
	moyen 16 ÷ 8
	fin 8 ÷ 4
	très fin 4 ÷ 2
Sable	très gros 2 ÷ 1
	gros 1 ÷ 0.5
	moyen 0.5 ÷ 0.25
	fin 0.25 ÷ 0.125
Limon	gros 0.062 ÷ 0.031
	moyen 0.031 ÷ 0.016
	fin 0.016 ÷ 0.008
	très fin 0.008 ÷ 0.004

Au-dessous de 4 microns sont représentées les argiles.

Lorsqu' un matériau n'est pas homogène (sédiments naturels), c'est sa courbe granulométrique qui le caractérise. Cette dernière consiste à porter en abscisse, les diamètres des particules (mm) d'un échantillon et en ordonnée, le pourcentage en poids du matériau de diamètre inférieur à la valeur portée en abscisse.

II.6.2 Les différents aspects du transport solide

Les matériaux roulent ou glissent sur le fond sans jamais le quitter, c'est **le transport de fond** ou **charriage**.

Les matériaux les plus fins sont entraînés par le courant sans toucher le fond représente **la suspension**.

Certains matériaux progressent par bonds successifs, se trouvant tantôt sur le fond, tantôt au sein du liquide représente la **saltation**. Cette dernière notion est considérée en général avec le charriage car il n'existe pas de théorie particulière.

II.6.3 Estimation du transport solide

Compte tenu de l'absence de mesures du transport solide des oueds de la région, l'estimation du transport solide des oueds du secteur d'étude a été réalisée sur la base des formules empiriques les plus utilisées tel que les formules de Shyl, de Fournier et de Gavrilovic.

1) Application des formules empiriques

Afin de pouvoir estimer le taux d'abrasion ou dégradation spécifique des bassins des oueds de la région, on a utilisé les formules expérimentales appliquées aux conditions algériennes. La formule de Tixeront se base sur les corrélations établies à partir des mesures effectuées dans les oueds importants en Algérie. La formule de Fournier estime la dégradation du bassin à partir de la pluviométrie et la morphométrie.

L'objectif à atteindre à travers la mesure du débit solide est la connaissance du comportement du bassin versant vis-à-vis du ruissellement et par conséquent de l'érosion hydrique. Celle-ci est identifiée à travers le calcul de l'érosion spécifique définie comme étant la quantité de sédiments arrachés au bassin versant et charriés par le cours d'eau rapportée à l'unité de surface. Elle est exprimée en t/km².an. C'est un paramètre difficilement calculable. Plusieurs facteurs entrent en jeu pour le déterminer, depuis la nature des sols, la végétation du bassin versant jusqu'au ruissellement proprement dit.

Une des approches utilisées dans le contexte algérien en zone semi-aride est la modélisation mathématique qui a donné des résultats représentatifs de la région d'étude. Le modèle mathématique le plus performant rencontré est le modèle régressif puissance.

La méthode de Gravitovitch a donné des résultats comparables à ceux trouvés par l'observation dans certains bassins versants.

1. Formule de FOURNIER :

$$A. \quad T_a = \frac{1}{36} \left(\frac{Pm^2}{Pa} \right)^{2.65} \left(\frac{H^2}{S} \right)^{0.46} \quad \text{II-32}$$

Avec :

Ta : Taux d'abrasion moyen interannuel en tonnes/km²/an ;

Pm : Pluie moyenne mensuelle du mois le plus pluvieux ; (Pm = 70.343 mm)

Pa Pluie moyenne interannuelle en (Pa= 366.962mm).

H : Altitude à 45 % en (m) : (H= H_{max} - H_{min} = 485-0.00= 485 m).

S_{bv} : Surface du bassin versant en (S_{bv}= 1.346km²).

AN :

$$T_a = \frac{1}{36} \left(\frac{70.343^2}{366.962} \right)^{2.65} \left(\frac{485^2}{1.346} \right)^{0.46} = 7067.144 T/Km^2/an$$

2. Formule de SHYL :

Cette formule donne l'apport solide moyen annuel en suspension en (t/Km²/An), elle est exprimée par :

$$T_a = (91.78 * K - 737.62) \quad \text{II-20}$$

Avec :

$$K = \left(\frac{P^2}{p_{moy}} \right) \times C$$

Avec :

P = pluviométrie moyenne du mois le plus arrosé (P = 70.343 mm)

P_{moy} = pluie interannuelle ($P_{moy}=366.962$ mm)

C = coefficient lié au régime pluviométrique, pris égal à 1

AN :

$$K = \left(\frac{70.343^2}{366.962}\right) * 1 = 13.484$$

Donc :

$$T_a = (91.78 * 13.484 - 737.62) = 500.372T/Km^2/an$$

3. Formule de Gavrilovic :

La méthode de Gravitovitch a été utilisée pour la détermination d'un coefficient d'érodabilité des sols et des paramètres de la production du débit solide dans le nord Algérie.

L'application de cette méthode en Algérie a été basée sur :

- La carte d'érosion à échelle 1/200 000, et qui ne peut à elle seule, quantifier le phénomène de l'érosion actuellement;
- L'utilisation de plusieurs paramètres intervenant dans l'analyse de l'existence du phénomène de l'érosion par rapport à la méthodologie classique utilisée dans l'établissement de la carte de l'érosion;
- L'utilisation des données satellitaires qui constituent les paramètres les plus fiables de l'heure.

Cette méthode a permis de calculer le coefficient d'érodabilité des sols et de dresser une carte pour l'Algérie du Nord afin de pouvoir l'estimer dans n'importe quel bassin versant. Ce coefficient d'érodabilité Z est donné par l'expression suivante :

$$T_0 = T_{SP} \times G_{rm} \quad \text{II-21}$$

$$T_{SP} = T \times P_{moy} \times \pi \times \sqrt{Z^3} \quad \text{II-35}$$

$$T = \sqrt{\frac{t}{10}} + 1 \quad \text{II-36}$$

$$G_m = \frac{\sqrt{P + H_{moy}}}{0.2(L + 10)} \quad \text{II-37}$$

Avec :

T_0 : Taux d'abrasion en (t/Km².an)

T_{SP} : Production totale de débits solide en m³/an sur l'ensemble d'un bassin versant ou une partie ou une parcelle.

T : Coefficient de température de la région.

P_{moy} : Précipitation moyenne annuelles en (mm).

L : Longueur de talweg principale en (km).

P_{bv} : Périmètre du bassin versant en (km).

H_{moy} : Altitude moyenne en (km).

G_m : Taux de rétention des sédiments produits par le bassin versant.

t : Température moyenne interannuelle en C°.

Z : Coefficient d'érodabilité des sols, six catégories de destruction des sols ont été établies et sont présentées dans le tableau ci-dessous avec le débit solide spécifique correspondant. (**Z= 0.15**)

Tableau II-26 : Intensité du processus d'érosion

Catégorie de destruction	Intensité du processus d'érosion dans le lit et sur le bassin versant	Coefficient d'érodabilité "Z"	Valeur moyenne du coefficient "Z"	Débit solide spécifique m ³ /km ² .an
I	Erosion excessive	1.01 à 1.50 et au de la	1.25	< 3000
II	Erosion forte	0.71 à 1.00	0.85	1500 à 3000
III	Erosion moyenne	0.41 à 0.70	0.55	1000à 1500
IV	Erosion faible	0.20 à 0.40	0.30	500 à 1000
V	Erosion très faible	0.01 à 0.19	0.10	0 à 500
VI	Retenues	0.00	0.00	0.00

Commentaire :

Erosion dans le lit de l'oued KRISTEL par rapport le débit spécifique (**159.161 m³/km².an**) très faible, donc la valeur de coefficient d'érodabilité égale à **0,15**.

Tableau II-27 : Les données pour calculer le taux d'abrasion

S_{bv} (Km ²) Surface de BV	1.346
P_{bv} (Km) Périmètre de BV	5.468
L (Talweg) en Km	1.804
Hmax (m)	485.000
Hmin (m)	0.000
Hmoy (m)	291.300
Pa (mm)	366.962
P (mm)	70.343
C (Coefficient)	1.000
K (F.SHYL)	13.484
t (Température C°)	17.95
T (Coefficient thermique)	2.340
Z(Coefficient d'érosion)	0.150
Grm (tonne/m ³) (Coefficient)	1.017
Tsp(m ³ /Km ² /an)	156.625
γ_s (t/m ³)	1.600

Le tableau suivant donne les estimations du transport solide d'après le calcul du taux d'abrasion des bassins étudiés

Tableau II-28 : Estimations des taux d'abrasion (Tonnes/km²/an)

Formule	taux d'abrasion « Ta » (Tonne/Km ² .ans)
Fournier	7067.144
SHYL	500.372
GRAVILIVIYCH	159.216
Moyenne	329.766

Commentaire :

Les valeurs adoptées sont représentées dans le tableau ci-dessus, on remarque les valeurs très rapprochées. Donc on prend la **moyenne** entre les deux dernières formules

($Ta = 329.766 \text{ T/Km}^2/\text{an}$).

Conclusion

En Algérie, la majorité des crues et inondations sont dues à des précipitations torrentielles qui engendrent des dégâts humains et matériels considérables.

L'étude des inondations d'une région spécifique pour des raisons préventives comme dans le cas de l'oued **KRISTEL** qui traverse la ville, nécessite en premier lieu de connaître le régime hydrologique de l'écoulement qui est lié à plusieurs facteurs physiques dans le but de déterminer l'aléa.

D'une autre part on peut noter que l'ajustement le plus adéquat a été trouvé suivant la loi de " **Log Normal** " à travers lequel on a pu tracer les hydrogrammes des crues de différentes fréquences qui nous permettent de déterminer les crues probables afin de tenir compte par la suite à toute mesure de sécurité qui est bien utile dans le dimensionnement des divers ouvrages.

A la fin on peut dire que ce projet nous a permis de faire une synthèse pour une étude hydrologique sachant qu'une étude hydrologique est très importante dans le domaine de la construction des ouvrages d'art.

Les aménagements de protection contre les crues sont généralement dimensionnés sur la base de calculs hydrologiques et hydrauliques appropriés, permettant l'évacuation et/ou dérivation d'un plus grand volume possible des apports de crue. Les canaux d'évacuation de ces apports doivent être dimensionnés sur la base des débits de pointe estimés avec précision.

Sur la base des résultats donnée par des formules empiriques qui donne des valeurs très rapprochées. Donc on prend la moyenne de ces valeurs (**Q 1% =15.24 m³/s**) pour dimensionnée les ouvrages d'arts et calcul les dimensions de la section de l'oued pour évacuer les eaux pluviales.

Chapitre 03 : Modélisation du cours d'eau non aménagé

III Modélisation du cours d'eau non aménagé

Introduction

Certaines inondations provoquant des dégâts humains et matériels qui peuvent être catastrophiques, surtout dans les zones urbaines, il faut faire certains aménagements pour amortir ces dégâts.

La ville de KRISTEL wilaya d'Oran est un exemple parfait de ce phénomène, où toutes les conditions (Climatiques -Hydrologiques -Morpho métriques –Morpho géologiques- Extension urbanisable anarchique se réunissent afin de donner un cas typique des inondations dans la région.

En général les études de protection consistent à protéger les lits et les berges par des dispositifs qui supporteront tout risque d'érosion. Pour la protection des berges, la méthode adoptée sera en fonction des caractéristiques hydrauliques (tracé de la ligne en plan, la pente, l'importance des crues), de la nature du fond des berges et la disponibilité locale en matériaux de protection et une main d'œuvre spécialisée.

L'objectif de notre travail est d'étudier l'inondation de cette ville, et de traiter les moyens de protection contre ce phénomène par des aménagements et des ouvrages de protection.

III.1 Généralités

III.1.1 Écoulements à surface libre

Un écoulement à surface libre est un écoulement de liquide avec une interface libre entre l'air et l'eau. La pression y est généralement égale à la pression atmosphérique. Ce type d'écoulement se produit sous l'action de la force de gravité due à l'existence d'une pente.

- Canaux à ciel ouvert

Un canal est un système de transport dans lequel l'eau s'écoule et dont la surface libre est soumise à la pression atmosphérique. Ils peuvent être des canaux naturels ou artificiels, caractérisés par une pente " i " et un coefficient de rugosité " n ".

1) Canaux naturels

Ce sont les canaux qui existent naturellement en terre, comme les rivières, les fleuves, les torrents, etc. Ces canaux ont des caractéristiques géométriques et hydrauliques généralement irrégulières.

Ils sont formés par l'érosion naturelle du sol et leur section transversale peut varier de façon importante le long du cours d'eau. Leur pente et leur rugosité dépendent de la nature du terrain traversé.

Les écoulements dans les canaux naturels sont souvent non uniformes et non permanents, en raison des variations de débit et de la géométrie irrégulière. Leur étude nécessite des modèles mathématiques plus complexes que pour les canaux artificiels.

En résumé, les écoulements à surface libre dans les canaux naturels présentent des caractéristiques spécifiques liées à l'irrégularité de leur géométrie et de leur rugosité. Leur étude hydraulique est essentielle pour comprendre le comportement des cours d'eau et dimensionner les aménagements nécessaires.

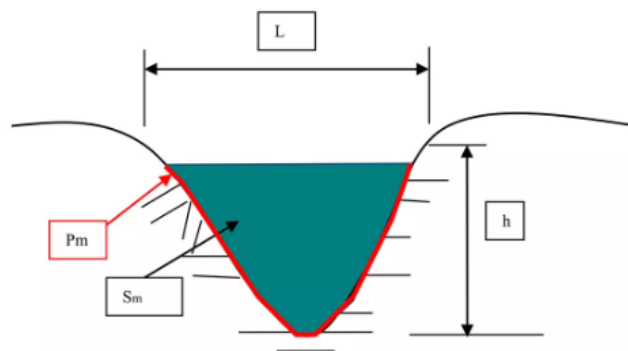


Figure III-1 : Canal naturel

- **Section d'écoulement (ou section mouillée) S**

C'est la partie de la section transversale du canal occupée par l'eau, délimitée par les parois et la surface libre

- **Périmètre mouillé P_m**

C'est la longueur de la ligne de contact entre l'eau et les parois du canal (fond et berges). Il exclut la largeur au niveau de la surface libre.

- **Largeur au miroir B ou L**

C'est la largeur de la section d'écoulement mesurée à la surface libre. À ce niveau, la pression de l'eau est égale à la pression atmosphérique.

- **Tirant d'eau**

C'est la profondeur maximale de l'écoulement dans une section donnée du canal.

2) Canaux artificiels

Ce sont des cours d'eau réalisés par l'homme, tels que :

Les canaux découverts construits au ras du sol (canaux de navigation, d'adduction et d'évacuation, d'irrigation et de drainage)

Les canaux couverts où l'eau ne remplit pas toute la section (tunnels hydrauliques, aqueducs, égouts, etc.)

Contrairement aux cours d'eau naturels, les canaux artificiels présentent des caractéristiques géométriques et hydrauliques plus régulières. Cela permet une modélisation plus précise de leur écoulement en appliquant la théorie hydraulique.

En résumé, les principaux paramètres géométriques qui définissent un écoulement dans un canal sont la section mouillée, le périmètre mouillé, la largeur au miroir et le tirant d'eau. Les canaux artificiels se distinguent par une géométrie plus régulière facilitant leur étude hydraulique.

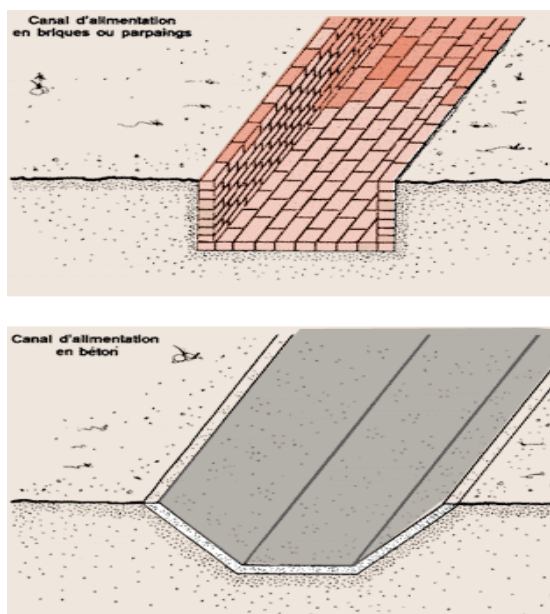


Figure III-2 : Canaux artificiels à ciel ouvert

III.1.2 Types d'écoulement

A. Variabilité dans le temps :

Les types d'écoulement qu'on peut avoir en hydraulique fluvial sont comme suit :

- **Écoulement permanent :**

Un écoulement est considéré comme permanent lorsque la profondeur de l'eau et les autres paramètres changent lentement au fil du temps.

$$\frac{dv}{dt} = \frac{dQ}{dt} = \frac{dh}{dt} = \frac{dU}{dt} = 0$$

Il se divise en :

✓ Uniforme

✓ Non uniforme

- **Ecoulement non permanent :**

L'écoulement est non uniforme si la profondeur de l'eau et les autres paramètres varient avec le temps, c'est à dire :

$$\frac{dv}{dt} \neq \frac{dQ}{dt} \neq \frac{dh}{dt} \neq \frac{dU}{dt} \neq 0$$

Il se divise en :

✓ Uniforme

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

B. Variabilité dans l'espace

- **Ecoulement uniforme**

Un écoulement est considéré comme uniforme lorsque les paramètres tels que la vitesse, la pente, la rugosité, la profondeur et la section restent constants tout au long de l'espace.

$$\frac{dv}{dx} = \frac{dQ}{dx} = \frac{dh}{dx} = \frac{dU}{dx} = 0$$

- **Ecoulement non uniforme**

Un écoulement est considéré comme non uniforme lorsque les paramètres tels que la vitesse, la pente, la rugosité, la profondeur et la section varient tout au long de l'espace.

$$\frac{dv}{dx} \neq \frac{dQ}{dx} \neq \frac{dh}{dx} \neq \frac{dU}{dx} \neq 0$$

- **Ecoulement non uniforme graduellement varié**

Un écoulement est qualifié de non uniforme graduellement varié lorsque la variation de hauteur dans le sens de l'écoulement est très faible. En général, si x représente une longueur d'écoulement et h une variation de hauteur, cette dernière demeure faible.

On a :

$$\Delta h / x \ll 1.$$

- **Écoulement non uniforme rapidement varié**

Un écoulement présente un régime rapidement varié lorsque la variation de hauteur dans la direction de l'écoulement devient significative. Ce phénomène se produit notamment à proximité d'une singularité ou lors d'un ressaut hydraulique.

III.1.3 Régime d'écoulement

Un écoulement peut être classé en différents types selon le nombre de Froude, qui prend en compte les forces d'inertie et les forces de gravité (Lancastre, 1996). Le nombre de Froude est défini comme le rapport entre les forces de gravité et les forces d'inertie.

$$F_r = \frac{v}{\sqrt{g \cdot D_h}} \quad \text{III-1}$$

Où :

v : Vitesse moyenne de l'écoulement;

D_h : Profondeur hydraulique;

g : Accélération gravitationnelle.

Quand:

- $Fr = 1$: le régime est critique (supercritique) ;
- $Fr < 1$: le régime est fluvial (subcritique) ;
- $Fr > 1$: le régime est torrentiel.

La notion de régime fluvial, torrentiel ou critique s'applique évidemment au cas particulier du régime uniforme.

Quand :

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

Un autre nombre adimensionnel couramment utilisé en hydraulique, en complément du nombre de Froude, est le nombre de Reynolds. Il permet de définir trois régimes d'écoulement et représente le rapport entre les forces de viscosité et les forces d'inertie.

$$Re = \frac{V \cdot h}{\nu} \quad \text{III-2}$$

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

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

Donc la combinaison des deux nombres donne la classification suivante :

- $Fr < 1$, $Re < 500$: écoulement fluvial-laminaire.
- $Fr < 1$, $Re > 2000$: écoulement fluvial-turbulent.
- $Fr > 1$, $Re < 500$: écoulement torrential-laminaire.
- $Fr > 1$, $Re > 2000$: écoulement torrential-turbulent .

III.1.4 Propriétés des canaux

III.1.4.1 Propriétés géométriques

Les paramètres géométriques sont des caractéristiques fondamentales qui décrivent la forme et les dimensions d'un canal ou d'un système hydraulique. Ils jouent un rôle essentiel dans l'analyse des écoulements d'eau et la conception des infrastructures hydrauliques. Voici quelques-uns des paramètres géométriques clés :

Section Transversale (A)

La section transversale représente la superficie à travers laquelle l'eau s'écoule. Ce paramètre est crucial pour le calcul du débit et est généralement exprimé en mètres carrés (m²).

Périmètre Mouillé (P)

Le périmètre mouillé est la longueur de la surface de contact entre l'eau et les parois du canal. Il est utilisé dans le calcul du rayon hydraulique et est exprimé en mètres (m).

Rayon Hydraulique (R)

Le rayon hydraulique est défini comme le rapport entre la section mouillée (A) et le périmètre mouillé (P) :

$$R = \frac{P}{A} \quad \text{III-3}$$

Ce paramètre est essentiel pour caractériser l'écoulement dans un canal.

Largeur de la Surface Libre (B)

La largeur de la surface libre est la distance entre les rives du canal à la surface de l'eau, mesurée perpendiculairement à la direction de l'écoulement. Elle influence la profondeur de l'écoulement et la distribution de la vitesse.

Profondeur d'Eau (h)

La profondeur d'eau est la distance verticale entre le fond du canal et la surface libre de l'eau. C'est un facteur clé dans le calcul du débit et des caractéristiques d'écoulement.

Profondeur Moyenne (h_m)

La profondeur moyenne est définie comme le rapport entre la section mouillée (A) et la largeur de la surface libre (B) :

$$h_m = \frac{A}{B} \quad \text{III-4}$$

Ce paramètre donne une indication générale de la profondeur d'écoulement dans le canal.

Pente Longitudinale (i)

La pente longitudinale désigne l'inclinaison du fond du canal dans le sens du flux d'eau.

Largeur au Fond (b)

La largeur au fond est la mesure horizontale qui sépare les deux parois ou les bords inférieurs d'un canal.

III.1.4.2 Paramètres Hydrauliques

Les paramètres hydrauliques sont des variables essentielles pour caractériser et analyser l'écoulement de l'eau dans un système hydraulique. Ils permettent d'évaluer les performances du système et de comprendre le comportement de l'eau. Voici les principaux paramètres couramment utilisés :

Débit (Q)

Le débit représente la quantité d'eau qui s'écoule à travers une section donnée par unité de temps. C'est un paramètre fondamental pour déterminer le volume d'eau circulant dans le système. Il est généralement exprimé en mètres cubes par seconde (m^3/s) ou en litres par seconde (l/s).

Vitesse d'Écoulement (V)

La vitesse d'écoulement désigne la rapidité avec laquelle l'eau se déplace dans le système. Elle dépend de la géométrie du canal, de la pente et de la rugosité de la surface. La vitesse est essentielle pour évaluer les performances hydrauliques et le transport des sédiments. Elle est généralement mesurée en mètres par seconde (m/s).

Pente Hydraulique (i)

La pente hydraulique représente la déclivité du terrain sur lequel l'eau s'écoule. Elle influence directement les performances hydrauliques du système. La pente est souvent exprimée en pourcentage (%) ou en mètres par mètre (m/m).

La pente hydraulique se calcule à l'aide de la formule suivante :

$$I = \frac{\Delta h}{L} \quad \text{III-5}$$

Où :

- Δh : représente la différence de niveau entre les altitudes ($h_1 - h_2$).
- L : désigne la longueur du parcours.

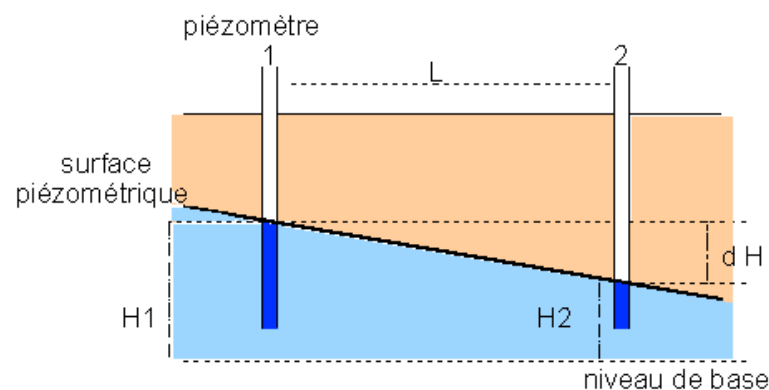


Figure III-3 : Représentation du gradient hydraulique.

Profondeur Critique (h_c)

La profondeur critique est la profondeur d'eau à laquelle l'énergie spécifique est minimisée pour un écoulement donné. Elle est cruciale pour déterminer si un écoulement est subcritique ou supercritique, ce qui influence le comportement de l'eau dans un canal.

Pression

La pression dans un système hydraulique correspond à la force exercée par l'eau sur les parois du canal ou sur les structures environnantes. C'est un facteur déterminant dans l'analyse des forces agissant sur les infrastructures hydrauliques, mesurée en pascals (Pa) ou en bars.

