



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

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

Option : Ouvrage hydrotechnique et aménagement

THEME :

**Etude d'aménagement du cours d'eau de Oued Baghai
de la Wilaya de Khenchela**

Présenté par :

Sid Mohamed Laid

Devant les membres du jury

Nom et Prénoms	Grade	Qualité
ZEROUAL Ayoub .	Professeur	Président
ZAIBAK Issam .	M.C.B	Examineur
BOUZIANE Mamar	M.A.A	Examineur
BENALOUKLI Bachir	Professeur	Promoteur

Session juillet 2024

Dédicace

A mes chers parents, mes merveilleux frères et mes amis.

Ce mémoire est dédié à vous, ma famille et mes amis, qui avez toujours été mon soutien inébranlable. Votre amour, votre appui constant et vos encouragements m'ont donné la force nécessaire tout au long de ce parcours académique. Votre confiance en moi a été ma plus grande source de motivation, et chaque succès que j'ai atteint est le fruit de votre soutien infailible. Merci d'avoir été présents à chaque étape de ce voyage académique.

Mohamed Laid

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier Dieu tout-puissant pour m'avoir donné le courage et la volonté nécessaires pour accomplir ce travail.

Je voudrais exprimer ma profonde gratitude à mon encadreur, Mr BENLAOUKLI Bachir dont l'expertise, les précieux conseils et l'aide inestimable ont joué un rôle crucial dans la réalisation de ce mémoire. Sa patience et disponibilité m'ont permis de surmonter de nombreux défis et d'améliorer constamment la qualité de ce travail. Merci pour votre soutien indéfectible et votre dévouement à mon succès académique. Ce mémoire est le fruit de notre collaboration et de votre expertise, et je vous en suis profondément reconnaissant.

Je tiens également à remercier mes professeurs et enseignants, qui ont été des acteurs essentiels de mon parcours académique. Mes sincères remerciements vont aux responsables et au personnel de l'École Nationale Supérieure de l'Hydraulique (ENSH) de Blida pour leur soutien tout au long de mes études.

J'exprime ma profonde reconnaissance et mon respect aux membres du jury qui auront l'honneur d'évaluer ce travail.

Enfin, à mes amis, qui ont partagé avec moi les hauts et les bas de ce parcours académique, je vous remercie du fond du cœur pour votre présence constante et votre amitié inestimable.

ملخص

الهدف الرئيسي من هذا المشروع هو تحديد الأبعاد اللازمة لنظام إدارة هيدروليكي مصمم لحماية منطقة وادي بوغغال من الفيضانات المئوية التي تؤثر في ولاية خنشلة بلدية بغاي. تهدف هذه الدراسة إلى ضمان سلامة الممتلكات وسكان المنطقة. ولتحقيق هذا، تم اتخاذ عدة خطوات رئيسية. أولاً، تم تقديم نظرة شاملة على المنطقة المعنية. تلا ذلك دراسة جيولوجية وجيوتقنية لتقييم خصائص التربة. بعد ذلك، تم إجراء تحليل هيدرولوجي لدراسة أنماط الهطول وتقييم لرسم خرائط المناطق HEC-RAS معدلات التدفق. وأخيراً، تم إجراء دراسة هيدروليكية شاملة باستخدام برنامج المعرضة للفيضانات وتقييم مخاطر الفيضانات. طوال هذه الدراسة، تم النظر في خيارات تطوير متعددة، وتم اختيار نموذج معين لإجراء تحليل مفصل عليه

الكلمات الرئيسية: إدارة هيدروليكية، حماية من الفيضانات المئوية، وادي بوغغال، بغاي، ولاية خنشلة، خيارات التطوير، تحليل النماذج

Résumé

Le but principal de ce projet est de déterminer les dimensions nécessaires d'un système d'aménagement hydraulique visant à protéger la zone d'ouedBoughegal contre les crues centennales, qui affectent la commune de Baghai . L'objectif de cette étude est de garantir la sécurité des biens et des habitants. Pour ce faire, plusieurs étapes clés ont été suivies. Tout d'abord, une présentation détaillée de la zone concernée a été effectuée. Ensuite, une étude géologique et géotechnique a été réalisée pour évaluer les caractéristiques du sol. Par la suite, une étude hydrologique a été menée afin d'analyser les précipitations et d'évaluer les débits. Enfin, une étude hydraulique approfondie a été réalisée à l'aide du logiciel HEC-RAS pour délimiter les zones inondables et évaluer les risques d'inondations. Au cours de cette étude, différentes options d'aménagement ont été envisagées, et une variante a été sélectionnée pour une analyse détaillée.

Motsclés : aménagement hydraulique, protection contre les crues centennales, ouedBoughegal, Beghai, Khenchela, options d'aménagement, étude de variantes

Abstract

The primary goal of this project is to determine the necessary dimensions for a hydraulic management system designed to protect Oued Boughegal area from centennial floods, impacting the municipality of Baghai. This study aims to ensure the safety of both property and residents. To achieve this, several critical steps were undertaken. Initially, a comprehensive overview of the area was provided. This was followed by a geological and geotechnical study to assess soil characteristics. Subsequently, a hydrological analysis was conducted to examine precipitation patterns and evaluate flow rates. Lastly, an extensive hydraulic study, utilizing HEC-RAS software, was performed to map flood-prone zones and assess flood risks. Throughout this study, various development options were considered, and a specific variant was chosen for detailed analysis.

Keywords: hydraulic management, centennial floods, Oued Boughegal, Baghai, Khenchela, development options, variant analysis

Table des matières

CHAPITRE 1 : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE.....	6
Introduction.....	14
I.1 Présentation de la wilaya de Khenchela	14
I.2 Présentation de la commune de Baghai	14
I.3 Historique des inondations	15
I.4 Description de oued Bouhegal	17
I.5 La Géologie.....	17
I.6 La situation climatologique	18
I.6.1 La température	18
I.6.2 Les vents.....	20
I.6.3 Précipitation	20
Source :ANRH ALGER.....	20
I.6.4 Evaporation	21
I.6.5 Humidité.....	21
I.7 Données naturelles du site.....	21
I.7.1 Les Altitudes	21
I.7.2 Les pentes.....	21
I.7.3 Occupation du sol	22
I.7.4 Formation forestière (Reboisement).....	22
Conclusion	22
CHAPITRE 2 : ETUDE GEOLOGIQUE ET GEOTECHNIQUE.....	23
Introduction	24
II.1 Localisation et cadre géologique régional.....	24
II.2 Historique géologique.....	24
II.2.1 Stratigraphie et Lithologie	24
II.2.2 Description lithologique	24
II.2.3 Géomorphologie et Relief	24
II.2.4 Tectonique et Structures	25
II.2.5 Hydrogéologie.....	25
II.3 Etude géotechnique.....	25
II.3.1 Situation du site	25
II.3.2 Essais de reconnaissances in situ	25
II.3.3 Essais carottage.....	26
II.3.4 Essais de battage.....	26

II.3.5	Essais SPT.....	27
II.3.6	Essais au laboratoire	27
II.3.7	Essais d'analyse granulométrique.....	28
II.3.8	Essais de cisaillement.....	28
	Conclusion	28
CHAPITRE 3 : ETUDE HYDROLOGIQUE		29
	Introduction	30
III.1	Bassin versant.....	30
III.1.1	Étude géomorphologie.....	30
	• Surface	30
	• Périmètre	30
	• Longueur du thalweg (cours d'eau principal).....	31
	• Indice de compacité de Horton (KH).....	31
	• Indice de compacité de Gravélius (KG)	32
	• Coefficient d'allongement Ca	32
	• Rectangle équivalent	32
III.1.2	Etude du relief	33
	• Altitude maximale et minimale « Hmax, Hmin ».....	36
	• Altitude moyenne « Hmoy »	36
	• L'altitude médiane « Hméd »	36
	• La pente des sous bassins versants	37
	• La pente moyenne des sous bassins versants	37
	• Pente moyenne de sous bassin Oued BOUGHEGAL	38
	• Indice de pente de Roche Ip.....	38
	• Indice de pente moyenne I_{PM}	39
	• Indice de pente globale Ig.....	39
	• Dénivelée spécifique Ds	40
III.1.3	Etude du réseau hydrographique.....	40
	• Hiérarchisation du réseau	41
	• Rapport de la confluence « Rc ».....	41
	• Formule de VENTURA	44
	• Formule de KIRPICH.....	44
	• Formule de GIANDOTTI (sud Italie 1937)	44
	• Formule de TURAZZA.....	44
	• Formule ESPAGNOLE.....	45

• Formule de SOKOLOVSKY	45
• Formule de ANRH	45
III.2 Etude des crues	49
• Série d'observation de la station hydrométrique.....	49
• Méthode de GRADEX.....	49
III.2.1 Présentation des stations utilisées dans l'étude des crues	49
III.2.2 Étude des crues fréquentielles (Station Fourn el gueiss).....	50
III.2.3 Détermination des débits maximums fréquents en utilisant la méthode de GRADEX	57
III.2.4 Hydrogramme de crue	62
III.2.5 Choix de la crue du projet	65
III.2.6 Étude de transport solide	65
Conclusion	68
CHAPITRE 4 : ETUDE HYDRAULIQUE	69
Introduction.....	70
IV.1 Notions hydrauliques.....	70
IV.1.1 Paramètres hydrauliques.....	70
• Débit (Q)	70
• Vitesse de l'écoulement (V)	70
• Pente hydraulique (i)	70
• Coefficient de Manning (n)	71
• Profondeur critique (hc)	71
• Pression.....	71
• Poids volumique (γ_w)	71
IV.1.2 Paramètres géométriques.....	71
• Largeur au miroir (B).....	72
• Profondeur de l'eau (y)	72
• Surface mouillée transversale (S)	72
• Périmètre mouillé (P).....	72
• Rayon hydraulique (R).....	72
• Pente longitudinale (i)	72
• Largeur au fond (b)	72
IV.2 Cours d'eau	72
• Aménagements en matériaux minéraux.....	73
• Aménagements en béton ou en métal	73

• Aménagements en végétalisation	73
• Aménagements en matériaux synthétiques	73
• Aménagements en combinant plusieurs matériaux.....	73
IV.3 Mode d'écoulement dans les Oueds	74
IV.3.1 Modes d'écoulement	74
• Écoulement permanent	74
• Écoulement transitoire	74
• Écoulement torrentiel.....	74
• Écoulement uniforme	74
• Écoulement non uniforme	74
IV.3.2 Régime d'écoulement	74
IV.4 Modélisation d'écoulement	76
IV.4.1 les étapes de la simulation	76
IV.4.2 Résultats de la simulation.....	79
• Vue 3D de l'oued avant l'aménagement	79
• Profils en travers.....	80
IV.4.3 Interprétation	82
IV.5 Etude des aménagements.....	82
IV.5.1 Hypothèses de calcul.....	82
IV.5.2 Formule de dimensionnement	83
• Section Rectangulaire	83
• Section Trapézoïdale	84
• Section Triangulaire	84
• Section Circulaire (plein ou partiellement rempli)	85
IV.5.3 Principe de conception de l'aménagement d'oued Bouhegal.....	86
IV.5.4 Etude des variantes.....	87
CHAPITRE 5 : ETUDE DETAILS VARIANTE	96
Introduction.....	97
V.1 Détails de la variante adoptée.....	97
V.2 Détails de la conception.....	97
V.2.1 Canal trapézoïdale	97
V.2.2 Ferrailage.....	103
V.2.3 Sollicitation.....	103
V.2.4 Caractéristiques des matériaux :	104
V.2.5 Etude des voiles :	106

V.2.6	Le ferrailage du canal :	108
V.2.7	Etude de stabilité des talus	109
V.2.8	Les installations de chantier	112
V.3	Planification des travaux :	117
V.3.1	Définition :	117
V.3.2	Techniques de planification :	117
V.3.3	Technique basée sur le réseau:	117
	Conclusion	120
	Conclusion générale	121
	Références bibliographiques.....	122

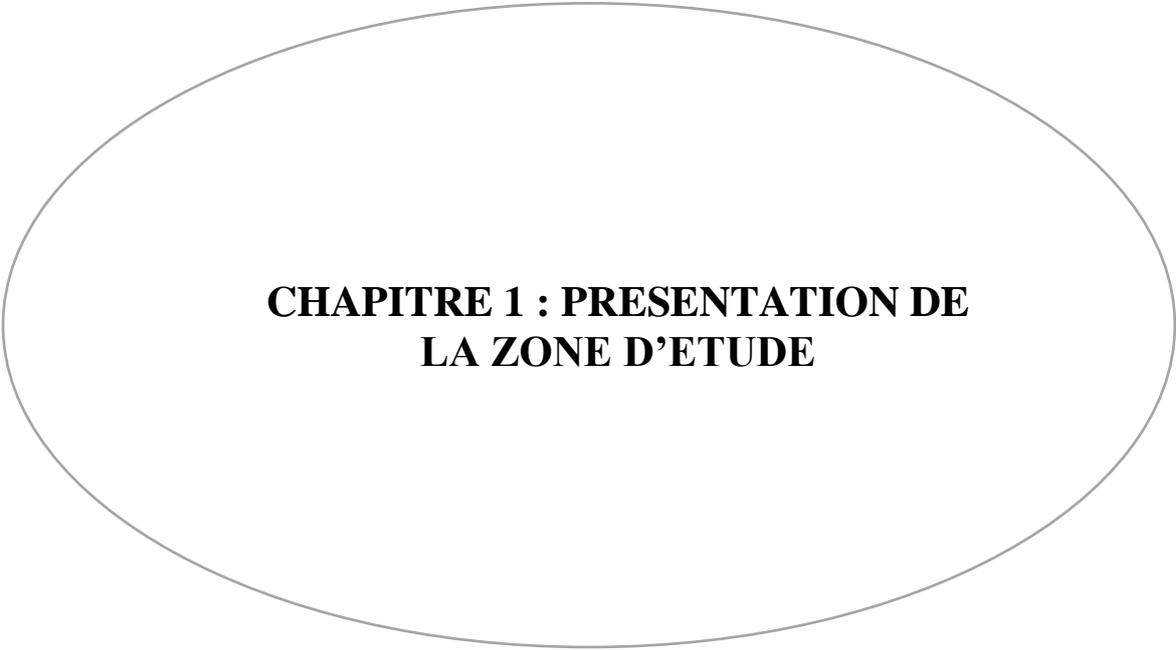
LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Les inondations anciennes d'oued Khenchela	16
Tableau 2 :Température moyenne mensuelle à la station ain mimoun	19
Tableau 3 : vitesse du vent moyenne mensuelle (m/s) (Source ONM)	20
Tableau 4 : Tableau des précipitation	20
Tableau 5 : Evaporation moyenne mensuelle	21
Tableau 6 : L'humidité de l'air	21
Tableau 7 : des coordonnées	25
Tableau 8 : Résulta essai SPT	26
Tableau 9 : Les caractéristiques hydro-morphométriques du bassin versant	33
Tableau 10 : Paramètres Hypsométriques de la zone d'étude	34
Tableau 11 : Tableau des Propriétés altimétriques des sous-bassins versants.	36
Tableau 12 : Pente moyenne de sous bassin Oued BOUGHEGAL	38
Tableau 13 :La classification O.R.S.T.O.M du relief se base sur l'indice de pente global.	39
Tableau 14 : Classification des reliefs d'après ORSTOM,1963.	40
Tableau 15 : Résultats de calculs des pentes et la dénivelée spécifique du sous bassin « Oued BOUGHEGAL »	40
Tableau 16 : Calcul du rapport de confluence pour sous bassin versant «Oued BOUGHEGAL ».	41
Tableau 17 : calcul du rapport des longueurs pour sous bassin versant « Oued BOUGHEGAL ».	42
Tableau 18 : Les résultats du calcul sont présentés dans le tableau ci-dessous	42
Tableau 19 : Les résultats des calculs sont affichés dans le tableau ci-dessous	43
Tableau 20 : Tableau des résultats de calcul du temps de concentration	46
Tableau 21 : Valeurs retenus du temps de concentration	46
Tableau 22 : Paramètres hydrographiques des deux sous bassins versants.	47
Tableau 23 : Caractéristiques géomorphologiques de sous bassin versant.....	48
Tableau 24 : les différentes stations utilisées.....	50
Tableau 25 : Série des débits maximaux annuels prise de la station hydrométrique (Source : ANRH Alger).....	50
Tableau 26 : Résultats d'ajustement à la loi de Gumbel de la station	52
Tableau 27 : Comparaison des caractéristiques de la loi de Gumbel et de l'échantillon.	53
Tableau 28 : Résultats d'ajustement à la loi log normale de la station	54
Tableau 29 : Comparaison des caractéristiques de la loi log normale et de l'échantillon	55
Tableau 30 : Résultats du test de χ^2 de la station Hydrométrique	56
Tableau 31 : Répartition des précipitations maximales journalières prise de la station Ain mimoune (Source :ANRH ALGER)	59
Tableau 32 : Résultats d'ajustement par la loi de Gumbel des pluies maximales journalières de la station pluviométrique	60
Tableau 33 : : Résultat de calcul pour la station de Ain Mimoun pour les différentes périodes de retour	62
Tableau 34 : Valeur du coefficient de forme de l'hydrogramme de crue δ	63

Tableau 35: : les valeurs du temps de base, montée et décrue.	63
Tableau 36 : Valeurs du débits centennales en fonction du temps pour la zone d'étude.	64
Tableau 37 : Estimation du coefficient de perméabilité.	66
Tableau 38: Résultats de calcul de la lame d'eau écoulée.	67
Tableau 39 : Résultats de calcul de la dégradation spécifique.	67
Tableau 40 : Résultats de calcul des apports solides.	67
Tableau 41 : Valeurs du coefficient de rugosité 'n'.	71
Tableau 42: Principaux paramètres hydraulique d'oued Boughegal.(source :hec-ras)	81
Tableau 43 : Valeurs de vitesse moyenne limite d'érosion pour les lits.	87
Tableau 44: Caractéristiques du canal de la variante 1	87
Tableau 45 : Résultats de calcul de la variante1	88
Tableau 46: Sections d'enrochement du canal de la variante 1.	89
Tableau 47 : Volumes d'enrochement de la variante 1.	89
Tableau 48 : Sections du géotextile de la variante 1.	89
Tableau 49: Volume des déblais et remblais de la variante 1.	89
Tableau 50 : Devis quantitatif estimatif de la variante 1.	90
Tableau 51 : Caractéristiques du canal de la variante 2	90
Tableau 52 : Résultats de calcul de la variante 2	91
Tableau 53 : Epaisseurs des bétons de la variante 2.	91
Tableau 54 : Sections des bétons du canal de la variante 2	92
Tableau 55 : Volumes des bétons.	92
Tableau 56 : Volume des déblais et remblais	93
Tableau 57 : Devis quantitatif estimatif de la variante 2.	93
Tableau 58 : des caractéristiques du canal de la variante adoptée	98
Tableau 59 : Principaux paramètres hydraulique d'oued Boughegal après l'aménagement.	102
Tableau 60: Résultats des essais géotechniques.	111
Tableau 61 : Devis quantitatif et estimatif du projet	116
Tableau 62 : :Liste des opérations avec leurs durées	120

LISTE DES FIGURES

Figure 1:la situation de la zone d'étude.....	15
Figure 2 : Les inondations anciennes	16
Figure 3: Tracer de oued bouhegal commune baghai	17
Figure 4 : Variation des températures mensuelles à la station ain mimoune	19
Figure 5 : Carte des sous bassins versants Baghai.....	31
Figure 6 : Carte hypsométrique des sous bassins versants Baghai	35
Figure 7 : Répartition des surfaces et la courbe hypsométrique de la zone d'étude. .	35
Figure 8 : Carte des courbes de niveaux des sous bassins versants de baghai.....	37
Figure 9 : Représentation graphique de la loi de Gumbel de la station foum el gueiss	53
Figure 10 : Représentation graphique de la loi log normale de la station	55
Figure 11 : Résultats d'ajustement par la loi de Gumbel des pluies maximales journalières de la station pluviométrique	60
Figure 12 : Graphique d'ajustement des pluies et la droite d'extrapolation des débits	62
Figure 13 : Hydrogramme de crue de la zone d'étude.....	65
Figure 14 : Interface d'HEC-RAS.....	76
Figure 15 : Introduction des valeurs de Manning (terrain naturel).....	76
Figure 16 : Inser le débit.....	77
Figure 17 : Conditions aux limites.....	77
Figure 18 : Lancement de la simulation	78
Figure 19 : Fin de simulation.....	78
Figure 20 : Vue 3d de oued bouhegal	79
Figure 21: Résultats de la simulation pour la station 1950.....	80
Figure 22 : : Résultats de la simulation pour la station 0.	80
Figure 23 d'un canal rectangulaire	83
Figure 24 : d'un canal Trapézoïdale	84
Figure 25 : d'un canal Triangulaire	85
Figure 26 : d'un canal Circulaire	85
Figure 27 : de la variante adopté.....	98
Figure 28 : variante sur hec-ras.....	99
Figure 29 : Résultats de la simulation	100
Figure 30 : Fin de simulation.....	100
Figure 31 : Résultats de la simulation	101
Figure 32: Vue 3D de l'oued Bouhegal (entre les stations 0 et 2096).....	101
Figure 33 : Résultats de calcul.....	112
Figure 34 : L'opération A doit être terminée avant que l'opération B puisse commencer.	117
Figure 35 : L'opération B suit l'opération A.....	117
Figure 36 : Diagramme de GANTT.....	120



**CHAPITRE 1 : PRESENTATION DE
LA ZONE D'ETUDE**

Introduction

L'étude de protection contre les inondations repose sur une vaste base de données comprenant les caractéristiques de chaque site de projet. Ces données sont essentielles pour mener à bien toute étude de protection contre les inondations. L'objectif de ce chapitre est de recueillir le plus d'informations possible sur notre région d'étude et de comprendre les défis auxquels nous sommes confrontés afin de développer des solutions qui seront explorées dans les chapitres suivants.

I.1 Présentation de la wilaya de Khenchela

La wilaya de Khenchela se trouve à l'Est du pays, au sud-est de Constantine. Ses limites sont les suivantes :

- Au nord, elle est bordée par la wilaya d'Oum El Bouaghi ;
- Au sud, elle est adjacente à la wilaya d'El Oued ;
- À l'ouest, elle est entourée par les wilayas de Batna et de Biskra ;
- À l'est, elle est limitrophe de la wilaya de Tébessa.

I.2 Présentation de la commune de Baghai

La commune de Baghai, d'une superficie de 13933 hectares, et les coordonnées 35° 31' 19" nord, 7° 06' 52" est .est administrativement rattachée à la daïra d'Elhamma dans la wilaya de Khenchela. Du point de vue agro-écologique, elle est située dans la plaine de Khenchela, qui constitue une transition naturelle entre les hautes plaines à l'est et la région des chotts au Nord et Nord-ouest. En raison de cette position géographique, elle est principalement dédiée à l'agriculture. La commune se distingue par son relief uniformément plat, ainsi que par sa proximité avec les grands centres urbains, notamment Khenchela et la daïra d'Elhamma.

Située à l'extrême Nord de la wilaya, la commune de Baghai est sous la juridiction de la daïra d'El Hamma. Son chef-lieu se trouve à une dizaine de kilomètres à la fois du chef-lieu de wilaya de Khenchela et du chef-lieu de la daïra d'El Hamma. Ses limites sont définies comme suit :

- À l'Est, elle est bordée par les communes de M'Toussa et Ain Touila.
- À l'Ouest, elle est limitrophe des communes d'El Hamma et Kais.
- Au Nord, elle est adjacente à la commune d'Oum El Bouaghi.
- Au Sud, ses limites sont avec les communes de Khenchela et Ensigna.

Grâce à son relief plat et propice, à sa proximité avec les centres urbains de Khenchela et El Hamma, ainsi qu'à la qualité du réseau routier assurant les liaisons avec les agglomérations voisines, cette commune est considérée comme non enclavée.



Figure 1: la situation de la zone d'étude

I.3 Historique des inondations

Pour comprendre l'importance de la protection contre les inondations dans le chef-lieu de Baghai, il est important de mentionner que plusieurs épisodes de crues ont entraîné une augmentation du niveau d'eau dans l'oued Boughegal, ce qui a récemment isolé complètement la localité chef-lieu. Le tableau ci-dessous résume les importantes inondations qui ont touché la zone d'étude.

Tableau 1: Les inondations anciennes d'oued Khenchela

Tableau 1 : Les inondations anciennes d'oued Khenchela		
Historique (date des inondations pour la plus longue période possible)	Lieu-dit (quartiers zones ou secteurs touchée)	Nature des dégâts
L'année 2018	Cartier 130 log et 100 log et CEM et Lycée les habitas avoisinants	Inondation des lotissement 50 lots la hauteur d'eau atteindre 1.5m. Lycée de Baghai submergé par les eaux mélangées avec les eaux d'égout. Risque de contamination hydrique.
L'année 2020 et 2021	La partie nord et est de chéflieu Baghai et CEM et Lycée.	Conditions de vie très difficiles.

(Source :Bureau d'étude AQUA ENGINEERING)

Les images ci-dessous illustrent l'ampleur de la tragédie :



Figure 2 : Les inondations anciennes
(Source :Bureau d'étude AQUA ENGINEERING)

I.4 Description de oued Bouhegal

L'Oued Bouhegal traverse la commune de Baghai, une région montagneuse située dans la Wilaya de Khenchela en Algérie. Dans cette région, l'Oued Bouhegal suit un cours sinueux à travers des paysages variés, comprenant des collines, des vallées et des plaines. Il peut être entouré de végétation typique des régions semi-arides, avec des bosquets d'arbres, des buissons et des plantes adaptées à des conditions de faible précipitation.

Le lit de la rivière peut être bordé de rochers et de galets, avec des zones de sédimentation le long de ses rives. Pendant la saison des pluies, l'Oued Bouhegal peut se remplir d'eau, formant des petites cascades et des bassins temporaires. Pendant les périodes plus sèches, le débit d'eau peut diminuer considérablement, laissant derrière lui des traces d'écoulement et des zones de végétation riveraine.

L'Oued Bouhegal dans la commune de Baghai pourrait également être un élément important du paysage local, offrant des vues panoramiques pittoresques et servant de lieu de rencontre naturel pour les habitants de la région.



Figure 3: Tracer de oued bouhegal commune baghai

(Source : Google earth)

I.5 La Géologie

La composition géologique des sols de la commune est une donnée essentielle pour orienter la conception des infrastructures lors de toute construction. Elle permet de prévenir les risques potentiels de rupture ou de tension dus à des tassements excessifs, des affaissements ou des glissements de terrain, si les infrastructures et les fondations ne sont pas adaptées aux contraintes locales.

Selon l'étude géologique réalisée dans le cadre du Plan Directeur d'Aménagement Urbain (PDAU), les formations géologiques prédominantes se décomposent comme suit :

- Formations quaternaires : Ces formations se composent de limons, de débris argileux et de cailloutis déposés le long des oueds et des talwegs.

- Formations miocènes : Principalement constituées de grès de grande taille, on observe également la présence de formations marines et d'argiles présentant différentes couleurs, notamment blanches, avec une épaisseur totale de 340 mètres.
- Formations crétacées : Ces couches occupent la majeure partie du territoire et se composent de calcaire grumeleux, ainsi que de calcaire fissuré en surface sur une épaisseur de 30 mètres. On note également la présence de formations marines de grès sur une épaisseur de 150 mètres.

I.6 La situation climatologique

Le climat en Algérie est largement de type méditerranéen, se caractérisant par une saison pluvieuse qui s'étend généralement de septembre à mai, suivie d'un été sec et ensoleillé. La présence de l'Atlas tellien, dont notre région fait partie, agit comme une barrière qui favorise la condensation et les précipitations d'une partie de la vapeur d'eau transportée par les vents en provenance de la mer. L'altitude contribue à une baisse générale des températures, tandis que l'éloignement de la mer entraîne une augmentation des variations de température entre le jour et la nuit, ainsi qu'entre les saisons.

Les données climatologiques sont collectées et fournies par divers organismes spécialisés dans la collecte, le traitement et la conservation des informations météorologiques :

- L'Office National de Météorologie (ONM) fournit des données telles que la température, la vitesse du vent et l'évaporation.
- L'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH) de la Wilaya d'Alger est chargée de fournir des informations sur la pluviométrie.

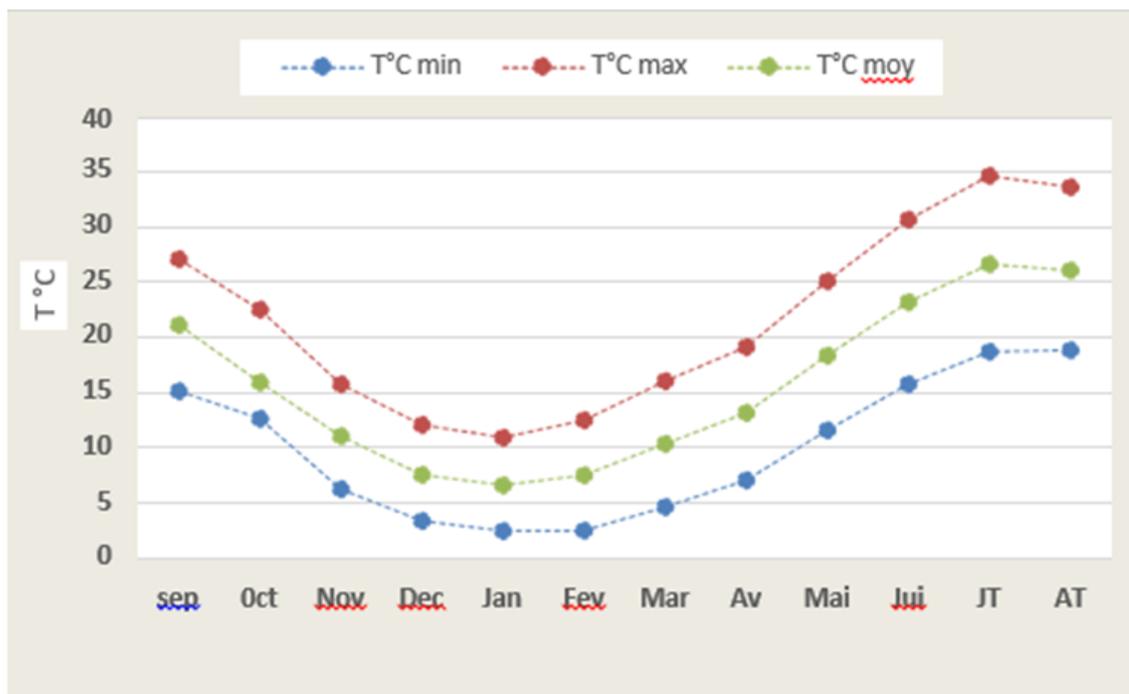
I.6.1 La température

La température de l'air interagit directement avec d'autres paramètres météorologiques tels que les précipitations et l'insolation, influençant ainsi le bilan thermique et le climat d'une région. On observe que le mois le plus froid, en général, est janvier, avec une température moyenne mensuelle de 6,70°C, tandis que le mois le plus chaud est juillet, avec une température moyenne mensuelle de 26,70°C.

Tableau 2 : Température moyenne mensuelle à la station ain mimoun

Tableau Température moyenne mensuelle à la station ain mimoun												
MOIS	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Jui	Aou	Sep	Oct.	Nov	Déc
T°C min	15.21	12.72	6.36	3.48	2.57	2.61	4.74	7.14	11.66	15.83	18.78	18.92
T°C max	27.17	22.61	15.84	12.18	11.02	12.6	16.12	19.22	25.17	30.74	34.71	33.7
T°C Moy	21.2	16.01	11.14	7.63	6.7	7.61	10.44	13.25	18.43	23.28	26.7	26.14

Source : Centre météorologique de wilaya de kenchela

**Figure 4 : Variation des températures mensuelles à la station ain mimounne**

(Source : Centre météorologique de wilaya de kenchela)

I.6.2 Les vents

Dans la région de baghai, les vents tendent à être généralement modérés, avec une vitesse moyenne estimée à 3,8 m/s. Cette caractéristique des vents est essentielle à considérer lors de l'évaluation du climat local et de ses effets sur divers aspects de la vie quotidienne et des activités économiques dans la région. Pour mieux comprendre la dynamique des vents dans cette zone, il est instructif d'examiner la répartition annuelle de leur vitesse, comme indiqué dans le tableau . Cette analyse permettrait de déterminer les fluctuations saisonnières des vents, ainsi que leur impact potentiel sur des secteurs tels que l'agriculture, l'énergie éolienne et la navigation. En comprenant les modèles de vent locaux, les planificateurs, les agriculteurs et les décideurs peuvent prendre des décisions plus éclairées en matière de gestion des ressources et de développement durable dans la région de baghai.

Tableau 3 : vitesse du vent moyenne mensuelle (m/s) (Source ONM)

Tableau : vitesse du vent moyenne mensuelle (m/s) (Source ONM)													
Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Jui	Aou	Sep	Oct.	Nov	Déc	Ann
Vent(m/s)	3.8	4.1	4.1	4.6	3.8	3.6	3.5	3.4	3.2	3.0	3.9	3.9	3.8

Durant la période allant de Mai au Janvier, les vents sont relativement faibles, variant entre 3.0 et 3.9 m/s.

de Février à Avril, les vents sont modérés avec un pic de 4.6 m/s en Avril.

I.6.3 Précipitation

Les précipitations dans les régions arides et semi-arides sont généralement de nature convective, se caractérisant par leur brièveté, leur puissance intense et leur distribution spatiale irrégulière.

Tableau 4 : Tableau des précipitation

	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Jui	Aou	Sep	Oct.	Nov	Déc	annu
moyenne p(mm)	38.65	33.37	35.99	35.55	37.78	28.91	51.96	37.52	18.6	25.04	15.7	32.23	391.23
p (%)	9.88	8.53	9.20	9.09	9.66	7.39	13.28	9.59	4.75	6.4	4	8.24	100

Source :ANRH ALGER

I.6.4 Evaporation

Dans le contexte du climat semi-aride de la région, la station météorologique de KHENCHELA fournit des données précieuses sur l'évaporation. Selon les estimations, l'évaporation annuelle moyenne atteint 130 mm. Ces chiffres sont le fruit d'une analyse détaillée incluant la répartition mensuelle, laquelle est spécifiée dans le tableau associé. Ces données jouent un rôle crucial dans la compréhension des conditions climatiques locales et leur impact sur divers aspects de l'environnement et de l'agriculture.

Tableau 5 : Evaporation moyenne mensuelle

Tableau : Evaporation moyenne mensuelle												
Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Jui	Aou	Sep	Oct.	Nov	Déc
Evap (mm)	65.18	82.3	110.7	139.5	175.4	258.8	320.5	310.4	200.1	145.52	91.7	72.3

Source : Centre météorologique de wilaya de kenchela .

I.6.5 Humidité

L'humidité de l'air est donnée dans le tableau suivant :

Tableau 6 : L'humidité de l'air

Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Jui	Aou	Sep	Oct.	Nov	Déc
Humidité %	59	47	41	46	42	38	41	32	45	58	58	47

Source : Centre météorologique de wilaya de kenchela .

I.7 Données naturelles du site

I.7.1 Les Altitudes

Plus de la moitié (60,56 %) de la surface de la commune a des altitudes supérieures à 900m. Les classes d'altitudes inférieures à 850 m sont situées au Nord de la commune et représentent 39,44% des terres de la commune.

.L'altitude de plus basse est de 800m.