Poids Volumique de l'Eau (γ_w)

Le poids volumique de l'eau (γ_w) est défini comme la masse d'eau par unité de volume :

$$\gamma_w = g\rho_w \quad \text{III-6}$$

Avec :

- ρ_w : masse volumique de l'eau, qui est de 1000 kg/m³.
- g : accélération due à la gravité, qui est de 9.81 m/s².

Coefficient de Manning (n)

Le coefficient de Manning est un paramètre qui mesure la rugosité d'un canal ou d'une surface. Il est utilisé pour estimer la vitesse d'écoulement dans les canaux ouverts. Des valeurs élevées de n indiquent une surface plus rugueuse, ce qui entraîne une réduction de la vitesse de l'eau. Ce coefficient est essentiel pour les calculs de débit et d'écoulement.

Tableau III-1 : Valeurs de rugosité selon le lit

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 enrochement	0.025
Canal en Gabion.	0.030

Ces paramètres hydrauliques fondamentaux permettent de caractériser et de comprendre le comportement de l'eau dans les systèmes hydrauliques, facilitant ainsi leur conception, leur analyse et leur optimisation.

III.1.5 Conditions de l'Écoulement Uniforme

Les éléments suivants définissent les conditions d'un écoulement uniforme :

- Chaque section des tronçons proposés présente un débit d'eau constant.
- Le canal adopte une forme prismatique.
- La profondeur h du courant reste constante sur toute la longueur.
- Chaque section affiche une pente uniforme.
- Les parois sont uniformément rugueuses.
- Aucune résistance locale n'est présente.

III.1.6 Formules de Calcul

Il est essentiel d'utiliser des formules de calcul pour les canaux à surface libre afin d'analyser le débit de l'eau, ainsi que de concevoir et gérer les systèmes hydrauliques. Ces équations incluent celles de Manning, de Chezy, et l'équation de continuité, qui permettent d'évaluer des paramètres tels que la vitesse, le débit et la perte de charge.

- **Formule de Chezy**

La formule de Chezy est l'équation principale utilisée pour déterminer un écoulement uniforme constant. La variation moyenne de la vitesse du courant est formulée comme suit :

$$V = C\sqrt{RI} \quad \text{III-7}$$

En utilisant :

$$Q = V \cdot S \quad \text{III-8}$$

On obtient :

$$Q = C \cdot S \cdot \sqrt{RI} \quad \text{III-9}$$

Avec :

C : Coefficient de chezy (0.5 m/s)

R : Rayon hydraulique (surface mouillée S_m sur le périmètre mouillé P_m)

R : S_m/P_m (m)

I : Pente de fond du canal (radier)

Formule de dimensionnement

La relation suivante représente la formule de dimensionnement utilisée, connue sous le nom de Manning Strickler, qui s'applique à toutes les formes géométriques pour différentes sections ouvertes

Avec :

$$Q = \frac{1}{n} S R^{3/2} \sqrt{I} \quad (\text{IV. 6})$$

- Q : Débit de dimensionnement (m³/s).
- n : Rugosité du canal.
- S : Section mouillée (m²).
- I : pente du fond du canal (m/m).
- R : Rayon hydraulique (m)

III.2 Diagnostique et modélisation du cours d'eau non Aménagé

III.2.1 Modélisation d'écoulement

La modélisation des écoulements est un outil fondamental pour comprendre et gérer les risques d'inondation, particulièrement lors des crues. Elle utilise des logiciels de simulation et des données hydrologiques pour modéliser le comportement des cours d'eau durant des événements extrêmes. Cette approche permet d'identifier les zones vulnérables et d'évaluer les impacts potentiels des inondations, facilitant ainsi la proposition d'aménagements adaptés pour réduire ces risques.

III.2.2 Présentation du Logiciel HEC-RAS

HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System) est un logiciel intégré de modélisation hydraulique développé par le Hydrologic Engineering Center du U.S. Army Corps of Engineers. Il permet de simuler les écoulements à surface libre dans les cours d'eau et les canaux.

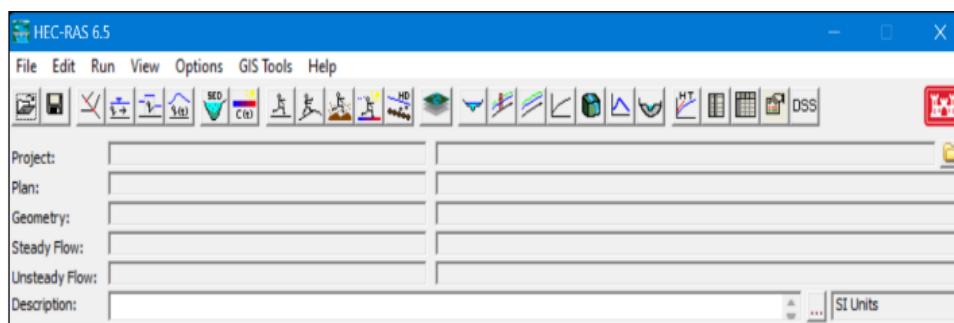


Figure III-4 : Interface utilisateur du logiciel HEC-RAS

Fonctionnalités

HEC-RAS englobe plusieurs aspects hydrologiques et hydrauliques :

- Analyse du ruissellement des précipitations
- Hydraulique fluviale
- Analyse des dommages d'inondation
- Simulation des écoulements permanents et non permanents
- Transport de sédiments
- Analyse de la qualité d'eau
- Conception d'ouvrages hydrauliques

Gestion des Données

Le centre de contrôle d'HEC-RAS permet de gérer et de combiner différents types de données :

- Géométrie
- Débits et conditions aux limites
- Conditions de calcul
- Résultats
- Applications

HEC-RAS est largement utilisé dans les firmes d'ingénierie et les organismes gouvernementaux pour :

- Étudier l'impact de la construction d'ouvrages (ponts, seuils, épis)
- Simuler des ruptures de barrages
- Réaliser des études d'inondation
- Modéliser le transport de traceurs chimiques ou de polluants
- Délimiter les zones inondables

III.2.3 Étapes de la Modélisation d'Écoulement avec HEC-RAS

- Création du TIN (Triangulated Irregular Network)

La première étape consiste à générer un modèle numérique de terrain (MNT) à l'aide du logiciel ArcGIS. Ce MNT, sous forme de TIN (Triangulated Irregular Network), représente fidèlement la topographie de la zone d'étude.

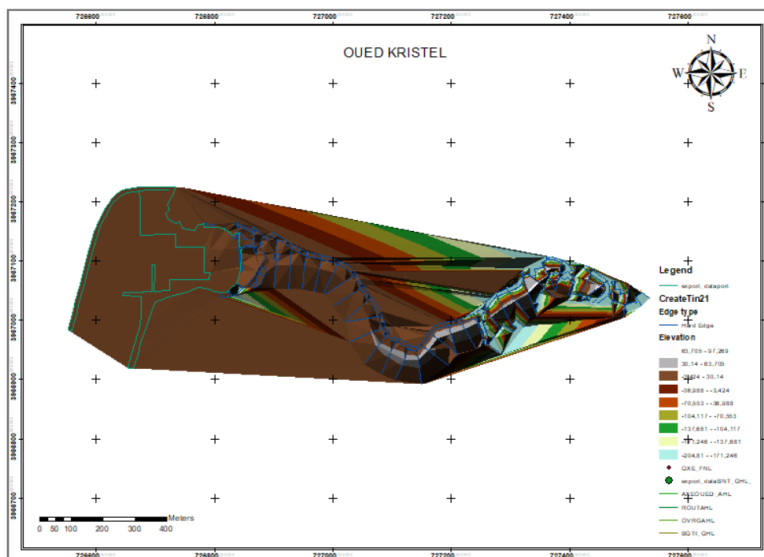


Figure III-5 : TIN de oued Kristel

- **Importation dans HEC-RAS**

Après la création du TIN, celui-ci est importé dans HEC-RAS en utilisant un fichier de projection (ESRI avec l'extension. PRJ) pour assurer un alignement correct du modèle avec le système de coordonnées géographiques.

- **Tracé de l'Axe du Cours d'Eau et des Sections Transversales**

Dans HEC-RAS, l'axe du cours d'eau est tracé, et des sections transversales sont définies à intervalles réguliers. Ces sections doivent représenter fidèlement les variations du lit du cours d'eau pour garantir une modélisation précise des écoulements.

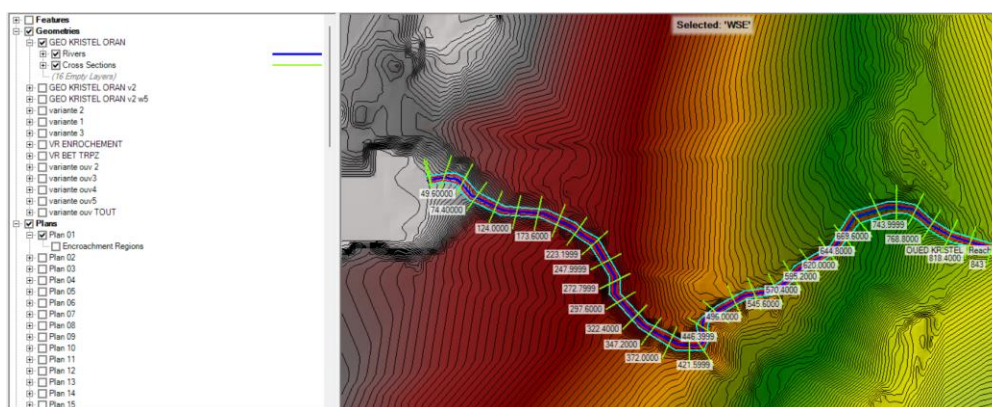


Figure III-6 : Modèle de Terrain et Sections Transversales dans RAS Mapper

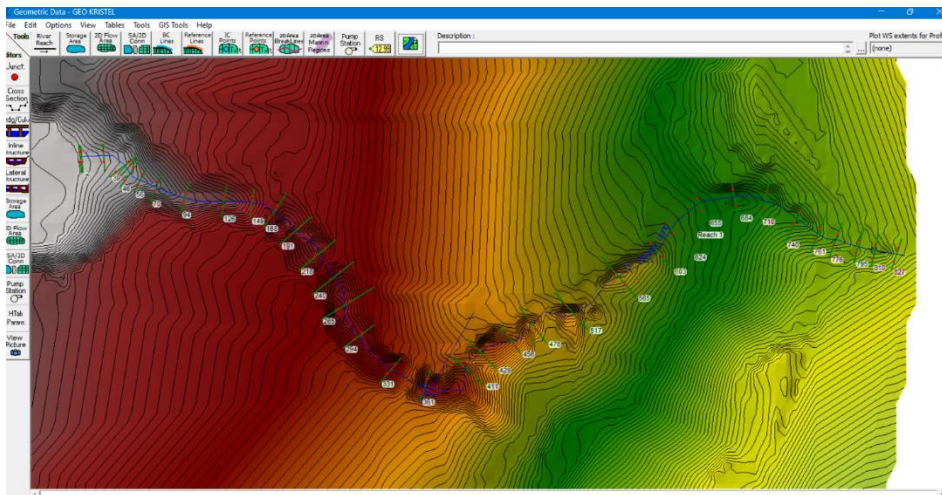


Figure III-7 : Importation des données géométriques dans HEC-RAS.

Edit Manning's n or k Values

River: OUED KRISTEL Edit Interpolated XS's Channel n Values have a light green background

Reach: Reach 1 All Regions

Selected Area Edit Options:

River Station	Frctn (n/k)	n #1	n #2	n #3
1 843	n	0.022	0.022	0.022
2 818.4000	n	0.022	0.022	0.022
3 793.5999	n	0.022	0.022	0.022
4 768.8000	n	0.022	0.022	0.022
5 743.9999	n	0.022	0.022	0.022
6 719.2000	n	0.022	0.022	0.022
7 694.3999	n	0.022	0.022	0.022
8 669.6000	n	0.022	0.022	0.022
9 644.8000	n	0.022	0.022	0.022
10 620.0000	n	0.022	0.022	0.022
11 595.2000	n	0.022	0.022	0.022
12 570.4000	n	0.022	0.022	0.022
13 545.6000	n	0.022	0.022	0.022
14 520.7999	n	0.022	0.022	0.022
15 496.0000	n	0.022	0.022	0.022
16 471.1999	n	0.022	0.022	0.022
17 446.3999	n	0.022	0.022	0.022
18 421.5999	n	0.022	0.022	0.022
19 396.7999	n	0.022	0.022	0.022
20 372.0000	n	0.022	0.022	0.022
21 347.2000	n	0.022	0.022	0.022
22 322.4000	n	0.022	0.022	0.022
23 297.6000	n	0.022	0.022	0.022
24 272.7999	n	0.022	0.022	0.022

OK Cancel Help

Figure III-8 : Introduction des valeurs de Manning (terrain naturel).

- **Conditions aux Limites**

Dans le cadre de la modélisation hydraulique, les conditions aux limites définissent le comportement de l'eau aux frontières de la zone d'étude. Elles régulent l'écoulement de l'eau aux extrémités amont et aval du modèle, ce qui a un impact significatif sur les résultats de la simulation.

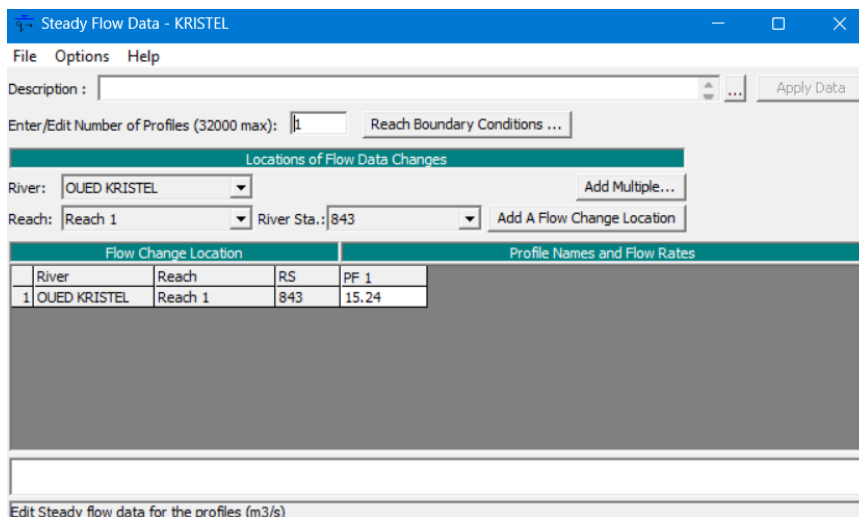


Figure III-9 : Introduction du débit de projet (crues centennales).

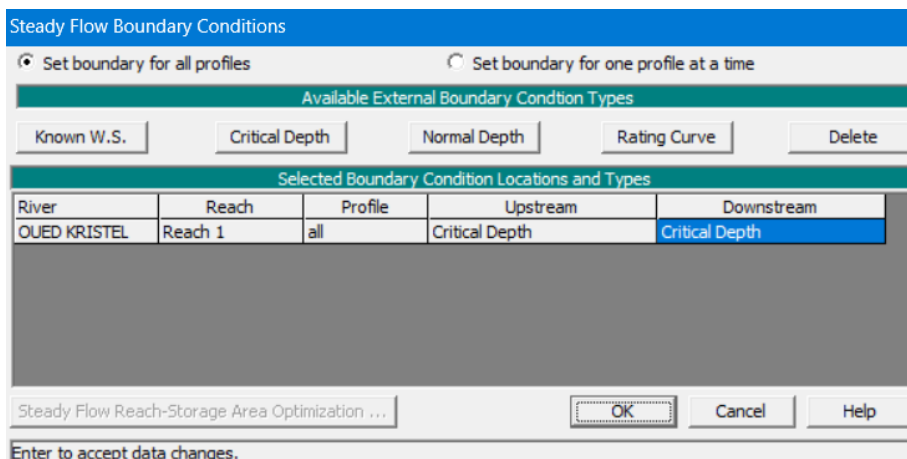


Figure III-10 : Conditions aux limites.

Simulation

Après avoir configuré le modèle et les paramètres, la simulation est lancée dans HEC-RAS. Le logiciel calcule les profils d'écoulement, les vitesses et les niveaux d'eau à travers les sections définies.

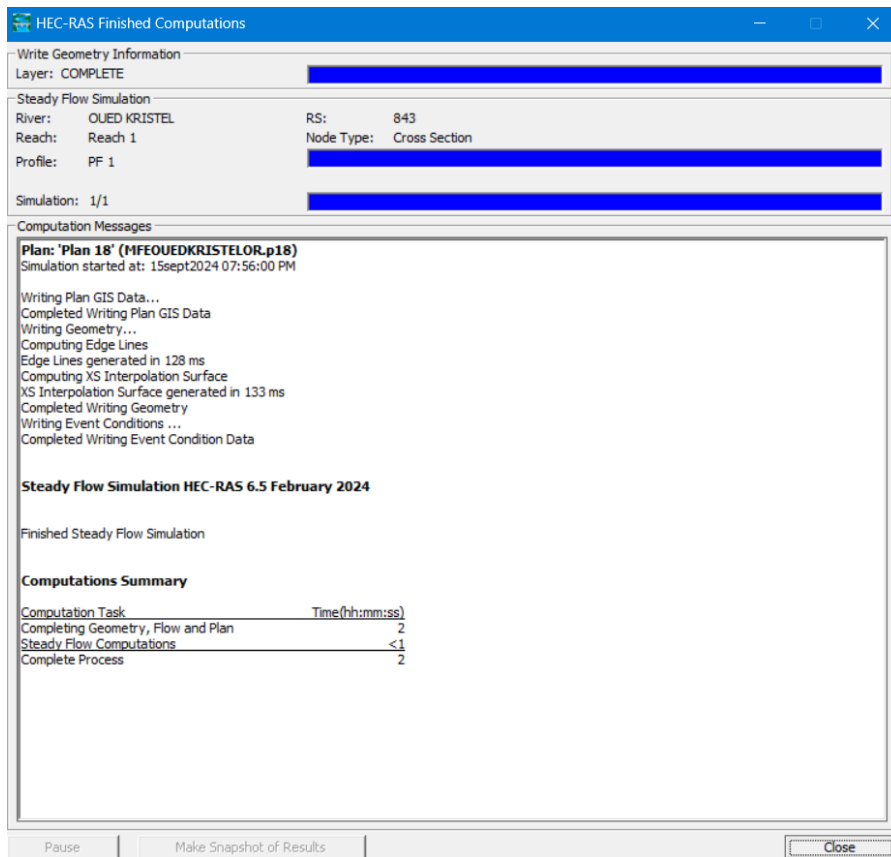


Figure III-11 : Fin de simulation

Résultats de la Simulation

L'entrée des données géométriques relatives aux profils des sections transversales et aux débits de pointe pour différentes périodes de retour, ainsi que les conditions limites dans le logiciel HEC-RAS, a permis de réaliser les calculs nécessaires.

- Vue 3D de l'oued

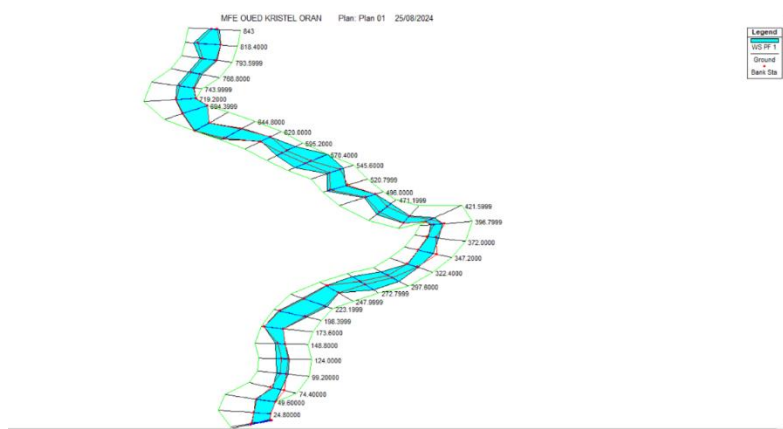


Figure III-12 : Vue 3D de l'oued

- Profils en long

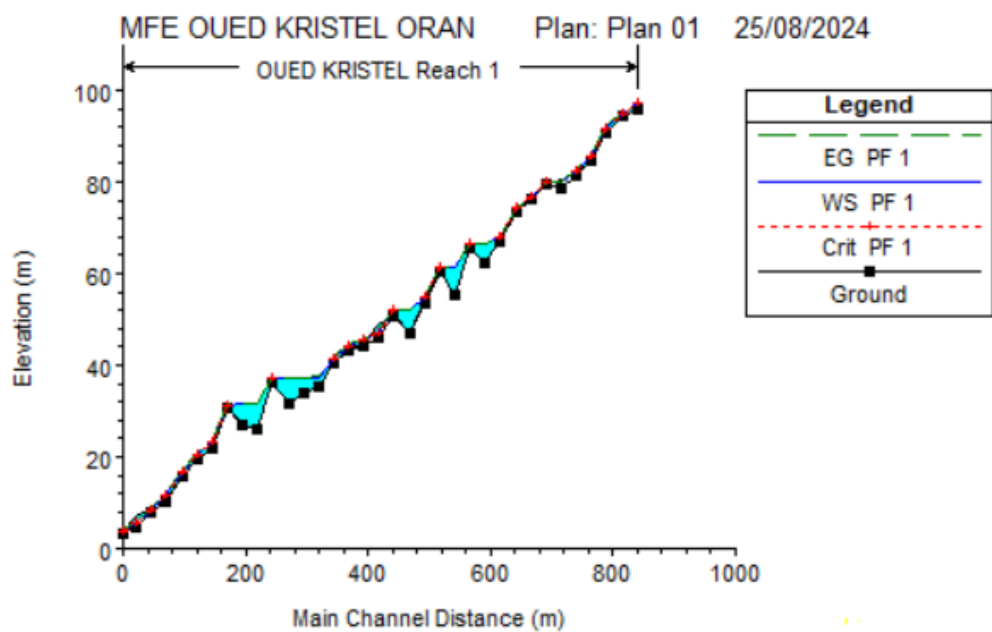


Figure III-13 :Profils en long

- Sections Transversales de l'Oued

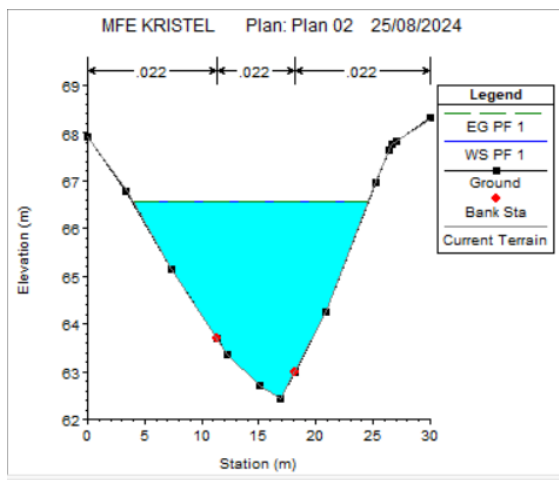


Figure III-14 : Sections 19

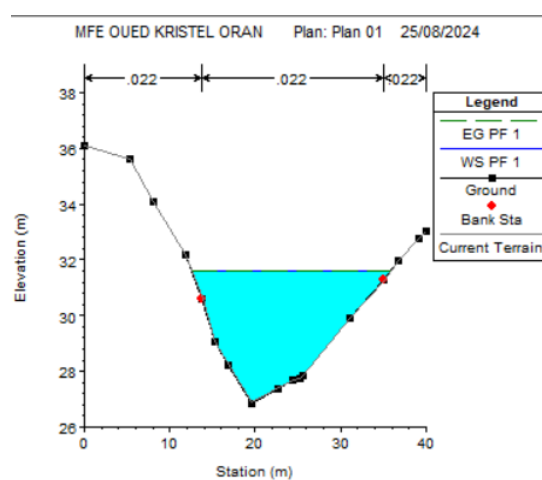


Figure III-15 : Sections 620

Le tableau suivant résume les résultats de la simulation d'oued kristel avec le débit centennal Q100 ans.

Avec :

- Min Ch. El : Altitude du radier du canal (m).

- W.S Elev : Altitude du plan d'eau calculé (m).
- Crit W.S : Altitude du plan d'eau critique (m).
- E.G Elev : Altitudes de la ligne d'énergie (m).
- E.G Slope : Pente de la ligne d'énergie (m/m).
- Vel Ch : Vitesse d'écoulement (m/s).
- Flow Area : Section mouillée (m²).
- Top Width : Largeur au miroir (m).
- Froude #Chl : Nomb

III.2.4 Les zones inondables :

Dans cette section, nous nous sommes appuyés sur les résultats de la simulation précédente. Nous avons fait usage de l'application RAS-Mapper, intégrée dans HEC-RAS, pour visualiser et exploiter ces résultats de manière plus approfondie.

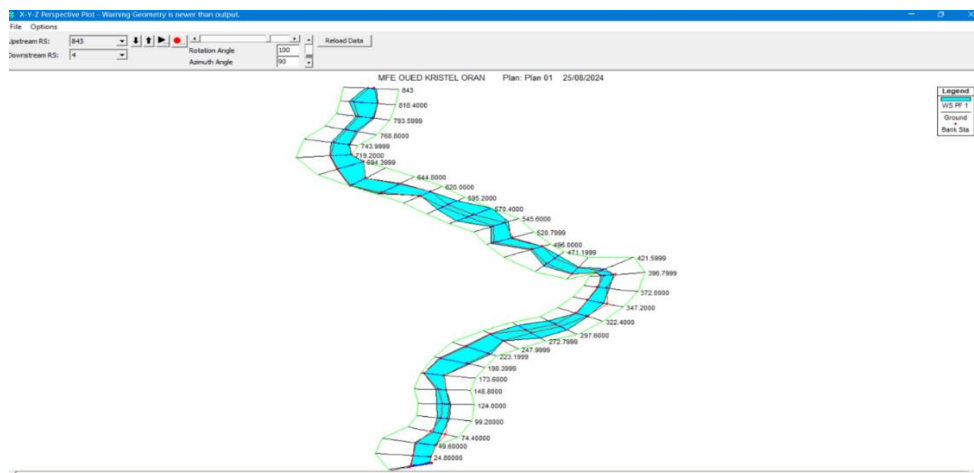


Figure III-16 : Représentation en 3D de oued Kristel

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

À l'aide de HEC-RAS, nous avons obtenu une représentation graphique montrant la variation de la hauteur d'eau en fonction du débit m³/s.

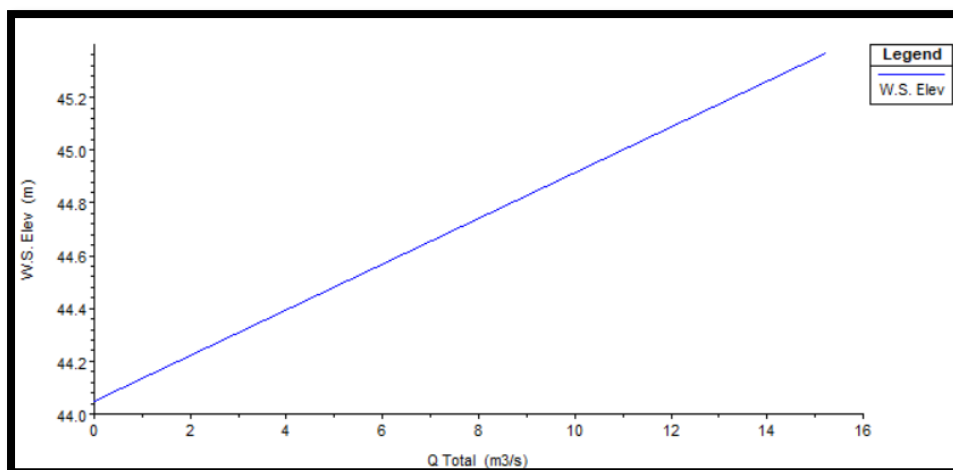


Figure III-17 : Courbe de tarage de oued Kristel

- Le logiciel permet également de générer des tableaux récapitulatifs incluant tous les paramètres hydrauliques pour diverses structures, telles qu'un barrage ou tout autre ouvrage. Il peut aussi fournir des données pour une zone de stockage spécifique, que ce soit pour chaque station (profil en travers) de manière individuelle ou pour l'ensemble des stations simultanément.

Tableau III-2 Principaux paramètres hydrauliques de l'oued Krichtel

Reach	River Sta	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Chl
Reach 1	843	95.87	97.17	97.17	97.53	0.0511	2.73	5.9	8.41	1.97
Reach 1	818.4	94.39	95.02	95.02	95.22	0.006089	2	7.83	20.44	1.98
Reach 1	793.5999	90.88	91.74	91.74	92.02	0.005202	6.37	6.69	12.77	3.96
Reach 1	768.8	84.86	85.72	85.72	86.04	0.004779	5.59	6.46	10.81	2.96
Reach 1	743.9999	81.48	82.53	82.53	82.8	0.005984	2.33	6.78	13.48	1.01
Reach 1	719.2	78.6	80.12	80.37	80.19	0.0788	13.57	13.12	15.2	6.39
Reach 1	694.3999	79.41	79.96	79.96	80.14	0.06843	14.01	8.15	23.26	7.25
Reach 1	669.6	76.13	76.7	76.7	76.92	0.064	2.07	7.42	17.44	2.07
Reach 1	644.8	73.72	74.23	74.23	74.41	0.006214	1.91	8.15	23.75	0.98
Reach 1	620	66.83	67.79	67.79	68.1	0.005774	14.47	6.18	9.99	7.36

Reach 1	595.2	62.44	66.46	66.32	66.47	0.016	10.42	46.71	20.34	4.26
Reach 1	570.4	65.65	66.32	66.32	66.45	0.005607	1.89	9.79	33.36	0.93
Reach 1	545.6	55.24	61.42	61.28	61.43	0.012	4.34	47.65	15.6	2.89
Reach 1	520.7999	60.35	61.17	61.17	61.4	0.06008	2.16	7.31	16.6	0.99
Reach 1	496	53.65	54.76	54.76	55.09	0.005435	2.53	6.16	10.19	0.99
Reach 1	471.1999	47.08	52.26	52.03	52.26	0.007	4.29	60.29	20.14	2.89
Reach 1	446.3999	50.9	51.96	51.96	52.24	0.005673	2.31	6.66	12.89	0.98
Reach 1	421.5999	46.09	47.01	47.01	47.35	0.04923	12.73	6.19	9.44	6.93
Reach 1	396.7999	44.05	45.37	45.37	45.71	0.005222	2.67	6.05	9.31	0.96
Reach 1	372	43.03	44.4	44.4	44.77	0.00526	2.77	5.79	8.02	1.01
Reach 1	347.2	40.5	41.54	41.54	41.81	0.006068	2.28	6.69	12.74	1
Reach 1	322.4	35.29	37.36	39.31	39.45	0.00677	1.32	11.62	9.42	0.84
Reach 1	297.6	33.83	37.42	38.3	38.43	0.000018	2.45	45.36	20.59	1.28
Reach 1	272.7999	31.7	37.42	37.2	37.43	0.003	2.22	83.7	26.96	0.93
Reach 1	247.9999	36.41	37.16	37.16	37.4	0.006187	2.18	7.04	15.17	1.01
Reach 1	223.1999	26.16	31.59	35.02	35.6	0.051	12.23	68.72	23.5	5.99
Reach 1	198.3999	26.87	31.59	31.4	31.6	0.008	4.24	63.19	23.33	2.07
Reach 1	173.6	30.51	31.33	31.33	31.57	0.006241	2.18	6.98	14.62	1.01
Reach 1	148.8	21.65	23.13	23.13	23.54	0.005116	4.89	5.55	7.26	2.56
Reach 1	124	19.46	20.57	20.57	20.89	0.004292	2.67	6.53	10.37	0.91
Reach 1	99.2	15.62	16.93	16.93	17.3	0.004184	12.82	6.11	9.02	6.81
Reach 1	74.4	10.11	11.6	11.6	11.98	0.005933	2.75	5.54	7.36	1.01
Reach 1	49.6	7.7	8.46	8.46	8.69	0.006239	2.85	7.1	15.69	1.28
Reach 1	24.8	4.59	5.36	5.36	5.62	0.006282	2.27	6.73	13.02	1

Reach 1	6	3.24	3.87	3.87	4.11	0.006463	2.17	7.04	15.4	1
Reach 1	4	3.11	3.63	3.63	3.83	0.00618	2	7.77	20.09	0.97

Interprétation des résultats :

En examinant le niveau d'eau dans l'ensemble des sections transversales de l'oued, nous constatons qu'il est entièrement inondé sur toute sa longueur, avec les paramètres suivants :

- La vitesse d'écoulement varie de 2,00 m/s à 14,01 m/s ;
- Le régime d'écoulement évolue tout au long de l'oued, ce qui est confirmé par les valeurs du nombre de Froude, comprises entre 0,84 et 7,25.

III.3 La cartographie du risque d'inondation :

- Après avoir généré les profils d'inondation à l'aide du logiciel HEC-RAS, la prochaine étape consiste à délimiter et cartographier les zones à risque d'inondation. Pour ce faire, il est essentiel de déterminer les niveaux d'eau dans différentes sections des oueds.
- Afin d'identifier les points de débordement et les zones à risque, nous avons utilisé l'outil RAS-MAPPER intégré au logiciel HEC-RAS pour simuler l'état du cours d'eau lors d'une crue centennale. Cette méthode nous a permis de créer les cartes qui seront présentées dans la phase suivante de notre étude.
- L'objectif de la création des cartes des risques est de localiser les principaux dangers en fonction de critères tels que l'impact attendu, la probabilité d'occurrence, ou le niveau actuel de gestion des risques. Ces cartes répondent aux objectifs suivants :
 - Mettre en place un système interne de contrôle ou de gestion des risques adapté.
 - Assister la direction dans l'élaboration de sa stratégie et dans la prise de décisions.
 - Orienter la planification des audits internes en identifiant les processus ou activités à risque élevé.
- La gestion des risques s'organise autour de l'anticipation et des moyens nécessaires pour réagir efficacement à une crise, facilitant ainsi la prise de décision. Cette approche se divise en trois phases :

- **Prévision** : mise en place de mesures pour anticiper un événement imprévu et améliorer la gestion de celui-ci.
- **Protection et prévention** : réduction de la gravité potentielle d'un risque par des mesures de protection, tandis que la prévention vise à diminuer la probabilité qu'un risque dépasse un seuil d'acceptabilité fixé par les autorités.
- **Communication** : diffusion d'informations à l'ensemble des acteurs impliqués dans la gestion des risques, de l'individu au préfet.

III.3.1 Carte des profondeurs :

La submersion lors d'une inondation se caractérise principalement par son étendue et sa profondeur, ce qui nécessite l'utilisation de modèles hydrauliques ou de représentations numériques des topographies des lits mineurs et majeurs des cours d'eau (Graguid, 2011). Elle est généralement classée en trois catégories selon la profondeur :

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

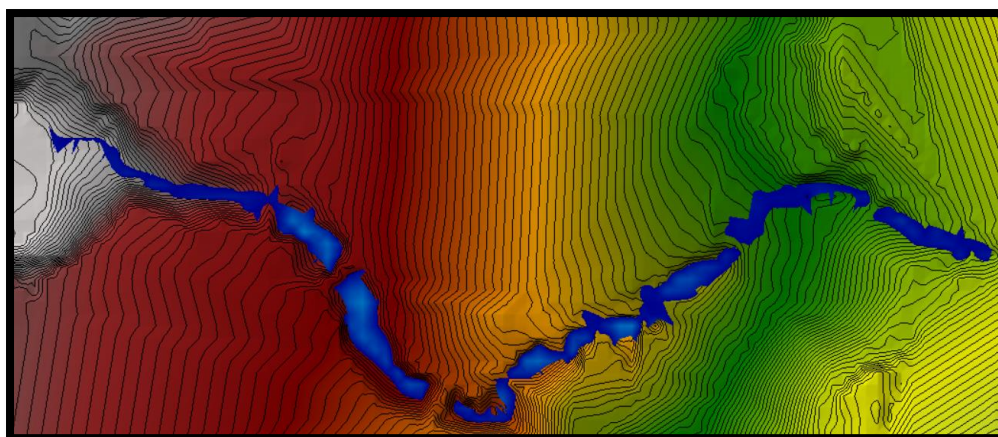


Figure IV.21 : Réseau des profondeurs d'eau pour une crue centennale.

- D'après la carte de profondeur d'eau obtenue, la hauteur varie entre 0,5 et 3 m. Les zones à haut risque de submersion se trouvent avant et sur le petit port de Kristel. La concentration des zones à risque près de la confluence souligne l'importance d'une planification urbaine résiliente et de stratégies d'adaptation pour réduire les impacts potentiels de la submersion. Cette approche est

essentielle pour élaborer des politiques publiques visant à assurer la sécurité des populations riveraines et à favoriser un développement durable dans la région.

III.3.2 Carte des vitesses

Les vitesses d'écoulement de l'eau sont réparties en trois catégories :

- **Faible vitesse** : inférieure à 0,2 m/s ;
- **Vitesse modérée** : comprise entre 0,2 m/s et 0,5 m/s ;
- **Forte vitesse** : supérieure à 0,5 m/s.

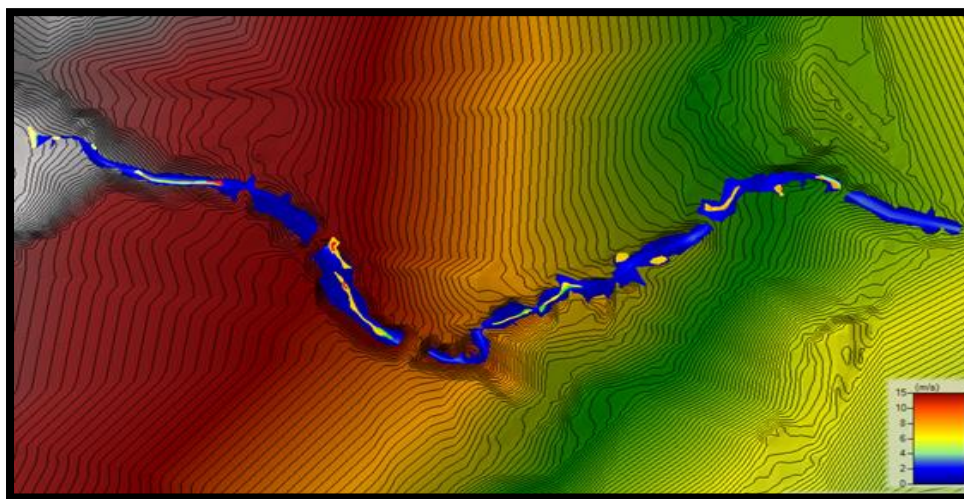


Figure III-18 : carte de vitesse d'eau pour la période de retour de 100ans

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné la situation de notre zone d'étude et sa vulnérabilité aux inondations provoquées par une crue centennale. Grâce à l'utilisation du logiciel HEC-RAS, nous avons pu identifier les zones inondables et générer une carte des profondeurs, permettant ainsi d'évaluer les niveaux d'eau à différents endroits. Cette analyse approfondie des zones sensibles offre une base solide pour la mise en place de mesures préventives spécifiques. Ces résultats orientent la prochaine phase du projet, qui consistera à explorer et évaluer diverses alternatives. L'objectif sera de proposer des solutions innovantes et durables pour améliorer la protection contre les inondations, tout en tenant compte des particularités des zones à risque.

Chapitre 4 : Etude des variantes d'aménagement

IV Etude des variantes d'aménagement

Objet de l'étude

Le but de l'étude est de définir un aménagement susceptible de protéger la localité de KRISTEL contre les inondations. Dans cette partie, nous avons définis :

- Les variantes de l'aménagement
- Une étude comparative des variantes proposées

IV.1 Généralités sur l'instabilité des oueds

Les oueds coulent généralement dans des plaines alluviales constituées des matériaux apportés par les eaux à des époques plus ou moins anciennes, mais elles continuent souvent à transporter vers l'aval de grande quantité des sédiments sous forme de suspension, soit en charriage de fond .

Le caractère très variable de ces apports liquides en période de crues ou de basse eau et les possibilités d'érosion des lits ne permettront pas aux oueds de conserver un tracé parfaitement stable à moins, de revêtir le fond et les berges par une protection non érodable, on constatera toujours des modifications des lits plus ou moins importantes.

IV.1.1 Ecoulement d'eau en surface libre

La forme et l'évolution de l'écoulement d'eau dépend du cycle érosion - transport - sédimentation.

L'érosion dans les bassins versants est essentiellement due au ruissellement.

L'eau a une double action :

- Chimique : Elle peut dissoudre certains éléments des roches ou des sols.
- Mécanique : Les eaux de ruissellement peut arracher des éléments au sol.
- La puissance d'érosion des eaux courantes est déterminée par le débit des crues et la vitesse des courants. La vitesse du courant est fonction de la pente.
- Le transport dépend également de la pente et donc de la puissance de l'écoulement des eaux. Les éléments fins sont transportés en suspension alors que les plus gros éléments sont roulés au fond de l'eau.
- La sédimentation est fonction de l'énergie des crues et de la taille des éléments transportés. Plus les éléments sont gros, plus ils se déposent rapidement.

- Les éléments les plus fins sont transportés plus loin.

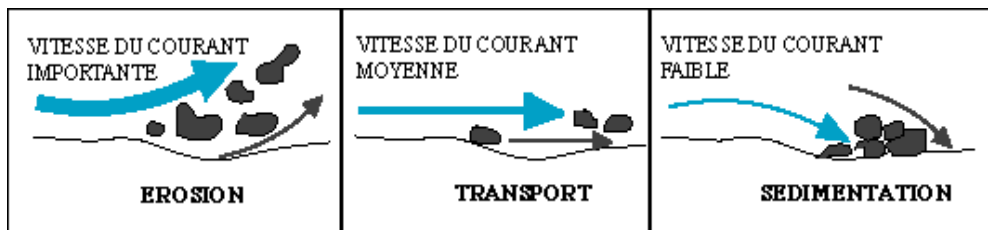


Figure IV-1 : relation entre vitesse /dépôt

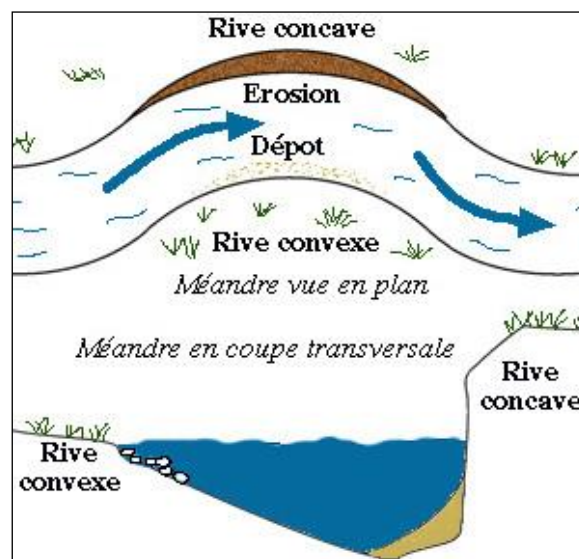


Figure IV-2 : Profil du cours d'eau

Toute modification du profil du cours d'eau (coupure de méandre, rupture de seuil) entraîne la recherche d'un nouvel équilibre et peut créer une reprise d'érosion de l'aval vers l'amont. C'est ce que l'on appelle l'érosion régressive. Un recalibrage provoque quant à lui, une reprise de méandrement et des dépôts (atterrissements) dans le lit du cours d'eau.

IV.1.2 Erosion des berges

Généralement on parle de dégradation des berges :

- Soit par arrachement des particules constituant la berge lorsque la vitesse de l'eau est élevée. Cette érosion sera d'autant, plus rapide que la crue est violente (durée, vitesse) et que la berge est érodable.
- Soit par fluage du talus au moment de la décrue.

Dans certains terrains argileux une baisse rapide du niveau de l'Oued peut engendrer des glissements du talus dans le lit lorsque le niveau d'eau dans le terrain, ne peut pas suivre avec la même vitesse la baisse du niveau d'eau dans l'oued

IV.2 Les aménagements de protection contre les inondations

Les ouvrages de génie civil constituent un patrimoine qu'il est nécessaire de maintenir, ce qui permet d'assurer la sécurité des biens et des personnes aussi garantir le fonctionnement et la pérennité des ouvrages sur le long terme sont les priorités. Il est donc essentiel de s'intéresser à la performance de ces ouvrages

Les ouvrages de protection peuvent être répartis en deux groupes : directes et indirectes.

IV.2.1 Protection directe (Rapprochées)

La protection directe consiste à intervenir directement sur le site menacé par la mise en œuvre des actions suivantes :

- Curage :

Qui permet une nette amélioration des conditions d'écoulement suite à l'élimination de tous les obstacles et les dépôts entravant l'écoulement des eaux dans le cours d'eau. Le débroussaillage est également nécessaire à la traversée des agglomérations pour des raisons sanitaires et en sections courantes pour diminuer la rugosité et accroître la débitante.

- Recalibrage :

Qui permet d'élargir et d'approfondir les sections des cours d'eau pour augmenter leur capacité d'évacuation des eaux et assurer une section mouillée répondant aux critères de protections désirées.

- Renforcement des ouvrages :

De franchissements des Oueds et modification de leurs caractéristiques et des systèmes existants en cas de leur insuffisance (ponts, dalots, buses...).

- Réalisation des canaux :

Permet de régénérer le couloir initial de l'oued. Cette solution est indispensable dans le cas où le lit de l'oued et son domaine hydraulique ont été complètement occupés par des bâtiments ou par la voirie.

- Protection des berges :

Qui comprend tout ouvrage visant à maintenir la stabilité des terres en dépit de l'action de l'eau. Les berges sont en effet attaquées par des courants perturbateurs générés par les crues. De même, les terres

glissent par suite de l'infiltration de l'eau après le retrait de la crue. La protection des berges est également nécessaire au voisinage de certains ouvrages tels que les ponts.

- Endiguement des oueds :

Par la réalisation de digues qui longent le cours d'eau sur ses deux berges. Cette opération est aisément réalisable par les ressources locales en main-d'œuvre et en matériaux. Par ailleurs, ce type de protection permet en outre de réaliser une protection sélective. Il peut en effet être établi graduellement en commençant par mettre à l'abri, de la plupart des crues, la partie la plus riche et la plus peuplée des zones exposées. En contrepartie on notera que ce procédé de protection présente l'inconvénient de provoquer une surélévation souvent notable du niveau des eaux et rend en outre plus difficile le drainage des terrains bas.

IV.2.2 Protection indirecte (Eloignées)

La protection indirecte par contre, consiste à intervenir plus loin des sites menacés, à l'extérieur du périmètre d'aménagement, en réalisant des ouvrages sur les oueds responsables des inondations :

- Création des canaux périphériques :

De dérivation des eaux vers les oueds permettant de les restituer vers des zones situées en dehors des aires à protéger. Cette déviation pourrait concerner une partie ou la totalité des eaux d'un oued vers un autre.

- Réalisation des barrages :

Ou seuils pour stockage et laminage des crues à l'amont des zones menacées. Le volume et la capacité de laminage du barrage devront être optimisés de manière à répondre au-mieux à la protection envisagée.

- Aménagement des bassins versants :

Contre l'érosion par des méthodes biologiques et/ou par la construction de seuils en gabions qui permettent la réduction des vitesses d'écoulement et le dépôt des sédiments en amont.

IV.2.3 Différents types de sections de canaux

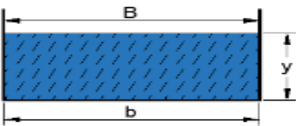
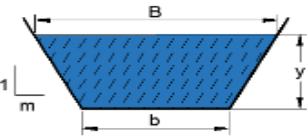
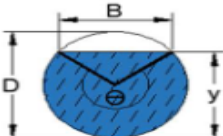
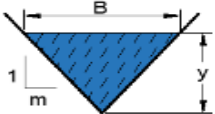
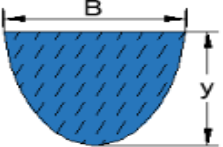
	<p>Type Rectangulaire</p> <p>Largeur au miroir B b</p> <p>Surface S $b \cdot y$</p> <p>Périmètre P $b + 2y$</p> <p>Rayon hydraulique R $\frac{b \cdot y}{b + 2y}$</p>
	<p>Type Trapézoïdale</p> <p>Largeur au miroir B $b + 2m \cdot y$</p> <p>Surface S $(b + my) \cdot y$</p> <p>Périmètre P $b + 2y\sqrt{1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

Figure IV-3 : Différents types de sections de canaux

IV.3 Etude des variantes

Dans le cadre de cette recherche, les options proposées pour l'aménagement des deux cours d'eau sont les suivantes :

- Construction d'un canal trapézoïdal en béton armé.
- Construction d'un canal rectangulaire en béton armé.
- Construction d'un canal trapézoïdal en enrochement.

Les variantes mentionnées ci-dessus seront analysées à l'aide du logiciel FLOW MASTER et évaluées en vérifiant l'état d'écoulement grâce à une simulation HEC-RAS pour chaque section des deux cours d'eau. Enfin, à l'issue de chaque variante, une interprétation technico-économique s'avérera essentielle pour permettre une sélection optimale.

IV.3.1 Choix du débit de projet

Le choix de la crue de projet est une décision très importante dans l'étude de protection d'une ville et de ses habitants contre les eaux de crues qui sont en générale brusques et violentes.

Les dimensionnements des canaux proposés pour une fréquence de 1 % (période de retour de 100 ans)

Tableau IV-1 : Les débits maximaux du oued Kristel pour différentes période de retour

	Fréquences	Période de retour (ans)	MALLET GAUTHIER	TURRAZA	POSSENTI	SOKOLOVSKY	Moyenne
Oued KRISTE L	0.10	10	14.33	8.10	42.86	4.33	8.92
	0.05	20	16.00	9.70	51.37	6.00	10.57
	0.02	50	17.97	13.93	63.23	8.50	13.47
	0.01	100	19.33	15.91	72.19	10.49	15.24
	0.00	1000	23.29	26.63	105.76	18.53	22.82

IV.3.2 Choix des Paramètres Hydrauliques

Dans le cadre d'un projet d'aménagement hydraulique, il est crucial de considérer divers paramètres hydrauliques, tels que la pente, la revanche et la rugosité, qui sont fondamentaux pour la conception d'un canal.

- La Pente du Projet

Pour cette étude, on divise notre Oued sur 7 Tronçons à cause des changements de pentes.