I.7.2 Les pentes

La commune se caractérise par des terrains à faibles et moyennes pentes, constituant de ce fait :

Les terrains à très faibles pentes (0-3%) sont localisés au Nord de la commune, dans la plaine, près de la zone des lacs, tandis que les pentes fortes (+25%) occupent une faible part n'excédant pas les 04% et se situent au Sud-est principalement (zone montagneuse).

I.7.3 Occupation du sol

L'analyse de l'occupation du sol repose sur les données issues de photos satellites, qui sont ensuite validées par des observations sur le terrain.

I.7.4 Formation forestière (Reboisement)

Les zones boisées, principalement constituées de reboisements, ne couvrent que 6% des terres de la commune. Elles se trouvent au sud-est de la commune, sur Djebel Knif, et au sud du centre de la commune. Malgré leur superficie limitée, ces zones boisées ne définissent pas vraiment la commune comme une région forestière. Toutefois, il est crucial de promouvoir leur croissance en favorisant davantage de reboisements dans les zones soumises à l'érosion et peu propices aux activités agricoles.

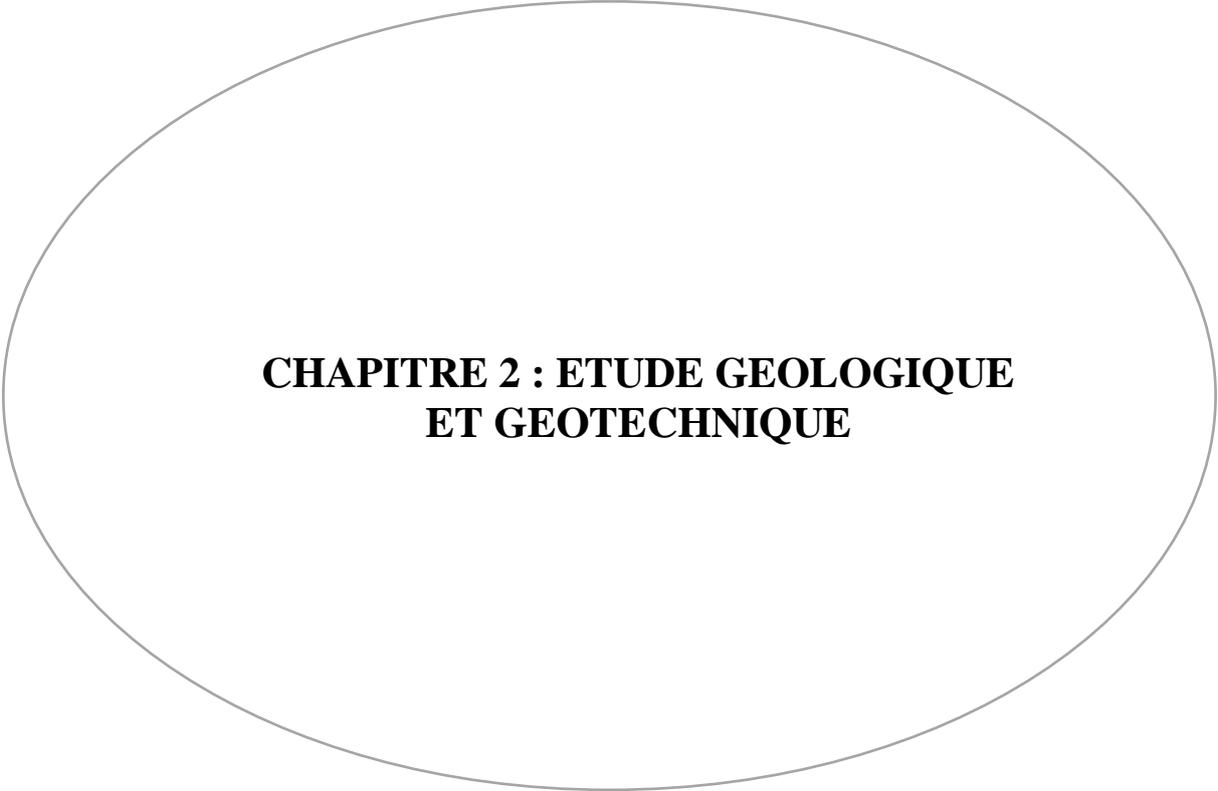
Conclusion

L'étude de la commune de Baghai dans la wilaya de Khenchela met en lumière les défis et les opportunités liés à la protection contre les inondations. Les données géographiques, géologiques, climatologiques et naturelles recueillies révèlent une région caractérisée par un relief plat et une importante activité agricole, mais aussi sujette à des épisodes d'inondations graves. Les informations historiques sur les inondations montrent que des événements récents ont eu des conséquences dévastatrices, soulignant l'urgence de mettre en place des mesures efficaces de gestion des risques.

Le climat semi-aride, marqué par des variations de température significatives et des précipitations irrégulières, accentue la complexité des défis environnementaux. Les données sur les vents, les précipitations et l'évaporation sont essentielles pour comprendre le contexte climatique local et pour planifier des interventions durables.

L'altitude et la pente des terrains, ainsi que l'occupation du sol, influencent directement les risques d'inondation et les stratégies de prévention. La présence limitée de zones boisées suggère la nécessité d'initiatives de reboisement pour réduire l'érosion et améliorer la résilience de la commune face aux inondations.

En somme, la commune de Baghai présente un cas typique de région où les interactions entre les conditions naturelles et les activités humaines exigent une approche intégrée et bien informée pour la protection contre les inondations. Les chapitres suivants de cette étude se concentreront sur le développement de solutions adaptées, basées sur les données recueillies, pour minimiser les impacts des inondations et améliorer la sécurité et le bien-être des habitants.



**CHAPITRE 2 : ETUDE GEOLOGIQUE
ET GEOTECHNIQUE**

Introduction

La sécurisation de la commune de Baghai contre les risques d'inondations de l'oued Boughegal nécessite la conception et la mise en place d'une infrastructure robuste conforme aux normes régionales. Pour ce faire, il est essentiel d'effectuer une analyse approfondie du sol à travers des études géologiques et géotechniques, en se basant sur des observations sur le terrain, des tests en laboratoire et une interprétation précise des cartes géologiques. Ce passage présente donc une analyse détaillée de la géologie et de la géotechnique de la partie aval du bassin versant de l'oued Boughegal.

Etude géologique

L'analyse géologique de l'oued Boughegal dans la wilaya de Khenchela repose sur l'examen et l'utilisation de la documentation régionale, la réalisation d'un levé géologique du site et l'exploitation des données issues des reconnaissances géologiques effectuées sur place.

II.1 Localisation et cadre géologique régional

- Baghai se trouve dans les Monts Aurès, à la frontière de l'Atlas saharien.
- La région est caractérisée par des formations sédimentaires du Jurassique au Crétacé.

II.2 Historique géologique

- La région a subi l'influence de l'orogénèse alpine, ce qui a conduit à la formation des montagnes actuelles et à des structures tectoniques complexes (plis, failles).

II.2.1 Stratigraphie et Lithologie

Stratigraphie locale:

- Séquence typique des roches de la région :
- Calcaires massifs (Jurassique moyen).
- Grès et marnes (Crétacé supérieur).

II.2.2 Description lithologique

- ✓ Marnes: Roches argileuses, souvent imperméables et sujettes à l'érosion.
- ✓ Calcaires: Roches sédimentaires carbonatées, souvent fracturées, pouvant contenir des fossiles marins.
- ✓ Grès: Roches sédimentaires formées de grains de sable cimentés, généralement perméables.

II.2.3 Géomorphologie et Relief

- ✓ Topographie:
 - Relief accidenté avec des montagnes, des vallées profondes et des plateaux.
 - Pentés raides et terrasses fluviales.
- ✓ Processus géomorphologiques:
 - Érosion fluviale et ravinement.
 - Mouvements de masse (glissements de terrain potentiels).

II.2.4 Tectonique et Structures

- ✓ Failles et plis:
 - Présence de failles inverses orientées NE-SW, résultat des compressions tectoniques.
 - Anticlinaux et synclinaux allongés, reflétant la déformation régionale.

II.2.5 Hydrogéologie

- ✓ Aquifères:
 - Aquifères karstiques dans les calcaires jurassiques.
 - Recharge par infiltration des précipitations et des rivières.
- ✓ Qualité de l'eau:
 - Eau généralement de bonne qualité, mais une analyse locale est nécessaire pour vérifier la potabilité et la présence de contaminants.

II.3 Etude géotechnique

Dans l'objectif de définir les propriétés du sol en vue de l'aménagement de l'oued Boughegal et de la protection de la ville de Baghai contre les inondations, l'étude géotechnique repose principalement sur les visites de terrain, les tests effectués sur site (in situ), ainsi que sur les analyses en laboratoire.

II.3.1 Situation du site

Le terrain étudié se trouve au niveau de l'oued de BAGHAI, au niveau des coordonnées.

Tableau 7 : des coordonnées

	Coordonnées	
	x	y
P1	329106	3933280
P2	329904	3931847

Source : BET AQUA.

II.3.2 Essais de reconnaissances in situ

Les tests de reconnaissance in situ sont des évaluations directes des caractéristiques géotechniques effectuées sur place. La campagne de reconnaissance géotechnique a inclus les activités et tests suivants :

- Deux sondages carottés pour la reconnaissance géologique, avec des échantillons prélevés pour des essais d'identification. Les sols sont représentés graphiquement dans les annexes, illustrant les coupes lithologiques.
- Des essais SPT (Standard Penetration Test) réalisés tous les 2 mètres de profondeur lors des sondages carottés.

- Huit sondages de battage au pénétromètre dynamique effectués sur l'ensemble du site d'implantation.

II.3.3 Essais carottage

Le carottage est une technique utilisée en géotechnique pour prélever des échantillons de sol à différentes profondeurs dans le but d'analyser ses caractéristiques physiques et mécaniques. Cette méthode implique l'utilisation d'une foreuse spéciale équipée d'une mèche creuse appelée "carottier" qui extrait un échantillon cylindrique de sol. Une fois récupérés, ces échantillons sont examinés en laboratoire pour déterminer des paramètres tels que la granulométrie, la composition minéralogique, la porosité, la densité, la résistance, la compressibilité, etc. Les résultats de ces analyses sont essentiels pour évaluer la qualité du sol, sa capacité portante, sa stabilité et pour concevoir des fondations adaptées aux projets de construction.

La description de ces faciès tels qu'ils ont été observés lors de l'exécution des sondages et à l'examen en laboratoire des échantillons prélevés est la suivante:

Tableau 8 : Résultats essai SPT

Couche de sol (i)	N _{SPT}
Faciès 02 : Argile limoneuse à sableuse marron plastique	04.0
Faciès 03 : Allusions, galets et sable.	06.50

II.3.3.1 Sandage n°01 :

- **Faciès 01** : Terre végétale.
- **Faciès 02** : Argile limoneuse à sableuse marron plastique avec débris de coquilles et galets.
- **Faciès 03** : Allusions, galets et sable dans une matrice limono argileuse.

II.3.3.2 Sandage n°02 :

- **Faciès 01** : Terre végétale.
- **Faciès 02** : Argile très sableuse limoneuse jaunâtre à marron plastique avec galets.
- **Faciès 03** : Allusions, galets et sable dans une matrice limono argileuse.

II.3.4 Essais de battage

les essais de battage sont des méthodes utilisées pour évaluer les caractéristiques des sols, en particulier leur densité et leur résistance. Ces essais sont souvent utilisés pour des projets de construction où il est essentiel de comprendre les propriétés du sol sur lequel une structure sera construite.

Le principe des essais de battage est assez simple : un poids est laissé tomber d'une certaine hauteur sur une masse placée sur le sol à tester. La réaction du sol à l'impact est enregistrée et analysée pour fournir des informations sur ses propriétés.

Le type le plus courant d'essai de battage est l'essai de pénétration dynamique (SPT), qui est largement utilisé dans l'industrie de la construction. L'essai SPT consiste à laisser tomber un marteau de masse standardisé d'une hauteur standard sur une tige équipée d'un foret. Le nombre de coups nécessaires pour enfoncer la tige sur une certaine distance est enregistré et utilisé pour calculer la résistance du sol.

Les essais de battage peuvent fournir des informations importantes sur la composition du sol, sa densité, sa cohésion et d'autres propriétés qui sont cruciales pour la conception et la construction de structures sûres et durables.

Les diagrammes d'essai de battage exécuté à l'aide d'un pénétromètre dynamique conventionnel, présentent des allures relativement identiques, les valeurs de

La résistance en pointe mesures et (bars) dans les différent faciès nous permet de distinguer:

A partir de 1.0 de profondeur, les résistance sont caractérisées par des valeurs qui augmentent progressivement et linéaire d'une valeur initiale de 40bars jusqu'à une valeur finale de 120bars.

II.3.5 Essais SPT

Le SPT est une méthode d'échantillonnage largement disponible qui indique la compacité ou la résistance d'un sol. Il mesure le nombre du coups (N) par un

marteau qui pèse 70 Kg tombant librement sur une hauteur de 76 cm qui sont nécessaires pour conduire un tube standard pénétromètre.

Le nombre du coups SPT ou « La valeur N » est faible dans les sols souples ou lâches et augmente avec l'augmentation de la rigidité ou de la résistance du sol,

et cette valeur peut donc être utilisée comme indice de la résistance ou de la compacité in-situ du sol.

A la base des essais SPT exécutés au niveau de sondage carottée SC01 (prise comme le cas le plus défavorable), nous pouvons procéder à la détermination de la classification du sol selon le potentiel parasismique, voici les résultat d'essais :

Conformément aux règles parasismiques algériennes RPA99 (version 2003, tab 3.2), et d'après les résultats clé l'essai de pénétration standard SPT. La moyenne harmonique du nombre de coups est :

$$N = \frac{h_s}{\sum_i^n \left(\frac{h(i)}{N_{SPT}(i)} \right)} = 5.30 < 10$$

Nous pouvons conclure que nous somme en préséance d'un site de Classe S04 (sol très Melube).

II.3.6 Essais au laboratoire

Les essais de laboratoire représentent des méthodes d'analyse géotechnique visant à définir les caractéristiques physiques et mécaniques des échantillons de sol collectés sur le terrain. Ils sont effectués dans des environnements contrôlés pour fournir des données précises sur

le comportement du sol dans diverses conditions. Une gamme variée d'essais en laboratoire existe, chacun visant à caractériser différentes propriétés du sol. Les échantillons prélevés lors des sondages géotechniques subissent ces essais afin d'obtenir une évaluation approfondie de leurs caractéristiques. Parmi les essais couramment réalisés en laboratoire, on trouve :

- les essais mécanique,
- les essais de granulométrie,
- les essais de limites d'Atterberg
- les essais de cisaillement.

II.3.7 Essais d'analyse granulométrique

Les résultats de cette analyse sont traduits graphiquement en annexe de ce rapport.

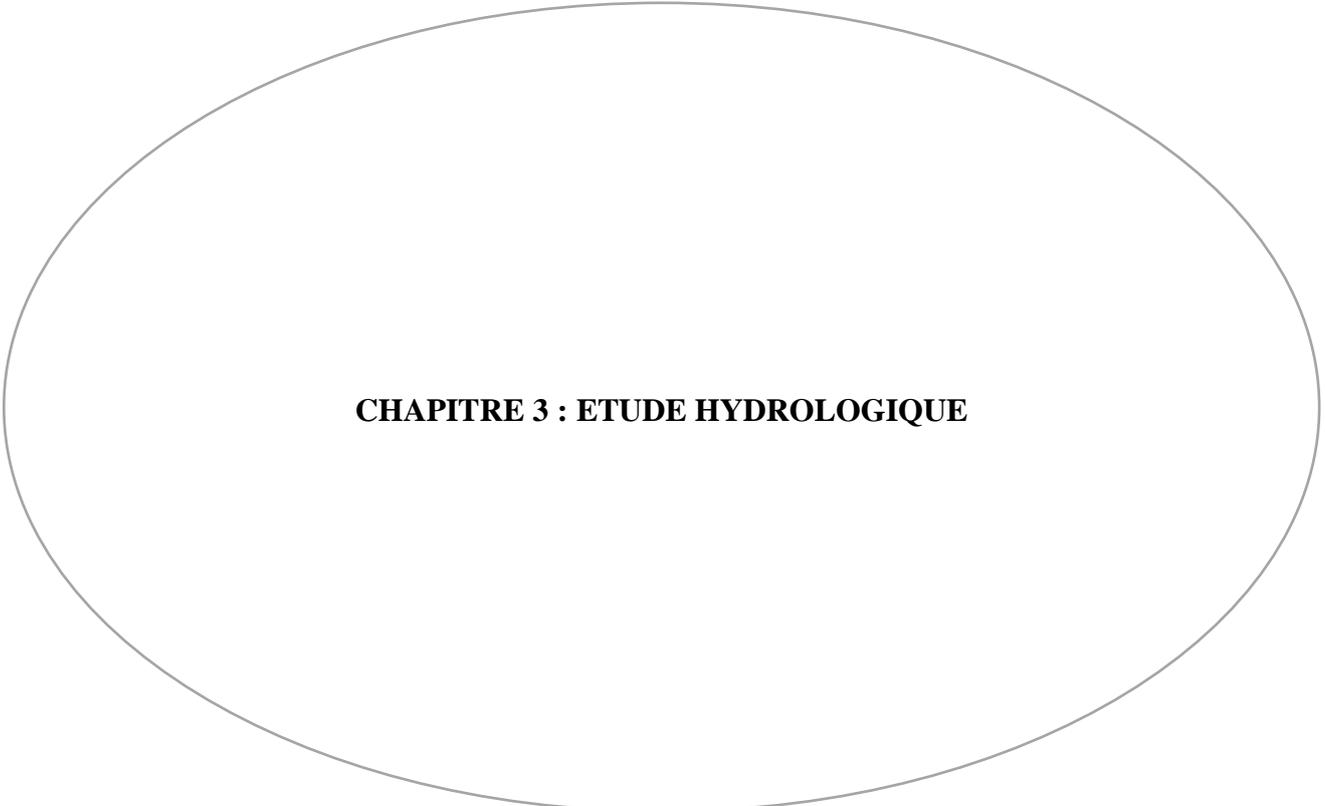
Nous avons principalement des sols fins constitués par des argiles limoneux (Faciès 02), avec plus de 50% d'éléments fins de dimensions inférieure à 80µm. Et des sols grenus constitués par des alluvions (Faciès 03), avec moins de 50% d'éléments fins de dimensions inférieure à 80µm.

II.3.8 Essais de cisaillement

L'essai de cisaillement est un test essentiel en géotechnique utilisé pour déterminer les propriétés de résistance au cisaillement des sols. Ces propriétés sont cruciales pour évaluer la stabilité des pentes, la capacité portante des fondations, et pour concevoir les structures de soutènement

Conclusion

- La région de Baghai présente une géologie complexe avec des formations sédimentaires variées et des structures tectoniques actives.
- La connaissance de la géologie est essentielle pour comprendre les risques d'inondation et les conditions de fondation des infrastructures.
- L'étude géotechnique fournit une base solide d'informations sur les propriétés du sol autour de l'oued de Baghai, essentielle pour orienter les décisions d'aménagement et de protection contre les inondations. Les données obtenues permettent de recommander des solutions de génie civil appropriées pour assurer la sécurité et la durabilité des projets futurs dans cette zone géographique spécifique.



CHAPITRE 3 : ETUDE HYDROLOGIQUE

Introduction

L'hydrologie se concentre sur la répartition, la circulation et la qualité de l'eau à la surface de la Terre, englobant les phénomènes tels que les précipitations, l'évaporation, l'infiltration, ainsi que le mouvement de l'eau dans les rivières, les lacs et les nappes phréatiques, ainsi que la qualité de l'eau et son utilisation par les humains et les écosystèmes. Une étude hydrologique consiste en une analyse méthodique et scientifique des caractéristiques hydriques d'un bassin versant, d'un cours d'eau ou d'un système aquifère, généralement menée dans le cadre de divers objectifs tels que la planification de projets de gestion des ressources en eau, la prévention des risques d'inondation et la conception d'infrastructures hydrotechniques.

Ce chapitre vise à identifier les principaux paramètres hydrologiques de la zone d'étude en délimitant le bassin versant de "oued BOUGHEGAL" dans la commune de Baghai, puis à déterminer ces caractéristiques en utilisant le logiciel ArcGIS. Il s'agit également d'estimer les périodes de retour et de déterminer les débits de crue nécessaires pour concevoir l'aménagement de l'oued, ce qui contribuera à protéger la zone contre les inondations.

III.1 Bassin versant

Un bassin versant est une région géographique délimitée par des sommets topographiques, à l'intérieur de laquelle toutes les précipitations qui tombent sont collectées et drainées par un réseau hydrographique commun, tel qu'une rivière ou un cours d'eau principal, vers un point de sortie unique, appelé exutoire, qui est le point le plus bas du bassin versant.

III.1.1 Étude géomorphologie

III.1.1.1 Caractéristiques morphologiques

Les particularités morphologiques d'une région, notamment celles d'un bassin versant, qui représente l'unité de base dans une étude hydrologique, jouent un rôle crucial dans la détermination des divers comportements du régime hydrologique. En d'autres termes, malgré des conditions climatiques et géologiques similaires, deux bassins versants adjacents peuvent réagir différemment en raison de leurs caractéristiques morphologiques distinctes. Cela souligne l'importance de la topographie, de la forme, de la taille, de la pente et d'autres aspects géomorphologiques dans l'écoulement, l'accumulation et la réaction de l'eau aux précipitations et aux conditions météorologiques. Il est donc crucial de tenir compte de ces caractéristiques morphologiques dans l'analyse et la modélisation des régimes hydrologiques afin de mieux comprendre et gérer les ressources en eau.

• Surface

Dans le cadre d'un bassin versant, la surface désigne la zone délimitée par la ligne de crête ou le contour du bassin. Pour évaluer cette surface, on peut recourir à un planimètre ou à la méthode des petits carrés, et elle est généralement exprimée en kilomètres carrés (km²).

Le bassin versant d'oued BOUGHEGAL (notre bassin d'étude) a une superficie de **94.23 Km²**.

• Périmètre

Le périmètre représente la longueur de la ligne de contour du bassin, habituellement exprimée en kilomètres (km).

Le périmètre du bassin versant d'Oued BOUGHEGAL (bassin d'étude) a un périmètre de **85.73 Km**.

- **Longueur du thalweg (cours d'eau principal)**

Le thalweg, qui constitue la ligne de partage des eaux, est également le lit principal du cours d'eau. La longueur du cours d'eau principal est de **37.8 (km)**.

La carte ci-dessous illustre le bassin versant d'étude de l'oued BOUGHEGAL ainsi que son cours d'eau principal .

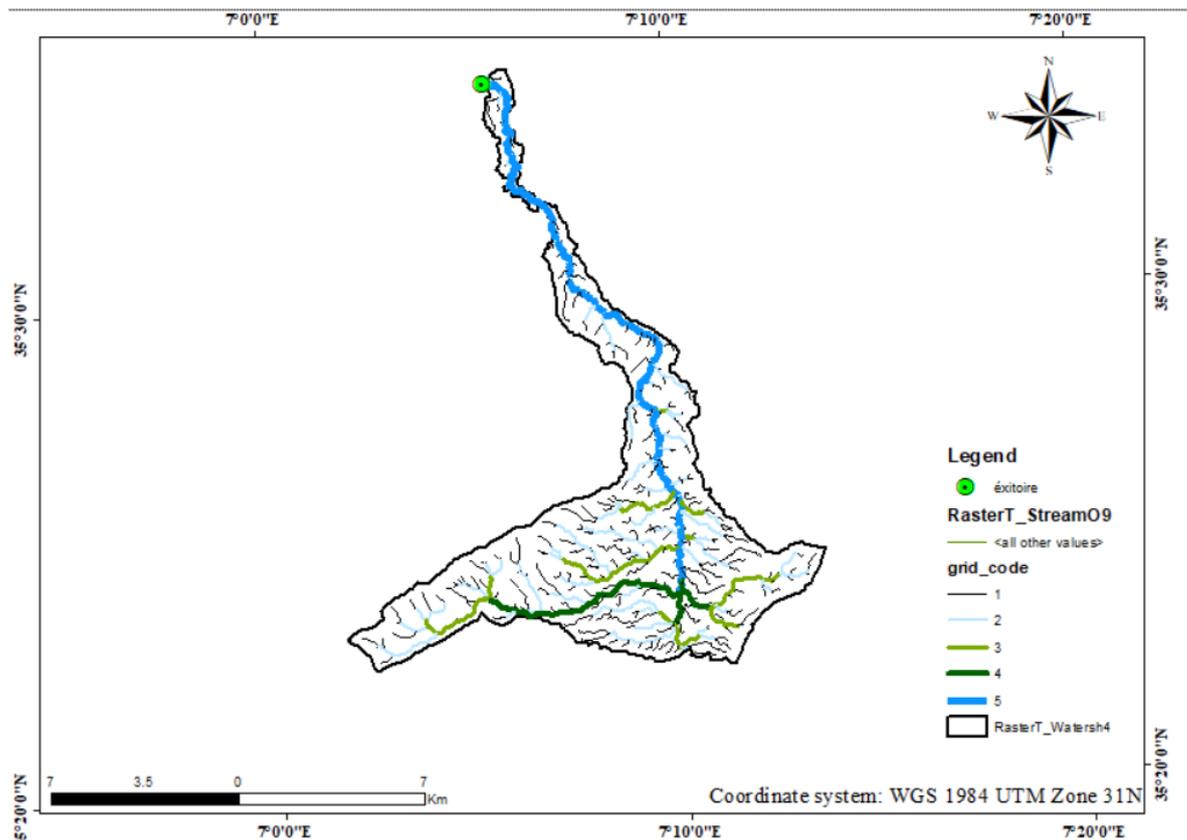


Figure 5 : Carte des sous bassins versants Baghai

(Source : arcgis)

III.1.1.2 Caractéristiques géométriques

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

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

$$K_H = \frac{A}{L^2}$$

Avec :

- K_H : Indice de compacité de Horton.
- A : Aire totale du bassin de drainage (Km²).
- L : Longueur du cours d'eau principal (Km).

Pour :

- $K_h < 1$: bassin de forme allongée
- $K_h > 1$: bassin de forme ramassée

• Indice de compacité de Gravélius (KG)

Selon M. GRAVELIUS (Laborde 2000), la forme du bassin a une influence directe sur le comportement de l'écoulement superficiel. On caractérise cette forme par un paramètre appelé l'indice de compacité (KG), également connu sous le nom d'indice de forme, qui est le rapport entre le périmètre P (en kilomètres) du bassin et le périmètre d'un cercle de même superficie A (en kilomètres carrés). Il est donné par la formule suivante :

$$K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} \approx 0.282 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Avec :

A : Superficie du bassin (Km²).

P : Périmètre du bassin (Km).

KG : Indice de compacité de Gravélius.

Pour :

- $K_G = 1$: bassin compacte.
- $1 < K_G < 1.3$: bassin moins compacte.
- $K_G > 1.3$: bassin allongé.

Dans notre situation, le bassin versant présente un indice de compacité de Gravélius (KG) égal à $2.49 > 1.3$, Cette valeur suggère que le bassin a une forme allongée.

• Coefficient d'allongement Ca

Il est donné par la formule suivante :

$$C_a = \frac{L_{cp}^2}{A}$$

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

A : La surface du bassin versant (Km²).

• Rectangle équivalent

Le rectangle équivalent, également connu sous le nom de rectangle de Gravélius, est une méthode par laquelle on représente le bassin versant sous la forme d'un rectangle qui possède à la fois le même indice de compacité et la même hypsométrie que le bassin étudié. Cette approche permet de comparer les différents bassins versants du point de vue de leur écoulement.

Le rectangle possède un périmètre équivalent ainsi qu'une surface correspondant respectivement au périmètre et à la superficie du bassin :

$$P = 2(L + l) \quad \text{et} \quad A = L * l$$

Les valeurs de la longueur L et de la largeur l en kilomètres sont déterminées par la résolution des paramètres P et A :

$$K_G = 0.282 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

D'après les équations précédent on obtient une équation de 2ème degré admet deux solutions L et l :

$$L \equiv \frac{K_G \sqrt{A}}{1.128} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.128}{K_G} \right)^2} \right] \quad \text{Et} \quad l \equiv \frac{K_G \sqrt{A}}{1.128} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.128}{K_G} \right)^2} \right]$$

Avec :

« **L** » et « **l** » : la longueur la largeur du rectangle (Km).

A : la surface du bassin versant (Km²).

KG : l'indice de compacité.

- Les caractéristiques hydro-morphométriques du bassin versant sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 9 : Les caractéristiques hydro-morphométriques du bassin versant

Désignation	Symbole	Unités	Valeur
Superficie	A	Km ²	94.23
Périmètre	P	Km	85.73
Longueur du talweg principal	L_{cp}	Km	37.8
Indice de compacité de Gravelius	K_G	/	2.49
Indice de compacité de Horton	K_h	/	0.07
Coefficient d'allongement	C_a	/	15.16
Rectangle équivalent	longueur	L	Km
	largeur	l	km

III.1.2 Etude du relief

L'impact du relief sur l'écoulement est facilement compréhensible, car de nombreux paramètres hydrométéorologiques varient en fonction de l'altitude (telles que les précipitations, les températures, etc.) et de la morphologie du bassin. De plus, la pente influence la vitesse de l'écoulement. Le relief peut être évalué à l'aide des indices ou des caractéristiques suivants :

- La courbe hypsométrique ;
- L'altitude moyenne ;
- L'indice de pente globale (I_g) ;

- L'indice de pente rocheuse (Ip) ;
- La densité de drainage (Dg).

Tableau 10 : Paramètres Hypsométriques de la zone d'étude

courbe de niveau		altitude moyenne (m)	Hi	surface partielle (km ²)	Si	surface partielle (%)	Si	surface cumulees (%)	Si	Si*Hi
845	900	872.5		5.2		5.52		100.0		4537
900	1000	950		8.68		9.2		94.5		8246
1000	1100	1050		16.02		17.0		85.3		16821
1100	1200	1150		38.14		40.5		68.3		43861
1200	1300	1250		9		9.6		27.8		11250
1300	1400	1350		3.94		4.2		18.2		5319
1400	1500	1450		3.73		4.0		14.1		5408.5
1500	1600	1550		4.77		5.1		10.1		7393.5
1600	1700	1650		3.79		4.0		5.0		6253.5
1700	1884	1792		0.96		1.0		1.0		1720.32
				total		94.23				Hmoy 1175.95

III.1.2.1 Courbe hypsométrique

- L'hypsométrie désigne la répartition relative des zones à différentes altitudes dans une région, et la courbe hypsométrique est une représentation graphique de cette relation entre la zone et l'altitude, décrivant comment la zone est distribuée en fonction de l'élévation (Strahler, 1952).

- Pour évaluer ces paramètres, il est nécessaire de représenter la distribution hypsométrique après avoir effectué une planimétrie des zones partielles délimitées par les courbes de niveau principales et les différentes altitudes côtières.

- La carte hypsométrique générée à partir du Modèle Numérique du Terrain (MNT) révèle des altitudes d'environ 845 mètres au niveau de l'exutoire. En s'éloignant, les altitudes augmentent progressivement jusqu'à atteindre un maximum de 1884 mètres.

-Les données concernant la distribution des surfaces élémentaires ainsi que leur cumul en fonction des altitudes ont été obtenues à l'aide du logiciel ArcGIS et sont présentées sous forme de tableaux. Les répartitions des surfaces et les courbes hypsométriques de chaque sous-bassin sont illustrées ci-dessous :

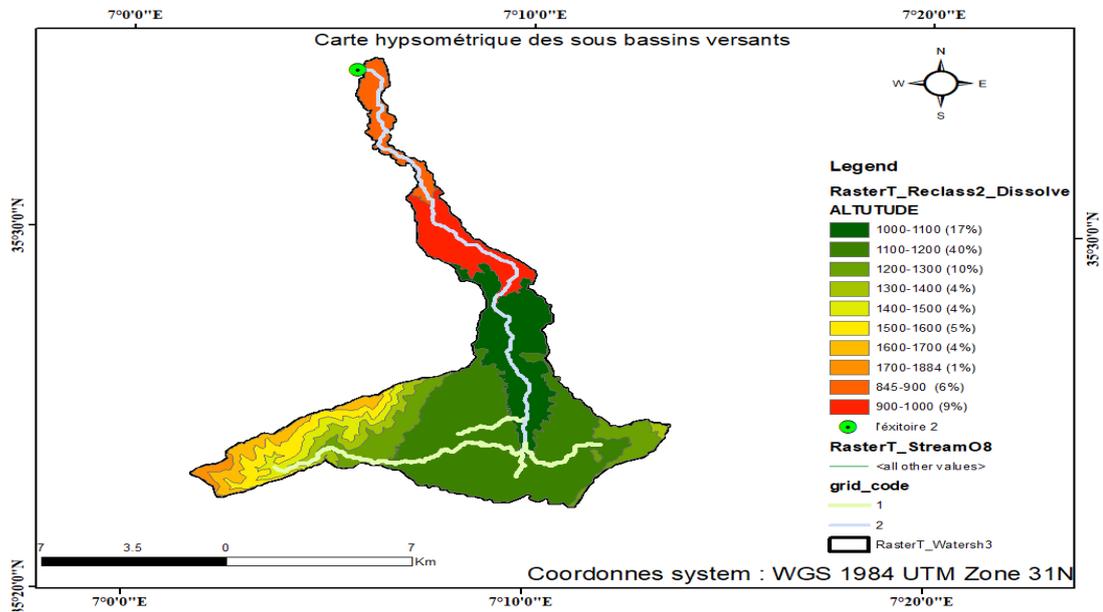


Figure 6 : Carte hypsométrique des sous bassins versants Baghai

(Source : arcgis)

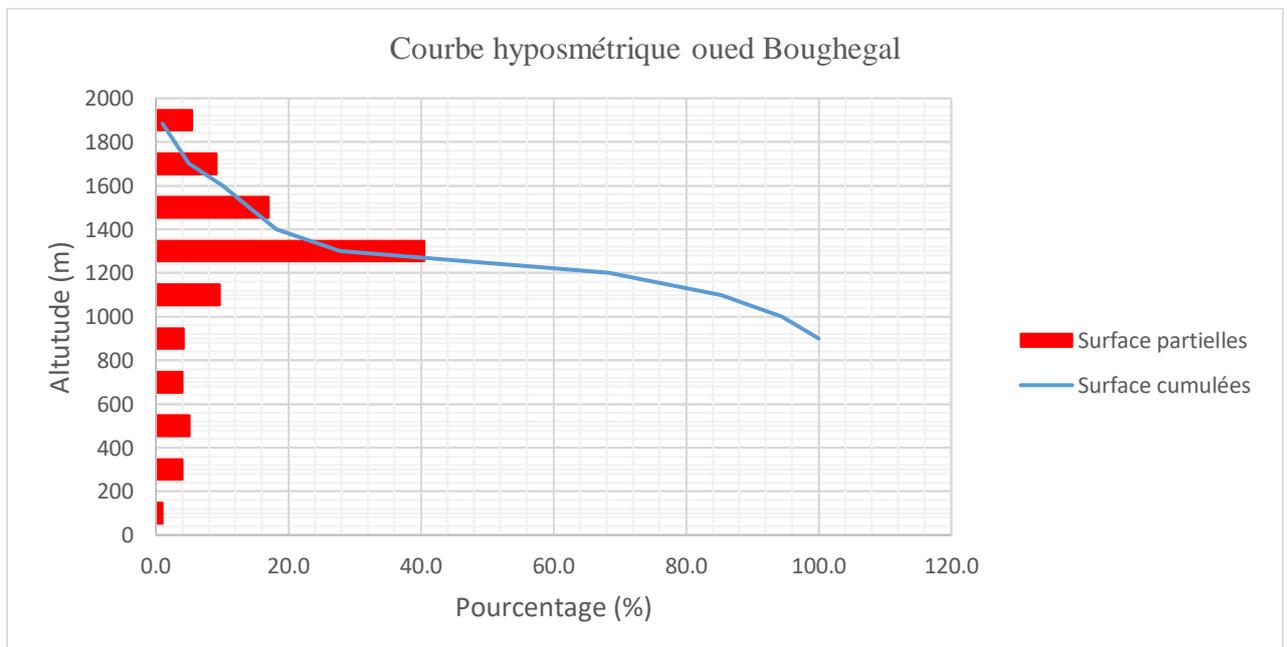


Figure 7 : Répartition des surfaces et la courbe hypsométrique de la zone d'étude.