- La Revanche

La revanche constitue un élément essentiel dans la conception et la gestion des canaux à surface libre. Elle joue un rôle protecteur contre les inondations, les variations de débit et les événements imprévus, tout en garantissant la sécurité et la durabilité des structures et des berges. Par conséquent, il est impératif de calculer et de maintenir la revanche avec soin pour assurer le bon fonctionnement et la sécurité des systèmes hydrauliques (Chow, V. T. 1959). Dans cette étude, une marge de sécurité de 0,9 mètres sera ajoutée aux profondeurs normales des canaux.

- La Rugosité

La rugosité est un facteur clé en hydraulique fluviale, car elle représente la résistance à l'écoulement due à la surface du lit du cours d'eau. Elle influence la vitesse et le débit de l'eau, ce qui a des répercussions sur les calculs de conception et de gestion des canaux et des rivières. Le tableau ci-dessous présente les valeurs de rugosité spécifiques à chaque variante.

Tableau IV-2 : Valeurs de rugosité correspondantes au type de revêtement

Revêtement	Valeur de la rugosité (n)
Béton armé	0.014
Enrochement	0.025

IV.3.3 Variante 1 : Canal rectangulaire en béton armé

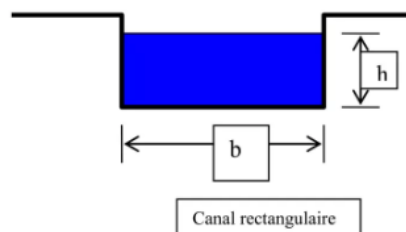
La première variante proposée concerne la construction d'un canal rectangulaire en béton armé. Cette conception a été choisie pour sa capacité à évacuer efficacement les eaux et à permettre le passage des crues sans difficulté. Pour cette variante, nous avons opté pour une largeur de fond de canal de $B=2.5\text{m}$ et un coefficient de rugosité de $n=0,014$ (pour le béton armé) sur une longueur de canal de $L=827\text{km}$. Ce choix garantit une robustesse et une durabilité accrues, essentielles pour la gestion des débits importants.

Tableau IV-3 : Dimensions du canal rectangulaire

L	B
Km	m
827.00	2.5

L : longueur du canal

B : largeur du canal

**Figure IV-4** : Canal rectangulaire

- Logiciel Flow Master

FlowMaster est un logiciel efficace conçu pour la conception et l'analyse d'une large gamme d'éléments hydrauliques, tels que les conduites sous pression, les canaux ouverts, les déversoirs, les orifices et les entrées. Il permet de créer des tableaux de tarage et des courbes de performance pour divers paramètres en utilisant des méthodes de frottement reconnues. FlowMaster suit les dernières directives de la FHWA pour les calculs d'entrée et permet de pondérer la rugosité des sections irrégulières selon des

techniques populaires. Ce logiciel est particulièrement utile pour l'évaluation des débits et la gestion des systèmes hydrauliques.

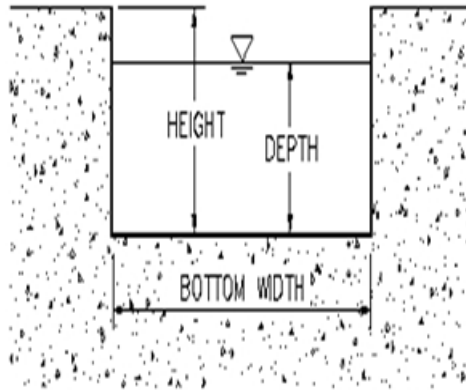


Figure IV-5 : Shema du rectangle proposé

Variante 1 :

- Tronçon 1:

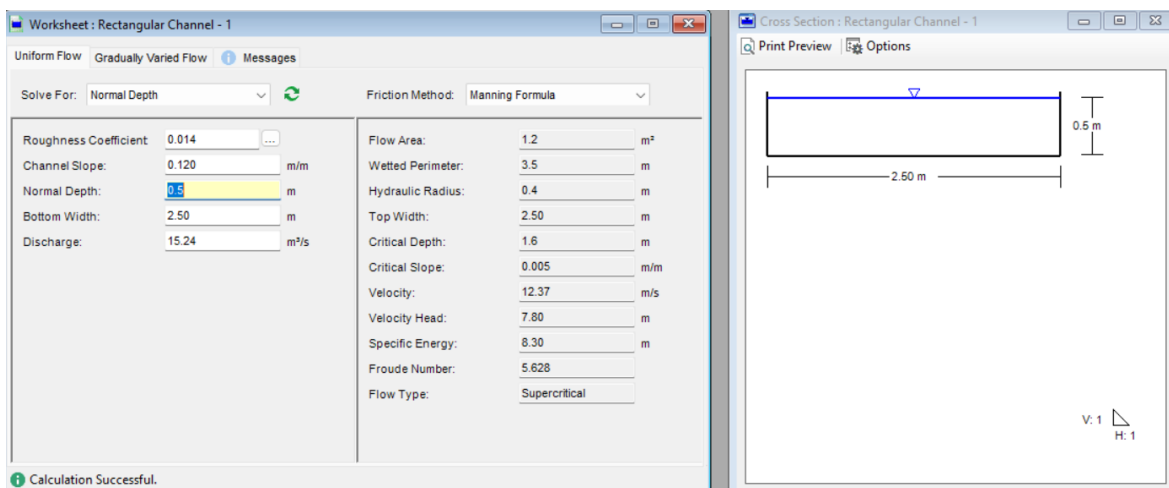
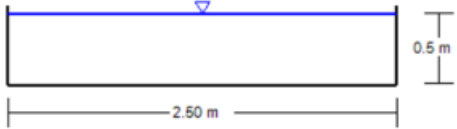
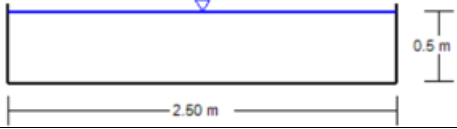
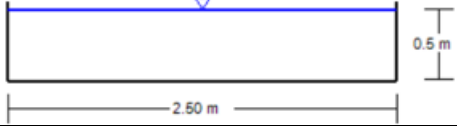
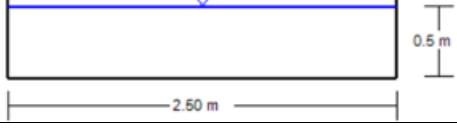
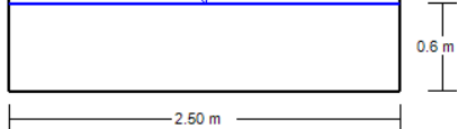
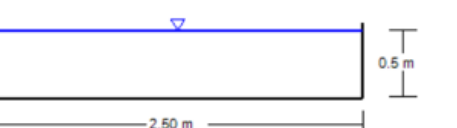


Figure IV-5 : dimensionnement du premier tronçons du canal via Flowmaster

- Le reste des tronçons :

Tableau IV-4 : Dimensionnement des 6 tronçons restants via Flowmaster

Tronçon	La pente	La hauteur	La vitesse	Froude	Type d'écoulement	Résultats obtenus via FLOWMASTER
89-103	0.149	0.5	9.03	6.27	supercritical	
103-351	0.124	0.5	12.51	5.72	supercritical	
351-389	0.113	0.5	12.12	5.45	supercritical	
389-564	0.160	0.5	13.63	6.5	supercritical	
564-732	0.081	0.6	10.82	6.53	supercritical	
732-825	0.105	0.5	11.82	5.25	supercritical	

- Interprétation des résultats de Flowmaster :

Nous avons divisé notre oued en 7 tronçons en nous basant sur les pentes extraites du levé topographique. Les résultats obtenus via Flowmaster montrent que les dimensions du canal sont identiques pour les 7 tronçons et que le nombre de Froude est constamment supérieur à 3.

En prenant compte de la revenche qui est de 0.9m car le débit=15.24m³/s >8.5m³/s

Donc les dimensions de mon canal rectangulaire en béton armé sont les suivantes :

Tableau IV-5 : Dimensions du canal rectangulaire en béton armé

L	B	H
Km	m	M
827.00	2.5	2.0

- **Conception du canal en béton**

Dans cette variante, le béton constitue le matériau principal du canal rectangulaire. L'épaisseur du radier et des parois du canal est de 30 cm, tandis que l'épaisseur du béton de propreté est de 10 cm.

Tableau IV-6 : Conception du canal en béton

	Épaisseur	Unité
Béton 350kg/m³	0.3	M
Béton de propreté	0.1	M

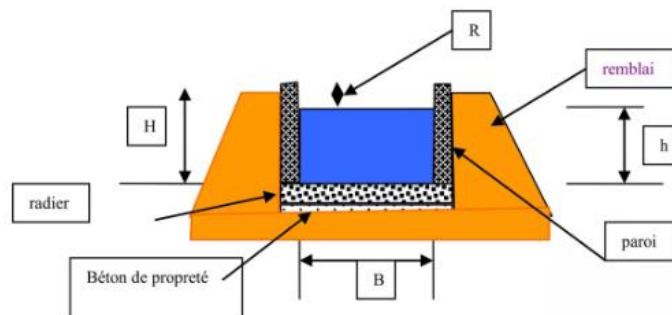


Figure IV-6 : Canal rectangulaire en béton

- **Les sections en travers :**

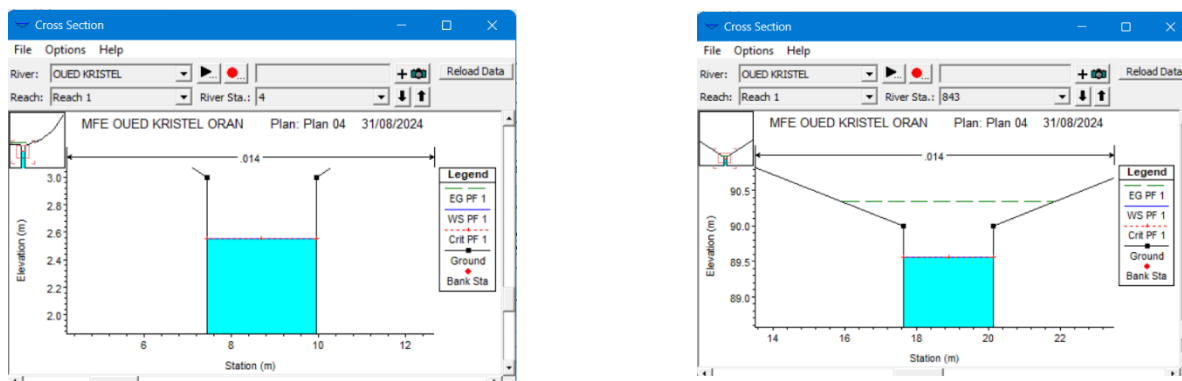


Figure IV-7 : Profils en travers d'un canal rectangulaire pour une crue de 100ans pour oued kristel

- **Calcul des sections des bétons de la variante 1**

Tableau IV-7 : Calcul des sections des bétons de la variante 1

		L(m)	l(m)	A(m ²)
Beton 350kg/m³	Fond	827	2.5	2894.5
	Talus droite	827	2	1654
	Talus gauche	827	2	1654
Beton de propreté	Fond	827	2.5	2894.5

- **Volume des betons :**

Tableau IV-8 : Calcul des volumes de béton

		A(m ²)	e(m)	V (m ³)	V totale (m ³)
Beton 350kg/m³	Fond	2894.5	0.3	1447.25	3101.25
	Talut droite	1654	0.3	827	
	Talus gauche	1654	0.3	827	
Beton de propreté	Fond	2894.5	0.1	289.45	289.45

- **Estimation du cout de la variante 1**

Tableau IV-9 : Estimation du cout de la variante 1

N°	Désignation des travaux	Unité	Quantité	Prix unitaire (DA)	Montant (DA)
1	Déblais	m ³	38634	700	27043800
2	Remblais	m ³	37611	700	26327700
3	Beton 350kg/m ³	m ³	3101.25	30000	93038100
4	Béton de propreté	m ²	289.45	6000	1736700
Total (DA)					148146300
TVA (%)					19
Total TTC (DA)					176294097

- Interprétation de la variante 1

La première variante correspond à un canal rectangulaire en béton armé avec une largeur de **2,5 m** et une hauteur de **2 m**. Ce type de conception est particulièrement robuste et adapté aux environnements où des contraintes structurelles fortes sont nécessaires pour contenir les crues et garantir une bonne gestion des débits élevés. Le choix du béton armé offre une résistance accrue face aux forces hydrauliques, assurant une durabilité à long terme et un entretien minimal une fois l'ouvrage en place.

Pour estimer le coût de cette variante, nous avons pris en compte plusieurs éléments cruciaux :

- **Volumes de déblais et de remblais** nécessaires pour la préparation du site avant la mise en œuvre du canal.
- **Béton de propreté**, indispensable pour assurer une base stable et nivelée avant la construction du canal.
- **Quantité de béton armé**, calculée pour garantir que la structure résiste aux forces d'écoulement du débit centennal (15,24 m³/s).

IV.3.4 Variante 2 : Canal trapézoïdale en enrochement

La deuxième variante proposée consiste à la construction d'un canal trapézoïdal revêtu d'enrochement. Cette géométrie a été sélectionnée en raison de sa capacité à évacuer efficacement les eaux, tout en permettant le passage des crues sans difficulté.

Pour cette variante 2, nous avons opté pour une largeur de fond de 2,5 m, une pente de talus avec un rapport $m = 1$, et un coefficient de rugosité $n = 0,025$ correspondant à l'enrochement.

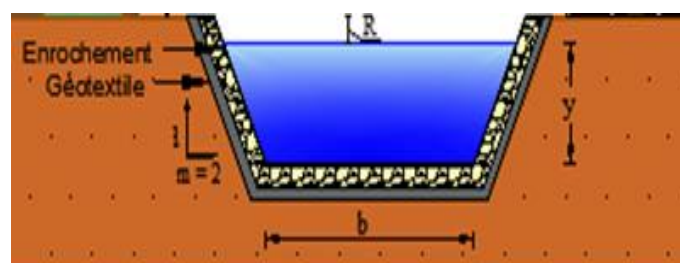


Figure IV-8 : Canal trapézoïdale en enrochement

Variante 2 :

Tronçon 1 :

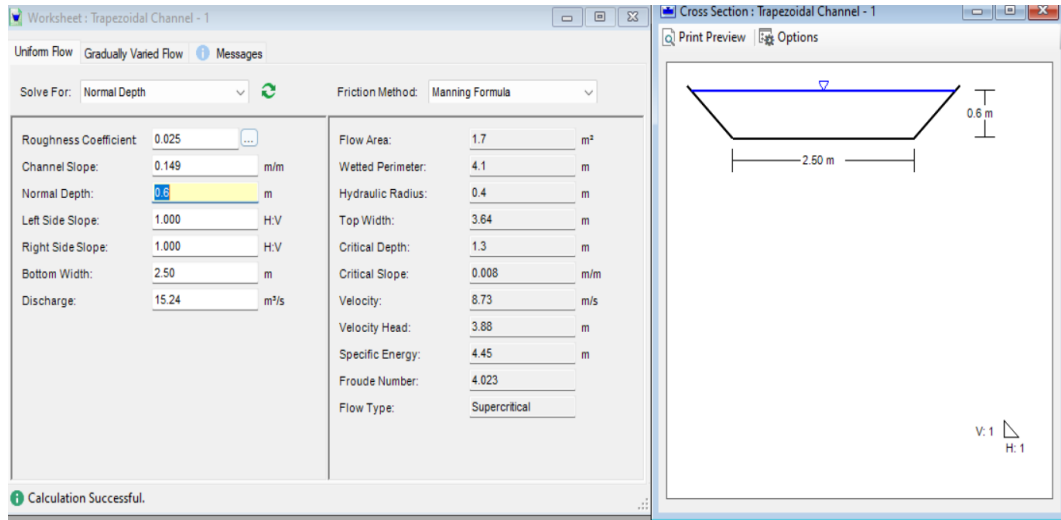


Figure IV-9 : résultats du tronçon 1 par Flow Master

Le reste des tronçons

Tableau IV-10 : Les résultats des tronçons restant via Flow Master

Tronçons	La pente	La hauteur	La vitesse	Froude	Type d'écoulement	
4-89	0.120	0.6	8.10	3.95	Supercritical	
103-351	0.124	0.6	8.19	3.688	Supercritical	
351-389	0.113	0.6	7.93	3.53	Supercritical	
389-564	0.160	0.6	8.94	4.16	Supercritical	
564-732	0.081	0.7	7.06	3.013	Supercritical	
732-825	0.105	0.6	7.73	3.408	Supercritical	

- Interprétation des résultats de Flowmaster :

Nous avons divisé notre oued en 7 tronçons en nous basant sur les pentes extraites du levé topographique. Les résultats obtenus via Flowmaster montrent que les dimensions du canal sont identiques pour les 7 tronçons et que le nombre de Froude est constamment supérieur à 3.

En prenant compte de la revanche qui est de 0.9m car le débit=15.24m³/s >8.5m³/s

Donc les dimensions de mon canal trapézoïdale en béton armé sont les suivantes :

Tableau IV-11 : Dimensionnement du canal trapézoïdal en béton armé

L(m)	B(m)	H	M	Lm
827	2.5	2	1	4

- Les sections en travers :

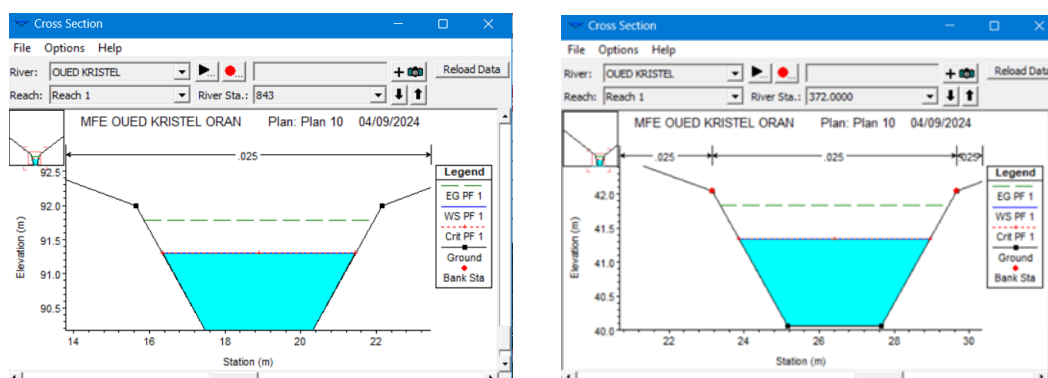


Figure IV-10 : Section en travers des stations 843 et 372

- Conception du canal en enrochement

Un canal en enrochement est une structure hydraulique dont les berges ou les talus sont recouverts de pierres ou de blocs de roche. Ce type de revêtement, appelé "enrochement", est utilisé pour stabiliser les pentes du canal, prévenir l'érosion et protéger contre l'action de l'eau, en particulier dans les zones soumises à de forts débits ou à des crues. L'enrochement permet également de dissiper l'énergie de l'eau tout en renforçant la durabilité et la résistance de la structure du canal.

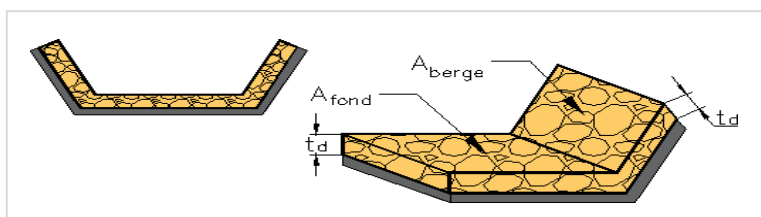


Figure IV-11 : Canal en enrochement

Epaisseur orthogonale théorique t_d (m) :

$$t_d = n \cdot D_{50} \quad \text{IV-1}$$

Volume globale de dimensionnement $\vartheta_{b,d}$ (m³):

$$\vartheta_{b,d} = A \cdot t_d \quad \text{IV-2}$$

Avec

n: nombre de couche n = 1.

D50 : Diamètre médian D50 =1 m.

A : Aire (surface) (m²).

- **Les sections d'encrochement :**

$$A = L \cdot l \quad \text{IV-3}$$

$$l_{\text{talus}} = Y\sqrt{1 + m^2} \quad \text{IV-4}$$

- **Calcul des sections d'encrochement de la variante 2**

Tableau IV-12 : Sections d'encrochement de la variante 2

		L(m)	l(m)	A(m ²)
	Fond	827	2.5	2067.5
	Talus droite	827	2.82	1849.22
	Talus gauche	827	2.82	1849.22

- **Calcul des volumes d'encrochement de la variante 2**

Tableau IV-13 : Volumes d'encrochement de la variante 2

	n	D ₅₀ (m)	t _d (m)	A (m ²)	V (m ³)
Fond	1	1	1	2067.5	2067.5
Talus droite	1	1	1	1849.22	1849.22
Talus gauche	1	1	1	1849.22	1849.22
Volume global (m³)					5765.95

- **Calcul des sections du géotextile de la variante2**

Tableau IV-14 : sections du géotextile de la variante2

		A (m ²)	A total (m ²)
	Fond	2067.5	5765.95
	Talus droite	1849.22	
	Talus gauche	1849.22	

- **Estimation du coût de la variante 2**

Tableau IV-15 : Devis quantitatif estimatif de la variante 2

N°	Désignation des travaux	Unité	Quantité	Prix unitaire (DA)	Montant (DA)
1	Déblais	m ³	75519	700	52863300
2	Remblais	m ³	1002	700	701400
3	Enrochement	m ³	5765.95	15000	86489250
4	Géotextile	m ²	5765.95	5000	28829750
Total (DA)					168883700
TVA (%)					19
Total TTC (DA)					200971603

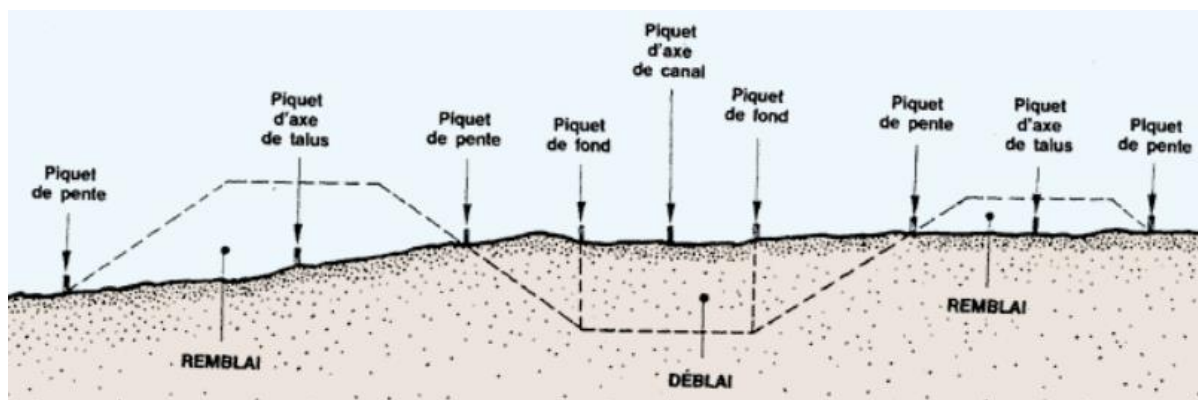


Figure IV-12 : Illustration du déblai et remblai

- **Interprétation de la variante 2 :**

La deuxième variante proposée consiste en un canal trapézoïdal en enrochement, avec une largeur à la base de 2,5 m et une hauteur de 2 m. Cette conception permet de combiner efficacité hydraulique et matériaux naturels, comme l'enrochement, qui offre une meilleure intégration environnementale et une protection efficace contre l'érosion des berges.

Cette variante reste plus onéreuse que la première variante, qui est en béton armé de forme rectangulaire. L'enrochement, bien qu'économique à certains égards, implique des coûts plus élevés liés à la mise en place des matériaux et à la stabilité à long terme, tout en nécessitant un entretien périodique pour garantir sa durabilité.

IV.3.5 Variante 3 : Canal trapézoïdale en béton armé

Un canal trapézoïdal en béton armé est une structure hydraulique dont la section transversale a la forme d'un trapèze, avec une base plus large au fond et des parois inclinées. Ce canal est construit en béton armé, un matériau composite renforcé par des armatures en acier, qui lui confère une grande résistance et durabilité. Ce type de canal est souvent utilisé pour transporter des eaux pluviales, des flux industriels ou agricoles, et pour gérer les crues, grâce à sa capacité à canaliser de grands volumes d'eau tout en étant résistant à l'érosion et aux contraintes mécaniques.

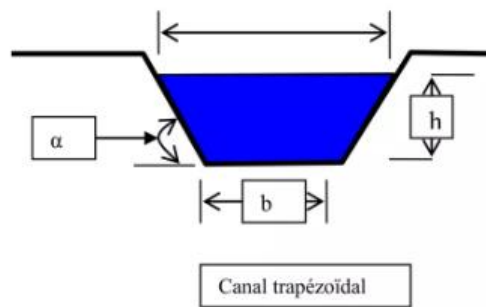


Figure IV-13 : Canal trapézoïdal

Variante 3

Tronçon 1 :

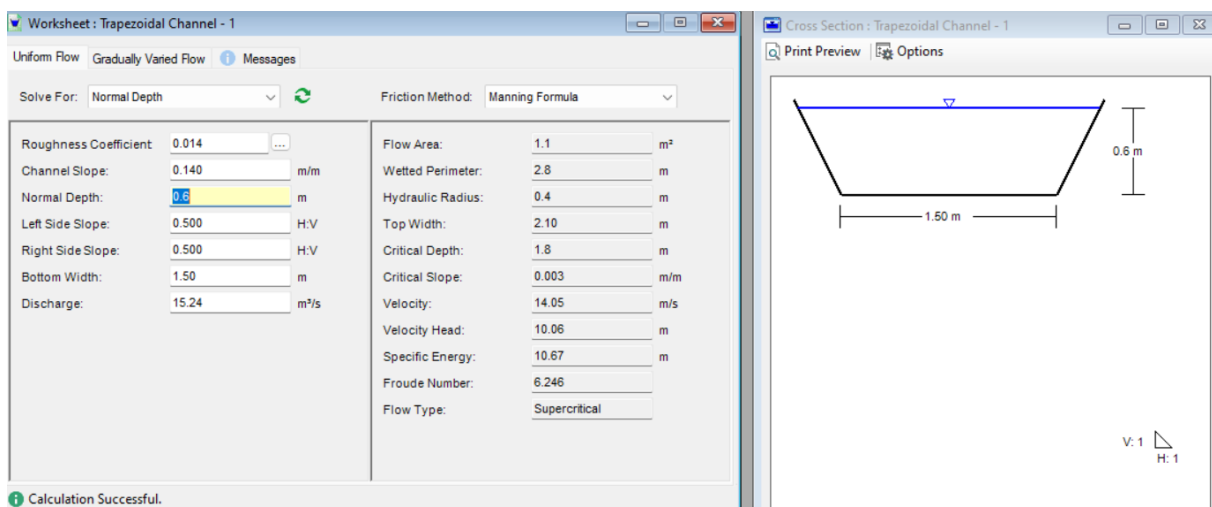
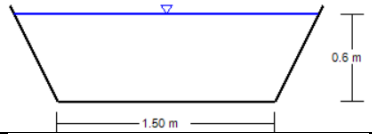
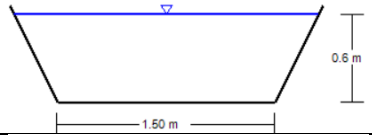
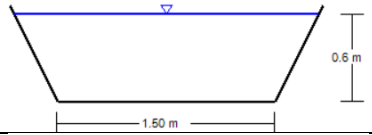
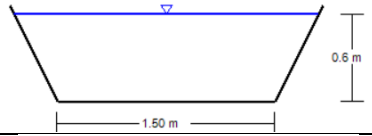
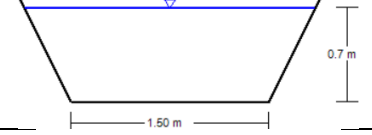
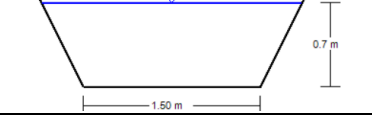


Figure IV-14 : résultat du canal trapézoïdal via Flow Master

Le reste des tronçons :

Tableau IV-16 : Les résultats des tronçons restant via Flow Master

Tronçon	La pente	La hauteur	La vitesse	Froude	Type d'écoulement	
89-103	0.149	0.6	14.37	6.441	supercritical	
103-351	0.124	0.6	13.45	5.882	supercritical	
351-389	0.113	0.6	13.01	9.27	supercritical	
389-564	0.160	0.6	14.74	6.671	supercritical	
564-732	0.081	0.7	11.57	4.783	supercritical	
732-825	0.105	0.7	12.69	5.432	supercritical	

- Interprétation des résultats de Flowmaster :

Nous avons divisé le cours de l'oued en 7 tronçons, en nous basant sur les pentes relevées lors du levé topographique. Les résultats obtenus à l'aide de Flowmaster indiquent que les dimensions du canal restent identiques pour chacun des 7 tronçons, avec un nombre de Froude constamment supérieur à 3. En prenant en compte la revanche de 0,9 m, cette configuration est justifiée par un débit de 15,24 m³/s, qui dépasse le seuil de 8,5 m³/s.

Tableau IV-17 : Dimensionnement du canal adapté

L(m)	B(m)	H	m	Lm
827	2.5	2	0.5	3

Les sections en travers :

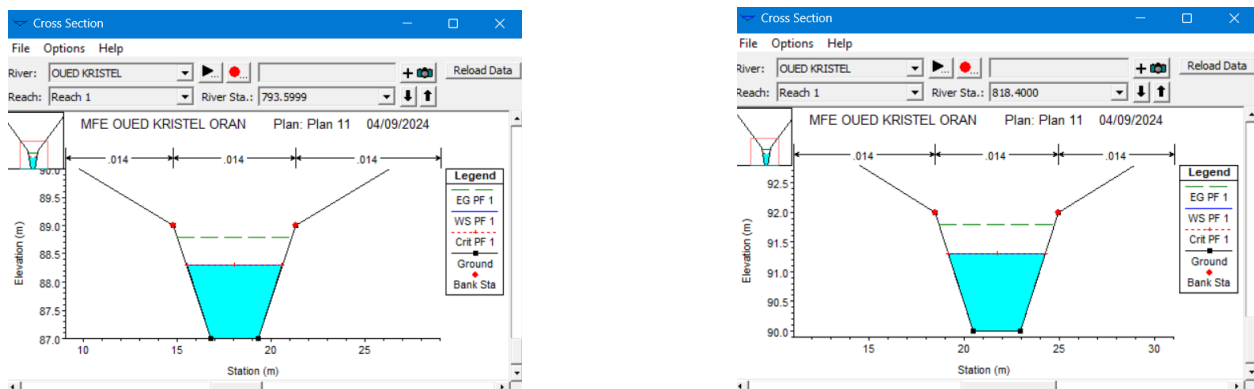


Figure IV-15 : Profils en travers d'un canal trapézoïdale en béton armé pour une crue centennale de oued Kristel (Station 793.6 et 818.4)

- Conception d'un canal trapézoïdal en béton armé

Dans cette variante, le béton est le matériau principal utilisé pour le canal trapézoïdal. L'épaisseur du radier et des parois du canal est de 30 cm, tandis que l'épaisseur du béton de propreté est de 10 cm.

- Calcul des sections de béton de la variante 3

$$A = L \cdot l \tag{IV-5}$$

$$l_{talus} = Y\sqrt{1 + m^2} \tag{IV-6}$$

- Calcul des sections des bétons de la variante3

Tableau IV-18 : Sections des bétons de la variante3

		L(m)	l(m)	A(m²)
Beton 350kg/m³	Fond	827	3.1	2894.5
	Talus droite	827	2.23	1844.21
	Talus gauche	827	2.23	1844.21
Beton de propreté	Fond	827	3.1	2894.5

- **Volume des bétons :**

Tableau IV-19 : Volume des bétons

		A(m ²)	e(m)	V (m ³)	V totale (m ³)
Beton 350kg/m³	Fond	2894.5	0.3	1447.25	3291.46
	Talut droite	1844.21	0.3	922.105	
	Talus gauche	1844.21	0.3	922.105	
Beton de propreté	Fond	2894.5	0.1	289.45	289.45

- Estimation du cout de la variante 3

Tableau IV-20 : Cout de la variante 3

N°	Désignation des travaux	Unité	Quantité	Prix unitaire (DA)	Montant (DA)
1	Déblais	m ³	76732	700	53712400
2	Remblais	m ³	75575	700	52902500
3	Beton 350kg/m ³	m ³	3291.46	30000	98743800
4	Béton de propreté	m ²	289.45	6000	1736700
Total (DA)					207095400
TVA (%)					19
Total TTC (DA)					246443526

- **Interprétation de la variante 3**

La troisième variante proposée consiste en la conception d'un canal à profil trapézoïdale en béton armé. Pour cette variante, nous avons suggéré une largeur de fond (b) de 2,5 m et une hauteur de 2 m. En appliquant l'équation de Manning-Strickler, nous avons calculé les dimensions optimales du canal pour les 7 tronçons, en prenant en compte un débit de 15,24 m³/s.

Cependant, malgré sa robustesse et son efficacité hydraulique, cette variante s'est avérée être la plus coûteuse parmi les options étudiées. Son coût de construction élevé en fait la solution la moins économique, rendant son adoption moins favorable sur le plan financier, bien qu'elle présente des avantages en termes de durabilité et de capacité de gestion des crues.

IV.3.6 Variante adoptée pour l'aménagement de l'oued Kristel

Pour l'aménagement de l'oued Kristel, trois variantes ont été étudiées : un profil rectangulaire en béton armé, un profil trapézoïdal en béton armé, et un profil trapézoïdal en enrochement. Après une analyse comparative, il a été constaté que la variante en béton armé de forme rectangulaire présente le coût de construction le plus faible tout en répondant aux exigences techniques et hydrauliques du projet.

Cette solution offre une excellente stabilité structurelle et une capacité d'écoulement adéquate, tout en étant plus économique que les autres alternatives. Ainsi, le choix de cette variante s'avère être le plus optimal et le mieux adapté aux besoins spécifiques de l'oued Kristel, en garantissant une efficacité hydraulique tout en maîtrisant les coûts de réalisation.

IV.4 Conclusion

En conclusion, ce chapitre a permis d'examiner en détail les différentes variantes d'aménagement proposées pour l'oued Kristel, à savoir le profil rectangulaire en béton armé, le profil trapézoïdal en béton armé, et le profil trapézoïdal en enrochement. Après avoir analysé ces options en termes de coût, d'efficacité hydraulique et de faisabilité technique, la variante rectangulaire en béton armé s'est révélée être la solution la plus économique et la mieux adaptée aux caractéristiques du site.

Les résultats des simulations et des calculs confirment que cette variante permet de maîtriser les crues centennales mais ne peut pas assurer la sécurité des infrastructures environnantes et en prévenant l'envasement du port de Kristel, pour cela une étude approfondie sur la vitesse de l'écoulement sera réaliser. Ce choix garantit une gestion optimale des écoulements, en respectant les contraintes économiques et techniques du projet.

Chapitre V : Etude détaillée de la variante choisie

V Etude détaillée de la variante choisie

Introduction

Dans cette section, nous présenterons une description détaillée de la variante d'aménagement retenue pour notre projet de protection de la ville de Kristel contre les risques d'inondation de l'oued Kristel. Cette variante consiste en la conception d'un canal rectangulaire en béton armé. Elle a été sélectionnée à la suite d'une étude technico-économique, en tenant compte de l'objectif principal du projet, qui est de concevoir un aménagement optimal de l'oued Kristel pour éviter les inondations de l'oued et résoudre le problème d'envasement auquel est confronté le petit port de Kristel.

L'oued de Kristel a une largeur de 2,5 m, avec une pente très abrupte sur une distance inférieure à 2 km, ce qui génère une vitesse d'écoulement très élevée et un nombre de Froude supérieur à 4, indiquant un écoulement torrentiel. Cela provoque plusieurs problèmes, notamment l'envasement du petit port de Kristel dû au transport massif de sédiments.

Pour résoudre ces problèmes, on a opté pour des dispositifs de dissipation d'énergie, qui jouent un double rôle. D'une part, ils réduisent l'énergie et la vitesse de l'eau, ce qui permet de diminuer l'érosion. D'autre part, ces dispositifs agissent comme des accumulateurs de débris, en retenant les sédiments avant qu'ils n'atteignent le port.

Le principe de la dissipation de l'énergie du flux repose sur un ralentissement brusque de la vitesse d'écoulement, entraînant un passage du régime torrentiel au régime fluvial. Ce changement permet de mieux contrôler l'écoulement et d'atténuer les effets destructeurs d'une vitesse excessive. Des dispositifs comme des bassins de dissipation ou des seuils permettent de provoquer ces changements de régime en créant des turbulences contrôlées. Cela protège à la fois les infrastructures en aval et limite l'envasement. Une gestion régulière des sédiments accumulés sera également nécessaire pour garantir leur efficacité.

V.1 Détails de la variante adoptée

Dans ce chapitre, nous allons présenter une description détaillée de la variante d'aménagement sélectionnée pour notre projet de protection de la ville de Kristel, située à Oran, contre les risques d'inondation de l'oued Kristel. Cette variante repose sur la conception d'un canal rectangulaire en béton armé, avec une largeur de 2,5 m et une hauteur de 2 m, complété par des bassins de dissipation d'énergie.

Le canal permet de canaliser le débit d'eau, tandis que les bassins de dissipation jouent un rôle essentiel dans la réduction de la vitesse d'écoulement, permettant ainsi de limiter l'érosion et de contrôler le flux de sédiments. Ce système assure une meilleure gestion des écoulements en transformant l'écoulement torrentiel en un écoulement fluvial, plus stable.

Pour garantir le bon fonctionnement de cette solution, nous allons dimensionner plusieurs éléments clés :

- Les coursiers : destinés à guider l'eau dans les sections à pente élevée et à favoriser la dissipation de l'énergie.
- Les bassins de dissipation : conçus pour ralentir brusquement l'écoulement et dissiper son énergie cinétique.
- Le convergent et le divergent : utilisés pour ajuster progressivement la section du canal et contrôler la transition entre les différentes zones d'écoulement.

Dans les sections suivantes, nous présenterons en détail les caractéristiques techniques de cette variante, en mettant l'accent sur les dimensions et les spécificités du canal, des bassins de dissipation et des autres composants essentiels. Des calculs hydrauliques seront également fournis pour justifier le dimensionnement optimal de ces éléments, afin d'assurer une protection efficace contre les inondations et de limiter les problèmes d'envasement du port de Kristel.

V.2 Section du canal :

La section proposée pour le futur canal est de type rectangulaire, car elle est la plus répandue, la plus usuelle, et aussi pour ses divers avantages dont la réalisation et l'exploitation facile.

Il est évident, que la section rectangulaire présente le profil le plus rentable hydrauliquement, pour sa grande capacité de transit des eaux, le champ de l'écoulement est maximal.

C'est pour ces critères, qu'on choisit couramment le profil rectangulaire.

V.3 Canal à projetés

L'aménagement consiste en une projection d'un canal rectangulaire sur une longueur de 827.0 m, sera projeté de telle façon à évacuer les eaux superficielles.

Les dimensionnements du canal arrêté sont les suivantes :

L : longueur du canal

B : largeur du canal

H : hauteur du canal

Tableau V-1 : Les dimensions du canal

L	B	H
Km	m	m
827.00	2.5	2.0

- Profil general du canal :

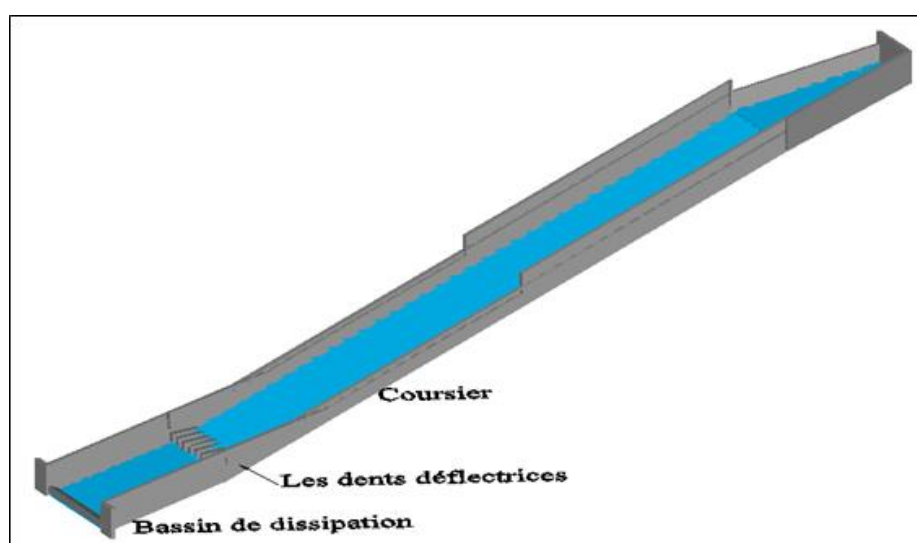


Figure V-1 : Profil général du canal

V.4 Calcul hydraulique du canal

V.4.1 Canal d'évacuation des eaux pluvial

Description : canal de forme rectangulaire qui ressemble à un coursier qui permet d'acheminer l'écoulement d'une crue de l'amont vers l'aval vers l'exutoire, sa longueur et sa perte dépendant de la configuration topographique du terrain.

Dans notre cas le canal dispose d'un ensemble d'ouvrages d'évacuation des eaux tel que les coursiers suivis par des ouvrages d'amortissement ou de dissipations selon le régime d'écoulement.

- **Coursier :**

Le coursier permet d'acheminer l'écoulement d'une crue de l'amont vers l'aval de la retenue, sa longueur et sa perte dépendant de la configuration topographique du terrain, et des disponibilités de raccordement au cours d'eau original.

❖ **Formules directes approximatives pour la détermination de la hauteur de l'écoulement d'eau :**

La hauteur du coursier est déterminée par la formule générale suivante :

$$Y_i = \frac{Y_{cr} b_{cour} (K_a b_{cour} + K_c L_i)}{(b_{cour}^2 + K_b b_{cour} L_i + K_d L_i^2)} \quad V-1$$

K_a ; K_b ; K_c et K_d sont les coefficients qui dépendent de la pente du coursier, ils sont calculés par les formules suivantes:

$$K_a = 0.959 - 0.184 i_0 \quad V-2$$

$$K_b = 0.243 + 3.768 i_0 \quad V-3$$

$$K_c = 0.280 + 0.189 i_0 \quad V-4$$

$$K_d = 0.006 - 0.013 i_0 \quad V-5$$

Y_{cr} : Hauteur d'eau critique au début du coursier. Elle est déterminée par la formule suivante :

$$Y_{cr} = \sqrt[3]{\frac{Q_d^2}{g b_{cour}^2}} \quad V-6$$

Q_p : débit de projet = 15.24 m³/s.

g : accélération de la gravité (9.81 m/s²)

b_{cour} : Largeur du coursier = 2.50 m.

En remplacement de la valeur Y_{cr} dans la formule.

$$Y_i = \frac{Y_{cr} b_{cour} (K_a b_{cour} + K_c L_i)}{(b_{cour}^2 + K_b b_{cour} L_i + K_d L_i^2)} \quad V-7$$

L_i : Distance depuis le début jusqu'à la section où l'on voudrait connaître la hauteur de l'eau

On peut réaliser le tableau suivant pour obtenir les résultats de la formule précédente.

Tableau V-2 : Calcul la hauteur critique de coursier n°01

Coursier n°01 (Pk 298.49÷350.0)							
Li(m)	0	10	20	30	40	50	51.51
Yi(m)	1.462	0.892	0.786	0.734	0.698	0.671	0.667
A1	9.14	20.88	32.63	44.37	56.12	67.86	69.63
A2	6.25	23.42	41.50	60.48	80.37	101.17	104.39

Tableau V-3 : Calcul la hauteur critique de coursier n°02

Coursier n°02 (Pk 359.28÷500.0)							
Li(m)	0	20	30	50	70	100	142.72
Yi(m)	1.462	0.786	0.734	0.671	0.628	0.579	0.524
A1	9.14	32.63	44.37	67.86	91.35	126.58	176.75
A2	6.25	41.50	60.48	101.17	145.48	218.75	337.15

Tableau V-4 : Calcul la hauteur critique de coursier n°03

Coursier n°03 (Pk 511.52÷650.0)							
Li(m)	0	10	20	50	70.00	100	138.38
Yi(m)	1.463	0.901	0.796	0.678	0.63	0.584	0.533
A1	9.15	20.87	32.59	67.76	91.20	126.37	171.36
A2	6.25	23.15	40.96	99.89	143.74	216.37	321.28

Avec :

$$A_1 = Y_{cr} b_{cour} (K_a b_{cour} + K_c L_i) \quad \text{V-8}$$

$$A_2 = (b_{cour}^2 + K_b b_{cour} L_i + K_d L_i^2) \quad \text{V-9}$$

Ces formules seront utilisées dans les conditions suivantes

- $2.13 \leq q \leq 15.50$ (débit spécifique)
- $L_i \leq 150$ m (longueur totale du coursier, $L_i = 51.51$ m)

On aura : $q = 6.10 \text{ m}^2/\text{s}$ (Voir le tableau ci-dessous)

$L = 51.51$ m (d'après le levé topographique)

La pente $I = 11.30 \%$ (d'après le levé topographique)

On calcule la hauteur normale (Y_n) par la formule suivante :

$$\frac{Q \times \eta}{\sqrt{i}} = b_c \times Y \left(\frac{b_c \times Y_{sup}}{2 \times b_c + Y_{sup}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad \text{V-10}$$

Étant connu :

$$\frac{Q * \eta}{\sqrt{i}} = \frac{15.24 * 0.014}{\sqrt{0.113}} = 0.635m$$

On donne des valeurs à Y_{sup} jusqu'à ce que :

$$b_c \times Y \left(\frac{b_c \times Y_{sup}}{2 \times b_c + Y_{sup}} \right)^{\frac{2}{3}} \tag{V-11}$$

Soit égal à :

$$\frac{Q \times \eta}{\sqrt{i}} \tag{V-12}$$

Tableau V-5 : Calcule la hauteur normale (Yn) de coursier n°01

$\frac{Q \times \eta}{\sqrt{i}}$	$b_c \times Y \left(\frac{b_c \times Y_{sup}}{2 \times b_c + Y_{sup}} \right)^{\frac{2}{3}}$	$Y_{sup}=Y_n$
0.635	0.466	0.5000
0.635	0.674	0.6300
0.635	0.635	0.6070

Tableau V-6 : Calcule la hauteur normale (Yn) de coursier n°02

$\frac{Q \times \eta}{\sqrt{i}}$	$b_c \times Y \left(\frac{b_c \times Y_{sup}}{2 \times b_c + Y_{sup}} \right)^{\frac{2}{3}}$	$Y_{sup}=Y_n$
0.635	0.466	0.5000
0.635	0.638	0.6090
0.635	0.635	0.60700

Tableau V-7 : Calcule la hauteur normale (Yn) de coursier n°03

$\frac{Q \times \eta}{\sqrt{i}}$	$b_c \times Y \left(\frac{b_c \times Y_{sup}}{2 \times b_c + Y_{sup}} \right)^{\frac{2}{3}}$	$Y_{sup}=Y_n$
0.643	0.466	0.5000
0.643	0.570	0.5670
0.643	0.643	0.6120

Le débit spécifique :

Le débit spécifique à travers la section est :

$$q = \frac{Q_{Pr ojet}}{b_{cours}} \tag{V-13}$$

B_{cours} : la largeur du canal de coursier ($B = 2.5 \text{ m}$)

Calcul de la hauteur des parois.

La hauteur des parois doit être calculée par la formule suivante :

$$H_3 = Y_{\text{crit}} + H_L \quad \text{V-14}$$

Où:

Y_{crit} : hauteur d'eau critique

H_L : hauteur libre ($0.5\text{m} \div 1.0\text{m}$), en prend $H_L = 0.5 \text{ m}$

AN :

$$H_3 = 1.559 + 0.5 = 2.06\text{m} = 2.00\text{m}$$

V.4.2 Calcul du convergent :

Le convergent est l'ouvrage intermédiaire entre le chenal d'écoulement et le coursier, sa largeur au début est égale à celle du chenal d'écoulement et égale à sa fin à celle du coursier.

Son rôle est de guider les filets d'eau jusqu'au coursier avec un passage d'un écoulement fluvial à la fin du chenal à un écoulement torrentiel au début du coursier.

Le convergent doit être dimensionné de telle sorte que la condition suivante est vérifiée :

$$\text{tg}(\alpha) < \frac{1}{3F} \quad \text{V-15}$$

On peut réaliser le tableau suivant pour obtenir les résultats de la formule précédente.

Tableau V-8 : les résultats des calculs hydrauliques du coursier

		Canal Rectangulaire en béton armé			
		Unité	Coursier n°01	Coursier n°02	Coursier n°03
Longueur du canal		Li (m)	51.51	140.72	138.48
Coefficient de rugosité		η	0.014	0.014	0.014
Largeur du canal		bcour (m)	2.50	2.50	2.50
Hauteur du canal		h_3 (m)	2.00	2.00	2.00
Pente du canal		I_0 (%)	11.300%	11.300%	11.010%
Débit de projet		Q (m ³ /s)	15.24	15.24	15.24
Débit spécifique		q (m ² /s)	6.10	6.10	6.10
Hauteur de coursier		Y_i (m)	0.767	0.526	0.533
Hauteur critique		Y_{cri} (m)	1.559	1.559	1.559
Coefficient	Ka	/	0.938	0.938	0.939
	Kb	/	0.669	0.669	0.658
	Kc	/	0.301	0.301	0.301
	Kd	/	0.005	0.005	0.005

V.4.3 Dissipateur d'énergie

- **Principe de dissipation**

La dissipation de l'énergie dans cet ouvrage s'effectue de la même manière que dans le bassin d'amortissement. A travers d'un saut hydraulique, avec la seule différence qu'on utilise différents éléments dans le but de dissiper l'énergie et contribuer à la stabilisation du flux.

Le principe de la dissipation d'énergie du flot évacué se fait par un ralentissement brutal de la vitesse de l'écoulement, donc par un changement du régime d'écoulement du torrentiel au fluvial.