III.1.2.2 Détermination des altitudes

- **Altitude maximale et minimale « Hmax, Hmin »**

Ces données déterminent l'amplitude altimétrique du bassin versant et sont également utilisées dans le calcul de la pente, qui est établi à partir de la carte topographique.

- **Altitude moyenne « Hmoy »**

L'altitude moyenne du bassin est un indicateur crucial qui synthétise l'influence de la zonalité climatique verticale. Elle est calculée en additionnant le produit des surfaces partielles S_i comprises entre les courbes de niveau et les altitudes moyennes correspondantes H_i .

Analytiquement ; l'altitude moyenne du bassin (H_m) peut être calculée en utilisant la formule suivante :

$$H_{moy} = \sum \frac{S_i * H_i}{S}$$

- (S_i) : Surface partielle entre deux lignes de contour (en km^2).

- (H_i): est l'altitude moyenne correspondant à la i-ème zone partielle.(m)

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

- **L'altitude médiane « Hméd »**

- L'altitude médiane H5% : Il s'agit de la projection du point représentant 5% de la surface cumulée sur la courbe hypsométrique.

- L'altitude médiane H50% : Elle correspond à l'altitude lue au point situé à 50% de la surface totale du bassin, sur la courbe hypsométrique. Cette valeur est similaire à l'altitude moyenne lorsque la courbe hypsométrique du bassin présente une pente régulière.

- L'altitude médiane H95% : C'est la projection du point qui correspond à 95% de la surface cumulée sur la courbe hypsométrique.

Tableau 11 : Tableau des Propriétés altimétriques des sous-bassins versants.

Sous bassin versant	H _{max}	H _{min}	H _{moy}	H _{5%}	H _{50%}	H _{95%}
Oued bouhegal	1884m	845m	1175.95m	1702m	1242m	992m

III.1.2.3 Les indices de pente

Les paramètres de pente fournissent des informations sur l'inclinaison des bassins versants, simplifiant ainsi les comparaisons et les classifications. Ils servent également à estimer les vitesses d'écoulement en surface.

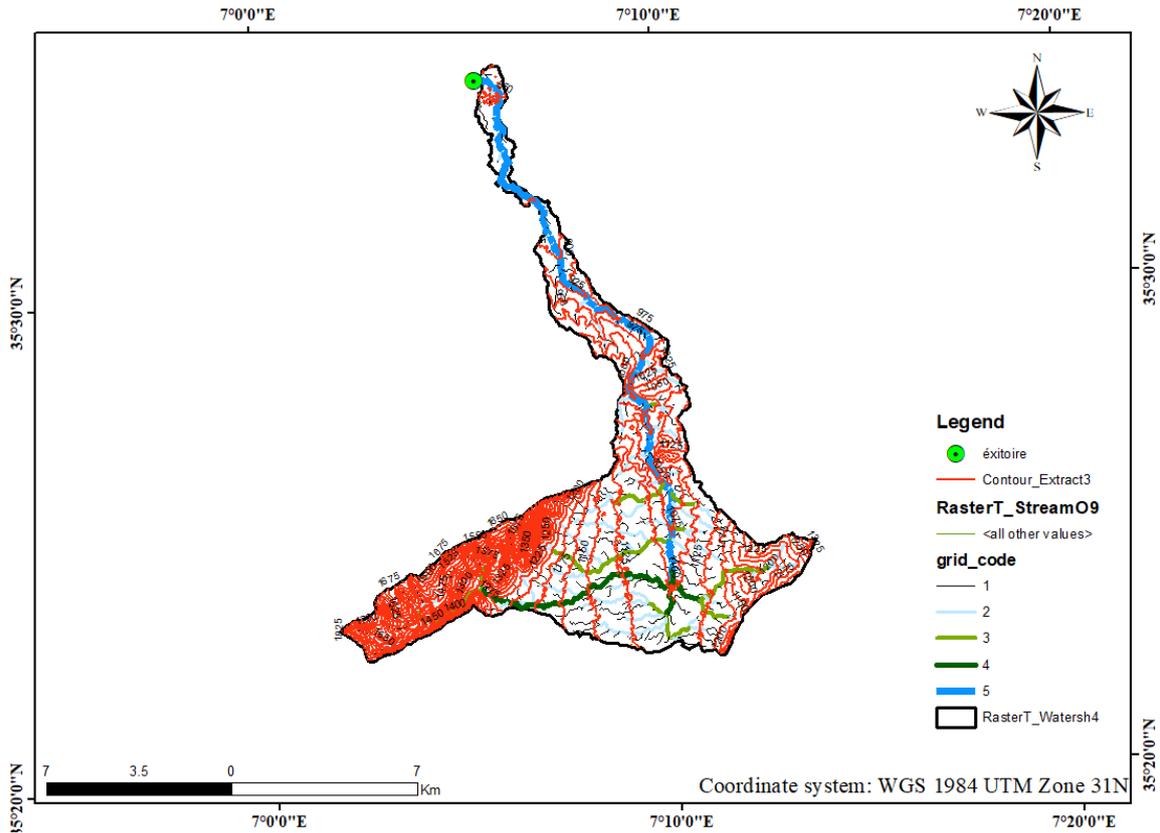


Figure 8 : Carte des courbes de niveaux des sous bassins versants de baghai

(Source : arcgis)

- **La pente des sous bassins versants**

Elle peut être exprimée par la formule suivante :

$$I_{BV} = \frac{(H_{max} - H_{min})}{L_{cp}}$$

Avec :

L_{cp} : longueur du cours d'eau principal(km).

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

- **La pente moyenne des sous bassins versants**

La pente moyenne est une donnée essentielle pour évaluer la configuration topographique du bassin. En tant que variable autonome, elle fournit des informations cruciales sur la durée du cheminement des eaux de ruissellement (et donc sur le temps de concentration, T_c), et elle impacte directement le débit maximal lors de précipitations intenses.

La technique avancée par Carlier et Leclerc (1964) implique de déterminer la moyenne pondérée des pentes pour chaque zone élémentaire située entre deux altitudes spécifiques. Une estimation de la pente moyenne peut ensuite être obtenue en utilisant la relation suivante

:

$$I_{mBV} = \frac{\Delta H(0.5L_1 + L_2 + \dots + 0.5L_n)}{S_{BV}}$$

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_b : Superficie du bassin versant (Km²).

- **Pente moyenne de sous bassin Oued BOUGHEGAL**

Tableau 12 : Pente moyenne de sous bassin Oued BOUGHEGAL

courbe	longueur	delta h	longueur cumulee	surface bv	pente partielle
845-900	2.84	55	2.84	94.23	1.94
900-1000	9.98	100	12.82		1.00
1000-1100	22.02	100	34.84		0.45
1100-1200	12.95	100	47.79		0.77
1200-1300	12.6	100	60.39		0.79
1300-1400	12.11	100	72.5		0.83
1400-1500	14.3	100	86.8		0.70
1500-1600	9.58	100	96.38		1.04
1600-1700	3.3	100	99.68		3.03
1700-1884	1.3	184	100.98		14.15
					Im= 109.06
Moy=103.9					

- **Indice de pente de Roche Ip**

L'indice de pente I_P développé par M. Roche permet de calculer la pente moyenne en utilisant les données réelles du bassin versant. IP est défini par la formule suivante:

$$I_P = \frac{1}{\sqrt{L_R}} \sum \sqrt{(S_i * H_i)}$$

Avec :

IP : Indice de pente de Roche.

L_r : Longueur du rectangle équivalent (m).

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

• Indice de pente moyenne I_{PM}

La pente moyenne d'un cours d'eau influe sur la vitesse de l'eau vers la sortie du bassin (l'exutoire) ainsi que sur le temps de concentration. Pour estimer ces pentes moyennes, on analyse le profil en long du cours d'eau principal et de ses affluents. La méthode habituelle pour calculer la pente longitudinale consiste à diviser la différence d'altitude entre les points les plus élevés et les plus bas du profil par la distance totale du cours d'eau.

La pente moyenne est donnée par :

$$I_{PM} = \frac{H_{max} - H_{min}}{L_r}$$

Avec :

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

L_r : Longueur du rectangle équivalent (Km).

• Indice de pente globale I_g

L'indice de pente globale exprime la pente moyenne sur 90% de la superficie du bassin, calculée à partir de la courbe hypsométrique. Il est déterminé en prenant la différence (D) entre les altitudes H5% et H95%.

$$I_g = \frac{D}{L_r} = \frac{H_{5\%} - H_{95\%}}{L_r}$$

Avec :

- H5% : Altitude où 5% de la surface totale est située (m).

- H95% : Altitude où 95% de la surface totale est située (m).

- L_r : Longueur du rectangle équivalent (km).

Tableau 13 : La classification O.R.S.T.O.M du relief se base sur l'indice de pente global.

Relief		Valeur de I_g (m/km)
1	Relief très faible	$I_g < 2$
2	Relief faible	$2 < I_g < 5$
3	Relief assez faible	$5 < I_g < 10$
4	Relief modéré	$10 < I_g < 20$
5	Relief assez fort	$20 < I_g < 50$
6	Relief fort	$50 < I_g < 100$
7	Relief très fort	$100 < I_g$

• Dénivelée spécifique D_s

La dénivelée spécifique, notée "DS", permet d'appliquer la classification de l'O.R.S.T.O.M, qui permet de définir les divers types de relief des bassins versants indépendamment de leur superficie. Elle offre une indication générale sur le relief du bassin, calculée selon la formule suivante :

$$D_s = I_g \sqrt{A} = D \sqrt{\frac{I}{L_r}}$$

Avec :

D_s : Dénivelée spécifique (m) .

I_g : Indice de pente globale (m/m) .

A : Superficie du bassin versant (Km²).

Tableau 14 : Classification des reliefs d'après ORSTOM,1963.

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

Tableau 15 : Résultats de calculs des pentes et la dénivelée spécifique du sous bassin « Oued BOUGHEGAL »

Paramètres	Symboles	Unités	Valeur
Pente du bassin versant	IBV	m/Km	27.49
Pente moyenne de bassins versant	ImBV	m/km	109.06
Indice de pente globale	I_g	m/km	17.59
Indice de pente moyenne du cours d'eau	I_{pm}	m/m	25.63
Indice de pente de Roche	I_p	%	4.74
Dénivelée spécifique	D_s	m	170.72
Relief		/	Assez fort

III.1.3 Etude du réseau hydrographique

III.1.3.1 Caractéristiques du réseau hydrographique

Le cours principal d'un fleuve est nourri par les cours d'eau qui lui sont rattachés, lesquels sont à leur tour alimentés par des affluents de moindre importance, et ainsi de suite, jusqu'aux ruisseaux et petites rivières situés à la source du bassin. Ces cours d'eau à la tête du bassin forment ce qu'on appelle le réseau hydrographique du bassin versant. Pour décrire intégralement un réseau hydrographique, plusieurs paramètres doivent être pris en compte.

- **Hierarchisation du réseau**

La hiérarchisation d'un cours d'eau se fait en lui attribuant une numérotation selon son niveau d'importance :

- Tout cours d'eau sans affluent est classé comme de premier ordre.
- Lorsque deux cours d'eau de même ordre se rejoignent, le cours d'eau résultant est classé comme d'ordre n+1.
- Si deux cours d'eau de niveaux différents se rejoignent, le cours d'eau résultant adopte le niveau le plus élevé des deux.
- Le niveau le plus élevé correspond à celui du cours d'eau principal à la sortie.

III.1.3.1.1 Formes du réseau hydrographique

Les lois de Horton : telles que le rapport de confluence et le rapport de longueur, sont des expressions empiriques utilisées pour distinguer les caractéristiques des réseaux hydrographiques.

- **Rapport de la confluence « Rc »**

Il s'agit d'un facteur crucial à prendre en compte lors de l'établissement de corrélations entre différentes régions. Selon Strahler (1964), le rapport de confluence varie de 3 à 5 dans une région où la géologie n'exerce aucune influence. Sa définition est la suivante :

$$R_c = \frac{N_n}{N_{n+1}}$$

Avec :

Rc : rapport de confluence.

Nn : nombre de cours d'eau d'ordre n.

Nn+1 : nombre de cours d'eau d'ordre n+1.

Le coefficient de Strahler (Rc) représente l'organisation du réseau de drainage. Lorsque ce réseau est bien structuré, les nombres de cours d'eau successifs suivent une progression géométrique inverse.

Tableau 16 : Calcul du rapport de confluence pour sous bassin versant «Oued BOUGHEGAL ».

Ordre	Nbr du talwegs	Rc	Rc
1	16	0.84	0.84
2	19	/	

III.1.3.1.2 Rapport des longueurs « RL »

Il s'agit du rapport entre les longueurs moyennes des cours d'eau de niveau n et celles des cours d'eau de niveau n-1, formulé comme suit :

$$R_L = \frac{L_n}{L_{n+1}}$$

Avec :

L_n : longueur de cours d'eau d'ordre n.

L_{n+1} : longueur de cours d'eau d'ordre n+1.

Tableau 17 : calcul du rapport des longueurs pour sous bassin versant « Oued BOUGHEGAL ».

Ordre	Longeur des talwegs	R_L	R_L
1	25.9	1.24	1.24
2	20.85	/	

III.1.3.1.3 Le profil en long

Le profil en long d'un cours d'eau est traditionnellement représenté graphiquement pour illustrer comment l'altitude du lit du cours d'eau varie en fonction de la distance depuis son point de sortie. Cette représentation permet de calculer sa pente moyenne.

III.1.3.1.4 La densité de drainage « Dd »

La densité de drainage constitue un paramètre essentiel pour décrire et estimer le temps nécessaire à l'écoulement des eaux souterraines. Définie par Horton en 1945, comme cité dans Coulon (2015), elle représente le rapport entre la longueur totale du réseau hydrographique et la superficie du bassin versant, qui est la zone du terrain où toutes les eaux s'écoulent vers un même point de sortie. Cela se formule ainsi :

$$D_d = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{S}$$

Avec :

D_d : Densité de drainage en km/km² ;

$\sum L_i$: La somme des longueurs de tous les cours d'eau considérés pour le bassin versant ;

n : L'ordre le plus élevé dans la classification.

S : La surface du bassin versant en km².

Tableau 18 : Les résultats du calcul sont présentés dans le tableau ci-dessous

Sous bassin versant	n	S (km ²)	$\sum L_i$ (Km)	D_d (km / km ²)
Oued bouhegal	2	94.23	46.75	0.5

III.1.3.1.5 La densité hydrographique des thalwegs élémentaires « F1 »

La densité hydrographique désigne le nombre de canaux d'écoulement par unité de surface. Sa définition est donnée par la formule suivante :

$$F_1 = \frac{\sum N_1}{S}$$

Avec :

F1 : Densité hydrographique (Km-2) ;

N1 : Nombre de cours d'eau d'ordre 1 ;

S : Superficie du bassin versant (Km2).

III.1.3.1.6 Le coefficient de torrencialité « Ct »

Le coefficient de torrencialité résulte du produit entre la densité de drainage et la fréquence des talwegs élémentaires. Sa valeur est obtenue à partir de l'équation suivante :

$$C_t = D_d \times F_1$$

Avec :

Dd : Densité de drainage en km/km2 ;

F1 : Densité hydrographique (Km-2).

Tableau 19 : Les résultats des calculs sont affichés dans le tableau ci-dessous

Sous bassin versant	S (Km ²)	N ₁	F ₁	C _t
Oued Bouhegal	94.23	16	0.17	0.085

III.1.3.1.7 Le temps de concentration « Tc »

Le temps de concentration désigne la période écoulée entre le début d'une précipitation et l'atteinte du débit maximal à la sortie du bassin versant. Il représente la durée requise pour que l'eau s'écoule depuis le point le plus éloigné du bassin versant jusqu'à son exutoire, comme décrit par Nicolas en 2007.

Il se compose de trois composantes distinctes :

- Th : Temps d'humectation, indiquant le laps de temps requis pour que l'eau qui tombe s'infiltré dans le sol avant de commencer à s'écouler en surface.
- Tr : Temps de ruissellement, représentant la durée pendant laquelle l'eau s'écoule en surface ou à travers les premières couches du sol jusqu'à rejoindre un réseau de collecte, tel qu'un cours d'eau naturel ou un collecteur.
- Ta : Temps d'acheminement, correspondant à la durée nécessaire à l'eau pour se déplacer à travers le système de collecte jusqu'à l'exutoire. Avec :

$$T_c = \max(\sum (T_h + T_r + T_a))$$

Les méthodes et les formules utilisées sont influencées par des caractéristiques régionales, qui se reflètent à travers des paramètres spécifiques à la région où ces formules sont

élaborées. En général, le choix de la formule appropriée dépend du type de bassin-versant étudié. Dans ce contexte, on privilégie généralement celle qui semble la plus adaptée, développée dans des conditions géophysiques similaires à celles de la partie nord de l'Algérie, comme indiqué par Bennis en 2004. L'estimation du temps de concentration est réalisée à l'aide des formules empiriques suivantes :

- **Formule de VENTURA**

$$T_c = 0.1275 \frac{\sqrt{S}}{\sqrt{I_{BV}}}$$

Avec :

T_c: Temps de concentration (h) ;

IBV : Pente du bassin versant (m/m) ;

S : Surface du bassin versant (Km²).

- **Formule de KIRPICH**

Cette approche convient aux bassins versants dont la superficie oscille entre 0,4 ha et 81 ha, caractérisés par des sols argileux et une pente moyenne située entre 3% et 10%. Le temps de concentration est ensuite déterminé à l'aide de l'équation suivante :

$$T_c = 0.0663 \frac{L_{cp}^{0.77}}{I_g^{0.385}}$$

Avec les paramètres suivants :

- T_c : Temps de concentration (en heures).

- L_{cp} : Longueur du cours d'eau principal (en mètres).

- I_g : Indice de pente globale (en pourcentage).

- **Formule de GIANDOTTI (sud Italie 1937)**

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

Avec :

T_c : Temps de concentration (h).

H_{moy} et H_{min} : Altitudes moyenne et minimale du bassin versant (m).

S : Surface du bassin versant (Km²).

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

- **Formule de TURAZZA**

$$T_c = \frac{0.108^3 \sqrt{S \times L_{cp}}}{\sqrt{I_{pm}}}$$

Avec :

T_c : Temps de concentration (h) .

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

S : Surface du bassin versant (Km²).

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

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

- **Formule ESPAGNOLE**

$$T_c = 0.126 \times 60 \times \left(\frac{L_{cp}}{I_{pm}^{0.25}} \right)^{0.76}$$

Avec :

T_c : Temps de concentration (min) .

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

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

- **Formule de SOKOLOVSKY**

$$T_c = 4 \times \left(\frac{S \times L_{cp}^{0.333}}{\sqrt{I_{bv}}} \right)^{0.75}$$

Avec :

T_c : Temps de concentration (h) .

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

S : Superficie du bassin versant (Km²) .

I_{bv} : Pente du bassin versant (m/Km).

- **Formule de ANRH**

$$T_c = \left(\frac{0.87 L_{cp}^3}{H_{moy} - H_{min}} \right)^{0.385}$$

Avec :

T_c : Temps de concentration (h).

H_{moy} et H_{min} : Altitudes moyenne et minimale du bassin versant (m).

A : Surface du bassin versant (Km²).

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

- **Choix du temps de concentration**

Voici un résumé des résultats de calcul du temps de concentration obtenus en utilisant diverses formules, présenté dans le tableau ci-dessous :

Tableau 20 : Tableau des résultats de calcul du temps de concentration

Formules utilisées	Temps de Concentration	Unités
Formule de VENTURA	0.24	h
Formule de KIRPICH	0.36	h
Formule de GIANDOTTI	6.56	h
Formule de TURAZZA	0.33	h
Formule ESPAGNOLE	64.53	h
Formule de SOKOLOVSKY	86.5	h
Formule de ANRH	6.74	h

Les temps de concentration présentés dans le tableau affichent une grande disparité, allant de valeurs très courtes, telles que 0.24h et 0.36h , à des valeurs extrêmement longues comme 86.5. Cette variation souligne la diversité des capacités de concentration parmi les individus examinés. Afin de mieux saisir la tendance centrale des données, il est pertinent de se pencher sur les valeurs intermédiaires. En prenant les temps de 6.74 et 6.56 comme exemples, nous observons des valeurs plus représentatives de la moyenne. En calculant la moyenne de ces deux valeurs, nous obtenons un temps de concentration moyen de 6.65 . Cette approche permet de mettre en évidence une mesure plus équilibrée de la concentration au sein de l'échantillon étudié, offrant ainsi un aperçu plus précis des performances cognitives globales .

Tableau 21 : Valeurs retenus du temps de concentration

Oued Bouhegal	T _c
Formule de GIANDOTTI	6.56
Formule de ANRH	6.74
La moyenne	6.65

- **Vitesse de ruissellement Vr**

Le ruissellement se réfère à l'écoulement par gravité des eaux météorologiques sur la surface du sol, suivant la pente naturelle du terrain et dans le micro-réseau hydrographique. Il s'agit

des eaux qui n'ont pas été absorbées par le sol, évaporées ou retenues en surface. En termes simples, le ruissellement est défini comme le rapport entre la distance parcourue par l'écoulement et le temps de concentration :

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

Avec :

V_r : vitesse de ruissellement (km/h) ;

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

T_c : Temps de concentration (h).

Ci-dessous, vous trouverez un tableau récapitulatif des résultats des calculs des paramètres hydrographiques :

Tableau 22 : Paramètres hydrographiques des deux sous bassins versants.

Désignation	Symbole	Unités	Valeur
Densité de drainage	D_d	Km/Km ²	0.5
Densité hydrographique	F	Km ⁻²	0.17
Coefficient de torrentialité	C_t	/	0.085
Temps de concentration	T_c	Heurs	6.65
Vitesse de ruissellement	V_r	Km/h	5.68

Voici une synthèse des caractéristiques géomorphologiques du bassin versant de l'oued Baghai présentée dans le tableau ci-dessous :

Tableau 23 : Caractéristiques géomorphologiques de sous bassin versant.

Désignation		Symbole	Unités	Valeur
Superficie		A	Km ²	94.23
Périmètre		P	Km	85.73
Longueur du talweg principal		L _{cp}	Km	37.8
Indice de compacité de Gravélius		K _G	/	2.49
Indice de compacité de Horton		K _h	/	0.07
Coefficient d'allongement		C _a	/	15.16
Rectangle Equivalent	Longueur	L	Km	40.53
	Largeur	l	km	2.32
Altitudes	Maximale	H _{max}	m	1884
	Moyenne	H _{moy}	m	1175.95
	Minimale	H _{min}	m	845
	Médiane 5%	H5%	m	1702
	Médiane 50%	H50%	m	1242
	Médiane 95%	H95%	m	992
Pente du bassin versant		I _{bv}	m/Km	27.49
Pente moyenne de bassins versant		I _m	m/km	109.06
Indice de pente globale		I _g	m/km	17.59
Indice de pente moyenne du cours d'eau		I _{pm}	m/m	25.63
Indice de pente de Roche		I _p	%	4.74
Dénivelée spécifique		D _s	m	170.72
Densité de drainage		D _d	Km/Km ²	0.5
Densité hydrographique		F	Km ⁻²	0.17
Coefficient de torrentialité		C _t	/	0.085
Temps de concentration		T _c	Heurs	6.65
Vitesse de ruissellement		V _r	Km/h	5.68

III.2 Etude des crues

L'analyse fréquentielle en hydrologie est une méthode statistique employée pour anticiper les occurrences futures des crues. Habituellement, l'évaluation des crues se fonde sur les données hydrométriques, pour autant qu'elles soient accessibles pour le bassin versant concerné. En l'absence de telles données, une approche alternative implique l'utilisation de modèles et de formules empiriques qui se fondent sur les données pluviométriques.

On peut estimer le débit de crue fréquentielle du bassin versant en utilisant deux méthodes différentes

- **Série d'observation de la station hydrométrique**

Cette méthode s'appuie sur l'exploitation des données de débit historiques collectées à une station hydrométrique dans le bassin versant en question. À partir de ces données, des analyses statistiques sont entreprises pour estimer les débits de crue fréquentielle en utilisant diverses techniques telles que la méthode des moments, la méthode de la loi de Gumbel, la méthode de la loi de Pearson III, et d'autres encore.

- **Méthode de GRADEX**

La méthode GRADEX propose une alternative lorsque les données hydrométriques sont limitées. Elle repose sur une relation empirique entre les précipitations et les débits de crue observés dans un bassin versant similaire, permettant ainsi de transférer ces informations au bassin d'étude en ajustant les données de précipitation en fonction des différences de caractéristiques telles que la surface, la pente, la géologie, etc.

Ces deux méthodes ont pour but d'estimer les débits de crue fréquente en utilisant des approches probabilistes et statistiques. Cependant, il est crucial de souligner que les résultats issus de ces méthodes peuvent comporter des incertitudes et nécessitent une interprétation prudente.

L'objectif principal de l'analyse des crues est de mieux appréhender les processus hydrologiques impliqués et d'acquérir des données précieuses pour la gestion des ressources en eau, la planification des infrastructures, la mise en place de mesures d'atténuation des risques et l'élaboration de plans d'urgence. Ces études sont également fondamentales pour concevoir des dispositifs de protection contre les crues, tels que des digues, des canaux de dérivation ou des systèmes de drainage.

III.2.1 Présentation des stations utilisées dans l'étude des crues

Pour analyser les crues, on se sert de diverses stations de mesure afin de recueillir des informations hydrologiques et météorologiques. Voici quelques-unes des stations fréquemment employées à cette fin

- **Stations pluviométrique**

Cette station est spécifiquement conçue pour mesurer les quantités de précipitations. Elle utilise des jauges ou des capteurs pour enregistrer la pluviométrie sur une période donnée. Les données pluviométriques sont cruciales pour évaluer les apports en eau dans un bassin versant et prévoir les crues.

- **Stations hydrométriques**

Cette station est utilisée pour les mesures de débit. Elle est essentielle pour la surveillance et la collecte de données hydrologiques, qui sont utilisées dans l'analyse des crues, la gestion des ressources en eau et d'autres études liées aux systèmes hydriques.

Tableau 24 : les différentes stations utilisées

Code de la station	Nom de la station	Type de la station	Période d'observation
070704	Ain mimoun	Station pluviométrique	1977-2020
070702	Barrage Foum El Gueiss	Station hydrométrique	1971-2009

Ces deux stations sont positionnées stratégiquement dans le bassin versant d'Oued Boughegal et dans les zones sujettes aux inondations afin de recueillir des données en temps réel. Elles fournissent des informations précieuses pour la gestion des crues. Les données collectées par ces stations alimentent l'analyse, la modélisation et la prévision des crues, ce qui aide à prendre des décisions éclairées en matière de gestion des risques d'inondation.

III.2.2 Étude des crues fréquentielles (Station Foum el gueiss)

Après avoir examiné différentes distributions de probabilité, comme la loi de Gumbel et la loi log-normale, l'analyse fréquentielle en hydrologie permet d'évaluer les quantiles associés à des périodes de retour spécifiques, telles que 5, 10, 20, 50, 100 et 1000 ans. Cette approche statistique repose sur des calculs probabilistes qui se basent sur l'historique des événements passés pour anticiper les fréquences d'occurrence à venir.

Ci-dessous est affichée la série des débits maximaux annuels enregistrés à la station hydrométrique de foum el gueiss :

Tableau 25 : Série des débits maximaux annuels prise de la station hydrométrique (Source : ANRH Alger).

Année	Q max (m ³ /s)	Année	Q max (m ³ /s)
1971	35.99	1991	10.31
1972	37.73	1992	13.21
1973	12.66	1993	1.48
1974	1.82	1994	1.93
1975	2.68	1995	0.82
1976	5.73	1996	4.60
1977	10.73	1997	0.72
1978	7.54	1998	9.24

1979	2.23	1999	2.02
1980	7.82	2000	4.68
1981	2.34	2001	6.50
1982	6.89	2002	0.57
1983	21.32	2003	4.87
1984	1.45	2004	2.67
1985	4.24	2005	10.17
1986	7.64	2006	9.08
1987	3.24	2007	6.92
1988	3.42	2008	2.54
1989	6.11	2009	9.13
1990	9.09		

III.2.2.1 Sélection du modèle de fréquence

• L'exactitude des conclusions tirées d'une analyse fréquentielle repose sur le choix approprié du modèle de fréquence, en particulier de son type. Bien que diverses approches puissent aider à orienter ce choix, il n'existe malheureusement pas de méthode universelle et infaillible.

• À partir d'un échantillon de n observations, on élabore un histogramme de la fréquence des événements, ainsi qu'une courbe de fréquence cumulée de non-dépassement. Lorsque le nombre d'observations n devient important, on cherche à déterminer la loi de distribution de la population. Les fréquences se transforment alors en densités de probabilité.

Parmi les modèles d'ajustement, nous avons :

- **Loi normale**

Un modèle fréquentiel où les valeurs observées pour une population donnée gravitent autour de la moyenne de l'échantillon. Ainsi, les valeurs qui s'écartent de cette moyenne sont peu fréquentes. Cette loi est applicable aux précipitations annuelles, aux débits et au volume de stockage des réservoirs.

- **Loi log-normale**

Une variation de la loi normale où les facteurs agissent de manière multiplicative plutôt qu'additive. Elle s'applique aux débits maximum annuels, aux précipitations journalières et annuelles, ainsi qu'aux volumes de ruissellement mensuels et annuels.

- **Loi de Gumbel**

Aussi appelée loi double exponentielle, elle est asymétrique et utilisée pour estimer les valeurs extrêmes des variables hydrologiques, en se basant sur le débit maximum annuel.

- **Pearson type III (Gamma)**

Cette loi dépend des débits maxima annuels, des précipitations journalières et annuelles, ainsi que des volumes de ruissellement mensuels et annuels.

- **Loi de Goodrich**

Elle dépend des valeurs moyennes annuelles (débits, précipitations...).

Les lois d'ajustement choisies sont :

- La loi de Gumbel (droite de Henry)
- La loi log-normale (droite de Galton).

III.2.2.1.1 Ajustement de la série à la loi de GUMBEL

La loi de Gumbel est couramment utilisée pour décrire les distributions des valeurs extrêmes. En fait, elle représente la forme limite de la distribution de la valeur maximale d'un échantillon de n valeurs. Étant donné que le maximum annuel d'une variable est considéré comme le maximum de 365 valeurs journalières, il est essentiel que cette loi puisse caractériser les séries de maxima annuels.

La forme suivante est utilisée pour représenter la fonction de répartition :

$$F(x) = e^{-e^{\frac{x-\beta}{\alpha}}}$$

La variable réduite u de Gumbel est définie par l'expression suivante :

$$u = \frac{x - \beta}{\alpha}$$

Alors : $f(x) = e^{-e^u}$

Dans cette loi, α et β sont les paramètres. α représente la dispersion caractéristique, tandis que β correspond au mode, c'est-à-dire la valeur la plus probable. Les paramètres de la loi de Gumbel peuvent être estimés grâce à la méthode des moments.

Tel que : $\alpha = 0.78 \bar{x}$

$$\beta = \bar{x} - 0.45\sigma$$

Avec :

\bar{x} : La moyenne de l'échantillon.

σ : L'écart type de l'échantillon.

$F(x)$: Probabilité au non dépassement.

La variable réduite u de Gumbel se calcule par :

$$u = -\log(-\log F(x))$$

Le logiciel HYFRAN a servi à ajuster la série à la loi de Gumbel, et les résultats sont synthétisés dans le tableau présenté ci-dessous :

Tableau 26 : Résultats d'ajustement à la loi de Gumbel de la station

Période de retour (ans)	Probabilité de fréquence (q)	Débit max jour (m3/s)	Ecart type	Intervalle de confiance
1000.0	0.9990	47.7	7.54	32.9 - 62.4
200.0	0.9950	37.4	5.84	26.0 - 48.9
100.0	0.9900	33.0	5.11	23.0 - 43.0

50.0	0.9800	28.6	4.39	20.0 - 37.2
20.0	0.9500	22.7	3.44	15.9 - 29.4
10.0	0.9000	18.1	2.72	12.8 - 23.4
5.0	0.8000	13.3	2.01	9.40 - 17.3

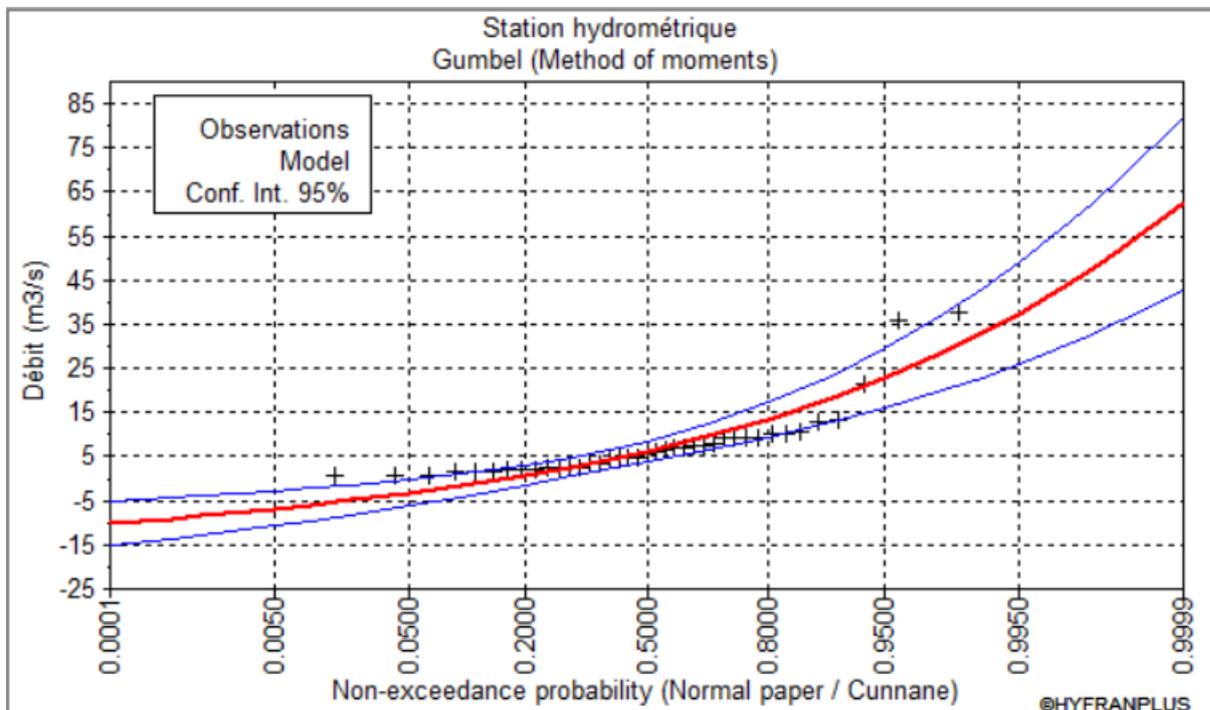


Figure 9 : Représentation graphique de la loi de Gumbel de la station foug el guéiss

(Source : HYFRAN)

Le tableau ci-dessous illustre la comparaison entre les caractéristiques de l'échantillon et celles de la loi de Gumbel.