La vitesse d'écoulement à l'entrée du bassin de dissipation est inférieure à 15 m/s et le nombre de Froude inférieur à 4.5 . Donc, d'après les tests réalisés par (USBR) « The Bureau Of Réclamation » : **le bassin de dissipation le plus favorable est un bassin à ressaut de type I.**

- **Méthodologie de dimensionnement :**

La méthodologie qu'on présente s'appuie sur les données connues suivantes :

Débit de projet Q_d

Largeur de dissipateur bb

Hauteur de l'écoulement d'eau en aval (imposée par l'oued ou le canal de sortie), Y_3

Hauteur de l'écoulement d'eau à l'entrée du dissipateur, Y_1

Le bassin à ressaut est un moyen très efficace pour réduire la vitesse de sortie à une valeur compatible avec une bonne stabilité à l'aval :

1- Calcul du nombre de Froude à l'entrée du dissipateur Fr_1 :

La forme du ressaut et ses caractéristiques dépendent directement du nombre de Froude.

les résultats des calculs hydrauliques du coursier

$$Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g * Y_1}} \tag{V-16}$$

Y_1 : tirant d'eau en m

V : vitesse de l'écoulement (m/s) $V_1 = \frac{Q_d}{b_c * Y_1}$ V-17

Y_3 (Y_{cr}): La hauteur critique $Y_3 = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$ V-17

Q : Débit spécifique (m^2/s) $q = \frac{Q_d}{L_d}$ V-18

Pour choisir le type de dissipateur d'énergie il faut connaître la nature du ressaut.

1. On doit déterminer les profondeurs contactées Y_1 conjuguée Y_2 , la profondeur contactée Y_1 est déjà calculée dans le coursier.
2. Une fois calculée le nombre de Froude, on analyse le type de saut qui aura lieu dans le dissipateur et on choisit le type de dissipateur.

- Si $2,5 \leq Fr_1 \leq 4,5$ le saut est oscillant; on conçoit un dissipateur de type I.

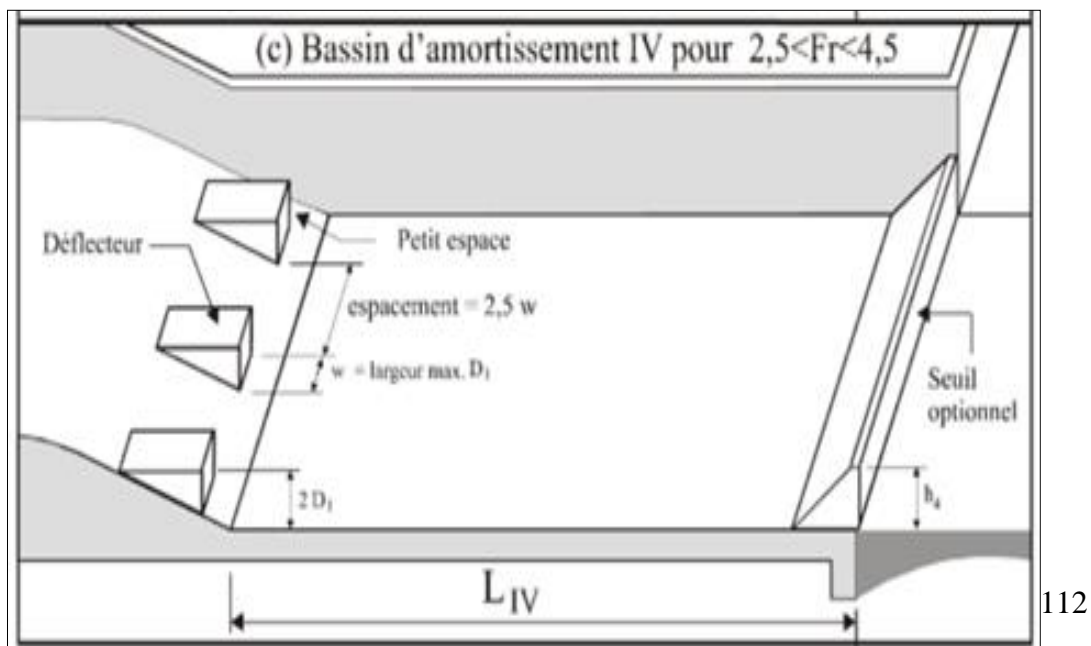


Figure V-2 : Dissipateur de type I pour $2.5 < Fr < 4.5$

- Si $F_{r1} > 4.5$ le saut est stable, alors: Si $V_1 < 15$ m/s, on conçoit un dissipateur de type II.

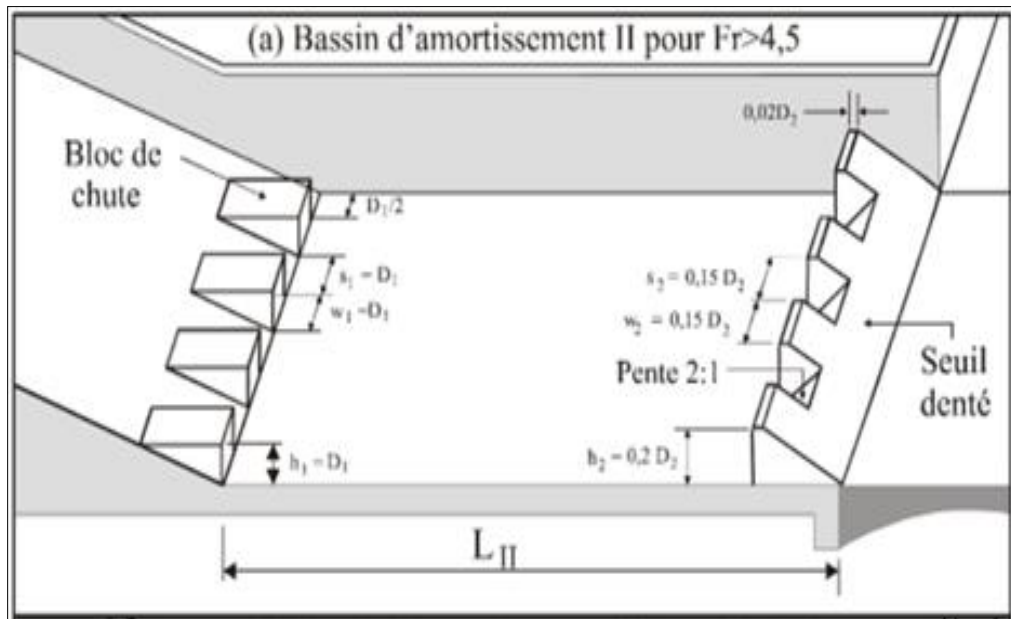


Figure V-3 : Dissipateur de type II pour $Fr > 4.5$

- Si $V_1 > 15$ m/s, on conçoit un dissipateur de type III.

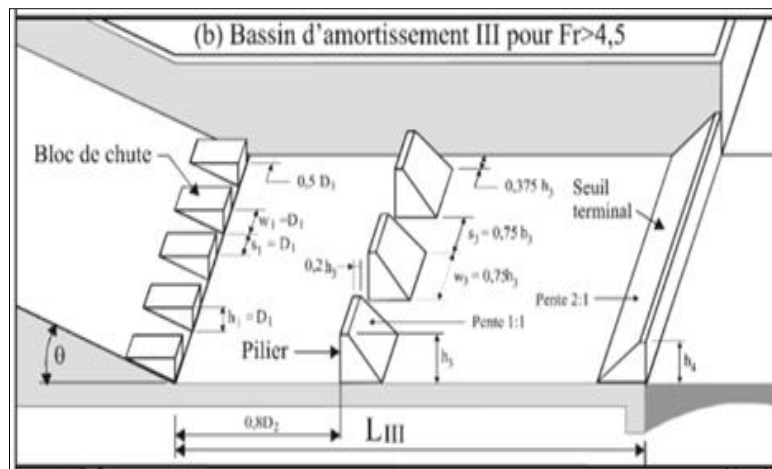


Figure V-4 : Dissipateur de type III pour $Fr > 4.5$

- Conception d'un dissipateur de Type I ($2.5 < F_{r1} < 4.5$).

1- On calcule la hauteur de l'écoulement d'eau T_a à partir de l'équation suivante :

$$T_a = Y_1(1.539F_{r1} - 0.471) \quad \text{V-19}$$

2- On détermine la longueur du dissipateur (L_I).

$$L_I = Y_2(1.50 + 1.768F_{r1} - 0.174F_{r1}^2) \quad \text{V-21}$$

3- On calcule la hauteur conjuguée Y_2

$$Y_2 = \frac{Y_1}{2} (\sqrt{(8Fr_1^2 + 1)} - 1) \quad \text{V-22}$$

4- On détermine la longueur du dissipateur (L_1).

$$L_1 = Y_2(1.50 + 1.768Fr_1 - 0.174Fr_1^2) \quad \text{V-23}$$

5- On calcule les dimensions des dents déflectrices.

$$\text{Hauteur} = 2Y_1 \quad \text{V-24}$$

$$\text{Epaisseur} = Y_1 \quad \text{V-25}$$

$$\text{Largeur} = 2Y_1 \quad \text{V-26}$$

$$\text{Espace entre des dents} = 2.5Y_1 \quad \text{V-27}$$

6- On calcule le nombre de dents déflectrices (n).

$$n = \frac{b + 2.5Y_1}{3.5Y_1} \quad \text{V-28}$$

7- On calcule l'espace fractionnel entre la paroi et la dent déflectrice la plus proche.

$$Esp_{frac} = \frac{b - (3.5Y_1 * n - 2.5Y_1)}{2} \quad \text{V-29}$$

Dans le plan, on représente le paramètre précité.

8- On obtient le dimensionnement du seuil terminal.

$$L = 2.5Y_1 + 0.04Y_2 \quad \text{V-30}$$

Hauteur de seuil Optionnel est donnée par la formule suivante :

$$H_4 = 1.25Y_1 \quad \text{V-31}$$

Tableau V-9 : Calculs hydraulique pour les trois bassins de dissipation de type I

	Unité	Bassin de dissipation N°01 (Pk 350.0÷Pk359.28)	Bassin de dissipation N°02 (Pk 500.0÷Pk511.52)	Bassin de dissipation N°03 (Pk650.0÷Pk611.34)	
Débit de projet	Q(m ³ /s)	15.240	15.240	15.240	
Débit spécifique	q(m ² /s)	3.048	3.048	3.048	
Largeur du canal	bcour (m)	5.000	5.000	5.000	
Hauteur de l'écoulement d'eau	Ta(m)	1.950	2.200	2.180	
Hauteur de coursier	Y ₁ (m)	0.474	0.395	0.401	
Nombre de Froude	Fr ₁	2.980	3.920	3.830	
Hauteur conjuguée	Y ₂ (m)	1.776	2.000	1.982	
vitesse à l'entrée du dissipateur	Vi(m/s)	6.430	7.716	7.601	
Longueur du dissipateur	L ₁ (m)	9.279	11.520	11.337	
les dimensions des dents défectrices	Hauteur	2Y ₁ (m)	0.950	0.790	0.802
	Epaisseur	Y ₁ (m)	0.474	0.395	0.401
	Largeur	2Y ₁ (m)	0.948	0.790	0.802
	Espace entre des dents	2.5Y ₁ (m)	1.185	0.988	1.003
	Nombre des dents	n	3.000	3.000	3.000
	Espace fractionnel	Es(m)	0.604	0.920	0.896
Largeur de seuil	Ls(m)	1.256	1.067	1.081	
Hauteur de seuil	h ₄ (m)	0.592	0.493	0.501	

V.5 La longueur du convergent et divergent :

À l'extrémité du chenal, il est nécessaire de projeter un **convergent** pour ajuster le passage en régime torrentiel, suivi d'un **divergent** pour assurer une transition harmonieuse du flux après la zone de contrôle. Les calculs sont effectués selon la méthode recommandée par **Agustin, A.G. (2004)**, prenant en compte les nombres de Froude et l'angle d'inclinaison θ .

- **Méthode de calcul :**

Pour $\theta < 10^\circ$

$$\theta = \sin^{-1} \left(\left(\frac{1}{2Fr_1} \right) \times \left(\frac{b_1}{b_2} - 1 \right) \right)$$

Pour $\theta > 10^\circ$

$$\tan \theta = \frac{1}{3Fr}$$

- **Données de calcul :**

Débit Q : 15.24 m³/s

Largeur à l'entrée L_1 : 5.0 m

Largeur à la sortie du convergent L_2 : 2.5 m

Vitesse à l'entrée V_1 : 2.5 m/s

Hauteur à l'entrée h_1 : 1.29 m

- **Nombre de Froude Fr_1 à l'entrée :**

$$Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g \cdot h_1}} = \frac{2.6}{\sqrt{9.81 \times 1.29}} = 0.73$$

- **Angle d'inclinaison θ du convergent :**

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{1}{3 \times Fr_1} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{1}{3 \times 0.73} \right) = 34.38^\circ$$

- **La longueur du convergent:**

$$L = 1.6(L_1 - L_2)$$

V-20

$$A. N : L = 1.6(5 - 2.5) = 4.0 \text{ m}$$

- **Profondeur critique y_c à la sortie du convergent :**

$$y_c = \left(\frac{Q^2}{g \cdot b_2^2} \right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{15.24^2}{9.81 \times 2.5^2} \right)^{\frac{1}{3}} = 1.56 \text{ m}$$

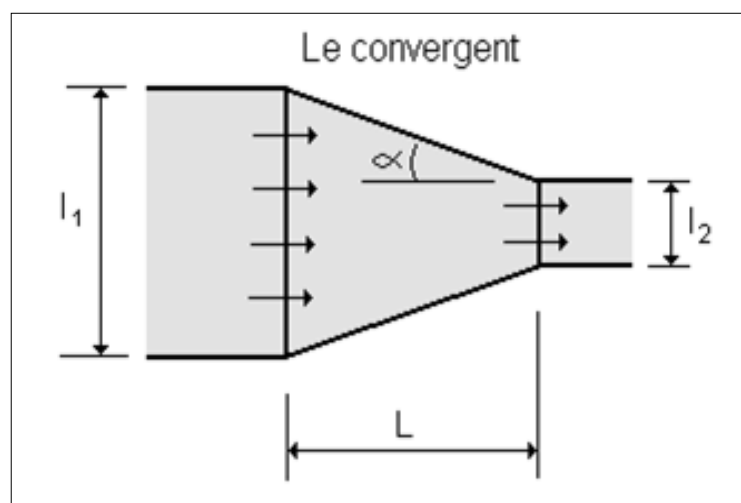


Figure V-5 : Schéma d'un convergent

V.6 Modélisation hydraulique et simulation

La modélisation des écoulements dans l'oued Kristel, en utilisant la variante d'aménagement choisie, a été réalisée à l'aide du logiciel HEC-RAS. L'objectif principal de cette simulation est d'analyser le comportement hydraulique de l'oued lors d'une crue centennale, en se concentrant particulièrement sur les débits d'écoulement et leur impact sur les infrastructures en aval.

Les résultats obtenus incluent des vues 3D détaillées, des profils en long et des coupes transversales, permettant d'évaluer avec précision les zones critiques, la répartition des vitesses d'écoulement ainsi que les hauteurs d'eau. Ces données offrent une vision complète du fonctionnement hydraulique de la variante adoptée, tout en optimisant la conception du canal et des bassins de dissipation. Des analyses complémentaires concernant l'effet des dispositifs de dissipation d'énergie sur la réduction des vitesses d'écoulement et l'atténuation de l'érosion pourront également être intégrées dans l'étude pour affiner les conclusions.

- Les sections en travers :

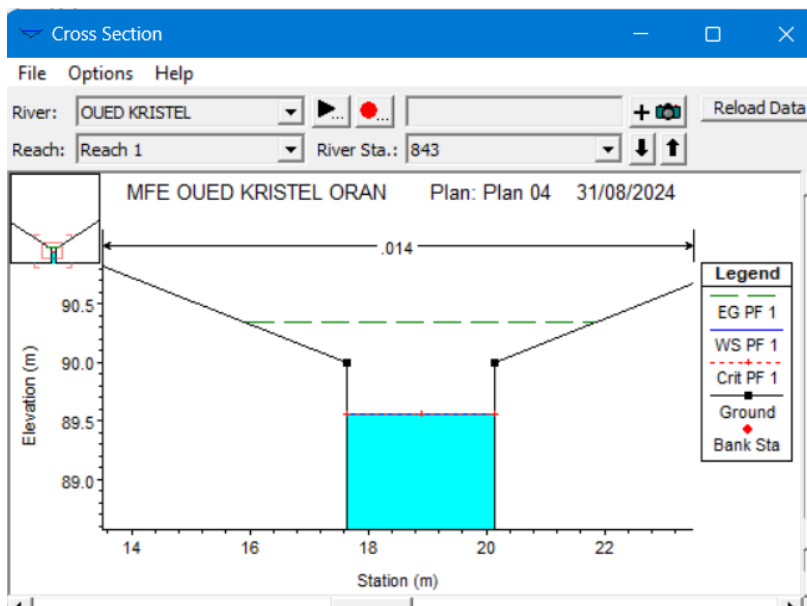


Figure V-6 : Section en travers de la station 843

- Vue 3D de oued Kristel

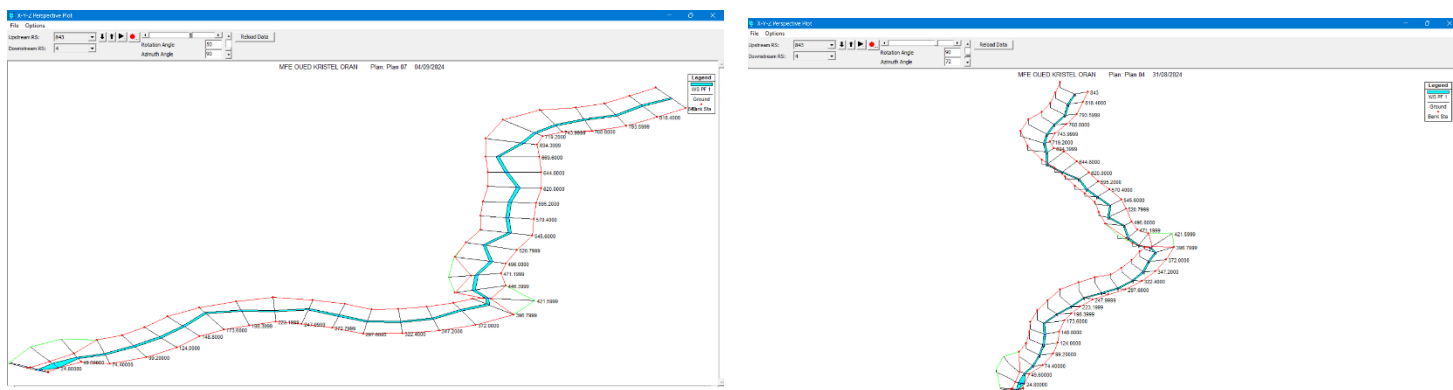


Figure V-7 : vue en 3D de oued Kristel

Tableau V-10 :Principaux parametres hydraulique d'oued Kristel après aménagement

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/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 (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl
Reach 1	843	PF 1	15.24	95.87	97.17	97.17	97.53	0.00511	2.73	5.9	8.41	1.07
Reach 1	818.4	PF 1	15.24	94.39	95.02	95.02	95.22	0.006089	2	7.83	20.44	1.08
Reach 1	793.5999	PF 1	15.24	90.88	91.74	91.74	92.02	0.005202	2.37	6.69	12.77	1.06
Reach 1	768.8	PF 1	15.24	84.86	85.72	85.72	86.04	0.004779	2.59	6.46	10.81	1.06
Reach 1	743.9999	PF 1	15.24	81.48	82.53	82.53	82.8	0.005984	2.33	6.78	13.48	1.11
Reach 1	719.2	PF 1	15.24	78.6	80.12	80.3	80.19	0.000788	1.17	13.12	15.2	1.10
Reach 1	694.3999	PF 1	15.24	79.41	79.96	79.96	80.14	0.006843	1.88	8.15	23.26	1.10
Reach 1	669.6	PF 1	15.24	76.13	76.7	76.7	76.92	0.0064	2.07	7.42	17.44	1.11
Reach 1	644.8	PF 1	15.24	73.72	74.23	74.23	74.41	0.006214	1.91	8.15	23.75	1.08
Reach 1	620	PF 1	15.24	66.83	67.79	67.79	68.1	0.005774	2.47	6.18	9.99	1.10
Reach 1	595.2	PF 1	15.24	62.44	66.46	66.3	66.47	0.000016	0.42	46.71	20.34	1.11
Reach 1	570.4	PF 1	15.24	65.65	66.32	66.32	66.45	0.005607	1.89	9.79	33.36	1.03
Reach 1	545.6	PF 1	15.24	55.24	61.42	64.15	61.43	0.000012	0.34	47.65	15.6	1.11
Reach 1	520.7999	PF 1	15.24	60.35	61.17	61.17	61.4	0.006008	2.16	7.31	16.6	1.09
Reach 1	496	PF 1	15.24	53.65	54.76	54.76	55.09	0.005435	2.53	6.16	10.19	1.09
Reach 1	471.1999	PF 1	15.24	47.08	52.26	52.65	52.26	0.000007	0.29	60.29	20.14	1.10
Reach 1	446.3999	PF 1	15.24	50.9	51.96	51.96	52.24	0.005673	2.31	6.66	12.89	1.08
Reach 1	421.5999	PF 1	15.24	46.09	47.01	47.01	47.35	0.004923	2.73	6.19	9.44	1.08
Reach 1	396.7999	PF 1	15.24	44.05	45.37	45.37	45.71	0.005222	2.67	6.05	9.31	1.06
Reach 1	372	PF 1	15.24	43.03	44.4	44.4	44.77	0.00526	2.77	5.79	8.02	1.08
Reach 1	347.2	PF 1	15.24	40.5	41.54	41.54	41.81	0.006068	2.28	6.69	12.74	1.10
Reach 1	322.4	PF 1	15.24	35.29	37.36	41	37.45	0.000677	1.32	11.62	9.42	1.10
Reach 1	297.6	PF 1	15.24	33.83	37.42	40.8	37.43	0.000018	0.45	45.36	20.59	1.10
Reach 1	272.7999	PF 1	15.24	31.7	37.42	38	37.43	0.000003	0.24	83.7	26.96	1.10
Reach 1	247.9999	PF 1	15.24	36.41	37.16	37.16	37.4	0.006187	2.18	7.04	15.17	1.11
Reach 1	223.1999	PF 1	15.24	26.16	31.59	36.2	31.6	0.000005	0.23	68.72	23.5	1.08
Reach 1	198.3999	PF 1	15.24	26.87	31.59	30.71	31.6	0.000008	0.24	63.19	23.33	1.09
Reach 1	173.6	PF 1	15.24	30.51	31.33	31.33	31.57	0.006241	2.18	6.98	14.62	1.11
Reach 1	148.8	PF 1	15.24	21.65	23.13	23.13	23.54	0.005116	2.89	5.55	7.26	1.06
Reach 1	124	PF 1	15.24	19.46	20.57	20.57	20.89	0.004292	2.67	6.53	10.37	1.01
Reach 1	74.4	PF 1	15.24	10.11	11.6	11.6	11.98	0.005933	2.75	5.54	7.36	1.11
Reach 1	49.6	PF 1	15.24	7.7	8.46	8.46	8.69	0.006239	2.16	7.1	15.69	1.10
Reach 1	24.8	PF 1	15.24	4.59	5.36	5.36	5.62	0.006282	2.27	6.73	13.02	1.10
Reach 1	6	PF 1	15.24	3.24	3.87	3.87	4.11	0.006463	2.17	7.04	15.4	1.10
Reach 1	4	PF 1	15.24	3.11	3.63	3.63	3.83	0.00618	2	7.77	20.09	1.07

- Interprétation :

Les résultats de la simulation hydraulique confirment que la variante d'aménagement retenue pour l'oued Kristel est la plus adéquate et fiable. Il est observé que le niveau de l'eau, tout au long du cours de l'oued, ne dépasse pas la hauteur du canal, ce qui indique l'absence de débordement. De plus, le nombre de Froude reste inférieur ou égale à 1, et la vitesse d'écoulement est jugée optimale.

V.7 Les ouvrages de traversés :

Notre oued est traversé par diverses infrastructures routières, incluant des ponts et des routes. Toutefois, l'absence de données précises sur les dimensions et les hauteurs de ces structures nous empêche de réaliser une simulation adéquate des écoulements. Nous recommandons donc l'installation de dalots dont les dimensions seraient ajustées en fonction du débit d'eau à gérer par le logiciel FLOWMASTER. De plus, pour limiter l'érosion autour de ces installations, nous proposons l'utilisation d'un revêtement en béton spécialement conçu pour cette finalité.

V.7.1 Les dalots

Un dalot est une structure d'ingénierie civile conçue pour permettre le passage de l'eau sous une route, une voie ferrée, un sentier ou toute autre infrastructure. Il joue un rôle crucial dans le drainage et la prévention des inondations en assurant un écoulement libre de l'eau sous les infrastructures. En quelque sorte, un dalot peut être considéré comme un petit pont ou une conduite d'eau, utilisé principalement pour gérer les eaux de ruissellement ou les cours d'eau temporaires.

V.7.2 Types de dalots

Il existe plusieurs types de dalots, classés en fonction des matériaux utilisés et de la méthode de construction. Voici les principaux types :

- Dalots en béton préfabriqué :
 - Dalots rectangulaires : Conçus pour de grandes capacités de drainage, ces dalots sont utilisés lorsqu'il faut évacuer de gros volumes d'eau.
 - Dalots circulaires : Souvent appelés "buses", ils sont couramment utilisés pour des débits d'eau modérés.
- Dalots en béton coulé sur place :
 - Dalots simples : Ils comportent une seule ouverture permettant le passage de l'eau, adaptés aux débits plus faibles.

- Dalots multiples : Ils possèdent plusieurs ouvertures parallèles, utiles pour évacuer de grands volumes d'eau, notamment en cas de crue.
- Dalots métalliques :
 - Dalots en acier ondulé : Souvent utilisés dans des environnements où la durabilité et la résistance à la corrosion sont primordiales, comme les zones industrielles ou les régions sujettes à la corrosion.
- Dalots en matériaux composites :
 - Dalots en plastique renforcé de fibres de verre (FRP) : Légers, résistants à la corrosion, et adaptés à des applications spécifiques, ces dalots sont souvent utilisés dans des environnements particuliers nécessitant des matériaux innovants.

V.7.3 Processus de montage des dalots

Le montage d'un dalot nécessite une série d'étapes méthodiques, allant de l'étude du site à la finition.

- Étude et conception :
 - Étude du site : Une évaluation préalable des conditions hydrologiques et géologiques est effectuée pour déterminer les besoins spécifiques en matière de drainage et de structure.
 - Conception : Les dimensions du dalot, ainsi que les matériaux à utiliser, sont définis en fonction du débit d'eau à évacuer et des charges mécaniques que la structure devra supporter.
- Préparation du site :
 - Excavation : Une tranchée est creusée à l'emplacement prévu du dalot, selon les dimensions spécifiées dans la conception.
 - Nivellement : Le fond de la tranchée est nivelé et compacté pour assurer une base stable pour la structure.
- Installation
 - Pose de la base : Une base de fondation en béton ou en gravier compacté est installée pour garantir la stabilité du dalot.
 - Assemblage des segments : Pour les dalots préfabriqués, les segments sont assemblés et scellés ensemble. Dans le cas des dalots coulés sur place, un coffrage est monté avant le coulage du béton.
 - Coulée du béton : Pour les dalots en béton coulé sur place, le béton est coulé dans le coffrage et laissé à durcir.
- Finition et vérification :

- Étanchéité : Les joints sont vérifiés et scellés pour éviter toute fuite d'eau.
- Remblaiement : Le dalot est ensuite entouré de gravier ou de sable pour assurer sa stabilité et prévenir les infiltrations d'eau.
- Test et inspection : Des tests sont effectués pour s'assurer du bon fonctionnement de l'ouvrage et de sa capacité à évacuer correctement l'eau.
- Aménagement paysager
 - Restauration du site : Après l'installation, le terrain autour du dalot est réhabilité en remettant en place la végétation ou les revêtements, afin de minimiser l'impact environnemental.

Ce processus de montage garantit non seulement l'efficacité hydraulique du dalot, mais aussi sa longévité et sa sécurité en fonction des contraintes du site et des conditions environnementales.

V.7.4 Dimensionnement des ouvrages traversés :

- Le premier dalot :

Le dimensionnement proposé suivant est établi sur la base des résultats fournis par le logiciel FLOW MASTER.

- La pente du projet : 0.014
- La profondeur normale : m
- Nombre des dalots (2.5×2.6) : 1
- Débit véhiculé : 15.24m³/s

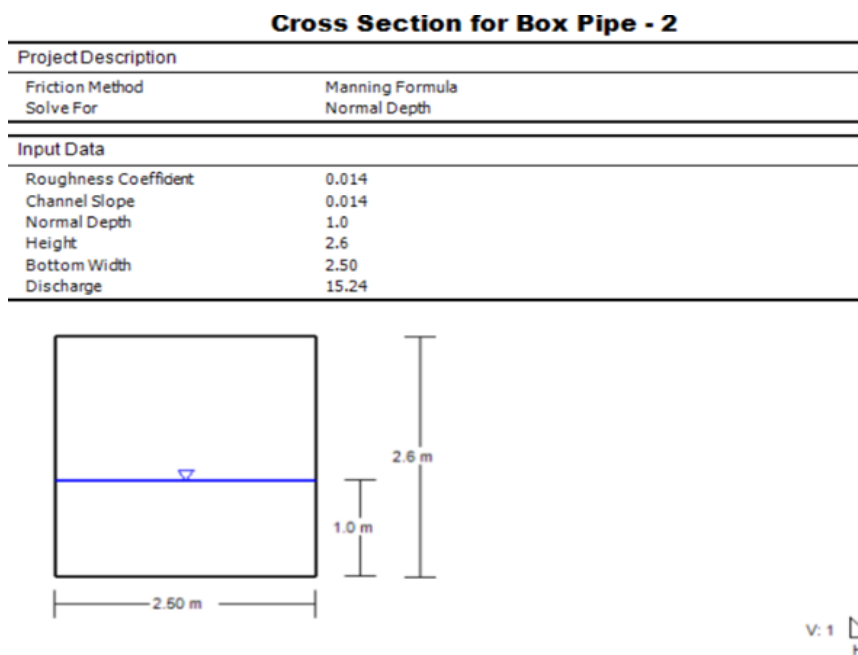


Figure V 8 : Débit véhiculé par le dalot (obtenue via flow master)

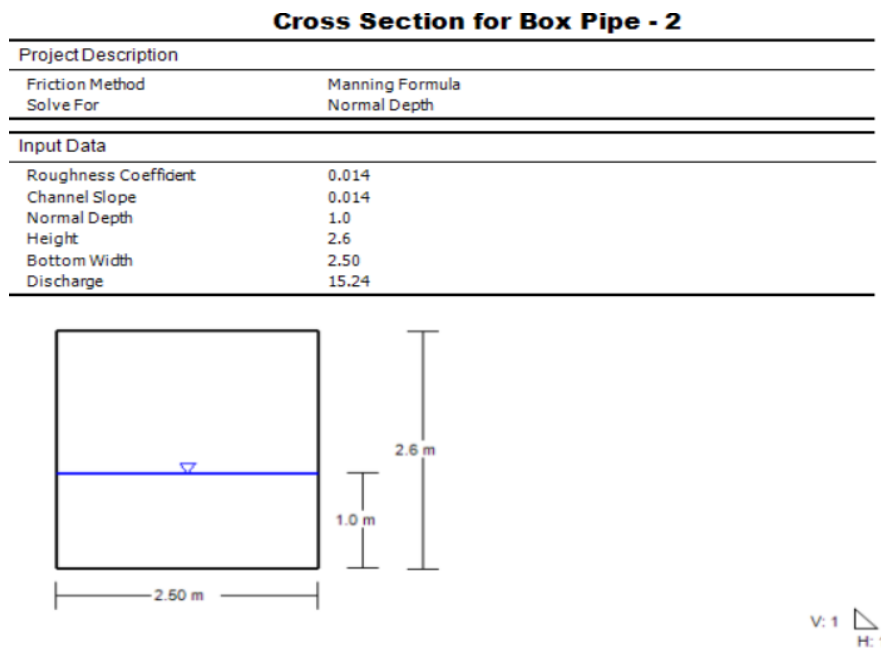


Figure V-8 : Debit vehiculer par le dalot (obtenue via flow master)

- Simulation avec HEC RAS :

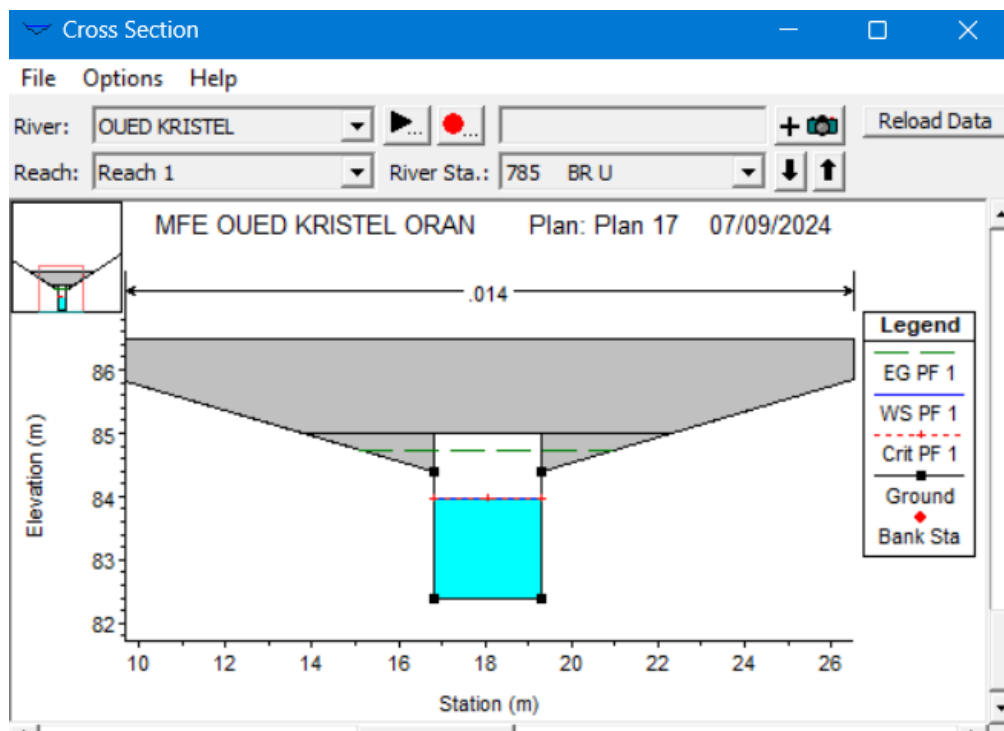


Figure V-9 : Simulation du dalot par HEC RAS

- Le deuxième dalot :
 - La pente du projet : 0.08
 - La profondeur normale : 0.9 m
 - Nombre des dalots (1.8×2) : 1
 - Débit véhiculé : 15.24m³/s

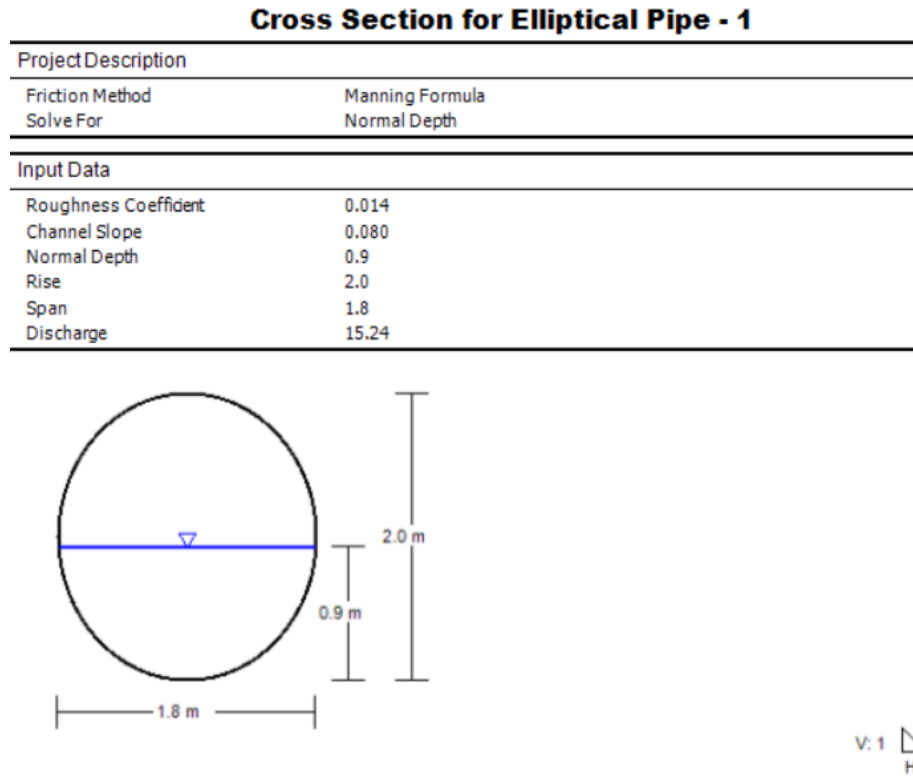


Figure V-10 : Débit véhiculé par le dalot elliptique (Obtenue via FLOWMASTER)

- Simulation avec HECRAS :

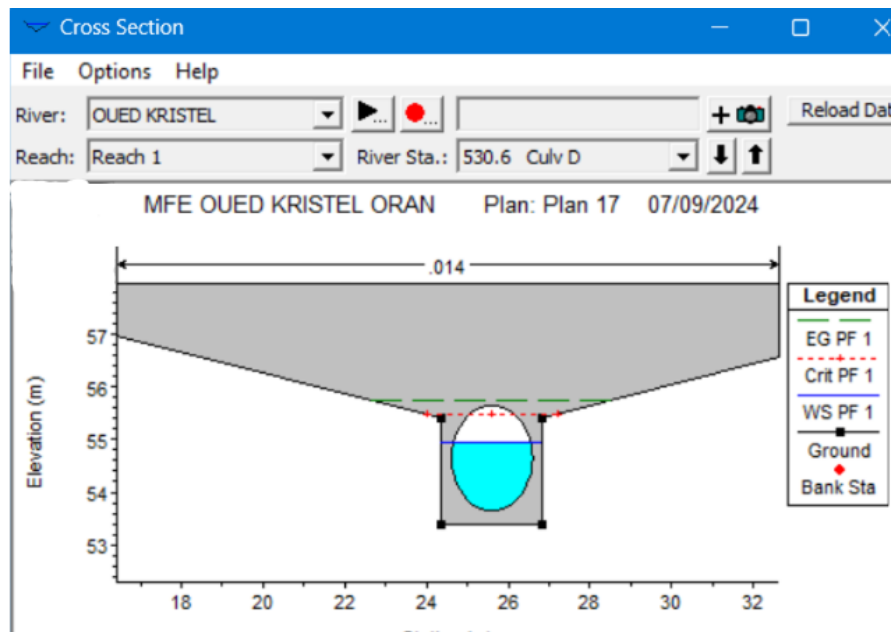


Figure V-11 :Simulation du dalot via HECRAS

- Photo réelle du dalot sur terrain :



Figure V-12 : Dalot elliptique sur terrain

- Le reste des ouvrages :

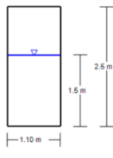
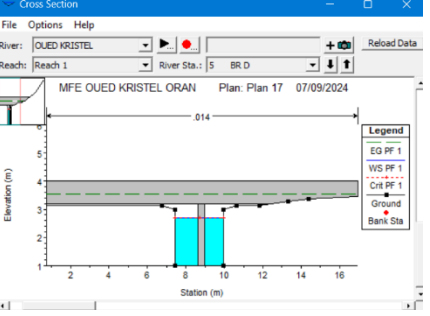
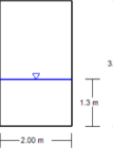
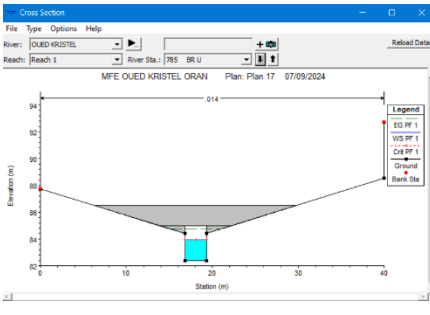
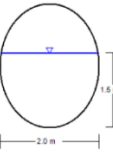
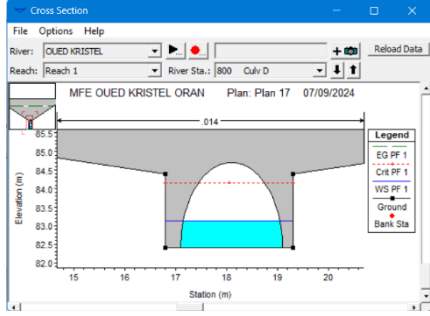
Dimension	Résultat via FLOWMASTE	Simulation sur HECRAS																				
<p>Deux dalots de dimension (1.1×2.6) pour chaque dalot</p>	<p>Cross Section for Box Pipe - 2</p> <table border="1"> <tr><td colspan="2">Project Description</td></tr> <tr><td>Friction Method</td><td>Manning Formula</td></tr> <tr><td>Solve For</td><td>Normal Depth</td></tr> <tr><td colspan="2">Input Data</td></tr> <tr><td>Roughness Coefficient</td><td>0.014</td></tr> <tr><td>Channel Slope</td><td>0.014</td></tr> <tr><td>Normal Depth</td><td>1.5</td></tr> <tr><td>Height</td><td>2.5</td></tr> <tr><td>Bottom Width</td><td>1.10</td></tr> <tr><td>Discharge</td><td>7.62</td></tr> </table>  <p>V:1 H:1</p>	Project Description		Friction Method	Manning Formula	Solve For	Normal Depth	Input Data		Roughness Coefficient	0.014	Channel Slope	0.014	Normal Depth	1.5	Height	2.5	Bottom Width	1.10	Discharge	7.62	
Project Description																						
Friction Method	Manning Formula																					
Solve For	Normal Depth																					
Input Data																						
Roughness Coefficient	0.014																					
Channel Slope	0.014																					
Normal Depth	1.5																					
Height	2.5																					
Bottom Width	1.10																					
Discharge	7.62																					
<p>Dalot de dimension (2×3.5)</p>	<p>Cross Section for Box Pipe - 1</p> <table border="1"> <tr><td colspan="2">Project Description</td></tr> <tr><td>Friction Method</td><td>Manning Formula</td></tr> <tr><td>Solve For</td><td>Normal Depth</td></tr> <tr><td colspan="2">Input Data</td></tr> <tr><td>Roughness Coefficient</td><td>0.014</td></tr> <tr><td>Channel Slope</td><td>0.014</td></tr> <tr><td>Normal Depth</td><td>1.3</td></tr> <tr><td>Height</td><td>3.5</td></tr> <tr><td>Bottom Width</td><td>2.00</td></tr> <tr><td>Discharge</td><td>15.24</td></tr> </table>  <p>V:1 H:1</p>	Project Description		Friction Method	Manning Formula	Solve For	Normal Depth	Input Data		Roughness Coefficient	0.014	Channel Slope	0.014	Normal Depth	1.3	Height	3.5	Bottom Width	2.00	Discharge	15.24	
Project Description																						
Friction Method	Manning Formula																					
Solve For	Normal Depth																					
Input Data																						
Roughness Coefficient	0.014																					
Channel Slope	0.014																					
Normal Depth	1.3																					
Height	3.5																					
Bottom Width	2.00																					
Discharge	15.24																					
<p>Dalot de dimension (2×2.5)</p>	<p>Cross Section for Elliptical Pipe - 1</p> <table border="1"> <tr><td colspan="2">Project Description</td></tr> <tr><td>Friction Method</td><td>Manning Formula</td></tr> <tr><td>Solve For</td><td>Normal Depth</td></tr> <tr><td colspan="2">Input Data</td></tr> <tr><td>Roughness Coefficient</td><td>0.014</td></tr> <tr><td>Channel Slope</td><td>0.014</td></tr> <tr><td>Normal Depth</td><td>1.5</td></tr> <tr><td>Rise</td><td>2.5</td></tr> <tr><td>Span</td><td>2.0</td></tr> <tr><td>Discharge</td><td>15.24</td></tr> </table>  <p>V:1 H:1</p>	Project Description		Friction Method	Manning Formula	Solve For	Normal Depth	Input Data		Roughness Coefficient	0.014	Channel Slope	0.014	Normal Depth	1.5	Rise	2.5	Span	2.0	Discharge	15.24	
Project Description																						
Friction Method	Manning Formula																					
Solve For	Normal Depth																					
Input Data																						
Roughness Coefficient	0.014																					
Channel Slope	0.014																					
Normal Depth	1.5																					
Rise	2.5																					
Span	2.0																					
Discharge	15.24																					

Figure V-13 Dimensionnement des dalots et leur simulation

- Vue 3D de oued Kristel avec les dalots :

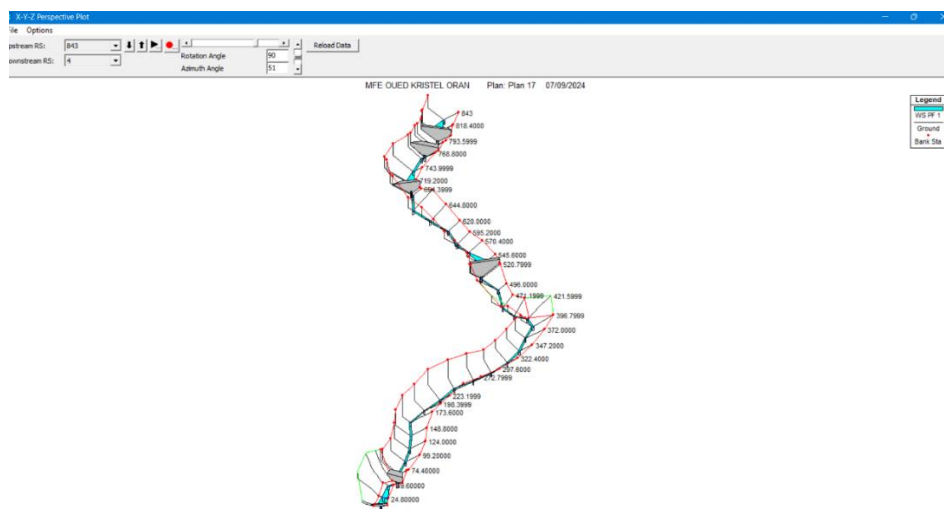


Figure V-14 Vue 3D de oued Kristel avec les dalots (via HECRAS)

Interprétation :

L'utilisation des dalots dans le cadre de l'aménagement de l'oued Kristel joue un rôle essentiel dans la gestion des écoulements hydrauliques et la protection contre les inondations. Les dalots, en tant que structures de franchissement, ont été dimensionnés pour permettre à l'eau de s'écouler de manière contrôlée sous des infrastructures, comme les routes ou les chemins, tout en évitant des débordements susceptibles de provoquer des inondations.

En résumé, les dalots représentent un élément clé de l'aménagement, permettant de gérer les flux d'eau tout en protégeant les infrastructures et les populations locales. Leur conception précise, basée sur les simulations hydrauliques, garantit leur efficacité à long terme et contribue à la durabilité de l'ensemble du projet.

Conclusion :

Ce chapitre a analysé en profondeur la variante d'aménagement sélectionnée pour le projet de l'oued Kristel, en détaillant les aspects de conception, les calculs de structures en béton armé, la conception des bassins de dissipation d'énergie, des coursiers et des dalots, ainsi que la modélisation hydraulique et les simulations associées. Au cours de cette étude, nous avons dimensionné les bassins de dissipation et les dalots afin d'optimiser l'efficacité de la solution choisie.

Les résultats de l'analyse confirment que la variante retenue permet de maîtriser les crues centennales de l'oued Kristel, tout en assurant la sécurité des populations des communes avoisinantes. De plus, cette solution contribue à protéger le petit port de Kristel contre les phénomènes d'envasement et

garantit une gestion hydraulique efficace du cours d'eau. En définitive, l'aménagement proposé offre un équilibre entre sécurité, durabilité et optimisation des écoulements, minimisant ainsi les risques environnementaux et hydrauliques pour la région.

Chapitre VI : Organisation de chantier

VI Organisation de chantier

Introduction

L'organisation d'un chantier est l'ensemble des mesures prises pour réaliser un travail dans les meilleures conditions possibles, afin de réduire les coûts de production et d'augmenter la productivité. Une meilleure connaissance du lieu de chantier facilite grandement la planification technologique des engins et leur utilisation rationnelle dans les différentes opérations, dans le but de répondre aux contraintes d'espace et de temps imposées par le marché. Ainsi, une bonne organisation de chantier contribue considérablement à réduire le prix de l'ouvrage pour qu'il ne soit pas trop onéreux.

Ces constructions sont extrêmement complexes, mais pour les réaliser, et peu importe les difficultés rencontrées, il est essentiel d'avoir une connaissance précise de l'organisation du chantier.

Pour accomplir ces objectifs, il est nécessaire de :

- Identifier de manière précise les méthodes d'exécution, les méthodes opératoires permettant la mise en œuvre des techniques de construction modernes à haut rendement.
- Organiser et organiser les tâches en utilisant une main-d'œuvre spécialisée.
- Organiser de manière adéquate les postes de travail stabilisés afin d'adopter une mécanisation de plus en plus avancée.
- Limiter l'embauche de personnel en quantité et en qualité, le coût de la main-d'œuvre ayant une influence significative sur le prix de revient.

VI.1 Rôles et responsabilités des intervenants sur chantier

Avant de nous plonger dans le cœur du sujet concernant le chantier de construction d'un barrage, il nous semble nécessaire de rappeler les rôles des divers intervenants dans l'acte de construction.

- **Le maître de l'ouvrage**

Il s'agit d'une personne physique ou morale pour laquelle les travaux sont réalisés. Il a pour mission de déterminer l'objectif à atteindre (programme), de mettre en place un financement, de passer et de régler les marchés de travaux. Il est le propriétaire et parfois le gestionnaire des ouvrages après leur réception.