Tableau 27 : Comparaison des caractéristiques de la loi de Gumbel et de l'échantillon.

Paramètres	Caractéristiques de la loi	Caractéristiques de l'échantillon
Minimum	Aucun	0.57
Maximum	Aucun	37.7
Moyenne	7.49	7.49
Standard deviation	8.14	8.14
Mediane	6.15	5.73
Coefficient de variation (Cv)	1.09	1.09
Coefficient d'asymétrie (Cs)	1.14	2.63
Coefficient d'aplatissement (Ck)	2.40	9.06

III.2.2.1.2 Ajustement à la loi Log Normale (Loi de Galton)

On peut dire qu'une Variable aléatoire x suit une distribution Log Normale si la transformation $y = \ln(x)$ donne une distribution normale. La loi de Galton découle de la loi normale, mais devient asymétrique suite à un changement de variable.

La fonction de répartition de la distribution Log Normale est exprimée par :

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u e^{-\frac{1}{2}u^2} du$$

Avec :

$$u = \frac{\ln x - \ln \bar{x}}{\sigma \ln x}$$

Le logiciel HYFRAN a été utilisé pour ajuster la série à la loi Log Normale, et les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau 28 : Résultats d'ajustement à la loi log normale de la station

Période de retour (ans)	Probabilité de fréquence (q)	Débit max jour (m3/s)	Ecart type	Intervalle de confiance
1000.0	0.9990	98.2	37.2	25.2 - 171
200.0	0.9950	59.5	19.5	21.3 - 97.7
100.0	0.9900	46.6	14.2	18.9 - 74.4
50.0	0.9800	35.7	9.93	16.3 - 55.2
20.0	0.9500	24.0	5.79	12.6 - 35.3
10.0	0.9000	16.8	3.57	9.84 - 23.8
5.0	0.8000	11.0	2.00	7.04 - 14.9

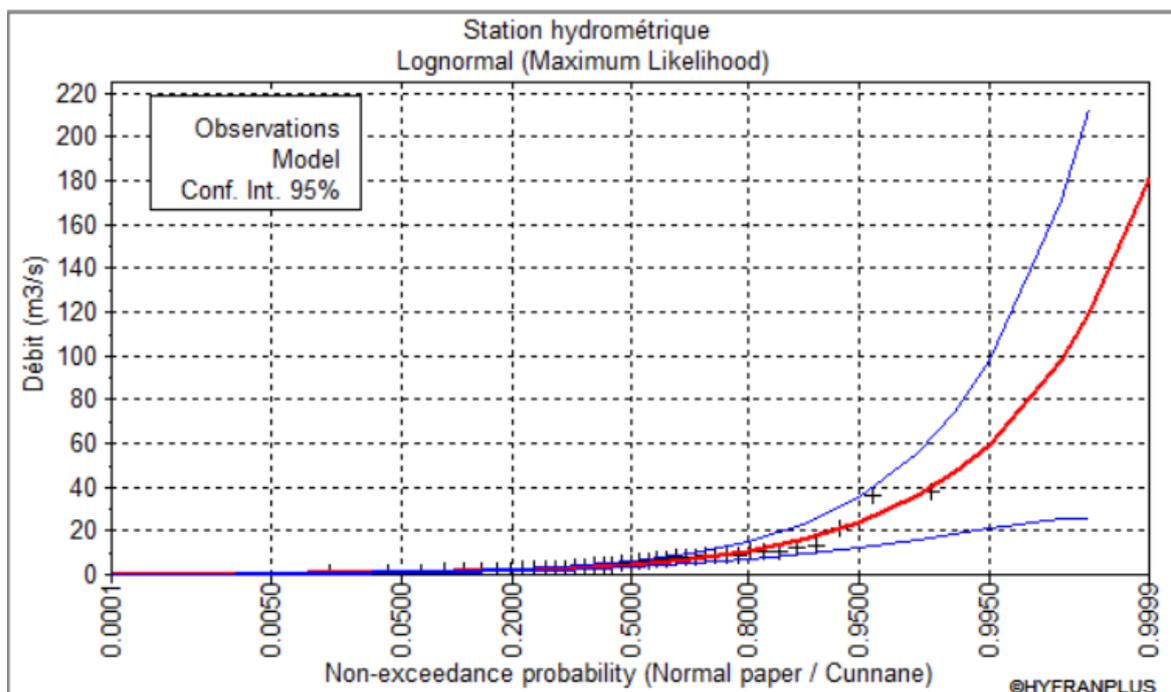


Figure 10 : Représentation graphique de la loi log normale de la station

(Source : HYFRAN)

Les caractéristiques sont comparées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 29 : Comparaison des caractéristiques de la loi log normale et de l'échantillon

Paramètres	Caractéristiques de la loi	Caractéristiques de l'échantillon
Minimum	0	0.57
Maximum	Aucun	37.7
Moyenne	7.76	7.49
Standard deviation	9.78	8.14
Mediane	4.82	5.73
Coefficient de variation (Cv)	1.26	1.09
Coefficient d'asymétrie (Cs)	5.78	2.63
Coefficient d'aplatissement (Ck)	96.6	9.06

III.2.2.1.3 Choix de la loi d'ajustement

Souvent, il y a des différences entre les fréquences expérimentales des valeurs observées et celles calculées à partir d'une fonction de répartition donnée. Bien que l'ajustement graphique soit une première étape importante, il n'est pas suffisant pour déterminer définitivement la loi théorique appropriée. Pour choisir la meilleure adéquation possible, on utilise un test statistique d'adéquation qui permet de comparer différentes lois. Les tests les plus couramment utilisés à cet effet sont le test du χ^2 (chi-carré) et le test de Kolmogorov-Smirnov.

- **Ajustement graphique visuelle**

Les graphiques affichent les résultats obtenus, mettant en évidence les probabilités empiriques et théoriques des distributions Gumbel et log-normale via le logiciel Hyfran. À première vue, il est difficile de déterminer visuellement quel ajustement est le plus approprié, d'où la nécessité d'une analyse statistique pour prendre une décision éclairée.

- **Le test d'adéquation de χ^2**

L'objectif d'un test d'adéquation (ou d'ajustement) est de vérifier si le modèle sélectionné correspond bien aux données observées. En d'autres termes, il s'agit de mettre en place une procédure de test pour évaluer si l'hypothèse selon laquelle les observations suivent une distribution spécifique est justifiée. Le test le plus fréquemment utilisé à cet effet est le test du χ^2 (chi-carré).

Pour prendre une décision quant au choix de la distribution, nous comparons généralement les valeurs de χ^2 calculée et χ^2 théorique (tabulé) à un niveau de risque de 5%, ce qui correspond à un seuil de signification de 95%. Cette comparaison nous permet de déterminer si les divergences observées entre les fréquences empiriques et théoriques sont statistiquement significatives. Une valeur de χ^2 calculée supérieure à celle de χ^2 théorique suggère un écart notable entre les données observées et la distribution théorique envisagée.

Les valeurs de χ^2 théorique (tabulé) sont extraites de la table de χ^2 en fonction des degrés de liberté (γ) et du niveau de risque (α), généralement fixé à 5%. Le test de Khi carré (χ^2) utilise un seuil de signification α standard de 5% et un degré de liberté (γ) (Touaibia, 2015).

Pour interpréter les résultats du test du χ^2 :

- Si χ^2 calculée > χ^2 théorique (tabulé) : On refuse la loi d'ajustement
- Si χ^2 calculée < χ^2 théorique (tabulé) : La loi d'ajustement sera retenue

Les résultats du test du χ^2 ont été obtenus à l'aide du logiciel HYFRAN et sont présentés dans le tableau ci-dessus.

Tableau 30 : Résultats du test de χ^2 de la station Hydrométrique

Loi de distribution	Degré de liberté γ	Nombre de classe	χ^2 calculée	χ^2 théorique (tabulé)
Gumbel	5	8	14.13	11.07
Lognormal	5	8	5.10	11.07

D'après le test de χ^2 les deux lois d'ajustements sont justes et fiables, on choisit la loi Log Normal elle est adéquate pour présenter la série de débit.

III.2.3 Détermination des débits maximums fréquentiels en utilisant la méthode de GRADEX

III.2.3.1 Description de la méthode

Le Gradex est une approche hydro-pluviométrique probabiliste utilisée pour estimer les débits de crues exceptionnelles sur une période de retour allant de 100 à 10000 ans. Cette méthode, développée par Guillot & Durand en 1969, est adaptée à des bassins versants de taille variable, allant de quelques dizaines à plusieurs milliers de kilomètres carrés, qui reçoivent des précipitations relativement uniformes sur le plan spatial.

En se basant sur les données pluviométriques, la méthode Gradex représente une avancée significative par rapport aux approches traditionnelles de prédétermination des crues, qui se limitent au traitement statistique des débits observés uniquement, comme le souligne Garavaglia en 2011.

III.2.3.2 Principe de la méthode

La méthode du GRADEX repose sur l'idée que lorsque le débit atteint un certain seuil, le sol devient saturé. Ce seuil, appelé débit seuil ou point pivot, peut varier selon les caractéristiques du sol et du bassin versant. Ainsi, pendant une période de base de ruissellement (également connue sous le nom de durée caractéristique) D , chaque augmentation de précipitation entraîne une augmentation équivalente du débit.

Cette méthode utilise les données climatologiques historiques pour inférer le comportement asymptotique de la loi de probabilité des volumes de crues rares à partir de la loi de probabilité des cumuls de pluies extrêmes. Pour les crues avec une période de retour décennale, la valeur moyenne de la capacité de rétention du bassin tend à se stabiliser.

Le GRADEX fournit une méthode de calcul cohérente et plausible en se basant sur une approche fréquentielle des précipitations intenses, qu'elles soient locales ou régionales. Cette approche repose principalement sur un paramètre lié à l'écart-type des fortes précipitations, appelé P_{jmax} (précipitation maximale journalière). Le GRADEX, qui est un invariant climatologique local dépendant de la situation géographique, joue un rôle central dans cette méthode.

III.2.3.3 Hypothèses de la méthode

Le principe fondamental de cette méthode repose sur l'existence d'une relation entre la distribution des débits et celle des précipitations qui les ont générés. Trois hypothèses clés sont énoncées par (Meddi et Zeroual en 2018) :

- **Hypothèse N° 1**

La distribution des précipitations sur le bassin est décrite asymptotiquement par une loi de Gumbel ou une loi exponentielle, en fonction du type d'échantillonnage utilisé. Le Gradex est alors représenté par la pente de la fonction de répartition sur un graphique de la pluie par rapport au logarithme de la période de retour.

- **Hypothèse N° 2**

Le déficit d'écoulement, défini comme la différence entre le volume de précipitations et le volume d'eau écoulé à l'exutoire du bassin pendant un intervalle de temps donné, n'augmente plus en moyenne au-delà d'une certaine valeur de pluie. Autrement dit, une fois que le bassin est saturé, la distribution du déficit d'écoulement devient indépendante de la valeur de la pluie ou du débit. Cette hypothèse se traduit graphiquement par un parallélisme entre la fonction de répartition des précipitations et celle des écoulements, avec un point de départ nommé point pivot, généralement fixé à une période de retour T_p comprise entre 10 et 50 ans selon le bassin versant considéré.

- **Hypothèse N° 3**

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

III.2.3.4 Etapes de la méthode

Choisir le pas de temps n heures (généralement égale à la moyenne des temps de base des hydrogrammes de crues disponibles, Pour la commodité des calculs on retiendra une valeur très arrondie, par exemple 2, 4, 6 ... 48 heures.).

Ajuster par la loi de Gumbel des pluies maximales journalières.

- Calculer le Gradex des précipitations « a » (pente de la droite de Gumbel).

$$p(mm) = a\mu + b$$

Avec :

- μ : Variable réduite de Gumbel.

Ajustement de la série des débits observés à la loi de Gumbel et déterminer le débit décennal (point pivot de l'extrapolation des débits).

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

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

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

$$Q(\mu\%) = a * \mu + b'$$

Avec :

a : Gradex de la pluie ;

μ : Variable réduite de Gumbel.

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

$$F = \frac{1}{1 - T}$$

▪Pour T=10 ans :

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

▪Tracer la droite de l'équation $Q(\mu\%) = a * \mu + b'$ sur le même graphe que l'ajustement de P_{jmax} .

▪Ensuite tirer les Q pour chaque période de retour (en mm). Puis Exprimer ces débits en m³/s par la formule :

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

Calcul de débit de pointe :

Calculer sur les hydrogrammes des crues observées le rapport « CP » « coefficient de pointe » :

$$Cp = \frac{Q_{max}}{Q_{moy}}$$

$$QP(m^3 / s) = Cp * Q(m^3 / s)$$

Remarque : Si on n'a pas d'enregistrements des crues dans le bassin étudié, on estime par analogie avec d'autre bassins voisins et de même grandeur le temps de base et le débit décennal.

III.2.3.5 Application de la méthode de GRADEX

Nous allons mettre en œuvre la méthode du GRADEX à la station pluviométrique de Ain Mimoune. Cette approche nous permettra d'évaluer les débits de crues exceptionnelles en utilisant les données pluviométriques de cette station.

De plus, nous appliquerons également la méthode du GRADEX à d'autres stations pluviométriques afin d'extrapoler les débits maximums et de les comparer entre toutes les stations.

Tableau 31 : Répartition des précipitations maximales journalières prise de la station Ain mimoune (Source :ANRH ALGER)

Année	P max (mm)	Année	P max (mm)
1977	25.5	1999	38.1
1978	58.9	2000	37.2
1979	36.7	2001	50
1980	36.9	2002	45.5
1981	31.8	2003	26
1982	54.4	2004	41.5
1983	49	2005	9.5
1984	6.5	2006	43.3

1985	33.5	2007	37.4
1986	34.4	2008	40
1987	46.6	2009	47.6
1988	37.3	2010	36.8
1989	36.8	2011	34.3
1990	54.9	2012	48
1991	116.9	2013	37
1992	33.7	2014	88
1993	42.9	2015	48.5
1994	48.8	2016	23
1995	41	2017	77
1996	30.7	2018	42.2
1997	23.8	2019	31.2
1998	60.9	2020	33.7

Nombres d'heures : n=24h.

Ajustement par la loi de Gumbel des pluies maximales journalières de la station pluviométrique de Ain mimoune .

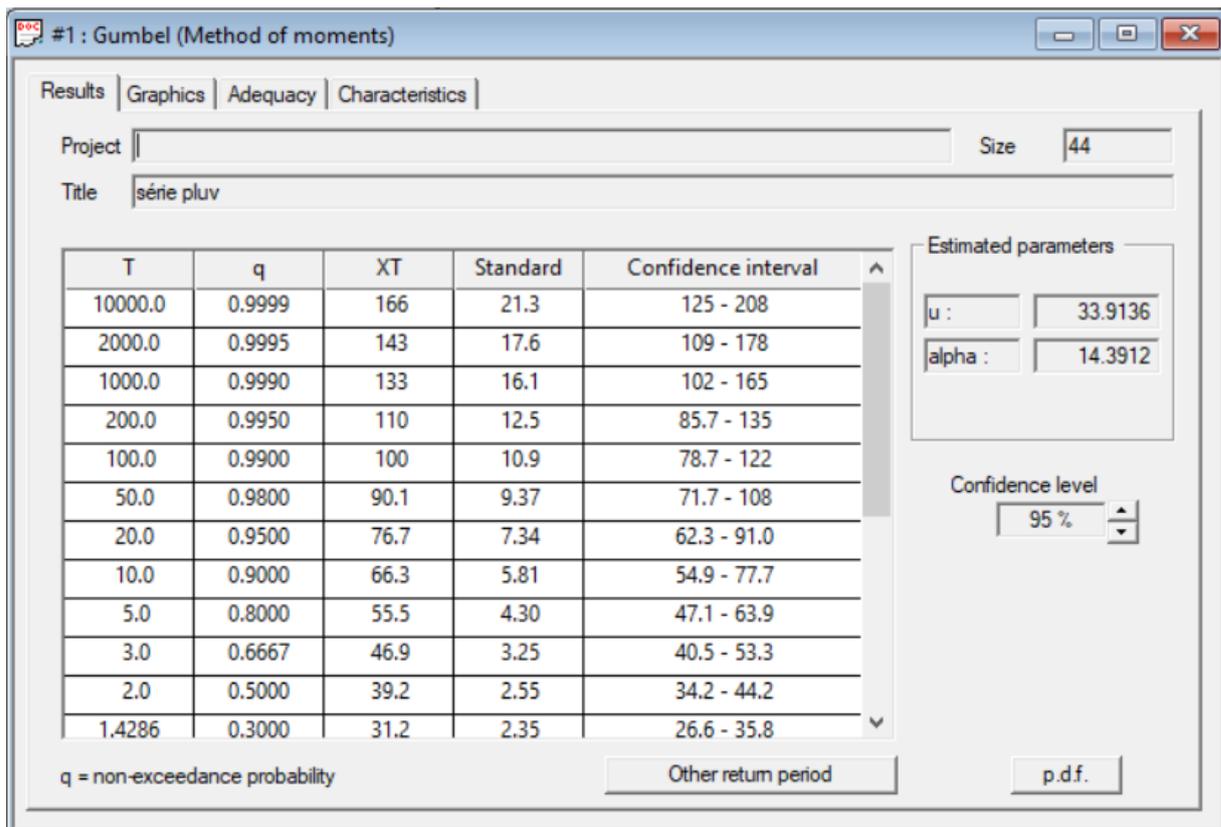


Figure 11 : Résultats d'ajustement par la loi de Gumbel des pluies maximales journalières de la station pluviométrique

Tableau 32 : Résultats d'ajustement par la loi de Gumbel des pluies maximales journalières de la station pluviométrique

Période de retour (ans)	Probabilité de fréquence (q)	Précipitation max jour (mm)	Ecart type	Intervalle de confiance
1000.0	0.9990	133	16.1	102 - 165
200.0	0.9950	110	12.5	85.7 - 135
100.0	0.9900	100	10.9	78.7 - 122
50.0	0.9800	90.1	9.37	71.7 - 108
20.0	0.9500	76.7	7.34	62.3 - 91.0
10.0	0.9000	66.3	5.81	54.9 - 77.7
5.0	0.8000	55.5	4.30	47.1 - 63.9

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

$$p(mm) = 14.39 \mu + 33.91$$

Donc le Gradex : $b=14.39$

$$a=33.91$$

Le débit décennal de la station hydrométrique de Foum El Gueiss est :

$$Q_{10\text{ans}}=16.8 \text{ m}^3/\text{s}$$

Conversion du débit décennal (m^3/s) en lame d'eau (mm)

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

$$R(mm) = 79.62\text{mm}$$

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

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

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

$$\mu=-\ln(-\ln(f))=2.25$$

On calcule maintenant les $b'=10.53$

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

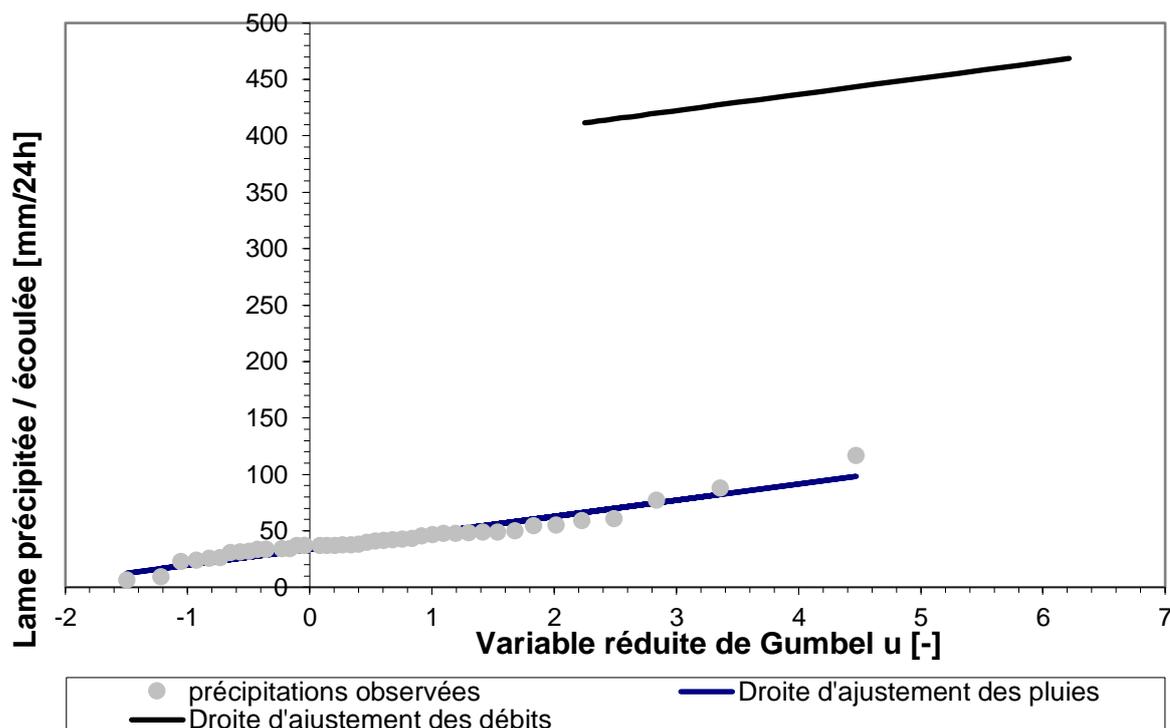


Figure 12 : Graphique d'ajustement des pluies et la droite d'extrapolation des débits

Tableau 33 : : Résultat de calcul pour la station de Ain Mimoun pour les différentes périodes de retour

Période de retour	Variable réduite de gumbel	pj max	Q
500.0	6.21	123.3	99
100.0	4.60	100.1	94
50.0	3.90	90.1	92
20.0	2.97	76.7	89
10.0	2.25	66.3	87

III.2.3.6 Interprétation des résultats

D'après les résultats de calcul des débits avec l'utilisation de la méthode de GRADEX, on trouve que la station pluviométrique de Ain mimoun. donne un débit centennal supérieur aux autres stations, donc le débit de projet pour l'aménagement d'oued Boughegal est de **94 m³/s**.

III.2.4 Hydrogramme de crue

L'hydrogramme de crue est une représentation graphique qui illustre la variation du débit d'un cours d'eau au fil du temps pendant une crue.

Dans un hydrogramme de crue, plusieurs éléments peuvent être distingués :

- Une phase ascendante, appelée courbe de concentration, caractérisée par le temps de montée.
- Le pic de l'hydrogramme, correspondant au débit maximum atteint.
- Une phase descendante, nommée courbe de décrue, caractérisée par le temps de décrue.

- Le temps total, composé du temps de montée et du temps de décrue, est appelé temps de base.

Pour tracer un hydrogramme de crue, la méthode de Sokolovsky est utilisée. Cette méthode implique le tracé de la courbe à partir de deux équations paraboliques, l'une pour la phase ascendante de la crue et l'autre pour la phase descendante.

$$\text{Pour la montée : } Q(t) = Q_{max} \left[\frac{t}{T_c} \right]^n$$

$$\text{Pour la décrue : } Q(t) = Q_{max} \left[\frac{T_b-t}{T_d} \right]^m$$

Avec :

- Q(t) : Débit à l'instant t (m³/s)
- Q_{max} : Débit maximal de la crue (m³/s)
- T_m : temps de montée (h) **T_m=T_c**
- T_d : temps de décrue (h) **T_d=δ *T_m**
- T_b : temps de base (h) **T_b=T_m+T_d**
- m,n : puissances des paraboles (m=3 ; n=2)

Tableau 34 : Valeur du coefficient de forme de l'hydrogramme de crue δ.

Description du cours d'eau	Valeur de " δ "
Petits cours d'eau et vallons dans des bassins versants dénudés et faiblement perméables.	2,0 – 2,5
Petits cours d'eau et vallons dans des bassins versants brisés ou perméables, moyens cours d'eau avec terrasses de lit majeur normales	3,0 – 4,0
Grands et moyens cours d'eau avec des terrasses de débordements étendues.	4,0 – 7,0

On prend : δ = 2

Tableau 35: : les valeurs du temps de base, montée et décrue.

Sous bassins versants	Temps de montée (h)	Temps de décrue (h)	Temps de base (h)
Bouhegal	6.65	13.3	19.95

Voici le tableau représentant l'hydrogramme de crue pour une période de retour de 100 ans aux différentes stations :

Tableau 36 : Valeurs des débits centennaux en fonction du temps pour la zone d'étude.

Temps (h)	Qmax (m ³ /s) pour période de retour 100 ans
	Stations pluviométriques
0	0.00
0.5	0.57
1	2.28
1.5	5.14
2	9.14
2.5	14.27
3	20.56
3.5	27.98
4	36.54
4.5	46.25
5	57.10
5.5	69.09
6	82.22
6.5	96.49
6.65	101.00
0.5	90.03
1	79.89
1.5	70.54
2	61.94
2.5	54.08
3	46.91
3.5	40.41
4	34.53
4.5	29.26
5	24.55
5.5	20.37
6	16.70
6.5	13.50
7	10.73
7.5	8.38
8	6.39
8.5	4.75
9	3.41
9.5	2.36
10	1.54
10.5	0.94
11	0.52
11.5	0.25
12	0.09
12.5	0.02
13	0.00

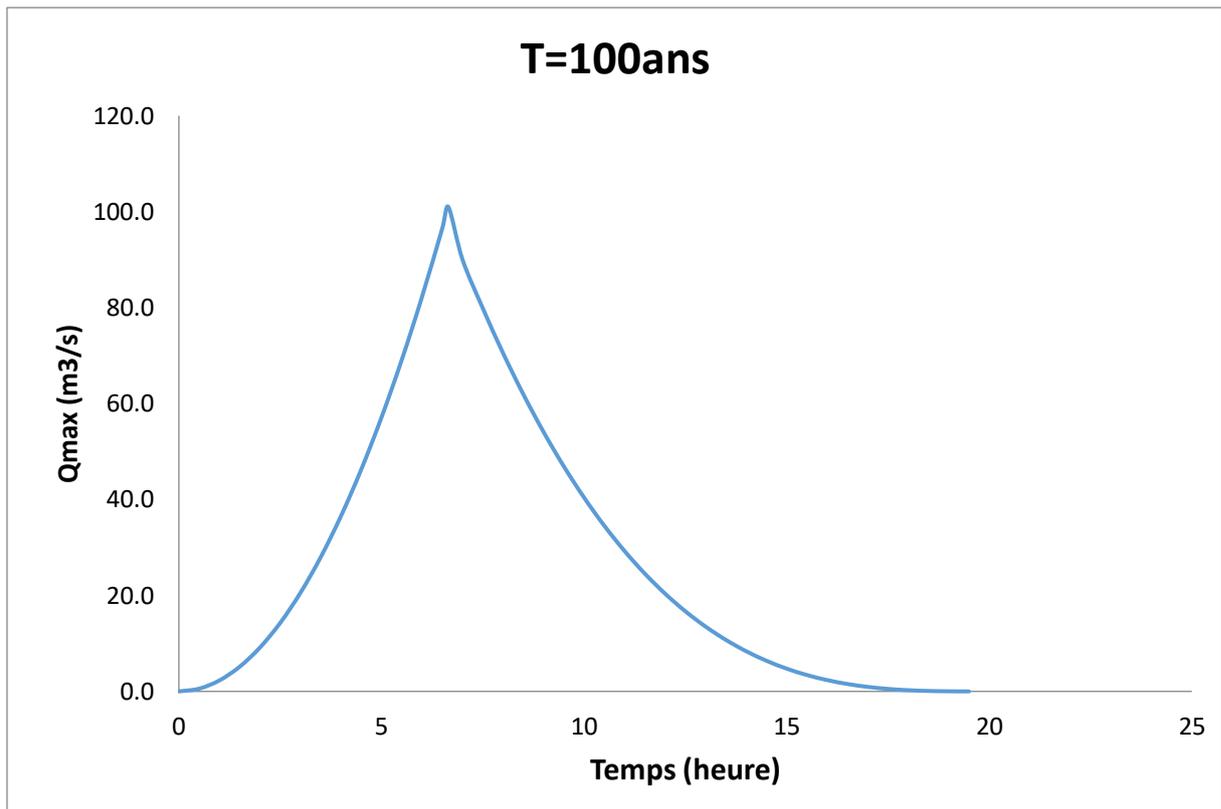


Figure 13 : Hydrogramme de crue de la zone d'étude

III.2.5 Choix de la crue du projet

La crue de projet représente le niveau de crue maximal que la structure doit pouvoir évacuer pour une probabilité donnée. Le choix de cette crue dépend principalement de plusieurs facteurs, notamment l'importance de la construction à réaliser, les éventuelles conséquences en aval, ainsi que les considérations technico-économiques liées à l'aménagement et à l'environnement.

III.2.6 Étude de transport solide

Le transport des matières solides en suspension a été au centre de nombreuses initiatives nationales visant à lutter contre la dégradation des terres cultivables, l'envasement des barrages, ainsi que les effets dévastateurs des cycles d'inondation et de désertification qu'il peut engendrer, comme souligné par De Ploey et al. (1991), cité dans Bouguerra et al. (2016).

En Algérie, le transport de matières solides dans les cours d'eau est significatif. Cependant, il reste mal quantifié dans certains oueds en raison du manque de données, notamment sur la concentration en particules fines, ainsi que de l'absence de stations de jaugeage, comme mentionné par Bouchelkia & Remini (2003). Par conséquent, l'estimation du transport solide repose souvent sur l'utilisation des formules empiriques les plus couramment employées, telles que :

- La formule de Tixéront (1960)
- La formule de Fournier (1960)
- La formule de Sogreah (1969)

- La formule de Gavrilovich (1992)
- La formule de Kasoul et al. (1997)
- La formule de Touaïbia et Achite (2003)
- Les formules de Meddi (2015).

- **Méthode de Tixeront (1960)**

Elle est représentée par la formule ci-dessous :

$$Ta = \alpha Le^{0.15}$$

Avec :

Ta : la dégradation spécifique en (T /Km2 /an).

Le : le ruissellement moyen en (m).

α : le coefficient de perméabilité fixé comme suit :

Tableau 37 : Estimation du coefficient de perméabilité.

Perméabilité du bassin versant	Valeur de α
Perméabilité élevée	8.5
Moyenne à élevée	75
Faible à moyenne	350
Faible	1400
Imperméable	3200

« Le » se calcule par les formules empiriques :

- **La formule de Samie**

$$Le = P (293 - 2.2 \times \sqrt{S})$$

Avec :

P : Pluie moyenne annuelle (m),

S : Surface du bassin versant (Km2) ;

Le : Lamme d'eau écoulée (mm).

- **La formule de Mallet et Gauthier**

$$Le = 600P(1 - 10^{-0.36P^2})$$

Avec :

P : Pluie moyenne annuelle (m),

S : Surface du bassin versant (Km2) ;

Le : Lamme d'eau écoulée (mm).

- **La formule de Turc**

$$Le = P - \frac{P}{\sqrt{\frac{P^2}{L} + 0.9}}$$

Avec :

L : coefficient de la température, tel que : $L = 300 + 25T + 0.05T^3$

T : Température moyenne annuelle.

Les résultats de calcul se résument dans le tableau suivant :

Tableau 38: Résultats de calcul de la lame d'eau écoulée.

Le (mm)	Pmoy annuelle(mm)	Formule		
		Samie	Mallet et Gauthier	Turc
Sous bassin	391.23	41595489.2	234738	389.88

Résultats de calcul de la dégradation spécifique.

Tableau 39 : Résultats de calcul de la dégradation spécifique.

	Le (mm)	α	Ta (T /Km2 /an).
Sous bassin	234738	8.5	479.35

- **Méthode d'estimation au nord Algérien**

$$Ds = 328.624Q^{-0.234}S^{-0.197}$$

Avec :

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

Q: Débit maximum (m2 /s);

S : Surface du bassin versant (Km²) ;

Les informations concernant les apports solides sont condensées dans le tableau ci-dessous

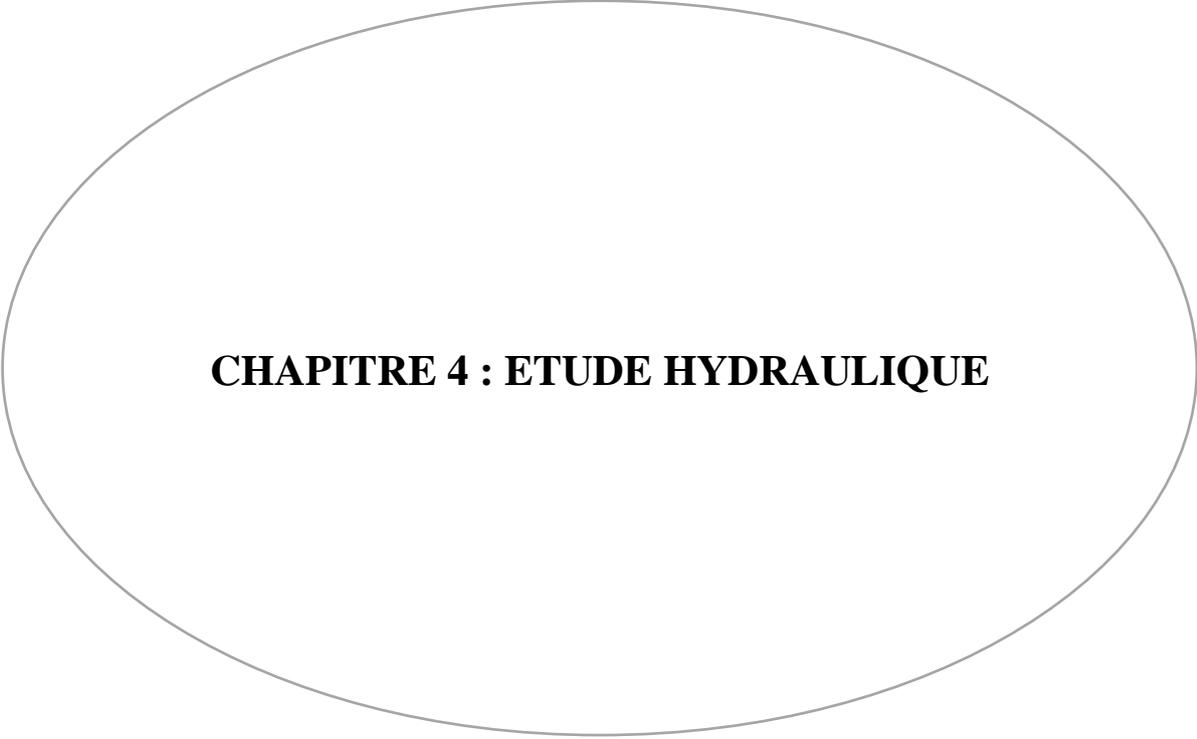
Tableau 40 : Résultats de calcul des apports solides.

	Q(m3 /s)	S(km2)	Ds (T/Km2 /an)
Oued Boughegal	94	94.23	46.35

Conclusion

L'objectif de ce chapitre est d'identifier les paramètres hydrologiques essentiels pour l'aménagement de l'oued Boughegal afin de protéger la ville de Baghai contre les crues centennales.

Pour cette analyse hydrologique, nous avons exploité les données fournies par la station hydrométrique ainsi que celles des stations pluviométriques disséminées dans le bassin versant de l'oued Boughegal. Nous avons ensuite appliqué la méthode du GRADEX pour calculer le débit centennal de la crue. En conclusion, nous avons choisi un débit de projet équivalent à $Q = 94 \text{ m}^3/\text{s}$.



CHAPITRE 4 : ETUDE HYDRAULIQUE

Introduction

Dans le cadre de la protection de la commune de Baghai, située à Khenchela, contre les risques d'inondations provenant de l'oued Boughegal, une étude hydraulique s'avère nécessaire après la détermination du débit projeté. Cette étape est cruciale pour définir correctement les dimensions de l'aménagement de l'oued Boughegal.

Dans ce chapitre consacré à l'étude hydraulique, nous examinerons en détail les principes fondamentaux de l'hydraulique. Nous nous familiariserons avec les concepts, lois et équations hydrauliques utilisées pour calculer les caractéristiques hydrauliques et géométriques de l'aménagement. Cette section nous permettra d'évaluer les risques d'inondations dans la zone d'étude et de concevoir des mesures de protection appropriées pour atténuer ces risques.

IV.1 Notions hydrauliques

Les concepts hydrauliques présentés ci-dessous revêtent une importance capitale pour appréhender les cours d'eau naturels et artificiels. Ils sont indispensables pour effectuer des calculs et des simulations visant à déterminer les caractéristiques de l'écoulement. Ces concepts peuvent être classés en deux catégories : les paramètres hydrauliques et les paramètres géométriques.

IV.1.1 Paramètres hydrauliques

Les paramètres hydrauliques représentent des variables ou des caractéristiques qui détaillent le mouvement de l'eau au sein d'un système hydraulique. Leur utilisation est essentielle pour l'analyse et l'évaluation des performances hydrauliques d'un système donné. Voici quelques exemples de paramètres hydrauliques fréquemment utilisés :

- **Débit (Q)**

Le débit représente le volume d'eau s'écoulant à travers un canal par unité de temps. C'est un paramètre crucial pour évaluer la quantité d'eau traversant un système hydraulique donné. Il se mesure généralement en mètres cubes par seconde (m^3/s) ou en litres par seconde (l/s).

- **Vitesse de l'écoulement (V)**

La vitesse de l'écoulement désigne la rapidité avec laquelle l'eau se déplace à l'intérieur du système. Cette vitesse peut fluctuer en fonction de divers facteurs tels que la configuration du canal, la pente, la rugosité de la surface, entre autres. Son évaluation est cruciale pour apprécier les capacités hydrauliques du système et le transport des sédiments. La mesure de la vitesse de l'écoulement est généralement exprimée en mètres par seconde (m/s).

- **Pente hydraulique (i)**

La pente désigne la inclinaison du terrain sur lequel l'eau s'écoule. Elle impacte la vitesse de l'écoulement et est un critère essentiel pour évaluer les caractéristiques et les performances hydrauliques d'un système donné. Cette mesure est généralement exprimée en pourcentage.

On calcule la pente par la relation suivante :

$$I = \frac{\Delta Z}{L}$$

Où :

ΔZ : c'est la différence de niveau entre les altitudes ($Z_1 - Z_2$).

L : c'est la longueur.

- **Coefficient de Manning (n)**

Le coefficient de Manning représente un paramètre décrivant la rugosité de la surface d'écoulement ou du lit d'un cours d'eau. Généralement obtenu par des méthodes expérimentales, ce coefficient varie en fonction du type de surface, qu'il s'agisse de béton, d'herbe, de graviers, etc. Il est habituellement noté "n" et ne possède pas d'unité de mesure.

Tableau 41 : Valeurs du coefficient de rugosité 'n'.

Caractéristiques du lit ou du revêtement	Valeur de la rugosité n
Canal avec revêtement en béton.	0.015
Canal en terre	0.022
Canal en enrochement	0.035
Canal en Gabion	0.030

- **Profondeur critique (h_c)**

La profondeur critique désigne la hauteur d'eau associée à un débit spécifique, à partir de laquelle l'écoulement bascule d'un régime subcritique à un régime supercritique, ou inversement.

- **Pression**

La pression désigne la force exercée par l'eau sur une surface spécifique. Elle se mesure généralement en Pascal (Pa) ou en bar. À la surface libre d'un canal, la pression est approximativement équivalente à la pression atmosphérique, soit 1 bar.

- **Poids volumique (γ_w)**

Le poids volumique de l'eau est symbolisé par :

$$\gamma_w = g\rho_w$$

- ρ_w désigne la masse volumique de l'eau et vaut 1000 kg/m^3 et

- g désigne l'accélération de la pesanteur et vaut 9.81 m/s^2 .

IV.1.2 Paramètres géométriques

Les paramètres géométriques concernent les caractéristiques physiques et dimensionnelles des éléments constitutifs d'un système hydraulique, comme les canaux, les rivières, les réservoirs et les conduites. Ils englobent la forme, la taille et la configuration géométrique du système. Voici quelques exemples de paramètres géométriques :

- **Largeur au miroir (B)**

Il s'agit de l'écart horizontal entre les parois du canal, mesuré à la surface de l'eau. Cette mesure est exprimée en mètres.

- **Profondeur de l'eau (y)**

Il s'agit de la distance verticale entre la surface libre de l'eau et le fond du canal. Cette mesure est obtenue en prenant la distance depuis la surface de l'eau jusqu'au fond du canal, et elle est exprimée en mètres.

- **Surface mouillée transversale (S)**

Il s'agit de la zone de la section transversale du canal qui est occupée par l'eau.

- **Périmètre mouillé (P)**

C'est la longueur de la bordure de la section transversale du canal qui est en contact avec l'eau.

- **Rayon hydraulique (R)**

Le rayon hydraulique se détermine en divisant la surface mouillée transversale (S) par le périmètre mouillé (P). Cet indice est fréquemment employé pour évaluer l'efficacité hydraulique d'une section transversale de canal. Il est exprimé en mètres.

$$R = \frac{S}{P}$$

- **Pente longitudinale (i)**

La pente longitudinale indique la déclivité du fond du canal dans la direction de l'écoulement.

- **Largeur au fond (b)**

C'est la mesure horizontale entre les deux parois ou les extrémités inférieures d'un canal.

IV.2 Cours d'eau

Dans les oueds et les rivières, l'eau circule à découvert en surface, souvent sans confinement artificiel. Son mouvement est influencé par divers facteurs tels que la pente, la forme du lit du cours d'eau et la rugosité de son profil hydraulique. Selon les aménagements réalisés, on distingue deux principaux types de cours d'eau :

IV.2.1.1 Cours d'eau naturels

Les cours d'eau naturels sont des voies d'eau qui se forment de manière spontanée, souvent par le processus d'érosion ou par la continuation de cours d'eau existants, comme les rivières, les fleuves ou les lacs. Ces cours d'eau sont le résultat des forces naturelles et sont généralement présents depuis une longue période.

IV.2.1.2 Cours d'eau artificiels

Les cours d'eau artificiels sont des voies d'eau façonnées par l'homme dans le dessein précis de transporter de l'eau vers une sortie spécifique. Selon la configuration géométrique de leur section transversale, différents types d'aménagements sont distingués, tels que le trapézoïdal, le rectangulaire, etc.

Différents types d'aménagements peuvent être identifiés en fonction du matériau utilisé pour leur construction :

- **Aménagements en matériaux minéraux**

L'enrochement : est une méthode d'ingénierie et de construction employée pour renforcer ou sécuriser les berges d'un cours d'eau en recourant à des roches, des pierres ou des blocs de béton.

Les gabions : sont une méthode semblable à l'enrochement, consistant en des conteneurs rectangulaires, souvent construits à partir de treillis métalliques ou de grillages, et remplis de pierres.

- **Aménagements en béton ou en métal**

Le bétonnage des cours d'eau : est une pratique de génie civil qui consiste à ériger des structures en béton le long des rives ou du lit d'un cours d'eau dans le but de le canaliser ou de le préserver de l'érosion et des inondations. Le béton est un matériau de construction composé d'un mélange de granulats, de sable et d'eau.

Les palplanches sont des panneaux métalliques enfoncés dans le sol pour ériger une barrière de protection contre l'érosion le long des berges.

- **Aménagements en végétalisation**

La végétalisation des cours d'eau est une méthode de génie biologique qui recourt à des plantes et des techniques de végétalisation pour stabiliser les berges et améliorer la qualité de l'eau le long du cours d'eau.

- **Aménagements en matériaux synthétiques**

Les géotextiles sont des matériaux synthétiques développés spécifiquement pour des applications géotechniques. Ils sont employés pour stabiliser les sols et renforcer les talus.

Les géogrilles sont des structures synthétiques en forme de grille, employées pour renforcer les sols et stabiliser les talus le long des berges.

- **Aménagements en combinant plusieurs matériaux**

L'aménagement d'un cours d'eau par le biais d'une combinaison de matériaux constitue une approche de génie civil qui intègre divers éléments tels que des roches, des matériaux synthétiques, du béton, des géotextiles, des végétaux, etc., dans le but d'atteindre des objectifs spécifiques le long du cours d'eau. Cette approche vise à tirer parti des avantages de chaque matériau pour élaborer des solutions d'aménagement plus efficaces et durables.

IV.3 Mode d'écoulement dans les Oueds

Dans les cours d'eau naturels et artificiels, l'écoulement se produit à la surface libre, caractéristique principale des rivières et des oueds. Ce type d'écoulement est largement influencé par la pente du fond du canal ou du lit du cours d'eau. Contrairement aux conduites en charge, où l'eau est confinée par des parois rigides, ici, l'eau circule librement à l'air libre.

Dans un écoulement à surface libre, le mouvement de l'eau est principalement dicté par la gravité. Lorsque l'eau se déplace en aval le long d'une pente, la force de gravité la pousse vers le bas. La pente revêt une importance capitale car elle génère une disparité de hauteur entre différents points du cours d'eau, entraînant ainsi un flux de l'amont vers l'aval.

La vitesse de l'écoulement dans un écoulement à surface libre est également tributaire de la pente du canal. Plus la pente est prononcée, plus l'eau se déplacera rapidement. À l'inverse, une pente moins marquée se traduira par un écoulement plus lent.

IV.3.1 Modes d'écoulement

Les différents modes d'écoulement à surface libre que l'on rencontre en hydraulique fluviale comprennent :

- **Écoulement permanent**

C'est un écoulement stable et continu qui persiste dans le temps avec des caractéristiques constantes de débit et de niveau d'eau. Il se produit généralement dans les rivières à débit régulier et dans les canaux bien entretenus.

- **Écoulement transitoire**

Il s'agit d'un écoulement temporaire qui varie au fil du temps en réponse à des changements de débit ou de conditions environnementales. Il peut se produire lors de crues, de marées, ou d'autres événements hydrologiques transitoires.

- **Écoulement torrentiel**

C'est un écoulement à haute vitesse et à forte turbulence qui se produit sur des pentes raides, souvent associé à des événements pluvieux intenses. Il peut être caractérisé par des débits élevés, des crues soudaines et des risques d'érosion.

- **Écoulement uniforme**

ce mode d'écoulement, la vitesse de l'eau et la profondeur sont uniformes le long d'une section transversale du cours d'eau. Cela se produit dans des canaux bien conçus où les pertes de charge sont minimales et où le débit est uniforme.

- **Écoulement non uniforme**

Contrairement à l'écoulement uniforme, cet écoulement se caractérise par des variations de vitesse et de profondeur le long de la section transversale du cours d'eau. Il peut résulter de la rugosité du lit du cours d'eau, des variations de la géométrie du canal ou des changements de débit.

IV.3.2 Régime d'écoulement

Le terme "régime d'écoulement à surface libre" désigne la catégorisation des flux qui se déroulent dans les canaux où le liquide est en contact direct avec l'atmosphère. Ces régimes

sont principalement définis par des caractéristiques hydrauliques telles que le nombre de Froude, qui permet de classer précisément le mode d'écoulement.

L'écoulement dans un canal à surface libre est soumis à plusieurs forces, notamment :

- La gravité
- La force de pression
- La force de traînée
- La force d'inertie

L'équation souvent utilisée pour représenter le nombre de Froude est :

$$f_r = \frac{V}{\sqrt{g * h}}$$

Où :

- V : est la vitesse du fluide,
- g : est l'accélération due à la gravité,
- h : est la profondeur du fluide.

Lorsque :

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

Le nombre de Reynolds est un autre paramètre adimensionnel employé dans l'analyse hydraulique. Il est fréquemment associé au nombre de Froude pour caractériser le régime d'écoulement d'un fluide. Le nombre de Reynolds (Re) représente le rapport entre les forces inertielles et les forces visqueuses dans un écoulement :

$$R_e = \frac{VL}{\vartheta}$$

Où :

- V : la vitesse d'écoulement.
- L : la longueur caractéristique
- ϑ : la viscosité cinématique du fluide

Lorsque :

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

Par conséquent, les effets du nombre de Reynolds Re, et du nombre de Froude, Fr, donnent quatre régimes d'écoulement :

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

- $Fr > 1$, $Re > 2000$: écoulement torrentiel-turbulent.

IV.4 Modélisation d'écoulement

La modélisation d'écoulement vise à comprendre le comportement des cours d'eau pendant les crues, en utilisant des outils informatiques et des données hydrologiques pour simuler leur réaction lors d'événements extrêmes. Cette approche permet d'évaluer et de gérer les risques d'inondation en proposant des aménagements pour réduire ces risques. Nous allons appliquer cette méthodologie au cas de l'oued Boughegal en utilisant le logiciel HEC-RAS, avec un débit projeté de 94 m³/s.

IV.4.1 les étapes de la simulation

La modélisation précise implique plusieurs étapes dans la simulation avec le logiciel HEC-RAS.

- **Importation des données géométriques du terrain**

Une fois que notre projet HEC-RAS est lancé et que les unités et les paramètres sont configurés, nous procédons à l'importation de la géométrie de l'oued Boughegal, y compris ses sections en travers tout au long du cours d'eau, à partir de Civil 3D vers HEC-RAS.

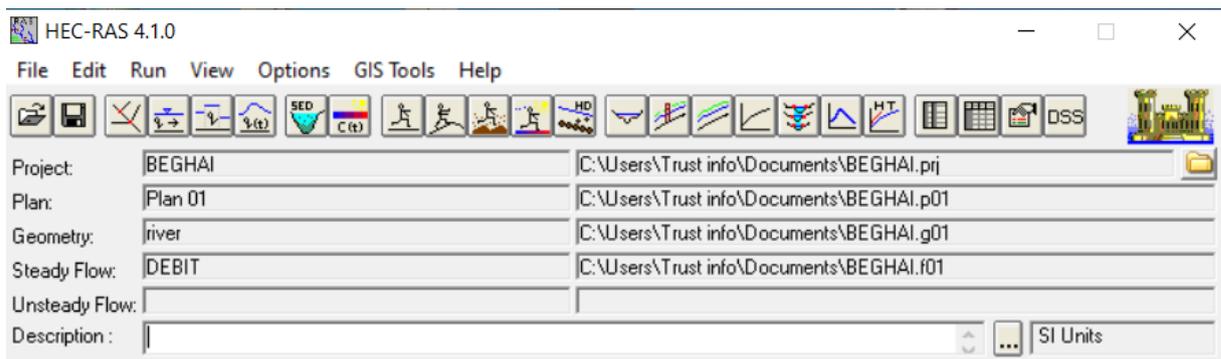


Figure 14 : Interface d'HEC-RAS

Edit Manning's n or k Values

River: oued
Reach: Site (1)
Selected Area Edit Options: All Regions

Channel n Values have a light green background

Selected Area Edit Options: Add Constant ..., Multiply Factor ..., Set Values ..., Replace ..., Reduce to L Ch R ...

River Station	Frctn (n/K)	n #1	n #2	n #3
1	2096.64	0.027	0.027	0.027
2	2050	0.027	0.027	0.027
3	2000	0.027	0.027	0.027
4	1950	0.027	0.027	0.027
5	1900	0.027	0.027	0.027
6	1850	0.027	0.027	0.027
7	1800	0.027	0.027	0.027
8	1750	0.027	0.027	0.027
9	1700	0.027	0.027	0.027
10	1650	0.027	0.027	0.027
11	1600	0.027	0.027	0.027
12	1550	0.027	0.027	0.027
13	1500	0.027	0.027	0.027
14	1450	0.027	0.027	0.027
15	1400	0.027	0.027	0.027
16	1350	0.027	0.027	0.027
17	1300	0.027	0.027	0.027
18	1250	0.027	0.027	0.027

OK Cancel Help

Figure 15 : Introduction des valeurs de Manning (terrain naturel)

- **Condition aux limites (Boundary condition)**

Dans le cadre de la modélisation hydraulique, les conditions aux limites définissent les paramètres qui influent sur le comportement de l'eau à la périphérie de la zone de modélisation.

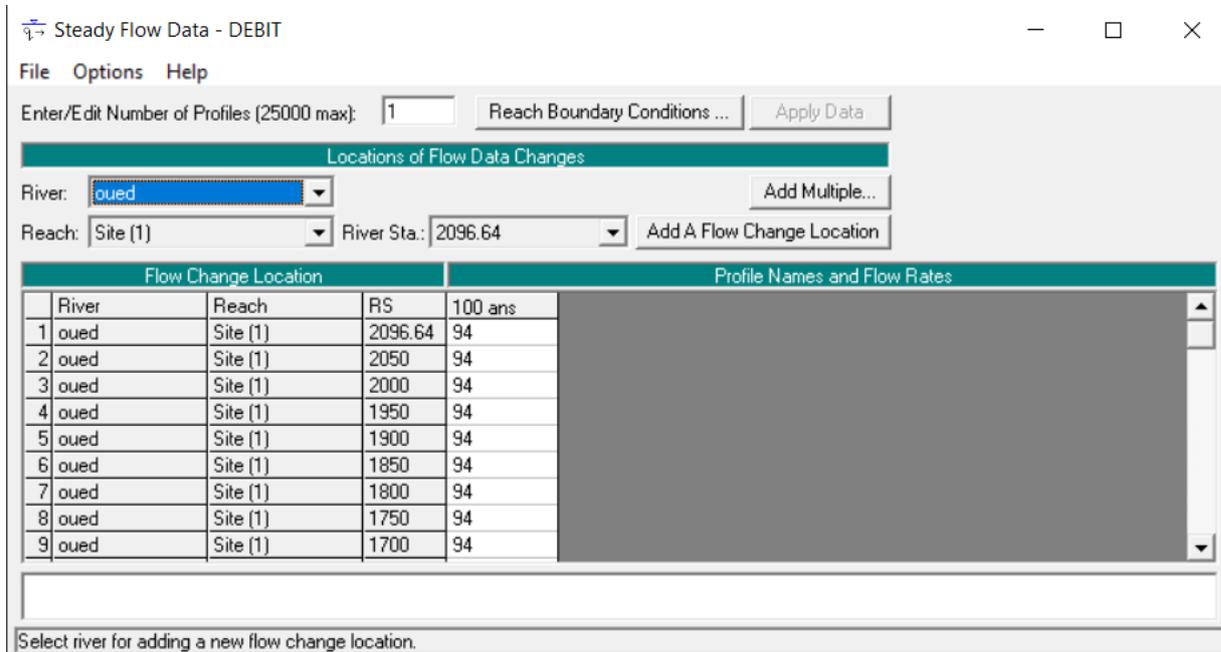


Figure 16 : Inser le débit

Steady Flow Boundary Conditions

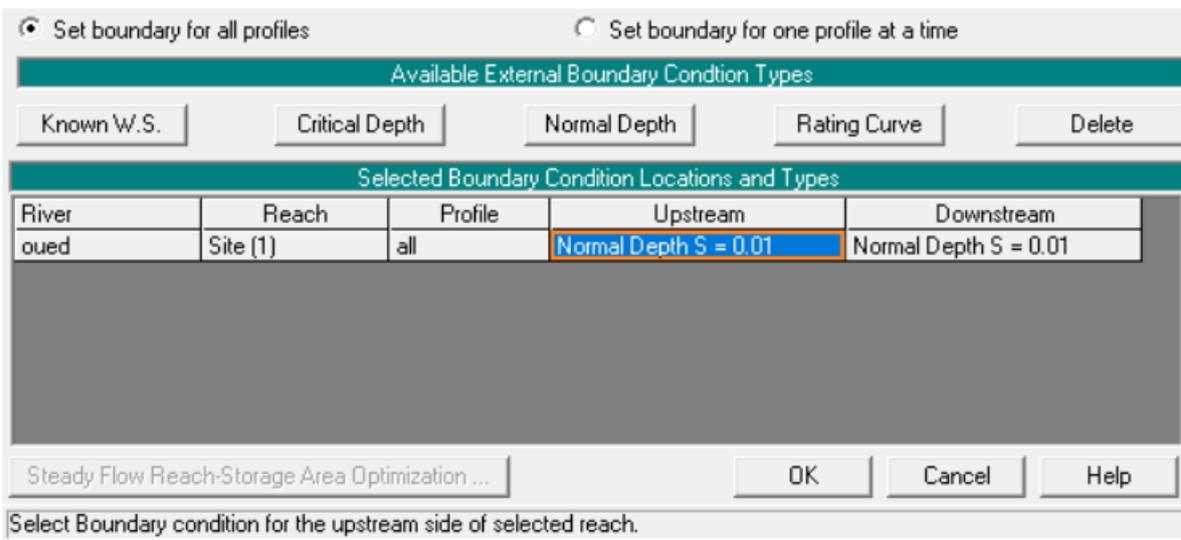


Figure 17 : Conditions aux limites

- **Simulation**

On lance la simulation après la vérification de tous les données.

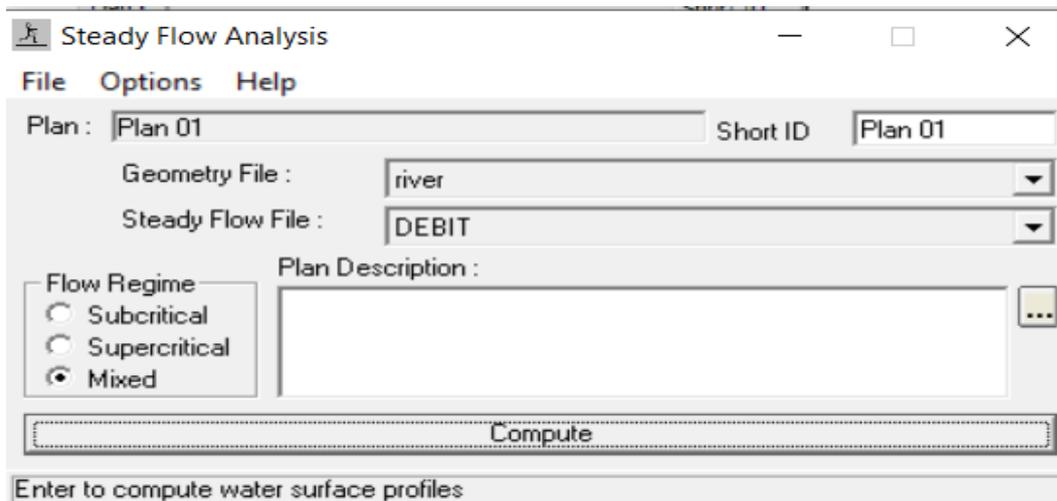


Figure 18 : Lancement de la simulation

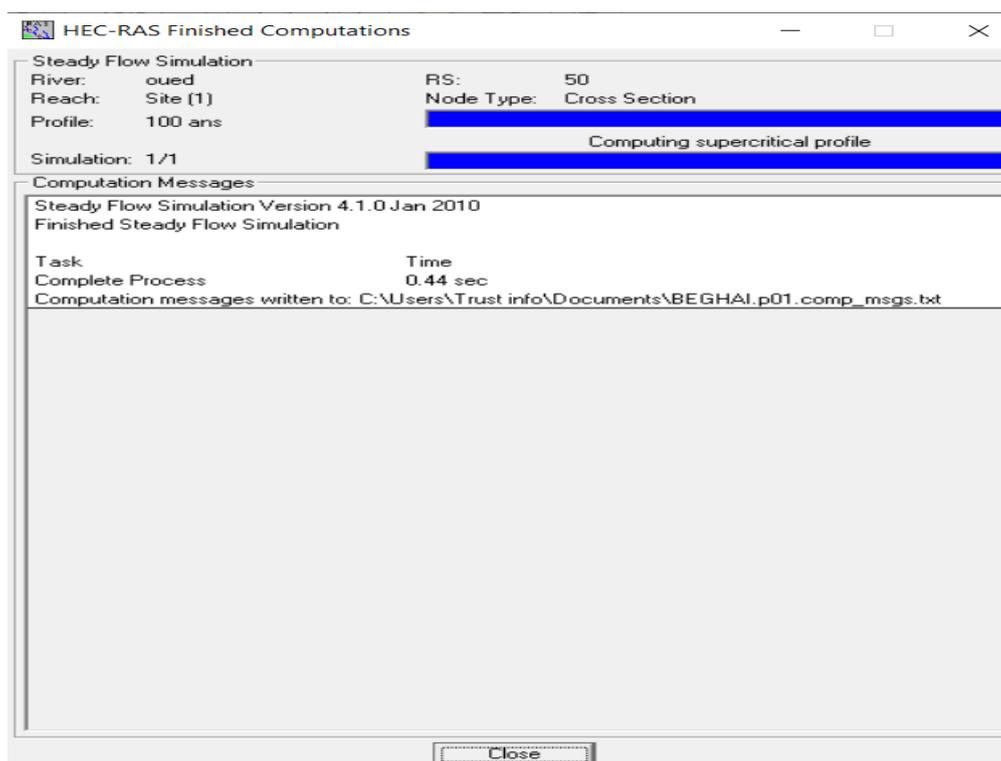


Figure 19 : Fin de simulation

IV.4.2 Résultats de la simulation

Les données obtenues à partir de la simulation avec HEC-RAS offrent une compréhension précieuse de l'écoulement stable dans un système fluvial ou hydraulique spécifique. Cette simulation permet une analyse détaillée de la répartition des vitesses, des niveaux d'eau et des débits dans le réseau hydrographique, ce qui facilite la prévision des risques d'inondation.

- **Vue 3D de l'oued avant l'aménagement**

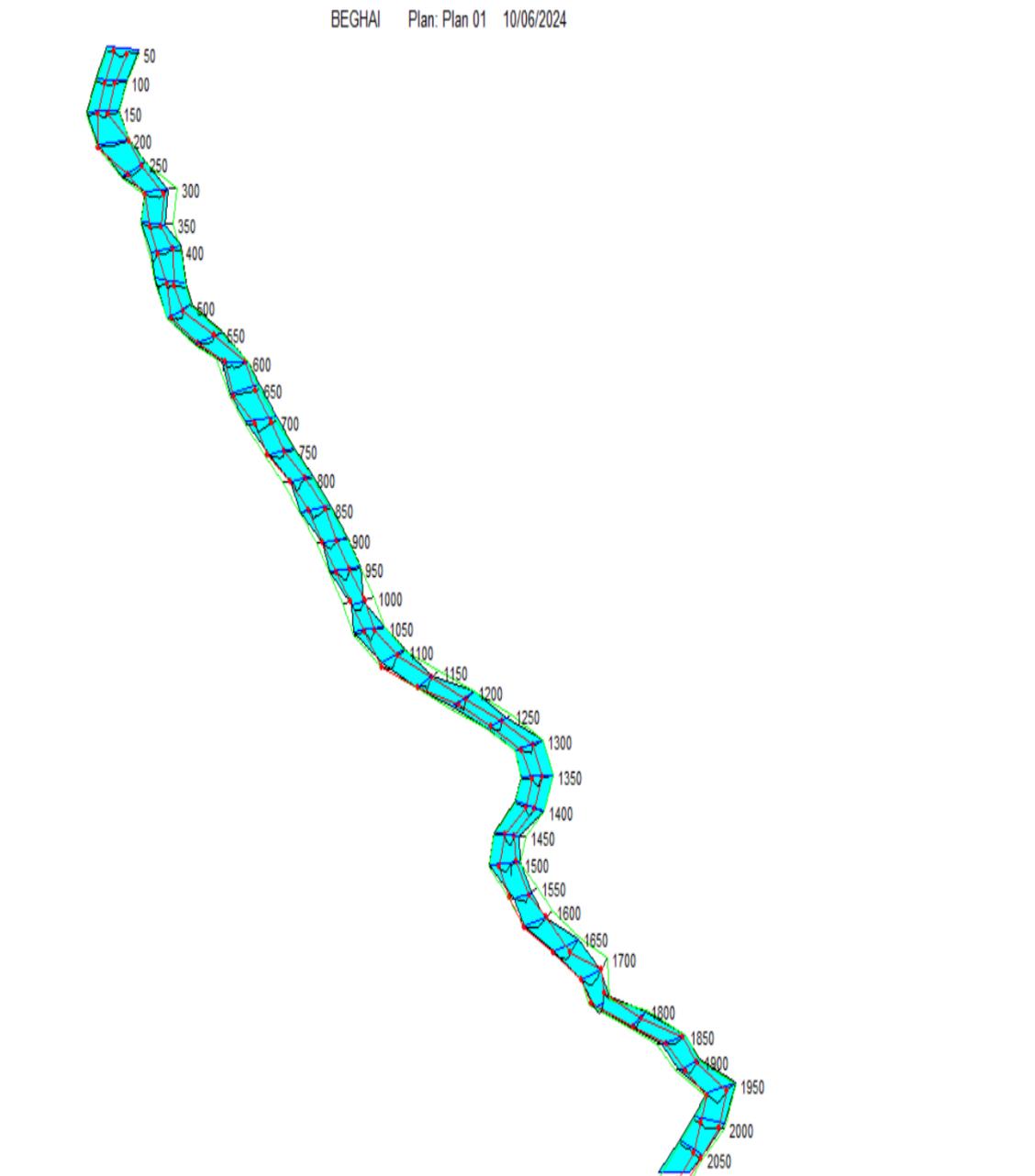


Figure 20 : Vue 3d de oued bougehal

• Profils en travers

La fonction de visualisation des résultats par profil en travers permet d'obtenir un niveau de détail maximal à chaque point précis le long du tracé du cours d'eau.

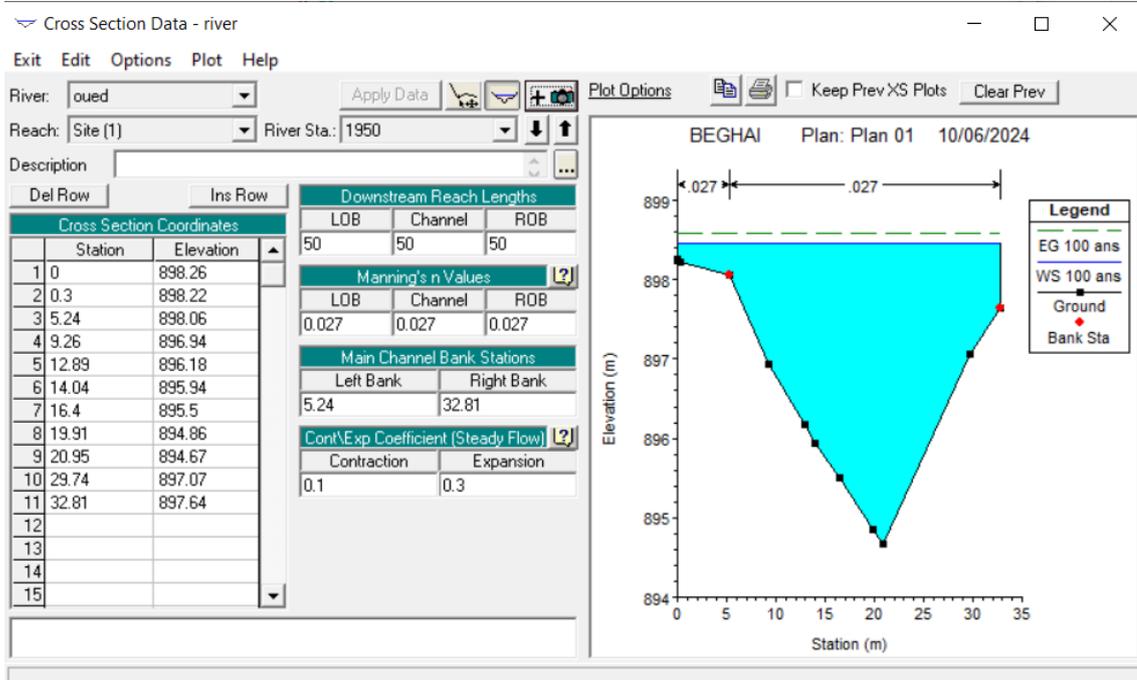


Figure 21: Résultats de la simulation pour la station 1950.

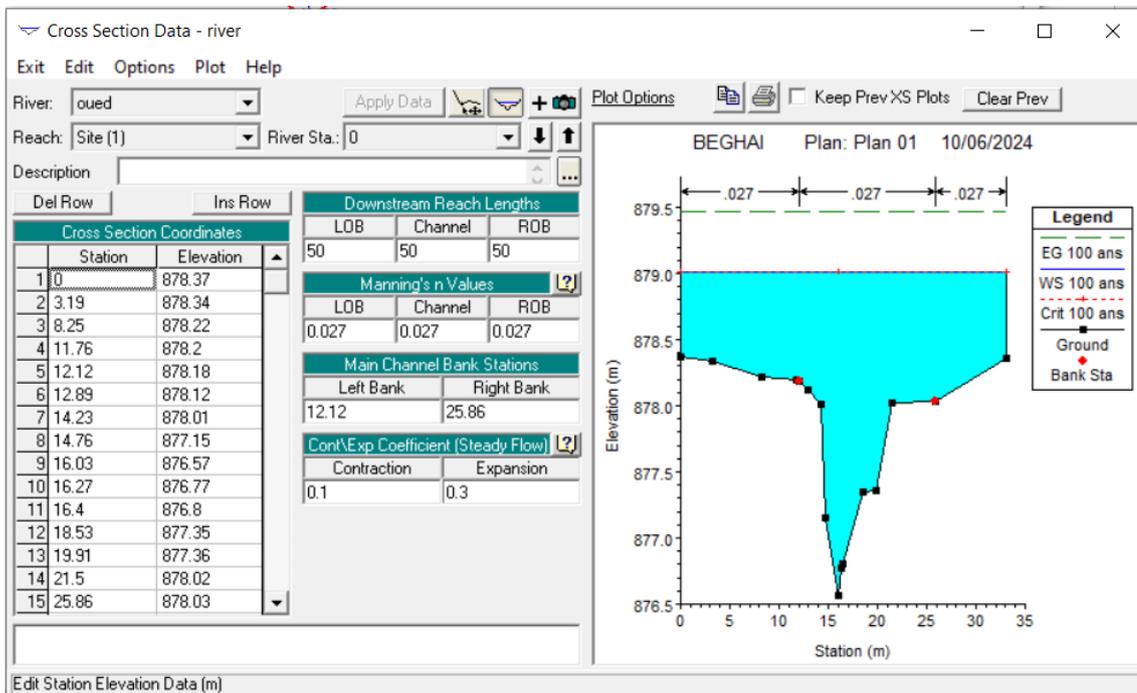


Figure 22 : Résultats de la simulation pour la station 0.

Le logiciel HEC-RAS donne des tableaux récapitulatifs contenant les paramètres hydrauliques pour tous les stations (sections en travers).

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 : Nombre de Froude.