- **Le maître d'œuvre**

Il s'agit d'un individu ou d'une entreprise, désigné par le maître de l'ouvrage pour recevoir l'ouvrage, établir le dossier de consultation des entreprises, assister le maître d'ouvrage dans le dépouillement

des offres, vérifier l'exécution des travaux et proposer leur réception et leur règlement, après avoir effectué le décompte. En ce qui concerne un barrage, il est fréquent que le maître d'œuvre soit également responsable de l'interprétation de son osculation jusqu'à la fin de la phase de mise en eau et de régler le rapport de la première mise en eau.

- **L'entrepreneur**

Personnalité physique ou morale qui a signé un contrat de travaux avec le maître d'ouvrage et qui est responsable de la réalisation des travaux et, parfois, de la conception approfondie des ouvrages. La responsabilité du chantier et de l'ouvrage en cours de construction incombe à l'entrepreneur jusqu'à sa réception. La figure (VII.1) résume le lien contractuel entre les acteurs traditionnels d'un chantier.

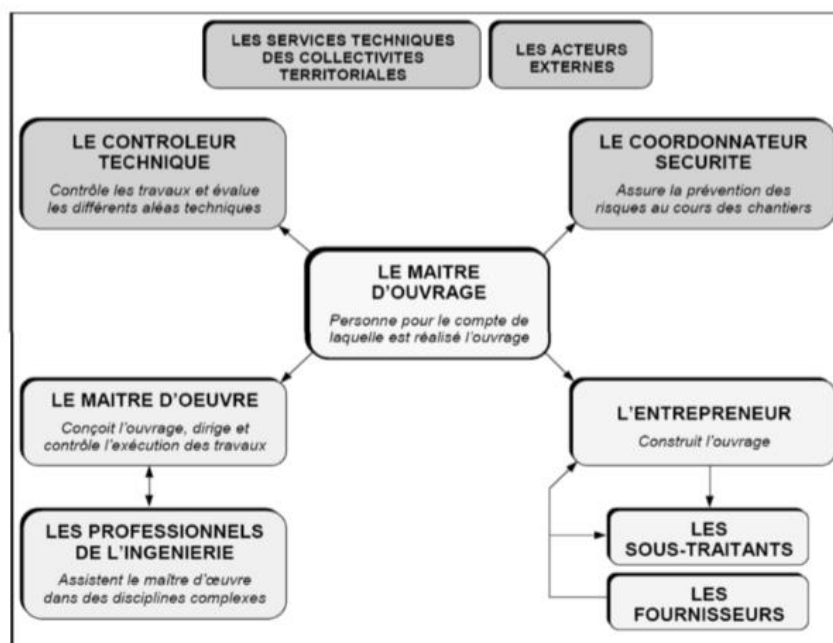


Figure VI-1 : Relation entre les personnes du chantier.

VI.2 Installations du chantier

VI.2.1 Installations destinées au personnel

Les dortoirs, les vestiaires, les réfectoires, les installations sanitaires et les bureaux de chantier sont généralement utilisés.

VI.2.2 Installations destinées au stockage des matériaux

Dans le cadre de l'organisation du chantier, plusieurs installations sont prévues pour assurer un stockage optimal du béton et du béton de propreté. Ces installations garantissent la préservation de la qualité des matériaux ainsi que leur accessibilité pendant les travaux.

- **Bennes à béton :**

Des bennes spécifiques sont utilisées pour stocker le béton prêt à l'emploi avant son utilisation. Ces bennes sont placées à proximité des zones de coulage pour réduire les délais de transport et éviter tout durcissement prématuré.

- **Centrale à béton mobile**

En fonction des besoins du chantier, une centrale à béton mobile peut être installée sur place pour produire le béton en continu. Cela permet d'éviter tout problème lié au transport et garantit une qualité constante du matériau.

- **Aire de stockage temporaire pour le béton de propreté**

Le béton de propreté, utilisé principalement pour préparer une surface propre avant le coulage des fondations, est livré directement sur le chantier et stocké temporairement dans des zones protégées, à proximité immédiate des zones d'application.

- **Cuves de stockage de l'eau**

Des cuves d'eau propre sont installées pour répondre aux besoins de préparation et d'entretien du béton. Elles doivent être placées près des zones de production ou des aires de lavage des équipements.

- **L'énergie électrique**

Un groupe électrogène sera utilisé pour fournir de l'électricité, ce qui ne justifie pas l'utilisation d'un réseau de moyenne tension (SONELGAZ).

- **L'alimentation en carburant**

Les camions citernes assureront l'alimentation, tandis que le stockage sera effectué dans des réservoirs enterrés équipés d'un dispositif de pompage.

- **Nettoyage et entretien des équipements**

Des aires de nettoyage pour les bétonnières et les bennes à béton doivent être installées pour garantir un entretien régulier des équipements, évitant ainsi la contamination et le durcissement non désiré du béton sur les outils.

La nature des travaux à réaliser détermine également le choix des matériaux. Dans le cadre de notre projet, les matériaux suivants ont été retenus.

- **Installations pour la préfabrication**

En général, il s'agit de hangars équipés du matériel requis pour la construction des éléments de l'ouvrage tels que les poutres, les dalles, les conduites et les murettes.

VI.3 Les moyens de chantier

VI.3.1 Les moyens humains

Concernant les ressources humaines nécessaires à la réalisation de l'ouvrage, il est nécessaire de justifier la présence du personnel qualifié pour mener les études préalables et la construction en indiquant leurs titres et leurs compétences.

VI.3.2 Les moyens matériels

Le matériel général de terrassement, le matériel lié au type de barrage et le matériel spécifique peuvent être distingués. Les marques, les types, les puissances, les rendements et le nombre d'engins utilisés sur le chantier doivent être indiqués, ainsi que leur mode d'intervention en fonction du calendrier des travaux.

- **Le matériel de terrassement**

Les engins traditionnels utilisés pour la construction des fouilles d'assise du barrage, l'extraction et le transport des matériaux, ainsi que la réalisation des finitions (remblaiement – enrochement...) sont inclus dans le matériel général de terrassement.

1. Le bulldozer.
2. Pelle mécanique.
3. Le chargeur peut être à pneu ou à chenilles.
4. Décapeuse.
5. Les camions et la niveleuse.

- **Le matériel de compactage**

Le compactage des remblais nécessite l'utilisation d'engins spécialisés, dont les plus fréquents sont les suivants :

1. Les compacteurs à pneus sont adaptés pour compacter presque tous les sols.
2. Les compacteurs vibrants à rouleaux : Ils sont employés pour compacter des matériaux avec un angle de frottement élevé, comme les enrochements ou les sables à granulométrie serrée.
3. Les compacteurs à pied dameurs : Ils sont adaptés pour compacter les sols souples.

- **Le matériel de bétonnage**

Les bétonnières sont généralement utilisées pour préparer le béton requis pour la construction des ouvrages en béton tels que les évacuateurs et les tunnels de dérivation.

VI.3.3 Installations destinées aux engins :

Les engins de chantier doivent être stationnés sur un terrain stable, nivelé et clairement délimité pour assurer leur sécurité et faciliter leur accès. Il est crucial de les protéger des intempéries à l'aide d'abris ou de bâches adaptées, afin de prolonger leur durée de vie. Un entretien régulier est nécessaire pour garantir leur bon fonctionnement, incluant des vérifications quotidiennes des niveaux d'huile, de carburant et des conditions mécaniques. De plus, un nettoyage fréquent des machines est indispensable pour prévenir les pannes, tout en assurant la sécurité des opérateurs et la continuité des opérations sur le chantier.

VI.4 Devis quantitatif et estimatif du projet

Les prix estimés des travaux et des aménagements sont les suivants :

- Prix unitaire des travaux de terrassement.
- Prix unitaire de la fourniture et de la pose de (gabionnage, tout bien venant).

Les montants de réalisation de la variante choisie sont indiqués dans le tableau ci-dessous :

Tableau VI-1 : Le devis des différents travaux de l'aménagement des oueds de la zone d'étude

Désignation travaux		Unité	Quantité	Prix unitaire (DA)	Montant (DA)
Terrassement	Déblai	m ³	38634	700	27043800
	Remblai	m ³	376111	700	26327700
Béton de propreté		m ³	289.45	6000	1736700
Béton armé		m ³	301.25	30000	93038100
Bassin de dissipation type I		/	3	600000	1800000
Montant Totale					149946300
TVA 19%					28489797
Total TTC					178436097

Le coût estimé du projet est de : cent soixante-dix-huit millions quatre cent trente-six mille quatre-vingt-dix-sept Dinar Algérien

VI.5 La Planification du Projet

VI.5.1 Définition de la Planification

La planification d'un projet est un processus essentiel qui consiste à organiser et à coordonner les différentes activités nécessaires pour atteindre les objectifs du projet de manière efficace et efficiente. Elle vise à optimiser l'utilisation des ressources, à minimiser les coûts, et à respecter les délais tout en garantissant la qualité des résultats. Une planification efficace cherche à anticiper les problèmes potentiels et à établir des stratégies pour les résoudre.

VI.5.2 Activités de Planification

1) Organisation et Mise en Place des Postes de Travail

- Disposer les postes de travail de manière optimale pour maximiser l'efficacité et la productivité. Cela implique de définir des zones de travail, de stockage, et de circulation, en tenant compte des besoins en espace et en matériel.

2) Observations en Temps Réel

- Réaliser des observations sur le chantier pour identifier les inefficacités et les opportunités d'amélioration. Les ajustements nécessaires doivent être effectués en temps réel pour maintenir la productivité et la qualité du travail.

3) Analyse des Tâches

- Examiner les diverses tâches à réaliser, les diviser en étapes, et déterminer les meilleures méthodes pour accomplir chaque tâche de manière efficace.

4) Chronométrage

- Évaluer le temps requis pour chaque tâche afin d'identifier les points d'étranglement et d'optimiser les processus. Le chronométrage aide à établir des calendriers réalistes et à éviter les retards.

5) Définition des Objectifs et des Responsabilités

- Clarifier les objectifs du projet et définir les responsabilités de chaque membre de l'équipe. Une répartition claire des tâches et des rôles permet de coordonner les efforts et d'atteindre les objectifs du projet.

6) Révision et Simplification des Méthodes de Travail

- Réviser les méthodes de travail pour éliminer les étapes superflues et réduire les temps morts. La simplification des processus contribue à une exécution plus fluide et plus rapide des tâches.

7) Maintien de la Stabilité des Postes de Travail

- Assurer des conditions de travail constantes et minimiser les perturbations pour garantir une production régulière et performante.

VI.5.3 Étapes de Planification

• Collecte des Informations

- Identification des Exigences : Comprendre les besoins des parties prenantes et les exigences du projet.

- Études Préliminaires : Effectuer des recherches et des analyses (études de faisabilité, analyses de risque) pour obtenir des données pertinentes.

- Synthèse des Informations : Regrouper et analyser les informations recueillies pour extraire les éléments essentiels à la planification.

• Décomposition du Projet

- Décomposition en Tâches : Diviser le projet en sous-tâches et activités spécifiques pour une gestion plus efficace.

- Attribution des Responsabilités : Assigner chaque tâche à un responsable ou à une équipe spécifique.

- Évaluation des Ressources : Identifier les besoins en matériel, en main-d'œuvre et en temps pour chaque tâche.

- **Relations entre les Tâches**

- Enchaînement Logique : Certaines tâches doivent être accomplies avant que d'autres puissent commencer (par exemple, la fondation avant les murs).

- Enchaînement Préférentiel : Certaines tâches peuvent être réalisées en parallèle ou dans un ordre flexible (par exemple, peinture intérieure en parallèle avec l'installation des systèmes électriques).

- **Planning des Travaux**

- 1) Plan du Travail au Plus Tôt

- Toutes les opérations commencent dès leur début le plus tôt possible. Ce plan est utilisé lorsque les ressources sont élevées et que plusieurs projets sont en cours. Il vise à maximiser l'utilisation des ressources et à éviter les interruptions.

- 2) Plan du Travail au Plus Tard

- Les tâches débutent à leur date limite sans dépasser les délais prévus. Ce plan est privilégié lorsque les ressources sont restreintes, car il permet de réduire l'utilisation des ressources et d'optimiser leur gestion.

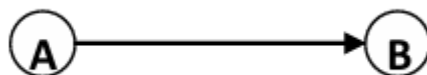
- 3) Plan du Travail Intermédiaire

- Les opérations commencent à une date intermédiaire, entre la date la plus tôt et la date la plus tard. Ce plan est utilisé lorsque les ressources sont suffisantes et que le projet est la priorité, offrant une flexibilité dans la gestion des ressources.

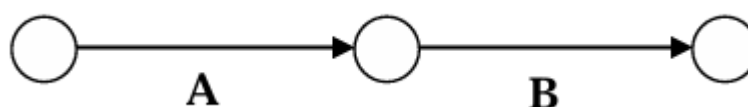
VI.5.4 Méthodes de Planification

- 1) **Méthode Basée sur le Réseau**

- Réseau à Nœuds : Représente les activités du projet avec des nœuds pour marquer leur début, fin, ou les deux, illustrant les dépendances entre les tâches.



- Réseau à Flèches : Utilise des flèches pour montrer l'ordre des activités et les dépendances entre elles.



- 2) **Méthode de Calcul CPM (Critical Path Method)**

- Paramètres :

Tableau VI-2 : Paramètres de la méthode CPM

DCP	TR
DFP	DCPP
DFPP	MT

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.

TR : Temps de réalisation MT (marge totale).

- **Chemin Critique** : Le chemin critique est constitué des tâches pour lesquelles la marge totale est nulle. C'est le chemin le plus long à travers le réseau de tâches, déterminant la durée totale du projet.

VI.5.5 Définition des Opérations et Durées

Tableau VI-3 Définition des opérations et durées

Symbole	Opération	Durée (jours)
A	Préparation du site	30
B	Excavation et terrassement	90
C	Mise en place des coffrages et ferrailage	120
D	Coulage du béton	150
E	Installation des drains et protection	60
F	Travaux de finition et stabilisation	45

VI.5.6 Succession des tâches :

A doit être terminé avant B.

B doit être terminé avant C.

C doit être terminé avant D.

D doit être terminé avant E.

E doit être terminé avant F.

VI.5.7 Calcul des dates de début et de fin au plus tôt (DCP et DFP)

Tableau VI-4 : Calcul des dates de début et de fin au plus tôt (DCP et DFP)

Tâche	Durée	DCP (Début au plus tôt)	DFP (Fin au plus tôt)
A	30	0	30
B	90	30	120
C	120	120	240
D	150	240	390
E	60	390	450
F	45	450	495

VI.5.8 Calcul des dates de début et de fin au plus tard (DCPP et DFPP)

Tableau VI-5 : Calcul des dates de début et de fin au plus tard (DCPP et DFPP)

A	30	0	30
B	90	30	120
C	120	120	240
D	150	240	390
E	60	390	450
F	45	450	495

VI.5.9 Calcul des marges totales (MT)

Tableau VI-6 : Calcul des marges totales (MT)

Tâche	Durée	Marge totale (MT)
A	30	0
B	90	0
C	120	0
D	150	0
E	60	0
F	45	0

VI.5.10 Chemin critique

Le chemin critique est défini par les tâches (A → B → C → D → E → F), avec une durée totale de 495 jours. Chaque tâche sur ce chemin a une marge totale de 0, ce qui signifie qu'il n'y a pas de flexibilité dans la durée de ces tâches. Si l'une d'elles prend plus de temps que prévu, cela retardera la fin du projet.

Cela correspond à la somme des durées de toutes les tâches critiques :

$30 + 90 + 120 + 150 + 60 + 45 = 495$ jours.

La durée totale du projet est la somme des durées des tâches sur le chemin critique, qui est de 495 jours ou environ **1 an et 4 mois**.

Conclusion :

En conclusion, le projet, d'un coût total de 178 436 097 dinars, sera réalisé sur une période de 1 an et 4 mois. Cette durée de réalisation reflète la complexité et l'ampleur des travaux nécessaires, ainsi que les ressources impliquées. Le budget alloué permet de garantir une mise en œuvre efficace, tout en assurant la qualité et la sécurité des infrastructures prévues. Ce projet représente un investissement significatif pour la région et promet des retombées positives en termes de sécurité et de développement urbain.

Conclusion générale

Notre étude se concentre sur l'un des risques majeurs qui affectent la ville de Kristel, à savoir les crues et les inondations, résultant de plusieurs facteurs topographiques, géologiques, hydrologiques et météorologiques. La gestion des inondations est aujourd'hui un enjeu crucial, notamment en raison des impacts croissants des changements climatiques au cours des dernières décennies. Cette gestion consiste en un ensemble de mesures et de stratégies visant à atténuer les risques d'inondation, et à minimiser leurs conséquences négatives sur les populations, les infrastructures et l'environnement.

Le travail que nous avons mené est structuré en plusieurs étapes clés. En premier lieu, une étude de reconnaissance du site et de la zone d'étude a été réalisée, permettant d'acquérir une compréhension approfondie du terrain. Ensuite, une étude hydrologique a révélé la nature hydromorphologique du bassin versant. Celui-ci présente une forme allongée, un relief accentué, une pente prononcée, et un temps de concentration relativement court, augmentant ainsi le risque de crues rapides et soudaines.

Pour évaluer les débits de crue, nous avons utilisé les données hydrométriques de la station d'Oran, que nous avons ajustées à une loi statistique afin de déterminer le débit correspondant à une période de retour de 100 ans. Le débit centennal ainsi calculé est de 15,24 m³/s.

Une étude hydraulique approfondie a également été menée pour analyser les écoulements de l'oued Kristel, en s'appuyant sur les principes de l'hydraulique fluviale. À cet effet, nous avons utilisé le logiciel HEC-RAS, un outil de référence pour la modélisation des écoulements dans les cours d'eau et pour évaluer les risques d'inondation. Les simulations ont mis en évidence que le débit centennal provoquerait des débordements le long de l'oued, ce qui rend nécessaire un aménagement spécifique.

Dans cette phase, nous avons proposé trois variantes d'aménagement, étudiées sous un angle technico-économique :

1. Un canal rectangulaire en béton armé.
2. Un canal trapézoïdal en béton armé.
3. Un canal trapézoïdal en enrochement.

Après une analyse détaillée, la variante en canal rectangulaire en béton armé s'est avérée être la plus appropriée et la plus économique pour la protection de la ville de Kristel. Cette variante comprend la construction d'un canal accompagné de trois bassins de dissipation d'énergie, visant à maîtriser l'écoulement des crues.

Enfin, une étude détaillée de la variante choisie a été menée. Le canal rectangulaire en béton armé a été conçu pour résister aux débits de crue et assurer une évacuation efficace des eaux, sans risque de

débordement. Les bassins de dissipation jouent un rôle crucial dans la réduction de la vitesse d'écoulement et dans la transition du régime torrentiel à un régime fluvial plus stable. En générant des turbulences, ces bassins réduisent la vitesse et le nombre de Froude, ce qui limite l'envasement du lit de l'oued, tout en assurant la protection des infrastructures environnantes.

Dans cette phase, nous avons également dimensionné les éléments clés de l'ouvrage, notamment les coursiers des bassins de dissipation et les dalots, pour garantir l'efficacité de l'aménagement. La simulation hydraulique finale du canal a confirmé l'absence de débordement tout au long de l'oued Kristel, démontrant ainsi la robustesse et l'efficacité de la variante retenue pour la gestion des crues et la protection de la ville et de ses infrastructures.

Références Bibliographiques

Touaibia Bénina, 2004. Manuel Pratique d'Hydrologie. Presse Madani frères, Blida, Algérie.

U.S. Army Corps of Engineers, 2016a. HEC-RAS River Analysis System – User's Manual, Hydrologic Engineering Center, CPD-68, Version 6.5.

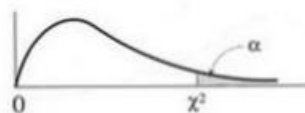
LEDOUX, Bruno, 2006. La gestion du risque inondation, 770 pages, Edition TEC et DOC,2006.

(Degoutte, 2012). Diagnostic, aménagement et gestion des rivières ;

Lencastre, 2008, Hydraulique générale.

Toumi, A. (2016). Hydraulique à surface libre (cours & exercices).

Annexes

Annexes 01 : Tableau des Valeurs de χ^2 Table χ^2 : points de pourcentage supérieurs de la distribution χ^2 

<i>dl</i>	.995	.990	.975	.950	.900	.750	.500	.250	.100	.050	.025	.010	.005
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.10	0.45	1.32	2.71	3.84	5.02	6.63	7.88
2	0.01	0.02	0.05	0.10	0.21	0.58	1.39	2.77	4.61	5.99	7.38	9.21	10.60
3	0.07	0.11	0.22	0.35	0.58	1.21	2.37	4.11	6.25	7.82	9.35	11.35	12.84
4	0.21	0.30	0.48	0.71	1.06	1.92	3.36	5.39	7.78	9.49	11.14	13.28	14.86
5	0.41	0.55	0.83	1.15	1.61	2.67	4.35	6.63	9.24	11.07	12.83	15.09	16.75
6	0.68	0.87	1.24	1.64	2.20	3.45	5.35	7.84	10.64	12.59	14.45	16.81	18.55
7	0.99	1.24	1.69	2.17	2.83	4.25	6.35	9.04	12.02	14.07	16.01	18.48	20.28
8	1.34	1.65	2.18	2.73	3.49	5.07	7.34	10.22	13.36	15.51	17.54	20.09	21.96
9	1.73	2.09	2.70	3.33	4.17	5.90	8.34	11.39	14.68	16.92	19.02	21.66	23.59
10	2.15	2.56	3.25	3.94	4.87	6.74	9.34	12.55	15.99	18.31	20.48	23.21	25.19
11	2.60	3.05	3.82	4.57	5.58	7.58	10.34	13.70	17.28	19.68	21.92	24.72	26.75
12	3.07	3.57	4.40	5.23	6.30	8.44	11.34	14.85	18.55	21.03	23.34	26.21	28.30
13	3.56	4.11	5.01	5.89	7.04	9.30	12.34	15.98	19.81	22.36	24.74	27.69	29.82
14	4.07	4.66	5.63	6.57	7.79	10.17	13.34	17.12	21.06	23.69	26.12	29.14	31.31
15	4.60	5.23	6.26	7.26	8.55	11.04	14.34	18.25	22.31	25.00	27.49	30.58	32.80
16	5.14	5.81	6.91	7.96	9.31	11.91	15.34	19.37	23.54	26.30	28.85	32.00	34.27
17	5.70	6.41	7.56	8.67	10.09	12.79	16.34	20.49	24.77	27.59	30.19	33.41	35.72
18	6.26	7.01	8.23	9.39	10.86	13.68	17.34	21.60	25.99	28.87	31.53	34.81	37.15
19	6.84	7.63	8.91	10.12	11.65	14.56	18.34	22.72	27.20	30.14	32.85	36.19	38.58
20	7.43	8.26	9.59	10.85	12.44	15.45	19.34	23.83	28.41	31.41	34.17	37.56	40.00
21	8.03	8.90	10.28	11.59	13.24	16.34	20.34	24.93	29.62	32.67	35.48	38.93	41.40
22	8.64	9.54	10.98	12.34	14.04	17.24	21.34	26.04	30.81	33.93	36.78	40.29	42.80
23	9.26	10.19	11.69	13.09	14.85	18.14	22.34	27.14	32.01	35.17	38.08	41.64	44.18
24	9.88	10.86	12.40	13.85	15.66	19.04	23.34	28.24	33.20	36.42	39.37	42.98	45.56
25	10.52	11.52	13.12	14.61	16.47	19.94	24.34	29.34	34.38	37.65	40.65	44.32	46.93
26	11.16	12.20	13.84	15.38	17.29	20.84	25.34	30.43	35.56	38.89	41.92	45.64	48.29
27	11.80	12.88	14.57	16.15	18.11	21.75	26.34	31.53	36.74	40.11	43.20	46.96	49.64
28	12.46	13.56	15.31	16.93	18.94	22.66	27.34	32.62	37.92	41.34	44.46	48.28	50.99
29	13.12	14.26	16.05	17.71	19.77	23.57	28.34	33.71	39.09	42.56	45.72	49.59	52.34
30	13.78	14.95	16.79	18.49	20.60	24.48	29.34	34.80	40.26	43.77	46.98	50.89	53.67
40	20.67	22.14	24.42	26.51	29.06	33.67	39.34	45.61	51.80	55.75	59.34	63.71	66.80
50	27.96	29.68	32.35	34.76	37.69	42.95	49.34	56.33	63.16	67.50	71.42	76.17	79.52
60	35.50	37.46	40.47	43.19	46.46	52.30	59.34	66.98	74.39	79.08	83.30	88.40	91.98
70	43.25	45.42	48.75	51.74	55.33	61.70	69.34	77.57	85.52	90.53	95.03	100.44	104.24
80	51.14	53.52	57.15	60.39	64.28	71.15	79.34	88.13	96.57	101.88	106.63	112.34	116.35
90	59.17	61.74	65.64	69.13	73.29	80.63	89.33	98.65	107.56	113.14	118.14	124.13	128.32
100	67.30	70.05	74.22	77.93	82.36	90.14	99.33	109.14	118.49	124.34	129.56	135.82	140.19