Tableau 42: Principaux paramètres hydraulique d'oued Boughegal.(source :hec-ras)

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m ³ /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Chl
Site (1)	2096.64	100 ans	94.00	897.15	898.39	898.51	899.00	0.010016	4.02	28.05	32.81	1.21
Site (1)	2050	100 ans	94.00	897.96	899.09	899.09	899.57	0.007600	3.33	31.12	32.81	1.04
Site (1)	2000	100 ans	94.00	895.85	897.21	897.66	898.79	0.029319	5.69	17.93	30.56	1.96
Site (1)	1950	100 ans	94.00	894.67	896.96	897.11	897.77	0.009791	4.00	23.53	20.14	1.18
Site (1)	1900	100 ans	94.00	895.50	897.88	897.88	898.47	0.005498	3.54	29.71	27.12	0.92
Site (1)	1850	100 ans	94.00	895.10	896.49	896.94	897.88	0.024233	5.33	18.86	27.75	1.80
Site (1)	1800	100 ans	94.00	893.74	895.65	896.01	896.84	0.016382	5.01	20.81	26.96	1.52
Site (1)	1750	100 ans	94.00	891.90	894.01	894.61	895.84	0.021437	6.02	15.99	14.13	1.71
Site (1)	1700	100 ans	94.00	892.20	894.28	894.32	894.95	0.007633	3.61	26.00	21.57	1.05
Site (1)	1650	100 ans	94.00	891.30	893.17	893.54	894.38	0.014942	4.92	19.69	18.96	1.46
Site (1)	1600	100 ans	94.00	892.64	894.30	894.30	894.87	0.007256	3.34	28.13	25.00	1.01
Site (1)	1550	100 ans	94.00	890.75	892.52	893.04	894.14	0.025677	5.67	16.92	19.70	1.86
Site (1)	1500	100 ans	94.00	889.74	893.17	893.17	893.64	0.006606	3.18	32.62	32.81	0.85
Site (1)	1450	100 ans	94.00	889.26	891.78	892.26	893.13	0.011848	5.26	20.11	25.83	1.29
Site (1)	1400	100 ans	94.00	888.64	891.48	891.79	892.49	0.009539	4.77	24.48	32.55	1.18
Site (1)	1350	100 ans	94.00	888.57	890.88	891.22	891.98	0.010610	4.91	23.44	32.81	1.24
Site (1)	1300	100 ans	94.00	888.11	890.55	890.80	891.42	0.009368	4.28	25.18	32.81	1.16
Site (1)	1250	100 ans	94.00	887.57	889.77	890.16	890.88	0.011362	4.72	21.36	26.52	1.29
Site (1)	1200	100 ans	94.00	886.83	889.90	889.95	890.44	0.004493	3.55	32.64	32.81	0.83
Site (1)	1150	100 ans	94.00	886.50	888.92	889.29	889.99	0.016419	4.62	20.73	23.35	1.48
Site (1)	1100	100 ans	94.00	885.99	887.78	888.16	889.05	0.020825	4.99	18.83	20.46	1.66
Site (1)	1050	100 ans	94.00	885.51	888.60	888.60	889.08	0.003968	3.38	34.55	32.81	0.78
Site (1)	1000	100 ans	94.00	885.06	886.88	887.53	888.59	0.019069	5.79	16.24	12.69	1.63
Site (1)	950	100 ans	94.00	884.38	887.34	887.39	887.90	0.004683	3.46	31.47	32.81	0.84
Site (1)	900	100 ans	94.00	884.32	886.49	886.81	887.49	0.012444	4.61	22.63	26.15	1.33
Site (1)	850	100 ans	94.00	883.89	886.50	886.50	887.08	0.006189	3.47	28.67	26.78	0.94
Site (1)	800	100 ans	94.00	883.50	886.17	886.23	886.85	0.007064	3.78	26.81	23.20	1.01
Site (1)	750	100 ans	94.00	883.81	885.33	885.62	886.30	0.016381	4.61	22.44	27.87	1.48
Site (1)	700	100 ans	94.00	882.53	884.84	885.03	885.66	0.009057	4.09	24.29	22.32	1.14
Site (1)	650	100 ans	94.00	884.28	885.47	885.47	885.95	0.007849	3.11	30.84	32.81	1.03
Site (1)	600	100 ans	94.00	882.78	884.33	884.61	885.34	0.017086	4.55	21.94	26.03	1.49
Site (1)	550	100 ans	94.00	881.62	883.21	883.58	884.39	0.019673	4.94	20.40	29.28	1.61
Site (1)	500	100 ans	94.00	881.23	883.40	883.40	883.98	0.005038	3.44	30.04	29.67	0.86
Site (1)	450	100 ans	94.00	881.24	882.36	882.68	883.45	0.025244	4.83	21.14	32.81	1.74
Site (1)	400	100 ans	94.00	881.55	882.73	882.73	883.18	0.005694	2.39	33.61	32.81	0.86
Site (1)	350	100 ans	94.00	879.72	880.94	881.48	882.52	0.029264	5.98	17.51	24.15	1.98
Site (1)	300	100 ans	94.00	879.28	880.99	881.07	881.70	0.008400	3.78	25.52	22.48	1.09
Site (1)	250	100 ans	94.00	879.20	880.97	880.97	881.44	0.005502	3.21	32.53	32.81	0.91
Site (1)	200	100 ans	94.00	879.15	880.23	880.42	880.98	0.015878	3.84	24.52	32.81	1.40
Site (1)	150	100 ans	94.00	878.05	879.80	879.88	880.36	0.008398	3.79	29.65	32.81	1.09
Site (1)	100	100 ans	94.00	877.80	879.43	879.50	879.98	0.006999	3.72	30.55	32.81	1.03
Site (1)	50	100 ans	94.00	877.07	878.80	878.98	879.55	0.009942	4.07	26.49	32.81	1.20

IV.4.3 Interprétation

La modélisation d'écoulement est une étape fondamentale pour comprendre le comportement hydraulique de l'oued Boughegal ainsi que les risques d'inondation associés, et elle repose sur l'utilisation d'outils informatiques. En observant le niveau d'eau le long du cours de l'oued Boughegal, nous constatons des débordements dans la plupart des sections.

Les résultats présentés dans le tableau révèlent que :

- La vitesse d'écoulement le long de l'oued Boughegal varie entre 1.58 et 6.02 m/s.
- Le nombre de Froude oscille entre 0.32 et 1.86, ce qui indique une variation du régime d'écoulement tout au long de l'oued.

Selon la simulation, les habitants établis le long de l'oued Boughegal, dans la ville de Baghai, sont vulnérables aux risques d'inondation. Il est donc nécessaire de prendre des mesures d'aménagement hydraulique appropriées pour prévenir ces risques.

IV.5 Etude des aménagements

L'étude des aménagements visant à protéger la ville de Baghai contre les crues centennales est un processus d'analyse et de conception axé spécifiquement sur la réduction des risques d'inondation de l'oued Boughegal. L'objectif de cette étude est de dimensionner et de concevoir des ouvrages hydrauliques appropriés afin de minimiser les dangers et de faciliter le passage des crues centennales en toute sécurité. Dans le cadre de cette étude, différentes variantes seront proposées pour l'aménagement de l'oued Boughegal. À terme, une variante sera sélectionnée pour une étude détaillée afin de garantir la protection de la ville de Baghai, dans la région de Khenchela, contre les risques d'inondation de l'oued Boughegal.

IV.5.1 Hypothèses de calcul

Lors du dimensionnement des canaux à surface libre, l'écoulement est généralement considéré comme uniforme sur toute la longueur du canal. Un écoulement est qualifié d'uniforme lorsque ses caractéristiques restent constantes dans le temps et dans l'espace. Pour qu'un écoulement soit uniforme, les conditions suivantes doivent être remplies :

- Le débit de l'eau dans le canal doit être constant ($Q = \text{constant}$).
- Le canal doit être prismatique.
- La profondeur de l'eau dans le canal doit être constante sur toute sa longueur.
- La pente du canal doit être constante.
- La rugosité du fond et des parois doit être constante sur toute la longueur ($n = \text{constante}$).

Nous avons observé que :

La longueur du cours d'eau est estimée à 2108 m .

Présence d'un pont a route de M'toussa.

IV.5.2 Formule de dimensionnement

La formule suivante, connue sous le nom de Manning-Strickler, est utilisée pour le dimensionnement et s'applique à toutes les formes géométriques des sections ouvertes.

$$Q = \frac{1}{n} * S * R_h^{2/3} * \sqrt{i}$$

Avec :

- 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)

Voici les formules des éléments géométriques pour les différents types de sections de canaux :

- **Section Rectangulaire**

- Largeur du canal (b)
- Profondeur de l'eau (y)
 - Aire de la section (A): $A = b \cdot y$
 - Périmètre mouillé (P) : $P = b + 2y$
 - Rayon hydraulique (R) : $R = \frac{A}{P} = \frac{b \cdot y}{b + 2y}$

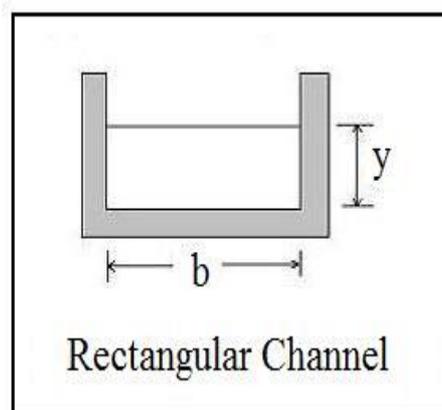


Figure 23 d'un canal rectangulaire

- **Section Trapézoïdale**

- Largeur du fond (b)
- Profondeur de l'eau (y)
- Pente des côtés ($z : 1$)
- Aire de la section (A) : $A = y(b + zy)$
- Périmètre mouillé (P) : $P = b + 2y\sqrt{1 + z^2}$
- Rayon hydraulique (R) : $R = \frac{A}{P} = \frac{y(b+zy)}{b+2y\sqrt{1+z^2}}$

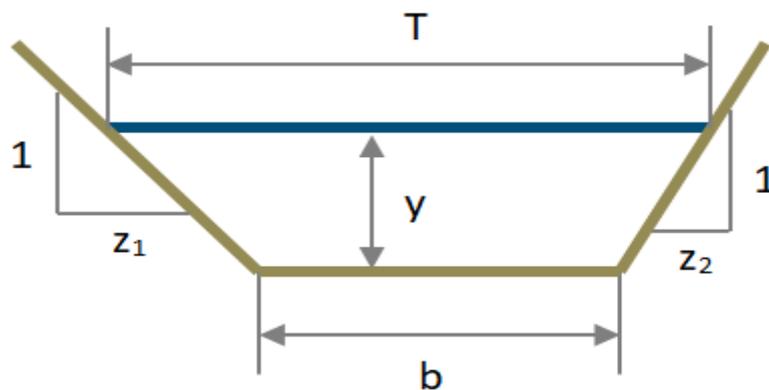


Figure 24 : d'un canal Trapézoïdale

- **Section Triangulaire**

- Profondeur de l'eau (y)
- Pente des côtés ($z : 1$)
- Aire de la section (A) : $A = zy^2$
- Périmètre mouillé (P) : $P = 2y\sqrt{1 + z^2}$

- Rayon hydraulique (R): $R = \frac{A}{P} = \frac{zy^2}{2y\sqrt{1+z^2}} = \frac{zy}{2\sqrt{1+z^2}}$

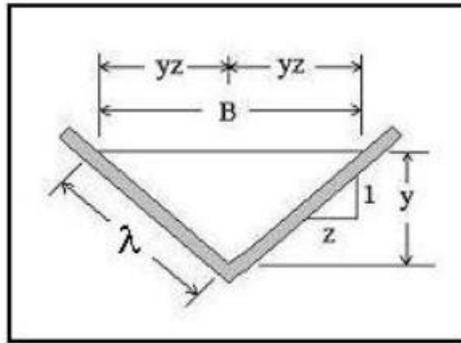


Figure 25 : d'un canal Triangulaire

• **Section Circulaire (plein ou partiellement rempli)**

- Diamètre (D)

- Profondeur de l'eau (y)

- Aire de la section (A) : $A = \frac{D^2}{8} (\theta - \sin(\theta))$ Ou $\theta = 2\cos^{-1}\left(\frac{D-2y}{D}\right)$

- Périmètre mouillé (P) : $P = D\theta$

- Rayon hydraulique (R): $R = \frac{A}{P}$

✓ Pour un canal circulaire plein :

- Aire de la section (A) : $A = \frac{\pi D^2}{4}$

- Périmètre mouillé (P) : $P = \pi D$ - Rayon hydraulique (R) : $R = \frac{A}{P} = \frac{D}{4}$

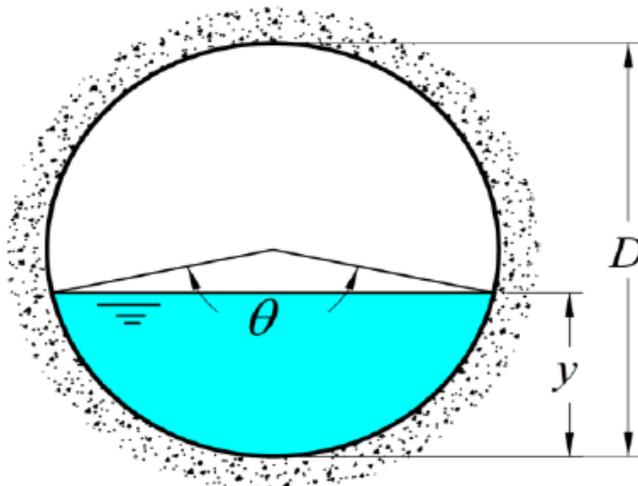


Figure 26 : d'un canal Circulaire

Ces formules permettent de déterminer les éléments géométriques essentiels pour le dimensionnement et l'analyse des canaux à différentes sections.

IV.5.3 Principe de conception de l'aménagement d'oued Boughegal

Dans la conception de l'aménagement d'un cours d'eau, il est essentiel de respecter et de suivre des principes et des normes spécifiques. Pour notre cas d'étude concernant l'aménagement de l'oued Boughegal, la conception doit intégrer les paramètres hydrauliques tels que le débit aménagé (Qaménagée), la pente, et la rugosité. De plus, il est crucial de prendre en compte les ouvrages d'art existants, que l'on ne peut ni modifier ni toucher, tout en respectant les normes de sécurité, notamment la marge de sécurité (revanche).

L'aménagement de l'oued Boughegal vise à protéger la commune de Baghai. Pour cela, une connaissance approfondie du site est indispensable afin de déterminer la conception la plus appropriée.

IV.5.3.1 Pente

Sur le lève topographie sur autocad on a calculer la pent par la formule

$$I = \frac{Z_1 - Z_2}{L} = \frac{897,74 - 876,81}{2108} = 0,01$$

IV.5.3.2 Coefficient de rugosité (n)

La rugosité du canal dépend de la nature de son revêtement. À titre d'exemple, les valeurs de rugosité pour certains types de revêtements sont présentées dans le tableau suivant (Tableau 40).

IV.5.3.3 Marge de sécurité dans les canaux (Revanche)

Dans les canaux à surface libre, il est crucial de prévoir une marge de sécurité au-dessus de la ligne d'eau calculée pour éviter toute élévation imprévue de la surface libre et minimiser le risque de débordement. Cette marge permet de tenir compte de divers facteurs tels que l'accumulation de dépôts solides, la croissance de la végétation, les vagues générées par le vent et d'autres circonstances similaires.

La valeur de cette marge de sécurité dépend généralement de la taille du canal. Pour les petits canaux, une marge d'environ 0,30 m est souvent suffisante, tandis que pour les grands canaux, elle peut varier entre 0,60 m et 1,20 m.

IV.5.3.4 Vitesse d'érosion

Afin d'éviter les ruptures du fond et des berges des canaux sous l'effet dynamique d'un courant d'eau, la vitesse de celui-ci ne doit pas dépasser la vitesse limite maximale. Les valeurs de la vitesse moyenne limite d'érosion pour les lits consolidés sont indiquées dans le tableau ci-dessous (Degoutte, 2012).

Tableau 43 : Valeurs de vitesse moyenne limite d'érosion pour les lits.

Matériau du lit du canal	Vitesse limite maximale d'érosion
Sable fin	1,2 - 1,5 m/s
Sable moyen	1,5 - 1,8 m/s
Sable grossier	1,8 - 2,2 m/s
Gravier	2,0 - 2,5 m/s
Roches moyennes	2,2 - 2,5 m/s
Roches grossières	2,5 - 3,0 m/s

IV.5.4 Etude des variantes

Dans cette étude, Deux (02) variantes sont proposées pour l'aménagement de l'oued Bouhegal afin de protéger la commune de Baghai contre les crues centennales. Ces variantes sont conçues pour avoir la capacité d'évacuer le débit de projet, $Q = 94 \text{ m}^3/\text{s}$.

Les deux variantes proposées :

- ✓ Variante 1 : canal trapézoïdale en enrochement.
- ✓ Variante 2 : canal trapézoïdale en béton.

IV.5.4.1 Variante 1 : canal trapézoïdale en enrochement

IV.5.4.1.1 Canal trapézoïdale

La première variante proposée consiste en la construction d'un canal trapézoïdal en enrochement. Cette géométrie a été sélectionnée pour sa grande capacité à évacuer les eaux et à permettre le passage des crues sans problèmes. Pour cette variante, nous avons choisi une largeur au fond de $b = 6 \text{ m}$, un coefficient de talus de $m = 2$, et un coefficient de rugosité de Manning $n = 0.035$ (enrochement).

Les tableaux suivants présentent les dimensions et les résultats des calculs pour le canal de la variante 1.

Tableau 44: Caractéristiques du canal de la variante 1

Paramètre	Symbole	Valeur
Type de section	/	Trapézoïdale
Largeur au fond (m)	b	6
Fruit de talus	m	2
Tirant d'eau (m)	Y	2.34
La pente (%)	I	1
La rugosité	n	0.035
Débit (m ³ /s)	Q	94

- **Résultats de calcul de la variante1**

Tableau 45 : Résultats de calcul de la variante1

Paramétré	Valeur
Débit Q (m ³ /s)	94
Largeur au miroir B (m)	15.36
Section S (m ²)	24.99
Périmètre P (m)	16.46
Hauteur critique y _c (m)	2.265
La vitesse V (m/s)	3.76
Nombre de Froude Fr	0.84
Régime d'écoulement	fluviale

IV.5.4.1.2 Conception du canal en enrochement

L'enrochement est une technique couramment utilisée pour stabiliser les berges et le fond d'un canal. Elle consiste à empiler des roches de carrière, avec une pente de talus relativement faible, généralement comprise entre 3/2 et 2/1, pour les enrochements libres sans liaison en béton.

Le tonnage estimé nécessaire pour le projet d'enrochement de l'oued Boughegal, visant à protéger la commune de baghai contre les crues, varie entre 1 et 1,5 tonnes. Les roches enrochées ont un diamètre médian D50 d'environ 1/2 mètre.

Epaisseur orthogonale théorique t_d (m) :

$$t_d = n \cdot D_{50}$$

Volume globale de dimensionnement $\mathfrak{V}_{b.d}$ (m³):

$$\mathfrak{V}_{b.d} = A \cdot t_d$$

Avec :

- ✓ n: nombre de couche n = 1.
- ✓ D50 : Diamètre médian D50 = 0.50 m.
- ✓ A : Aire (surface) (m²).

Calcul des sections d'enrochement de la variante 1

$$A = L \cdot l$$

$$l_{\text{talus}} = Y \sqrt{1 + m^2}$$

Hauteurs de la variante 1

$$Y = y + R$$

$$Y = 2.265 + 0.3 = 2.565\text{m}$$

Tableau 46: Sections d'encrochement du canal de la variante 1.

	L (m)	l (m)	A (m²)
Font	2108	6	12648
Talus droite	2108	5.74	12099.92
Talus gauche	2108	5.74	12099.92

Calcul des volumes d'encrochement de la variante 1**Tableau 47 : Volumes d'encrochement de la variante 1.**

	n	D50(m)	t_d (m)	A(m²)	V(m³)
Fond	1	0.50	0.5	12648	6324
Talus droite	1	0.50	0.5	12099.92	6049.96
Talus gauche	1	0.50	0.5	12099.92	6049.96

Calcul des sections du géotextile de la variante 1**Tableau 48 : Sections du géotextile de la variante 1.**

	A(m²)	Total (m²)
Fond	6324	18423.92
Talus droite	6049.96	
Talus gauche	6049.96	

- **Volume des déblais et remblais**

Pour calculer les volumes de déblai et de remblai d'un canal trapézoïdal en encrochement dans HEC-RAS, Configurez les conditions aux limites en amont et en aval, puis exécutez la simulation hydraulique pour déterminer les hauteurs d'eau, les vitesses et les débits. ce qui permettra à HEC-RAS de calculer automatiquement les volumes de déblai et de remblai nécessaires., assurant ainsi une analyse précise et une planification efficace des travaux de terrassement.

Alors Volume de déblais et remblai de la variante 1.

Tableau 49: Volume des déblais et remblais de la variante 1.

	Volume (m³)
Déblais	72437
Remblais	6941.56

IV.5.4.1.3 Estimation du coût de la variante 1

Tableau 50 : Devis quantitatif estimatif de la variante 1.

N	Désignation des travaux	Unité	Quantité	Prix Unitaire (DA)	Montant (DA)
1	Déblais	m ³	72437	300	21731100
2	Remblais	m ³	6941.56	700	4859092
3	Enrochement	m ³	18423.92	10000	184239200
4	Géotextile	m ³	18423.92	3000	55271760
Total (DA)					266101152
TVA (%)					19
Total (DA)					316660371

IV.5.4.1.4 Interprétation de la variante 1

La première variante proposée consiste à la conception d'un canal de profil trapézoïdale en enrochement, nous avons proposée pour elle une largeur au fond (b) de 6 m, après en utilisant l'équation de Manning Strickler on a calculé ses dimension pour un débit de 94 m³/s. La variante 1 a une profondeur pour de projet de 2.34 m. Elle a une vitesse qui varie entre 3.72 et 4.05 m/s, avec un régime d'écoulement fluvial. Nous avons trouvé ses résultats grâce aux calculs faites, ses résultats implique que l'écoulement de la variante 1 aménagée nous assure le passage de la crue avec un régime fluvial, et aussi les dimensions calculées du canal trapézoïdale proposée d'oued Boughegal sont les plus adéquates pour la protection contre les crues centennales.

IV.5.4.2 Variante 2 : canal Trapézoïdale en béton

La deuxième variante proposée consiste en la construction d'un canal de profil trapézoïdale en béton. Sa géométrie a été choisie en raison de sa grande capacité à évacuer les eaux et à permettre le passage des crues sans problèmes.

Pour la variante 2 nous avons choisi une largeur au fond $b = 6$ m, et nous avons pris le coefficient de rugosité $n = 0.015$ (béton).

IV.5.4.2.1 Caractéristiques du canal de la variante 2

Tableau 51 : Caractéristiques du canal de la variante 2

Paramètre	Symbole	Valeur
Type de section	/	Trapézoïdale
Largeur au fond (m)	b	6
Fruit de talus	m	3
Tirant d'eau (m)	Y	1.41
La pente (%)	I	1
La rugosité	n	0.015
Débit (m ³ /s)	Q	94

- **Résultats de calcul de la variante 1**

Tableau 52 : Résultats de calcul de la variante 2

Paramétré	Valeur
Débit Q (m ³ /s)	94
Largeur au miroir B (m)	10.23
Section S (m ²)	14.42
Périmètre P (m)	14.92
Hauteur critique y _c (m)	2.08
La vitesse V (m/s)	6.52
Nombre de Froude Fr	1.44
Régime d'écoulement	torrentiel

IV.5.4.2.2 Conception du canal en béton

Dans cette variante, le béton constitue l'élément principal du canal trapézoïdal . L'épaisseur du béton pour le radier et les côtés du canal est de 30 cm, tandis que l'épaisseur du béton de propreté est de 10 cm. La figure suivante illustre les dimensions d'une section en travers d'un canal trapézoïdal.

- **Épaisseurs des bétons de la variante 2**

Tableau 53 : Épaisseurs des bétons de la variante 2.

	Épaisseur	Unité
Béton e _b	0.3	m
Béton de propreté e _{bp}	0.1	m

- **Calcul des sections des bétons de la variante 2**

Hauteurs de la variante 2 :

$$Y = y + R$$

$$Y = 2.08 + 0.3 = 2.38\text{m}$$

Tableau 54 : Sections des bétons du canal de la variante 2

		L (m)	l (m)	A (m²)
Béton	Font	2108	6	12648
	Talus droite	2108	7.53	15873.24
	Talus gauche	2108	7.53	15873.24
Béton de propreté	Font	2108	6	12648

Tableau 55 : Volumes des bétons

			A(m²)	e	V(m³)	V(m³)
Béton		Fond	12648	0.3	3794.4	6969.04
		Talus droite	15873.24	0.3	1587.32	
		Talus gauche	15873.24	0.3	1587.32	
Béton de propreté		Fond	12648	0.1	1264.8	1264.8

Tableau 56 : Volume des déblais et remblais

	Volume (m ³)
Déblais	75638
Remblais	12192.67

IV.5.4.2.3 Estimation du coût de la variante 2**Tableau 57 : Devis quantitatif estimatif de la variante 2.**

N	Désignation des travaux	Unité	Quantité	Prix Unitaire (DA)	Montant (DA)
1	Déblais	m ³	75638	300	22691400
2	Remblais	m ³	12192.67	700	8534869
3	Béton	m ³	6969.04	30000	209071200
4	Béton de propreté	m ³	1264.8	8000	10118400
Total (DA)					250415869
TVA (%)					19
Total (DA)					297994884.11

IV.5.4.2.4 Interprétation de la variante 2

La deuxième variante proposée concerne la conception d'un canal trapézoïdale en béton, avec une largeur de fond de 6 m, similaire à la première variante. En utilisant l'équation de Manning-Strickler, nous avons calculé les dimensions pour les deux tronçons afin de gérer un débit de 94 m³/s. La profondeur du projet pour cette variante est de 1,41 m. La vitesse de l'eau varie entre 6,4 et 6,92 m/s, et le régime d'écoulement est torrentiel, avec un nombre de Froude variant de 2,08 à 2,17. Les résultats indiquent que les dimensions calculées permettent le passage de la crue en régime d'écoulement torrentiel, en raison de la rugosité du canal en béton, ce qui se reflète dans la vitesse et le nombre de Froude.

Comparaison entre les deux variante :

Critère	Béton	Enrochement
Matériaux	Mélange de ciment, sable, gravier, et eau	Roches naturelles empilées
Durabilité	Très durable et résistant aux intempéries	Très durable, mais dépend de la qualité des roches
Installation	Nécessite des compétences techniques et du matériel spécialisé	Installation plus simple, souvent réalisée manuellement ou avec des équipements de terrassement
Temps de mise en œuvre	Peut être long (temps de séchage nécessaire)	Relativement rapide à mettre en place
Maintenance	Faible.	Faible à modérée, dépend de l'érosion et du déplacement des roches
Esthétique	Aspect lisse et uniforme	Aspect naturel et rugueux
Perméabilité	Imperméable	Perméable, permet l'infiltration de l'eau
Utilisation	Structures nécessitant une haute résistance (ponts, murs de soutènement, canaux en béton)	Stabilisation des pentes, protection contre l'érosion, revêtement de berge
Flexibilité d'adaptation	Peu flexible, nécessite une planification et une mise en œuvre précise	Très flexible, peut être ajusté facilement sur place
Impact environnemental	Extraction et production de ciment peuvent avoir un impact écologique significatif	Utilisation de matériaux naturels, souvent locaux, avec un impact environnemental moindre

Tableau : Les avantages et inconvénients de chaque matériau**IV.5.4.3 Variante adoptée pour l'aménagement d'oued Bouhegal**

Le choix de la variante du canal trapézoïdal en béton armé est motivé par plusieurs facteurs cruciaux, notamment des considérations économiques, de durabilité, de performance hydraulique et de coûts de maintenance réduits.

Tout d'abord, sur le plan économique, le béton armé offre un excellent compromis entre coût initial et coût global. Bien que les coûts initiaux puissent être légèrement plus élevés que ceux d'autres matériaux, tels que le béton non armé ou les revêtements métalliques, les avantages à long terme en termes de maintenance et de durabilité compensent largement cette différence. Le béton armé est connu pour sa résistance structurelle et sa capacité à supporter des charges importantes sur de longues périodes, minimisant ainsi les coûts de réparation et de remplacement.

En ce qui concerne la durabilité, le béton armé est extrêmement résistant à l'usure, aux intempéries et aux agressions chimiques, ce qui en fait un choix idéal pour les infrastructures exposées aux éléments naturels et à des conditions environnementales variées. Cette durabilité accrue se traduit par une plus grande longévité de l'ouvrage et une réduction des besoins en maintenance régulière, contribuant ainsi à des coûts de cycle de vie inférieurs.

Du point de vue de la performance hydraulique, le canal trapézoïdal en béton armé présente des caractéristiques de flux optimales, permettant un écoulement efficace et régulier des eaux tout en minimisant les pertes par friction. Cela est essentiel pour assurer une gestion hydraulique efficace des eaux pluviales ou des eaux de ruissellement dans divers environnements, des zones urbaines aux zones agricoles.

Enfin, les coûts de maintenance réduits associés au canal trapézoïdal en béton armé sont particulièrement attrayants. En raison de sa résistance aux dommages mécaniques et aux conditions environnementales, les interventions de maintenance sont moins fréquentes et moins coûteuses, ce qui se traduit par des économies à long terme pour les gestionnaires d'infrastructures et les collectivités.

En conclusion, le choix de cette variante spécifique de canal en béton armé est parfaitement justifié par ses nombreux avantages économiques, sa durabilité exceptionnelle, sa performance hydraulique optimale et ses coûts de maintenance réduits, faisant de cette solution une option fiable et rentable pour les projets d'ingénierie hydraulique.



CHAPITRE 5 : ETUDE DETAILS VARIANTE

Introduction

Ce chapitre se concentre sur l'étude détaillée de la solution retenue pour l'aménagement de l'oued Boughegal, qui consiste en la création d'un canal trapézoïdale en béton . L'objectif principal de cette approche est de contrôler les crues centennales afin d'assurer la sécurité des résidents et la protection de leurs biens le long de ce cours d'eau, situé dans la commune de baghai, dans la wilaya de khenchela.

V.1 Détails de la variante adoptée

Dans cette section, nous détaillerons la solution d'aménagement choisie pour notre projet de protection de la ville de Baghai contre les risques d'inondations de l'oued Boughegal. Cette solution se matérialise par la conception d'un canal en béton de forme trapézoïdale. Cette approche a été sélectionnée suite à une analyse technico-économique approfondie.

Dans mon projet d'aménagement, il existe deux pont traversant l'oued.

Dans les prochaines sections, nous allons aborder les principales caractéristiques de cette variante, notamment les dimensions du canal ainsi que les quantités de matériaux nécessaires pour sa réalisation.

V.2 Détails de la conception

V.2.1 Canal trapézoïdale

Pour le canal de la variante adoptée (variante 2) canal de forme trapézoïdale en béton sa rugosité $n = 0.015$, nous allons déterminer son débit aménagée $Q_{aménagée}$ à l'aide de l'équation de Manning Strickler. Le lit de l'oued Boughegal il nous impose une largeur au fond (b) de 6 m, nous avons proposée pour elle à une profondeur (y) de 1.41 m avec un fruit de talus $m = 3$.

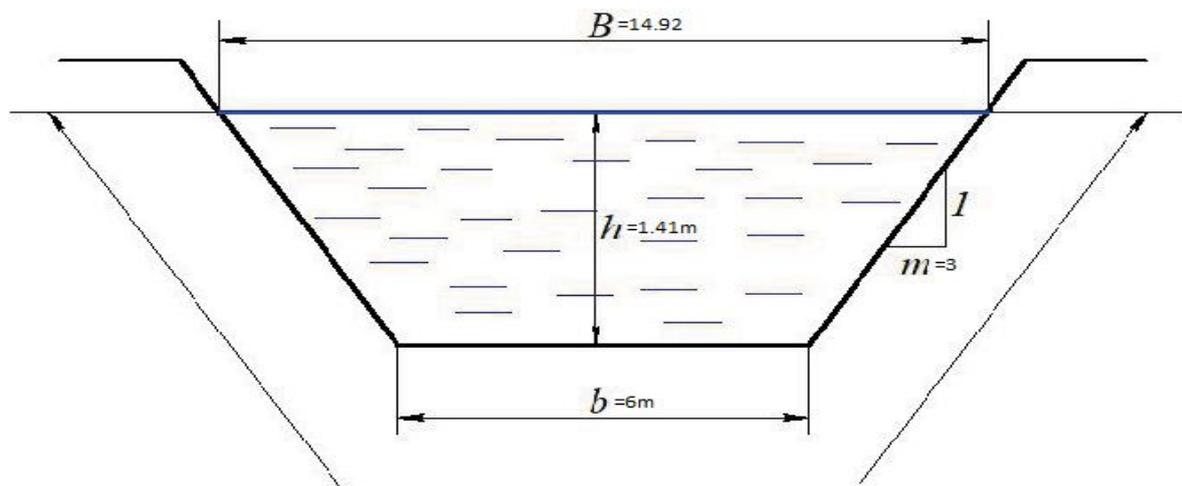
La conception du canal d'oued Boughegal consiste d'une section transversale de forme trapézoïdale contient du Béton armé.

Les caractéristiques du canal de la variante adoptée de l'oued Boughegal sont données dans le tableau suivant .

Tableau 58 : des caractéristiques du canal de la variante adoptée

Paramètre	Symbole	Variante adoptée
Type de section	/	Trapézoïdale
Largeur au fond (m)	b	6
Fruit de talus	m	3
La rugosité	n	0.015
La pente (%)	I	1
Tirant d'eau (m)	y	1.41
Débit (m ³ /s)	Q	94.03
Largeur au miroir (m)	B	14.46
Section (m ²)	S	14.42
Périmètre (m)	P	14.92
Revanche (m)	R	0.3

Voici Schéma de la variante adopté

**Figure 27 : de la variante adopté**

V.2.1.1 Modélisation hydraulique et simulation

Voici les dimensionnement sur Hec-ras ;

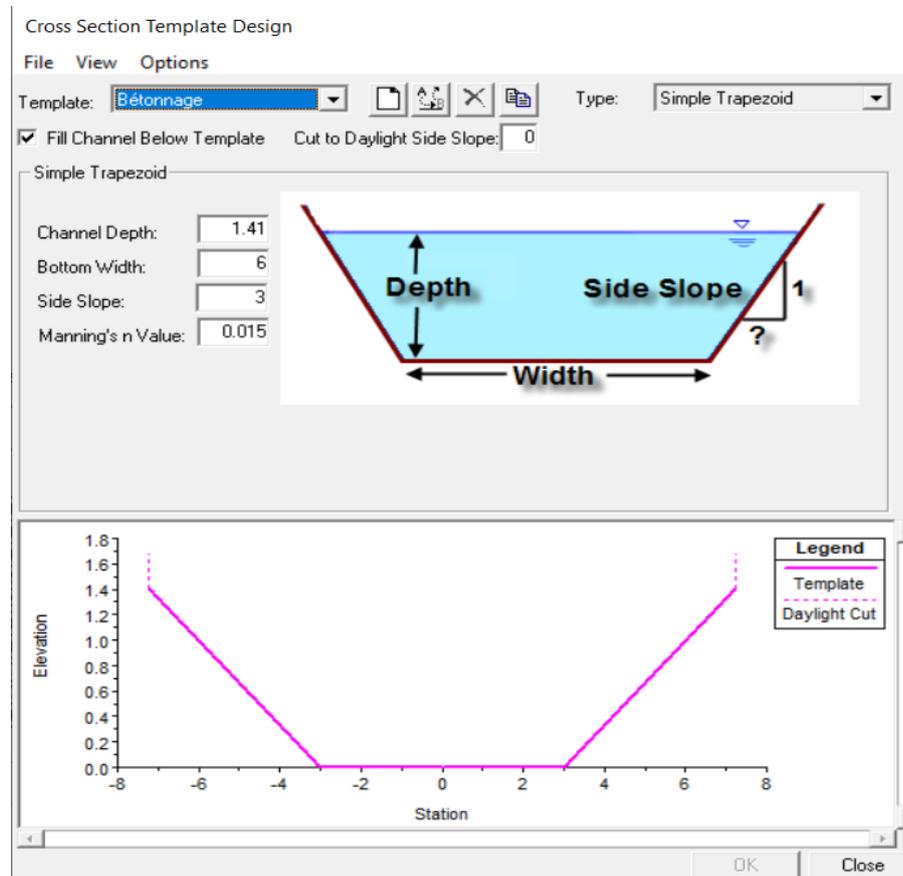


Figure 28 : variante sur hec-ras

La modélisation et la simulation hydraulique constituent une étape cruciale de notre étude détaillée pour la variante adoptée dans le projet d'aménagement de l'oued Boughegal. L'objectif principal de cette phase est d'évaluer la capacité de notre conception à gérer les crues centennales, tout en assurant la sécurité des habitants de commune de baghai.

Nous avons utilisé le logiciel HEC-RAS pour créer un modèle hydraulique représentatif de la zone d'étude, en nous appuyant sur des données topographiques du terrain et d'autres paramètres spécifiques à notre projet. Pour la variante adoptée pour le canal dans les tronçons amont et aval, nous avons conçu le canal sur toute la longueur de l'oued Boghegal, depuis le début du projet jusqu'à la fin.

Après avoir importé le modèle du canal dans HEC-RAS, nous avons intégré les données et les paramètres liés à notre projet, comme le débit aménagé par le canal. Ensuite, nous avons lancé la simulation et obtenu les résultats suivants :

Les résultats de simulation de variante

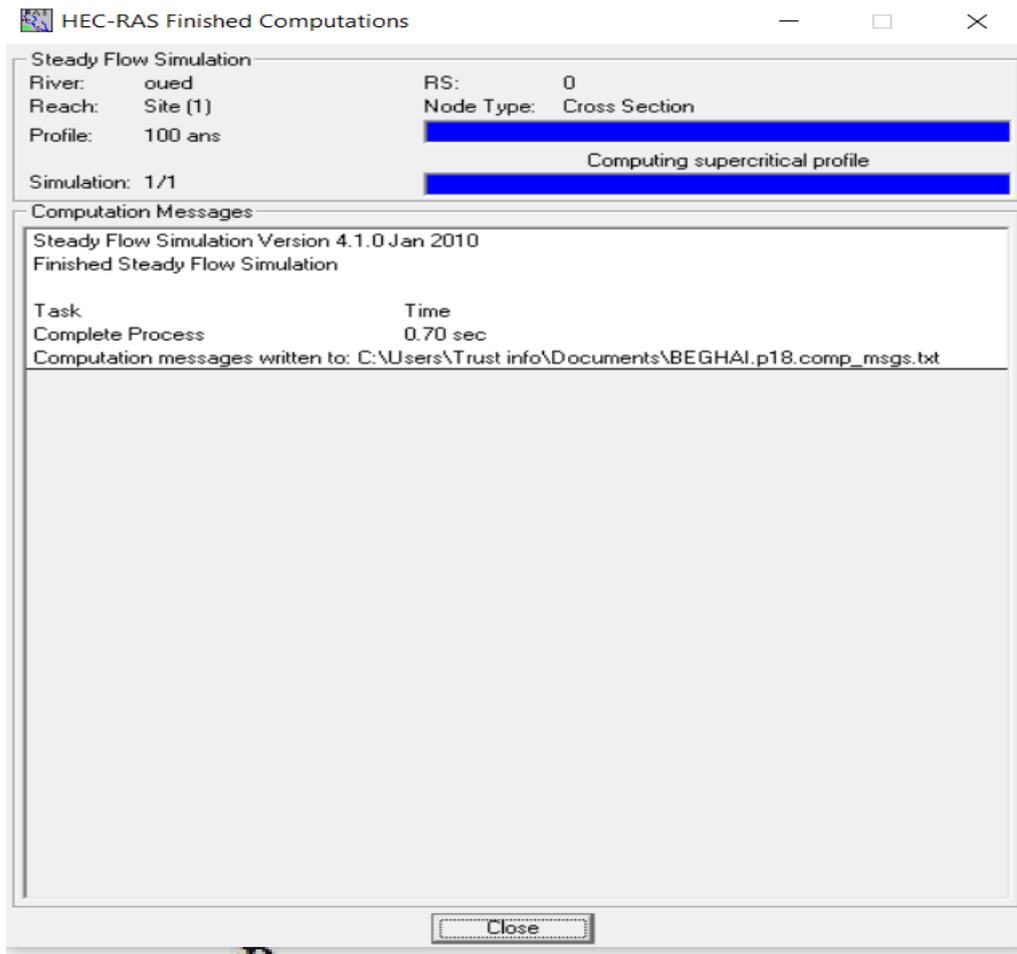


Figure 30 : Fin de simulation

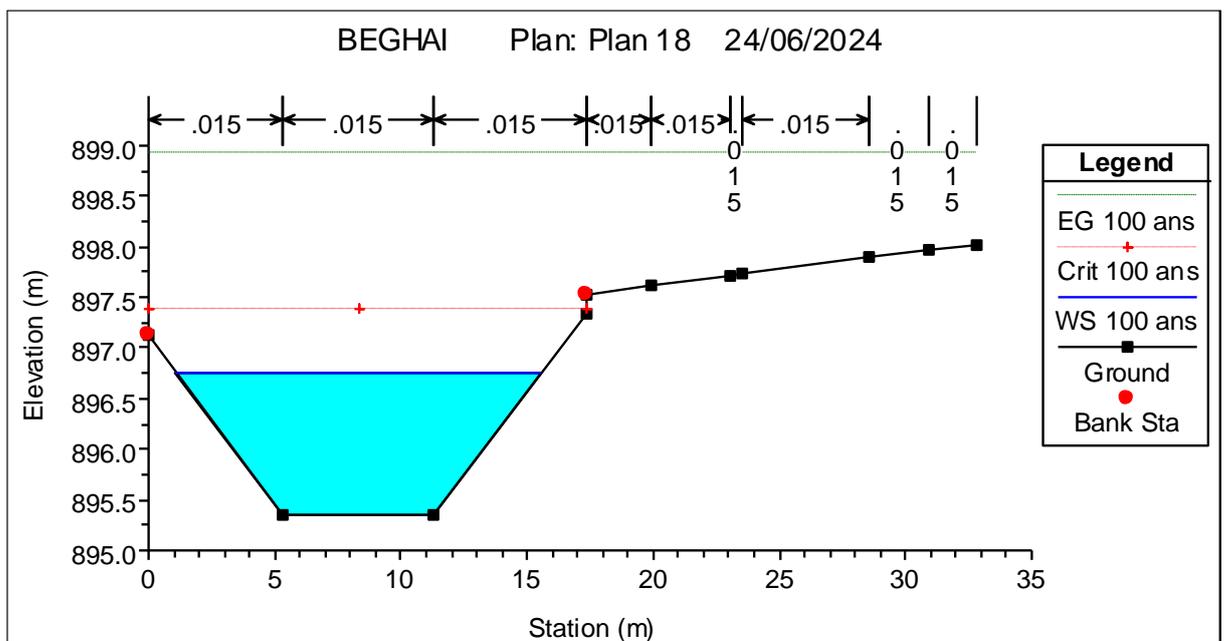


Figure 29 : Résultats de la simulation

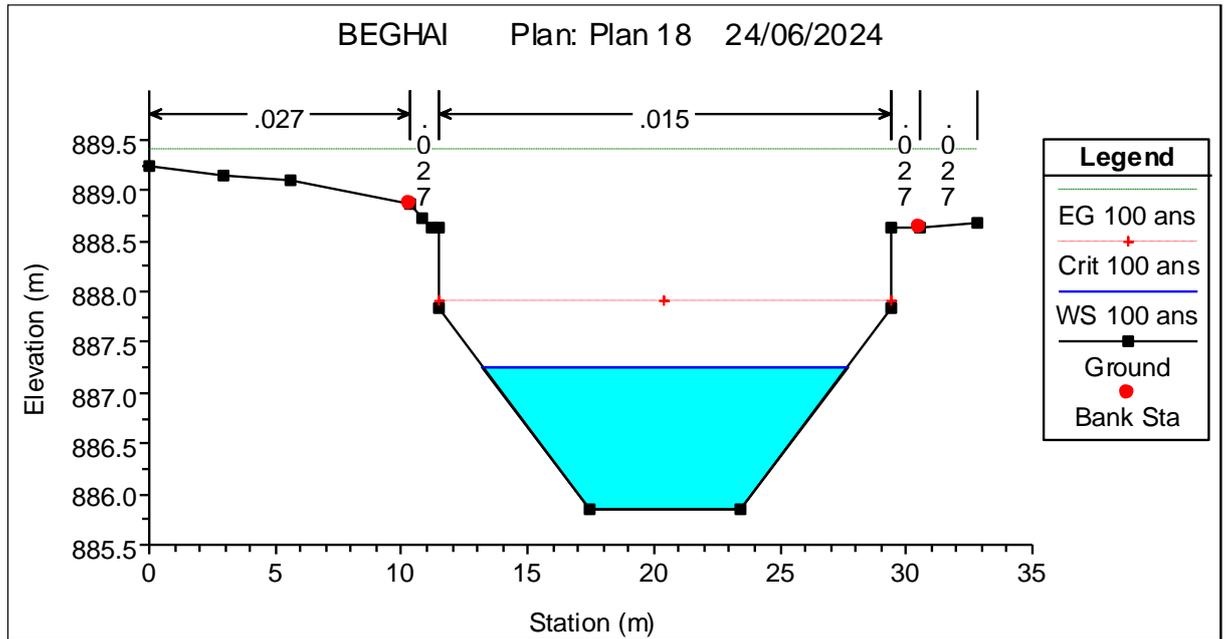


Figure 31 : Résultats de la simulation

Vue 3D de l'oued Boughegal

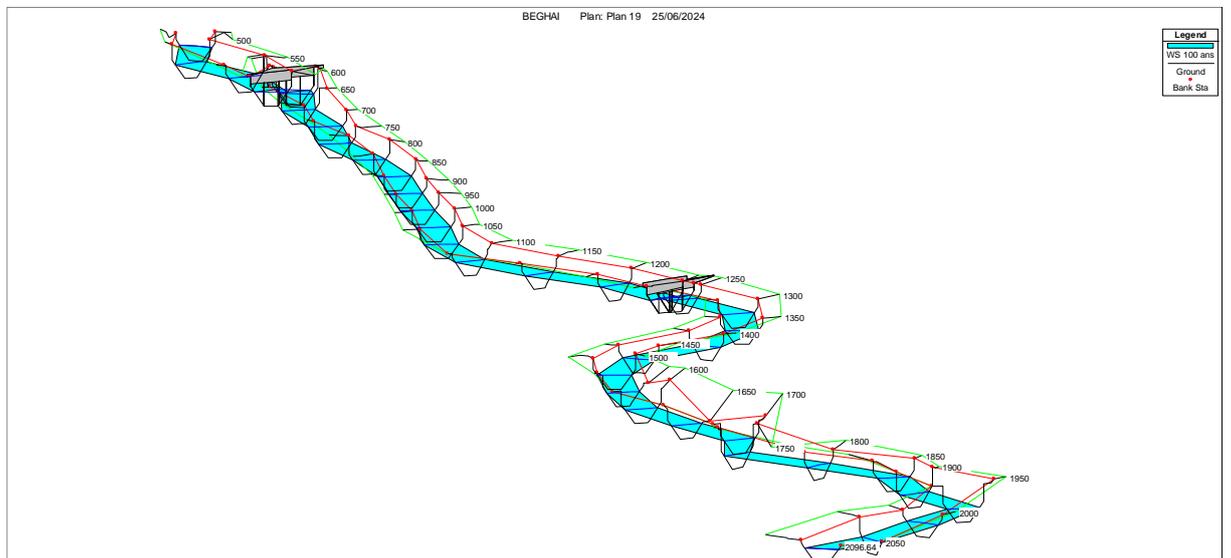


Figure 32: Vue 3D de l'oued Boughegal (entre les stations 0 et 2096).

Voici les résultats de calculs Hydraulique sur hec-ras

Tableau 59 : Principaux paramètres hydraulique d'oued Bouhegal après l'aménagement.

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m ³ /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Chl
Site (1)	2096.64	100 ans	94.00	895.35	896.76	897.40	898.93	0.010008	6.52	14.42	14.46	2.08
Site (1)	2050	100 ans	94.00	894.85	896.26	896.90	898.42	0.009954	6.51	14.45	14.47	2.08
Site (1)	2000	100 ans	94.00	894.35	895.76	896.42	897.92	0.009922	6.50	14.46	14.48	2.08
Site (1)	1950	100 ans	94.00	893.85	895.26	895.91	897.42	0.009964	6.51	14.44	14.47	2.08
Site (1)	1900	100 ans	94.00	893.35	894.76	895.41	896.92	0.009985	6.51	14.43	14.46	2.08
Site (1)	1850	100 ans	94.00	892.85	894.26	894.91	896.42	0.009955	6.51	14.44	14.47	2.08
Site (1)	1800	100 ans	94.00	892.35	893.76	894.41	895.91	0.009908	6.50	14.47	14.48	2.07
Site (1)	1750	100 ans	94.00	891.85	893.26	893.92	895.42	0.009955	6.51	14.44	14.47	2.08
Site (1)	1700	100 ans	94.00	891.35	892.76	893.41	894.92	0.009984	6.51	14.43	14.46	2.08
Site (1)	1650	100 ans	94.00	890.85	892.26	892.89	894.42	0.009947	6.51	14.45	14.47	2.08
Site (1)	1600	100 ans	94.00	890.35	891.76	892.41	893.91	0.009901	6.49	14.47	14.48	2.07
Site (1)	1550	100 ans	94.00	889.85	891.26	891.91	893.42	0.009957	6.51	14.44	14.47	2.08
Site (1)	1500	100 ans	94.00	889.35	890.76	891.41	892.92	0.009981	6.51	14.43	14.46	2.08
Site (1)	1450	100 ans	94.00	888.85	890.26	890.91	892.42	0.009942	6.50	14.45	14.47	2.08
Site (1)	1400	100 ans	94.00	888.35	889.76	890.41	891.91	0.009883	6.49	14.48	14.48	2.07
Site (1)	1350	100 ans	94.00	887.85	889.26	889.91	891.42	0.009948	6.51	14.45	14.47	2.08
Site (1)	1300	100 ans	94.00	887.35	888.76	889.41	890.92	0.009980	6.51	14.43	14.46	2.08
Site (1)	1250	100 ans	94.00	886.85	888.26	888.91	890.42	0.009935	6.50	14.46	14.47	2.08
Site (1)	1200	100 ans	94.00	886.35	887.76	888.41	889.91	0.009869	6.49	14.49	14.49	2.07
Site (1)	1150	100 ans	94.00	885.85	887.26	887.91	889.42	0.009941	6.50	14.45	14.47	2.08
Site (1)	1100	100 ans	94.00	885.35	886.76	887.41	888.92	0.009978	6.51	14.43	14.46	2.08
Site (1)	1050	100 ans	94.00	884.85	886.26	886.91	888.42	0.009926	6.50	14.46	14.47	2.08
Site (1)	1000	100 ans	94.00	884.35	885.76	886.41	887.92	0.009966	6.51	14.44	14.47	2.08
Site (1)	950	100 ans	94.00	883.85	885.26	885.91	887.41	0.009889	6.49	14.48	14.48	2.07
Site (1)	900	100 ans	94.00	883.35	884.76	885.41	886.92	0.009950	6.51	14.45	14.47	2.08
Site (1)	850	100 ans	94.00	882.85	884.26	884.91	886.42	0.009976	6.51	14.43	14.46	2.08
Site (1)	800	100 ans	94.00	882.35	883.76	884.41	885.92	0.009922	6.50	14.46	14.48	2.08
Site (1)	750	100 ans	94.00	881.85	883.26	883.91	885.42	0.009965	6.51	14.44	14.47	2.08
Site (1)	700	100 ans	94.00	881.35	882.76	883.41	884.91	0.009891	6.49	14.48	14.48	2.07
Site (1)	650	100 ans	94.00	880.85	882.26	882.91	884.42	0.009949	6.51	14.45	14.47	2.08
Site (1)	600	100 ans	94.00	880.35	881.76	882.41	883.92	0.009980	6.51	14.43	14.46	2.08
Site (1)	550	100 ans	94.00	879.85	881.26	881.91	883.42	0.009931	6.50	14.46	14.47	2.08
Site (1)	500	100 ans	94.00	879.35	880.76	881.41	882.91	0.009874	6.49	14.49	14.49	2.07
Site (1)	450	100 ans	94.00	878.85	880.26	880.91	882.42	0.009945	6.51	14.45	14.47	2.08
Site (1)	400	100 ans	94.00	878.35	879.76	880.41	881.92	0.009977	6.51	14.43	14.46	2.08
Site (1)	350	100 ans	94.00	877.85	879.26	879.91	881.41	0.009918	6.50	14.46	14.48	2.08
Site (1)	300	100 ans	94.00	877.35	878.76	879.41	880.92	0.009959	6.51	14.44	14.47	2.08
Site (1)	250	100 ans	94.00	876.85	878.26	878.91	880.42	0.009984	6.51	14.43	14.46	2.08
Site (1)	200	100 ans	94.00	876.35	877.76	878.41	879.92	0.009949	6.51	14.45	14.47	2.08
Site (1)	150	100 ans	94.00	875.85	877.26	877.91	879.41	0.009895	6.49	14.48	14.48	2.07
Site (1)	100	100 ans	94.00	875.35	876.76	877.41	878.92	0.009951	6.51	14.45	14.47	2.08
Site (1)	50	100 ans	94.00	874.85	876.26	876.91	878.42	0.009979	6.51	14.43	14.46	2.08
Site (1)	0	100 ans	94.00	874.35	875.76	876.41	877.92	0.009926	6.50	14.46	14.47	2.08

V.2.1.2 Interprétation

Les résultats de la simulation hydraulique nous confirment que la variante d'aménagement adoptée pour oued baghai est la plus adéquate et fiable. Nous observons que le niveau d'eau tout le long du cours d'eau oued bouhegal ne dépasse pas la hauteur du canal, ce qu'il montre qu'il n'y a pas de débordement.

V.2.2 Ferrailage

- **Action :**

Le terme "action" désigne les charges, forces ou contraintes externes exercées sur une structure, un bâtiment ou un élément de construction. Il est crucial de comprendre et d'évaluer ces actions afin de concevoir des infrastructures robustes et pérennes. En génie civil, les actions peuvent être regroupées en plusieurs catégories principales, notamment :

- **Les charges permanentes (G) :**

Ce sont les charges permanentes qui continuent d'exercer une influence constante sur une structure, telles que le poids propre des matériaux de construction, le poids des éléments fixes comme les murs, les planchers et les poutres, ainsi que le poids des équipements fixes. Ces charges restent relativement constantes au fil du temps.

- **Les charges accidentelles (A) :**

Il s'agit de charges extraordinaires qui peuvent se produire lors de circonstances imprévues, comme les séismes, les explosions ou les impacts. Bien qu'elles surviennent rarement, ces charges peuvent avoir un impact significatif sur une structure.

- **Les charges hydrauliques (H) :**

Dans le cadre de l'aménagement des cours d'eau, les charges hydrauliques revêtent une importance capitale. Elles englobent la pression de l'eau, les forces dues aux courants, les risques d'inondation ainsi que d'autres phénomènes hydrauliques. La compréhension de ces charges est indispensable pour concevoir des ouvrages hydrauliques tels que des barrages, des ponts, des écluses et des digues.

V.2.3 Sollicitation

Le terme "sollicitation" désigne les contraintes, forces, déformations ou charges internes qui se forment à l'intérieur d'une structure ou d'un élément de construction en réaction aux actions externes appliquées sur celle-ci. Comprendre les sollicitations est crucial pour évaluer la performance et la sécurité d'une structure, et pour concevoir des éléments de construction capables de résister efficacement aux charges et contraintes auxquelles ils seront soumis.

$$\gamma_{F3} (\gamma_{FG\max} * G_{\max} + \gamma_{FG\min} * G_{\min} + \gamma_{Q1} * Q_1 + \gamma_{FQi} * \sum(\psi_{oi} * Q_i))$$

Avec :

- γ_{Qi} 1,5 dans le cas général ;
- γ_{Qi} 1,35 cas de température, charges routières et bâtiments agricoles à faible densité d'occupation humaine
- Ψ_{0i} : Coefficient de pondération des valeurs complémentaires

Et :

- 0,77 neige, vent;
- 0,6 variations uniformes de la température.

✓ **Vis-à-vis P'ELU :**

$$1,35G_{max} + G_{min} + 1,5Q_1 + \sum 1,3 \psi_i Q_i$$

✓ **Vis-à-vis P'ELS :**

$$G_{max} + G_{min} + Q_1 + \sum \psi_i Q_i$$

V.2.4 Caractéristiques des matériaux :**V.2.4.1 le béton :**

Le béton est un matériau de construction composite largement employé, composé principalement de ciment, de granulats tels que le sable, le gravier ou d'autres agrégats, et d'eau. Lorsque le ciment est mélangé à l'eau, il subit un processus chimique de durcissement, formant une liaison solide avec les granulats. Le béton présente une faible résistance aux efforts de traction mais peut supporter des charges de compression considérables. Pour pallier cette faiblesse, il est courant d'incorporer des barres d'acier (armatures) dans les zones sujettes à la traction, ces dernières étant résistantes à la fois à la compression et à la traction. Ce matériau hybride de béton et d'acier est connu sous le nom de béton armé. Les déformations différées du béton incluent des phénomènes tels que le retrait et le fluage.

Le béton armé a été largement utilisé dans les projets de génie civil en raison de sa forte résistance à la compression et de sa durabilité nécessitant peu d'entretien.

V.2.4.2 Le retrait :

Également connu sous le nom de retrait par contraction, le retrait est un phénomène naturel où le béton subit un changement dimensionnel en se contractant progressivement au fil du temps. Ce phénomène résulte principalement de la perte d'eau dans le béton pendant son durcissement, ce qui provoque une diminution de son volume. Le retrait du béton peut se produire à différentes étapes du processus de durcissement et peut être classé en plusieurs types, notamment :

- ✓ $1,5 \times 10^{-4}$ régions très humide ;
- ✓ 2×10^{-4} régions humide ;
- ✓ 3×10^{-4} régions tempérées sèche ;
- ✓ 4×10^{-4} régions sèche et chaude ;
- ✓ 5×10^{-4} région très sèches.

V.2.4.3 Le fluage :

Une éprouvette en béton soumise en permanence à une charge subit une déformation progressive au fil du temps.

$$E_{ij} = 1100 (f_{cj})^{1/3} \text{ (module d'élasticité instantanée)}$$

$$E_{vj} = 3700 (f_{cj})^{1/3} \text{ (module d'élasticité différée)}$$

$$\text{Ainsi, pour } f_{c28}=25\text{MPa, } E_{ij}=32164,2 \text{ Ma} \quad , E_{vj}=10818,9 \text{ MPa}$$

V.2.4.4 Les armatures :

Les armatures en acier présentent des propriétés similaires en traction et en compression, caractérisées par une résistance très élevée, une bonne ductilité, une limite élastique définie et un module de Young constant pour tous les types d'armatures. Les armatures

longitudinales et les éléments principaux du béton armé doivent avoir une haute adhérence (HA) et une limite élastique inférieure ou égale à 500 MPa.

V.2.4.5 Contraintes de calcul :

Les calculs effectués pour cette étude seront basés sur les caractéristiques suivantes :

- **Béton :**

$f_{c28}=25\text{MPa}$

$$E_{ij} = 11000\sqrt[3]{25} = 32164,20 \text{ MPa}$$

➤ **à l'état limite ultime :**

Contrainte ultime de compression :

$$f_{bc} = \frac{0.85 \times f_{cj}}{\gamma_b}$$

Avec :

$\gamma_b = 1,5$ pour une situation courante et donc $f_{bc} = 14.2 \text{ Mpa}$

$\gamma_b = 1,15$ pour une situation accidentelle et donc $f_{bc} = 18.5 \text{ Mpa}$

Contrainte ultime de traction (à 28jours) :

$$f_{ij} = 0.06 f_{c28} + 0.6 \quad ; \quad f_{ij} = 2,1 \text{ MPa}$$

➤ **à l'état limite de service :**

La contrainte limite de service en compression est donnée par la formule suivante :

$$\sigma_{bc} = 0.6 \times f_{c28}$$

Pour un béton avec une résistance en compression à 28jours de $f_{c28} = 25 \text{ MPa}$

$$\sigma_{bc} = 0,6 \times f_{c28} = 0,6 \times 25 = 15 \text{ MPa}.$$

La contrainte ultime de cisaillement du béton selon le (BAEL91/Art A – 5-1-21) :

La contrainte ultime de cisaillement est limitée par : $\tau \leq \bar{\tau}$

$$\bar{\tau} = \min(0.13 \times f_{c28}, 4\text{MPa}) = 3.25\text{MPa} \Rightarrow \text{Cas normal (fissuration peu nuisible)}$$

$$\bar{\tau} = \min(0.10 \times f_{c28}, 3\text{MPa}) = 2.5\text{MPa} \Rightarrow \text{Cas où la fissuration est préjudiciable.}$$

La contrainte ultime de cisaillement dans une pièce en béton définie par rapport à l'effort tranchant ultime τ_u .

$$\tau_u = \frac{T_u}{b_0 \times d}$$

V.2.4.6 Acier :

➤ à l'état limite ultime :

$f_e = 400 \text{ Mpa}$

$$\bar{\sigma}_s = \frac{f_e}{\gamma_s}$$

Avec :

$\gamma_s = 1.15$: situation durable donc : $\bar{\sigma}_s = 348 \text{ Mpa}$.

$\gamma_s = 1$: situation accidentelle donc : $\bar{\sigma}_s = 400 \text{ Mpa}$.

➤ à l'état limite de service :

Il y a trois cas à distinguer :

➤ La fissuration est peu préjudiciable : la vérification doit être effectuée à l'EIU.

➤ Fissuration préjudiciable : $\bar{\sigma}_s = \min\left(\frac{2}{3} f_e; 110\sqrt{\eta \times f_{ij}}\right)$.

➤ Fissuration très préjudiciable : $\bar{\sigma}_s = \min\left(\frac{1}{2} f_e; 90\sqrt{\eta \times f_{ij}}\right)$.

Où :

η : Coefficient de fissuration : $\eta = 1$ pour le rond lisse $\eta = 1,6$ pour la haute adhérence.

V.2.5 Etude des voiles :

Dans une structure, les voiles ne se contentent pas de soutenir les charges verticales ; leur grande rigidité en fait des éléments particulièrement efficaces pour résister aux forces horizontales. Ils sont largement utilisés dans les constructions en béton armé en raison de leur capacité satisfaisante à absorber les forces latérales telles que celles provoquées par les séismes. Leur robustesse et leur rigidité permettent de limiter les déformations à grande échelle et de réduire les déplacements. En absorbant la majeure partie des efforts latéraux, les voiles améliorent le comportement global de la structure et jouent un rôle crucial en matière de sécurité.

V.2.5.1 Comportement d'un voile :

Un voile fonctionne comme une console encastrée à la base. Il existe deux types de voiles, chacune avec un comportement différent :

Voile élancée : $\frac{h}{l} > 1.5$

Voile courte : $\frac{h}{l} < 1.5$

Et trois modes de rupture les distinguent :

V.2.5.2 Rupture par flexion :

Ce phénomène ne peut se produire que dans des voiles soumis à une flexion faiblement armée, principalement lorsque les armatures verticales sont dispersées plutôt que concentrées aux extrémités. Cette disposition pourrait entraîner la rupture complète des aciers tendus ou leur plastification.

- **Rupture en flexion par effort tranchant :**

Ce phénomène survient lorsque l'effort tranchant prédomine par rapport à la flexion (moment), entraînant la rupture ou la plastification des armatures de flexion verticales et/ou transversales.

- **Rupture par écrasement ou traction du béton :**

Les voiles qui sont fortement armés à la fois longitudinalement et transversalement peuvent subir ce type de rupture sous des charges élevées ou normales.

- **Calcul des voiles et des dalles pleines :**

Pour prévenir les types de rupture mentionnés précédemment, la section du voile doit être correctement armée avec des barres verticales et horizontales suffisantes, ainsi que des armatures transversales. Afin de supporter efficacement toutes les charges appliquées, un voile doit être pourvu d'armatures verticales, horizontales et transversales.

- **Recommandation RPA99:**

Les armatures verticales sont disposées en deux nappes parallèles aux faces de la voile pour reproduire les effets de flexion. Ces armatures doivent respecter un minimum de 20% sur toute la zone tendue.

Armatures horizontales : disposées en deux nappes vers l'extrémité des armatures verticales pour empêcher leurs flambements, utilisées pour reprendre les efforts tranchants. Il est nécessaire qu'elles soient équipées de crochets de $10 \cdot \emptyset$ de longueur et à 135° .

Les armatures transversales sont utilisées pour protéger les barres verticales intermédiaires contre les incendies, avec au moins quatre épingles par m^2 .

Règles communes :

- Le pourcentage minimum des armatures :

$$\left[\begin{array}{l} A_{\min} = 0.15 \% S \text{ voile complet} \\ 0.10 \% S \text{ zone courante} \end{array} \right.$$

- Espacement des barres :

$$S_t < \min (1.5 \text{ à } 30 \text{ cm})$$

- Diamètres des barres :

$$\phi = \frac{a}{10}$$

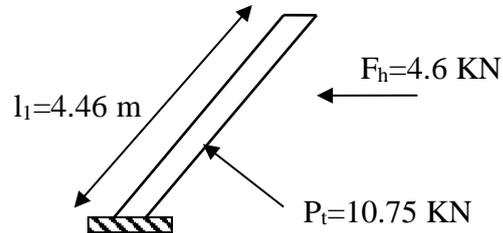
- Longueur de recouvrement :

$$\begin{array}{l} L_r = 20\emptyset \text{ zone comprimée sous toutes les combinaisons} \\ 40\emptyset \text{ zone qui peut être tendue} \end{array}$$

V.2.6 Le ferrailage du canal :

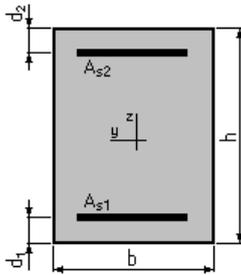
Déterminations du moment à l'encastrement à vide (sans prise en compte de l'eau)

$$\text{à l'elu} \Rightarrow M_{\text{encastrement}} = 1.35 \left(P_t \times \frac{l_1}{3} \right) + 1.5 \times F_h \times \left(\frac{H - ep}{2} \right) = 78.85 \text{ KN.m}$$



V.2.6.1 Ferrailage des voiles :

On prend une bande de 1m



$$b = 100.0 \text{ (cm)}$$

$$h = 14.1 \text{ (cm)}$$

$$d_1 = 3.0 \text{ (cm)}$$

$$d_2 = 3.0 \text{ (cm)}$$

$$M_e = 78.85 \text{ KN.m} = 7.885 \text{ t.m}$$

$$\sigma_{bc} = \frac{0.85 \times f_{c28}}{\gamma_b} \text{ Alors } \sigma_{bc} = 14.2 \text{ MPa}$$

$$\mu = \frac{M_e}{b \times d^2 \times \sigma_{bc}} \text{ Alors } \mu = 0.639 > \mu_l = 0.391 \text{ Asc} \neq 0$$

Armature comprimé :

$$A_{sc} = 18.06 \text{ cm}^2 \text{ on choisie } 6T20 \text{ } A_{\text{choisie}} = 18.84 \text{ cm}^2,$$

$$A_{\text{rep}} = A_{\text{choisie}} / 4 = 4.71 \text{ cm}^2 \text{ notre choix est } 6T12 \text{ es} = 15 \text{ cm, alors } A_{sc} = 18.84 \text{ cm}^2$$

et $A_{rep}=6.79\text{cm}^2$

$A_{Smin}=0.20.B = 4\text{cm}^2$ alors $A_{Smin}=0.20bd.\frac{f_{tj}}{f_e}$

$A_{smin}=1.785\text{cm}^2$

$A_s=\max (A_s.A_{smin})= 18.85\text{cm}^2$

Armature tendue :

$A_{st}=45.32\text{cm}^2$ on choisie 6T32

V.2.6.2 Ferrailage du radier :

$$\sigma_{moy} = \frac{3\sigma_1 + \sigma_2}{4} = 103.33 \text{ KPa} = 1.033\text{bars}$$

$$q_u = \sigma_{moy} \times 100 = 103.3 \text{ kg/cm}$$

$$M_u = \frac{q_u \times l^2}{8} = 3920247.91 \text{ Kg.cm}$$

$$\mu = \frac{M_u}{b \times d^2 \times \sigma_{bc}} \text{ Alors } \mu=0.270 < \mu_l=0.391 \text{ pivot A y'a pas d'acier comprimé}$$

$$A_s = \frac{M_u}{\beta \times d \times \sigma_s} = \frac{3920247.91}{0.839 \times 32 \times 3478.26} = 41.98 \text{ cm}^2 \text{ Alors on } 6\text{T32 } es=15\text{cm}$$

$A_s=48.25 \text{ cm}^2$ $A_{rep}=48.25/4=12.06 \text{ cm}^2$ on choisie 6T16

$$A_{smin} = 0.23bd.\frac{f_{tj}}{f_e}$$

$$A_{smin}=3.86 \text{ cm}^2$$

Alors $A_s=\max (A_s.A_{smin})$

V.2.7 Etude de stabilité des talus

L'étude de la stabilité des talus est une discipline essentielle en géotechnique, visant à évaluer la résistance des pentes face aux forces déstabilisatrices. Comprendre la stabilité des talus est crucial pour assurer la sécurité des infrastructures, des habitations et des personnes vivant à proximité. Cette étude comprend l'analyse des propriétés géologiques et géotechniques du sol. Pour cette évaluation, nous utiliserons le logiciel GeoStudio.

V.2.7.1 Présentation du logiciel GeoStudio

GeoStudio est un logiciel spécialisé largement utilisé dans le domaine de la géotechnique. Il offre une suite d'outils puissants pour la modélisation, l'analyse et la simulation de divers aspects du comportement des sols et des structures géotechniques. Voici une brève présentation de ses principales fonctionnalités :

- ✓ **SLOPE/W (Stabilité des Talus)** : Ce module permet d'analyser la stabilité des pentes, des talus, et des remblais.
- ✓ **SEEP/W (Écoulement de l'eau)** : SEEP/W est utilisé pour modéliser et analyser l'écoulement de l'eau dans les sols.
- ✓ **SIGMA/W (Analyse des Contraintes et des Déformations)** : est utilisé pour l'analyse des contraintes et des déformations dans le sol et dans les structures géotechniques.
- ✓ **TEMP/W (Analyse de la température)** : TEMP/W permet de modéliser la variation de la température dans les sols et les structures.
- ✓ **QUAKE/W** : est un module du logiciel GEOSTUDIO spécialement conçu pour analyser le comportement d'un terrain sous l'effet d'un séisme.
- ✓ **AIR/W (Analyse des écoulements d'air)** : AIR/W est utilisé pour l'analyse des écoulements d'air dans les sols et les déchets.
- ✓ **CTAN/W (Transport de Polluants)** : il est utilisé pour modéliser le transport des polluants dans le sol et les eaux souterraines.

V.2.7.2 Facteur de sécurité F_s

Le facteur de sécurité (FS) est une mesure essentielle dans l'étude de la stabilité des structures géotechniques telles que les talus, les digues, les fondations, les murs de soutènement, et autres. Il représente le rapport entre la capacité de résistance de la structure (sa capacité à supporter les charges et les contraintes) et les charges ou les forces qui lui sont appliquées. Le facteur de sécurité est utilisé pour évaluer la stabilité d'une structure.

V.2.7.3 Etapes pour l'étude de stabilité des talus avec SLOPE/W

L'étude de la stabilité des talus avec SLOPE/W suit généralement plusieurs étapes. Voici un aperçu des étapes de base pour effectuer une analyse de stabilité des talus avec SLOPE/W :

1. Création du modèle géométrique : Commencez par définir les dimensions, les angles de pente, et les autres caractéristiques géométriques du talus.
2. Entrée des propriétés géotechniques : Renseignez les propriétés des matériaux du talus, telles que la cohésion, l'angle de frottement interne, la densité, etc. Ces données peuvent provenir de tests de laboratoire ou de valeurs de référence spécifiques au site.
3. Spécification des conditions de charge : Définissez les conditions de charge, y compris la pression de l'eau et les charges de surcharge.
4. Choix du type d'analyse : Sélectionnez le type d'analyse à effectuer, par exemple, une analyse des cercles de glissement ou des tranches. Configurez également les paramètres de l'analyse, comme le facteur de sécurité cible.
5. Génération du modèle numérique : Utilisez les informations géométriques, les propriétés des matériaux et les conditions de charge pour créer un modèle numérique du talus dans SLOPE/W.
6. Lancement de l'analyse : Exécutez l'analyse en utilisant les paramètres définis. SLOPE/W effectuera les calculs nécessaires pour évaluer la stabilité du talus en fonction des données fournies.

V.2.7.4 Etude et résultats

Nous présentons en détail notre étude de la stabilité des talus à l'aide du logiciel SLOPE/W. Nous décrivons les différentes étapes du processus d'analyse, depuis la création du modèle géométrique jusqu'à l'exécution des calculs finaux. Les figures suivantes illustrent visuellement chaque étape, offrant ainsi une compréhension claire de notre approche méthodologique.

Pour l'étude d'aménagement d'oued Boughegal et pour la protection de la ville de baghai, et suite aux résultats des essais géotechniques il y a des recommandations concernant le cas défavorable pour assurer la stabilité et le bon dimensionnement des ouvrages. Tel que pour :

- Pour la densité γ_d du sol dans le cas défavorable, on prend la valeur maximale de la densité.
- Pour la cohésion C_u dans le cas défavorable, il est courant de considérer une valeur minimale de cohésion, ce qui signifie prendre une valeur plus basse que celle mesurée en laboratoire ou sur le terrain. Cela peut aider à tenir compte de la variabilité des propriétés du sol.
- Pour l'angle de frottement ϕ dans le cas défavorable, on prend la valeur minimale de l'angle de frottement. Cette valeur pourrait être plus basse que celle mesurée en laboratoire ou sur le terrain, pour tenir compte des variations potentielles des propriétés du sol.
- Pour les contraintes, nous identifions les charges maximales possibles qui peuvent agir sur le sol et les structures.

Le tableau ci-dessous présente les caractéristiques issues de l'étude géotechnique, à utiliser pour le calcul de la stabilité des talus.

Tableau 60: Résultats des essais géotechniques.

Paramètre	Symbole	Unité	Valeurs
Densité	γ_d	t/m ³	1.9
Cohésion	C_{uu}	bars	0.18
Angle de frottement	ϕ	°	20

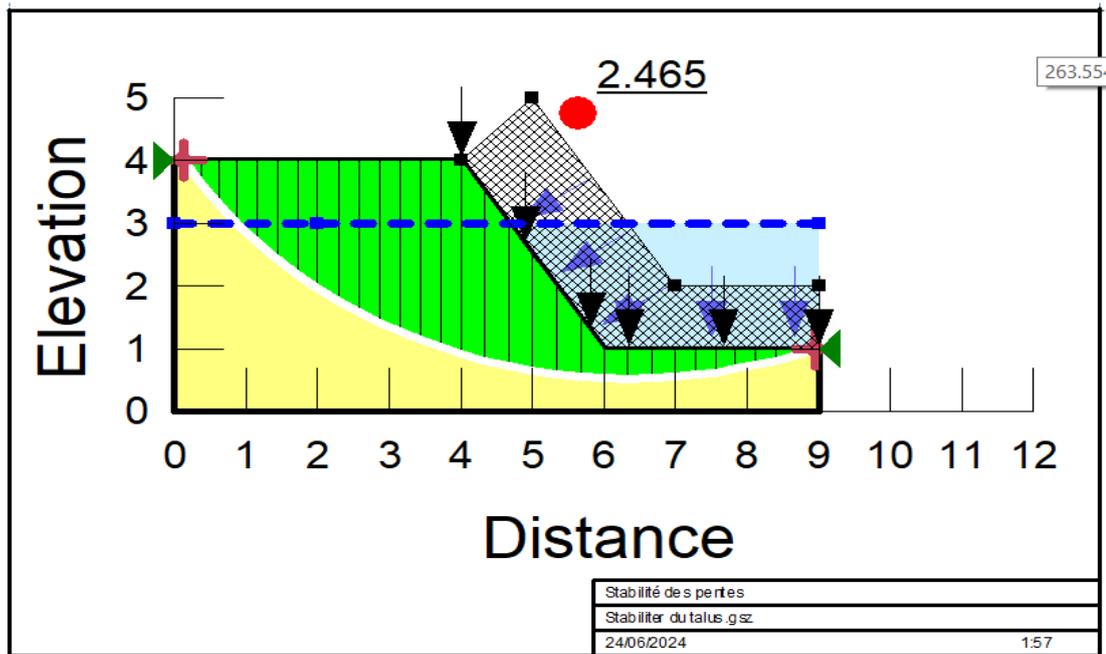


Figure 33 : Résultats de calcul

Pour l'étude des talus pour notre projet on fait l'étude juste une seule fois pour le cas le plus défavorable. La ligne piézométrique elle est à 2 m de haut du fond.

La valeur minimale du facteur de sécurité est de 2,465, correspondant à un centre de cercle critique. Il est essentiel que ce facteur de sécurité soit supérieur au facteur de sécurité admissible, soit $F_s = 2,465 > 1,5$. Cela indique que le talus analysé possède une marge de sécurité satisfaisante par rapport à ses conditions de charge ou d'utilisation, ce qui est crucial pour assurer sa stabilité et sa fiabilité.

V.2.8 Les installations de chantier

Les installations de chantier sont des dispositifs temporaires, implantés dans des zones permanentes ou provisoires, destinés à accueillir le personnel, les équipements, et les matériaux nécessaires à la construction d'une structure.

- L'installation des chantiers vise à :
 - Ordonner le chantier :
 - Gagner du temps ;
 - Éviter les pertes de matériaux et les doubles emplois de matériels ;
 - Améliorer la sécurité humaine et matérielle, ainsi que la qualité.
- Positionner les éléments :
 - Organiser les déplacements des engins et des véhicules sur le chantier ;
 - Bien positionner les livraisons ;
 - Positionner les réseaux en utilisant des grillages avertisseurs et des bandes de couleurs normalisées.

La réalisation de ces installations peut comporter d'énormes défis. Quelles que soient les difficultés rencontrées, il est impératif de disposer d'une compréhension précise de l'organisation du chantier. Pour atteindre ces objectifs, il est nécessaire de :

- Définir précisément les méthodes d'exécution et les procédures permettant l'utilisation de techniques modernes de construction à haute efficacité.
- Répartir et coordonner les tâches en recrutant une main-d'œuvre spécialisée.
- Organiser adéquatement les postes de travail, en stabilisant les processus où une mécanisation avancée est adoptée.
- Déterminer avec précision la quantité et la qualité de la main-d'œuvre à employer, car le coût de la main-d'œuvre a un impact significatif sur le prix de revient.

V.2.8.1 Rôles et responsabilités des intervenants sur chantier :

V.2.8.1.1 Le maître de l'ouvrage « MOA » :

Le maître d'ouvrage désigne la personne morale ou physique pour laquelle l'ouvrage est construit. En tant que responsable principal de l'ouvrage, il exerce une fonction d'intérêt général dont il ne peut se démettre. Après avoir vérifié la faisabilité et l'opportunité de l'opération envisagée, il lui revient de déterminer la localisation de l'ouvrage, d'en définir le programme, d'en établir l'enveloppe financière prévisionnelle, d'en assurer le financement, de choisir le processus de réalisation, et de conclure les contrats avec le maître d'œuvre et les entrepreneurs pour les études et l'exécution des travaux.

Pour ce faire, le maître d'ouvrage doit s'entourer de toutes les compétences nécessaires à la bonne définition, conception et exécution de son projet (Benoit & Gülseren, 2021).

Dans le contexte d'un barrage, il est courant que le maître d'ouvrage soit également responsable de l'interprétation de toutes les étapes, depuis le début de la construction jusqu'à la fin de la phase de mise en eau, y compris la gestion du processus de la première mise en eau.

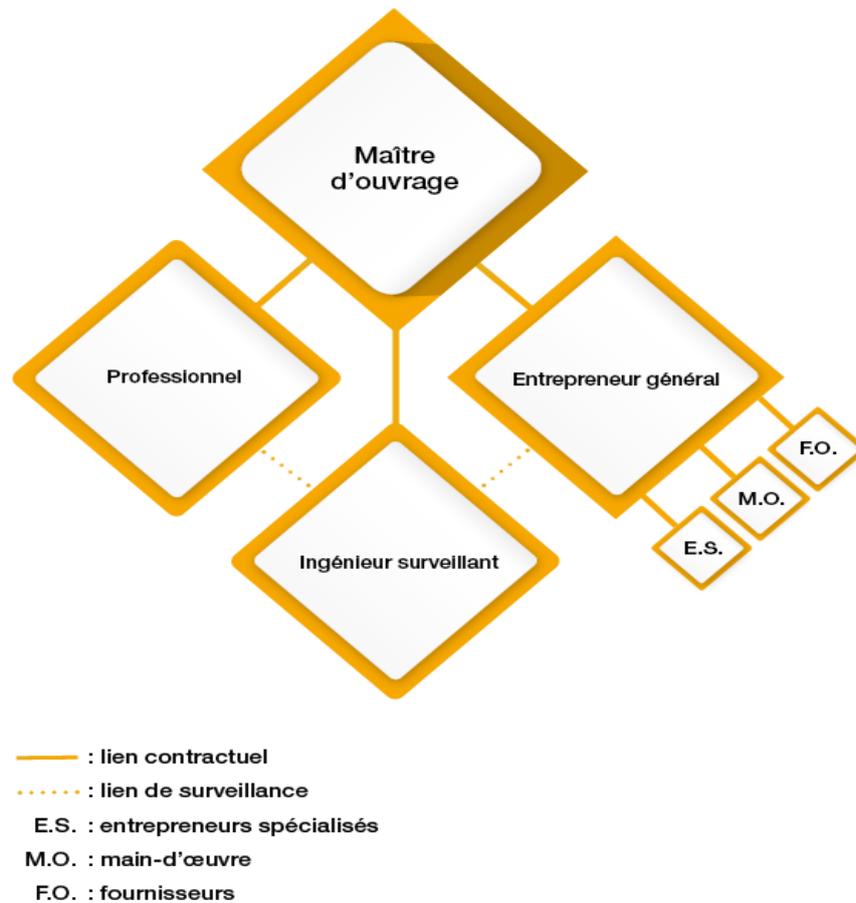
V.2.8.1.2 Le maître d'œuvre « MOE » :

Le maître d'œuvre (MOE) est la personne physique ou morale sélectionnée par le maître d'ouvrage. Sa mission est de concevoir la construction ou la réhabilitation d'un ouvrage de bâtiment ou d'infrastructure en conformité avec le programme défini par le maître d'ouvrage. Il s'assure également que cette conception est respectée lors de l'exécution de l'ouvrage et que les travaux sont réalisés conformément aux règles de l'art. En général, la mission de maîtrise d'œuvre est distincte de celle des titulaires des marchés de travaux (Benoit & Gülseren, 2021).

V.2.8.1.3 L'entrepreneur :

Une personne physique ou morale, titulaire du contrat de projet, est responsable de la construction de l'ouvrage conformément aux conceptions, dessins et descriptions du MOE. Elle doit :

- Mettre en place les installations et assurer la sécurité du chantier ;
- Réaliser tout ou partie des études d'exécution ;
- Exécuter les ouvrages en respectant les termes du contrat et la réglementation en vigueur
- Demander la réception de l'ouvrage ;
- Garantir le parfait achèvement de l'ouvrage (Benoit & Gülseren, 2021).



V.2.8.2 Installations du chantier :

V.2.8.2.1 Installations destinées au personnel :

Cela inclut généralement les installations telles que les dortoirs, les vestiaires, les réfectoires, les sanitaires et les bureaux de chantier ;

- **Aires de Stockage pour le Ciment**

- Silos à ciment : Structures verticales ou horizontales utilisées pour stocker le ciment en vrac. Ils protègent le ciment de l'humidité et des contaminants.

- Entrepôts couverts: Bâtiments fermés où les sacs de ciment sont empilés sur des palettes pour éviter le contact direct avec le sol et l'humidité.

- **2.Bacs de Stockage pour les Agrégats**

- Bacs à agrégats : Espaces délimités et segmentés pour le stockage de différents types d'agrégats (sable, gravier, etc.). Ces bacs sont souvent couverts pour éviter la contamination par la pluie et les impuretés.

- Aires de stockage ouvertes : Espaces en plein air pour les agrégats, généralement protégés par des bâches ou des toits temporaires pour minimiser l'exposition aux éléments.

- **3. Réservoirs d'Eau**

- Réservoirs de stockage d'eau : Citernes ou réservoirs pour stocker l'eau nécessaire au mélange du béton et aux besoins du chantier. Ils sont placés à proximité des zones de travail pour faciliter l'accès.

- **4. Installations pour les Adjuvants**

- Conteneurs pour adjuvants: Récipients spécialisés pour stocker les additifs chimiques (plastifiants, retardateurs, accélérateurs, etc.) utilisés dans le béton armé. Ces conteneurs doivent être bien étiquetés et stockés dans des conditions appropriées pour éviter les dégradations.

- **5. Stockage des Armatures**

- Supports pour barres d'armature : Structures métalliques ou en bois utilisées pour empiler et organiser les barres d'armature de différentes tailles. Elles aident à maintenir l'acier propre et sans déformation.

- Aires couvertes : Espaces protégés contre la pluie et la poussière pour stocker les armatures afin de prévenir la corrosion et les dommages.

- **6. Zone de Préparation et de Mélange**

- Aires de préparation du béton: Emplacements dédiés à la préparation et au mélange des composants du béton, souvent équipés de centrales à béton mobiles ou fixes.

- **7. Stockage des Matériaux de Construction Divers**

- Entrepôts généraux : Espaces couverts pour le stockage de matériaux de construction supplémentaires tels que les coffrages, les outils, et les équipements nécessaires pour le chantier.

- **8. Sécurité et Gestion des Déchets**

- Installations de sécurité : Équipements et structures pour assurer la sécurité sur le site de stockage, incluant les clôtures, les systèmes de surveillance, et les zones de stockage des matériaux inflammables.

- Zones de gestion des déchets : Espaces dédiés au tri et à la gestion des déchets de construction, assurant une gestion écologique et conforme aux réglementations.

V.2.8.3 Les moyens de chantier :

V.2.8.3.1 Les moyens humains :

Pour assurer la réalisation de l'ouvrage, il est primordial de recruter du personnel qualifié capable de mener les études préliminaires et de superviser la construction. Il est nécessaire de documenter précisément leurs qualifications, certifications et expertises.

V.2.8.3.2 Les moyens matériels :

Le matériel utilisé comprend les équipements standards utilisés sur les chantiers de travaux publics. L'usage d'engins de gros gabarit contribuera considérablement à diminuer à la fois les coûts et les délais des travaux de terrassement.

➤ Les engins couramment utilisés peuvent inclure :

1. Pelleteuses (Excavatrices) : Pour l'excavation du sol et la préparation du lit du canal.

2. Bulldozers : Pour le nivellement du terrain et la préparation de la plateforme.
3. Chargeuses sur pneus : Pour le transport et le chargement de matériaux comme le béton et les agrégats.
4. Camions-bennes : Pour le transport de matériaux comme le béton frais, les agrégats et les matériaux excavés.
5. Grues mobiles: Pour le levage et l'installation de préfabriqués en béton, comme les dalles et les conduites.
6. Compacteurs vibrants : Pour compacter le sol et les remblais afin d'assurer une base solide pour le bétonnage.
7. Pompe à béton: Pour le pompage du béton directement à l'endroit souhaité dans le canal.
8. Finisseurs de béton: Pour la mise en place et la finition du béton dans le canal.

V.2.8.3.3 Devis quantitatif et estimatif du projet :

Les estimations des coûts des travaux d'aménagement comprennent les éléments suivants :

- ✓ Le prix unitaire des travaux de terrassement.
- ✓ Le prix unitaire de la fourniture et de la pose béton armé.

Le devis du projet est donné ci-dessous :

Tableau 61 : Devis quantitatif et estimatif du projet

N	Désignation des travaux	Unité	Quantité	Prix Unitaire (DA)	Montant (DA)
1	Déblais	m ³	75638	300	22 691 400
2	Remblais	m ³	12192.67	700	8 534 869
3	Béton	m ³	6969.04	30 000	209 071 200
4	Béton de propreté	m ³	1264.8	8 000	10 118 400
Total HT (DA)					250 415 869
TVA (%)					19
Total TTC (DA)					297 994 884,11

Le montant total du projet s'élève a **297994885 DA**, deux cent quatre-vingt-dix-sept millions neuf cent quatre-vingt-quatorze mille huit cent quatre-vingt-cinq dinars algériens.

V.3 Planification des travaux :

V.3.1 Définition :

Il s'agit de l'activité consistant à identifier et organiser les tâches du projet, ainsi qu'à élaborer les étapes nécessaires pour les réaliser. En d'autres termes, c'est une technique utilisée par les responsables opérationnels pour améliorer l'efficacité de leurs opérations. La liste des objectifs de planification est la suivante :

- ✓ L'installation des postes de travail
- ✓ L'observation instantanée
- ✓ L'analyse des tâches
- ✓ Le chronométrage
- ✓ La simplification des méthodes

V.3.2 Techniques de planification :

Il existe deux principales méthodes de planification :

- ✓ Les méthodes basées sur le réseau
- ✓ Les méthodes basées sur le graphique

V.3.3 Technique basée sur le réseau:

V.3.3.1 Définition :

La représentation graphique d'un projet, appelée réseau, permet d'illustrer les relations entre les différentes opérations, qu'elles soient successives, simultanées, convergentes, ainsi que leur durée de réalisation. Il existe deux types de réseaux distincts :

- ✓ **Réseau à noeuds** : Un noeud et des flèches représentent les opérations successives.



Figure 34 : L'opération A doit être terminée avant que l'opération B puisse commencer.

- ✓ **Réseau à flèche** : Une flèche représente l'opération et les noeuds représentent la succession des opérations.



Figure 35 : L'opération B suit l'opération A.

V.3.3.2 Construction du réseau :

Les six opérations suivantes doivent être effectuées pour construire un réseau :

- ✓ Créer une liste de tâches : Dans cette première étape, il s'agit de réaliser un inventaire exhaustif et approfondi de toutes les tâches nécessaires à la réalisation d'un projet.
- ✓ Déterminer si les tâches antérieures doivent être successives ou convergentes peut s'avérer difficile après avoir établi la liste des tâches.
- ✓ Créer des graphes partiels.
- ✓ Effectuer le regroupement des graphes partiels.
- ✓ Définir les tâches nécessaires pour le début et la fin de l'ouvrage.
- ✓ Créer un réseau.

V.3.3.3 Différentes méthodes basées sur le réseau :

V.3.3.3.1 La méthode CPM (Critical Path Method) :

Cette méthode vise à réduire le temps nécessaire pour accomplir un travail en suivant trois étapes distinctes :

- ✓ Déterminer le personnel requis pour effectuer le travail.
- ✓ Effectuer une analyse systématique du réseau chaque jour, selon l'unité de temps choisie.
- ✓ Ajuster le réseau pour répondre aux exigences de l'entreprise.

V.3.3.3.2 La méthode PERT (Program Evaluation and Review Technique) :

La technique d'ordonnancement des tâches et de contrôle des programmes consiste à organiser plusieurs tâches sous forme de réseau. Ces tâches, en fonction de leur chronologie et de leurs dépendances, contribuent toutes à l'obtention d'un produit fini.

V.3.3.3.3 Méthodes basées sur le graphique :

- ✓ **La technique de la ligne de balance :** Cette méthode est utilisée pour planifier des projets de construction avec des travaux répétés.
- ✓ **Méthode à barres :** Cette méthode utilise un diagramme à barres (plan de travail) et deux réseaux.

V.3.3.3.4 Les étapes de la planification :

Le processus de planification des travaux à réaliser comprend les étapes suivantes :

✓ Collecte des informations :

Cette méthode permet de planifier des projets de construction en établissant une synthèse basée sur l'analyse des informations recueillies lors d'études comparatives. Cela facilite l'utilisation appropriée du plan de réalisation du projet.

✓ Décomposition du projet :

Il est essentiel de décomposer le projet, car chaque projet peut être examiné de différentes manières. À chaque tâche, nous assignons un responsable ainsi que les ressources matérielles nécessaires .

✓ Relation entre rôle et taches :

Lors de la réalisation des tâches, il existe deux relations essentielles entre elles. L'une permet l'accès à un enchaînement logique, tandis que l'autre permet l'accès à un enchaînement préférentiel.

Choix de la méthode de calcul :

Le type d'ouvrage à construire détermine la méthode de calcul à utiliser. Lorsque les opérations se suivent, comme c'est le cas ici, il est préférable d'utiliser la méthode CPM (Critical Path Method).

V.3.3.3.5 Paramètres de calcul dans la méthode C.P.M :

Les paramètres nécessaires pour utiliser cette méthode sont les suivants :

DCP	TR
DFP	DCPP
DFPP	MT

Avec :

TR : temps nécessaire pour terminer.

DCP : date de début la plus tôt possible.

DCPP : date de début la plus ancienne.

DFP : date limite de clôture.

DFPP : date limite de clôture

MT : marge totale, temps nécessaire à l'exécution de l'opération, comme :

$$DFP = DCP + tr$$

$$DCPP = DFPP - tr$$

V.3.3.3.6 Chemin critique (C.C) :

Le chemin critique relie les opérations ayant une marge totale nulle (0) à la durée totale du projet (DTR). Pour identifier un chemin critique, assurez-vous que les deux conditions suivantes sont remplies :

$$MT = 0 \text{ e t } \sum tr_{cc} = DTP$$

V.3.3.4 Diagramme de Gantt :

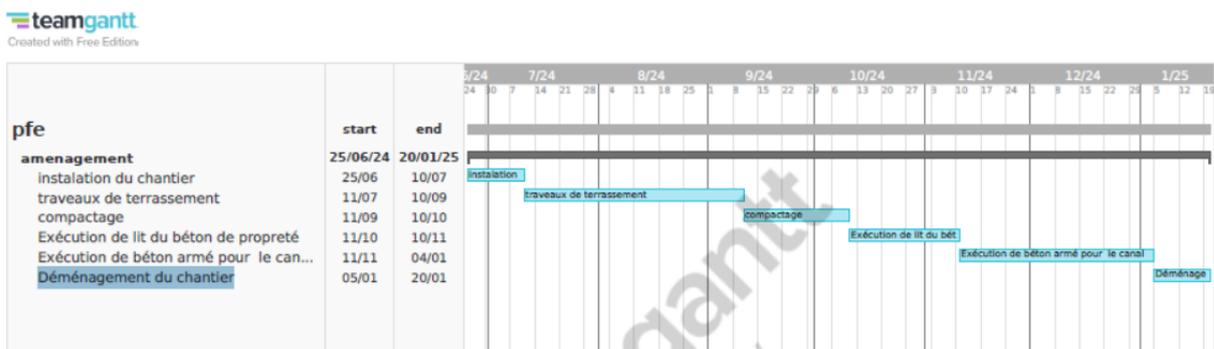
Un diagramme de Gantt est un outil de gestion de projet qui représente graphiquement les tâches sur une ligne de temps. Chaque tâche est affichée sous forme de barre horizontale, dont la longueur correspond à sa durée, et leur position montre les dates de début et de fin. Les diagrammes de Gantt sont couramment utilisés pour planifier, suivre et gérer des projets, offrant une visualisation claire de la chronologie des tâches, permettant d'identifier les retards potentiels et facilitant la gestion du projet. Ils peuvent également être mis à jour au cours du projet pour refléter les changements et ajustements.

V.3.3.5 Elaboration du réseau selon la méthode CPM :

La méthode de planification CPM vise à augmenter le rendement du travail tout en réduisant le temps et les coûts du projet. Pour construire un réseau, il est essentiel de définir clairement les différentes responsabilités des tâches. Le tableau suivant présente ces responsabilités.

Tableau 62 : :Liste des opérations avec leurs durées

Désignation d'opération	Code	Durée (Jours)
instalation du chantier	A	15
travaux de terrassement	B	60
compactage	C	30
Exécution de lit du béton de propreté	D	30
Exécution de béton armé pour le canal	E	50
Déménagement du chantier	F	15

**Figure 36 : Diagramme de GANTT**

Conclusion

Ce chapitre a examiné en détail la variante d'aménagement adoptée pour le projet de l'oued Bouhegal, en mettant en lumière les aspects de la conception, du calcul hydraulique, du calcul de stabilité, et du ferrailage. Il a également abordé le volume des travaux, l'agencement des travaux et la planification. Les résultats de cette étude détaillée confirment que la variante d'aménagement choisie maîtrise les crues centennales de l'oued Boghegal et assure la sécurité des habitants de la commune de Baghai.

Conclusion générale

Notre travail se concentre sur l'un des risques les plus dangereux qui affectent la ville de Baghai : les crues et les inondations, causées par divers paramètres topographiques, géologiques, hydrologiques et météorologiques. La gestion des inondations, un sujet d'actualité crucial en raison des changements climatiques des dernières décennies, comprend un ensemble de mesures et de stratégies visant à gérer les risques d'inondation et à minimiser les impacts négatifs sur les populations, les biens et l'environnement.

L'étude que nous avons menée est divisée en plusieurs parties. Tout d'abord, nous avons réalisé une étude de reconnaissance du site et de la zone d'étude, caractérisée par une haute densité de population, ce qui implique une vulnérabilité accrue aux risques d'inondation. Ensuite, nous avons effectué une étude géologique et géotechnique essentielle pour évaluer les caractéristiques du sol en vue d'une conception optimale.

L'étude hydrologique, incluant une analyse hydromorphologique du bassin versant, révèle une forme allongée avec un relief prononcé et un temps de concentration relativement court, aggravant le risque de crues. Pour estimer le débit de crue, nous avons utilisé les données hydrométriques de la station Foum El Gueiss, ajustées à une loi statistique, ce qui nous a permis de déterminer le débit correspondant à une période de retour de 100 ans, soit un débit centennal de 94 m³/s en appliquant la méthode de GRADEX. Par la suite, une étude hydraulique approfondie a été menée, basée sur une compréhension détaillée des principes hydrauliques et des écoulements de l'oued Boughegal. Nous avons utilisé le logiciel HEC-RAS pour évaluer les risques d'inondation le long de ce cours d'eau. Les simulations ont montré que le débit centennal entraîne des débordements, nécessitant ainsi un aménagement. Nous avons proposé et étudié en détail deux variantes du point de vue technico-économique, et sélectionné celle qui semblait la plus appropriée et économique pour protéger la ville de Baghai : un canal de profil trapézoïdal en béton armé.

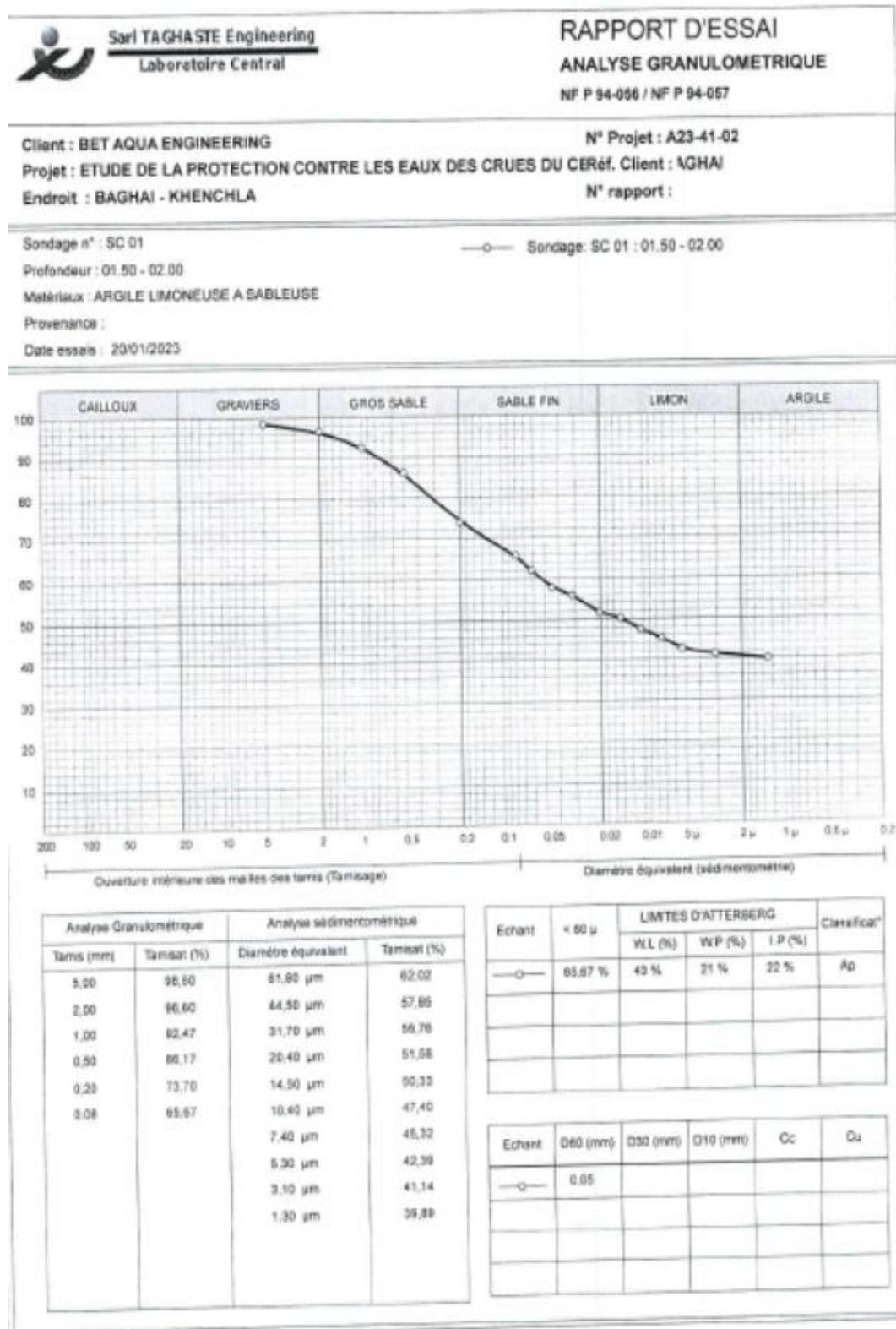
Enfin, nous avons mené une étude détaillée de la variante choisie, représentant un canal trapézoïdal en béton armé. Dans cette phase, nous avons dimensionné avec précision les ouvrages nécessaires pour assurer le bon fonctionnement de la variante retenue, analysé la stabilité des talus (qui se sont révélés stables) et, après une simulation hydraulique du canal de la variante adoptée, confirmé l'absence de débordement tout au long de l'oued.

Références bibliographiques

- KVOĀKA Davor, AHMADIAN Reza, FALCONER Roger A., 2018. Flood Hazard Indices in Torrential or Flashy River Basins and Catchments. *Water Resour Manage* 32, 2335–2352 (2018).
Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1007/s11269-018-1932-6>
- LEDOUX, Bruno, 2006. La gestion du risque inondation, 770 pages, Edition TEC et DOC, 2006.
- Touaibia Bénina, 2004. Manuel Pratique d'Hydrologie. Presse Madani frères, Blida, Algérie. 166p.
- Touaibia, bénina. (2015). Manuel pratique d'hydrologie (2ème Edition). Disponible sur : https://ia801004.us.archive.org/19/items/manuelpratiqedhydrologie/Manuel_pratique_d_hydrologie.pdf
- U.S. Army Corps of Engineers, 2016a. HEC-RAS River Analysis System – User's Manual, Hydrologic Engineering Center, CPD-68, Version 5.0. 960p.
Disponible à l'adresse : <http://www.hec.usace.army.mil/software/>
- Benlaoukli, B. (2004). Organisation de chantier, la planification des travaux les M.M.O [Working Paper].
Disponible sur : <http://localhost:8080/xmlui/handle/123456789/108>
- Bouchelkia, H., & Remini, B. (2003). Quantification du transport solide dans le bassin versant algérien du Chellif. *Sciences Eaux & Territoires*, 33 Ingénieries-EAT, Article 33 Ingénieries-EAT.
Disponible sur : <https://hal.science/hal-00466014/document>
- Helga Jane et Richad 2004 : RISQUE D'INONDATION ET AMÉNAGEMENT DURABLE DES TERRITOIRES
- Degoutte, G., 2006: Diagnostic, aménagement et gestion des rivières Hydraulique et morphologie fluviales appliquées.
- Cosandey, C. (1990). L'origine des crues dans les bassins-versants élémentaires : Du ruissellement sur les versants à l'écoulement de crue. *Annales de Géographie*, 99(556), 641-659.
Disponible sur : <https://www.jstor.org/stable/23452703>
- Guillot, & Durand. (1969). La Méthode du gradex pour le calcul de la probabilité des crues à partir des pluies—UNESCO Digital Library.
Disponible sur : <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000014626>
- Houbib, H. (2012). Analyse Multicritères des composantes du Milieu à l'aide des techniques de la géomatique pour un aménagement intégré de la vallée d'Oued Mellagou- Bouhmama W. KHENCHELA [Université El Hadj Lakhdar -Batna].
Disponible sur : <http://eprints.univ-batna2.dz/574/1/sce%20HOUBIB%20hanane.pdf>
- Toumi, A. (2016). Hydraulique à surface libre (cours & exercices). 197.
Disponible sur : <https://dspace.univ-guelma.dz/jspui/bitstream/123456789/601/1/H.S.L%28Cours%20%26%20Exercices%29-01.pdf>

- Sedrati, C. (2018). Étude d'une retenue collinaire sur l'oued Charchar, commune de Hadjadj (Mostaganem) [mémoire de fin d'études]. École Nationale Supérieure d'Hydraulique -Arbaoui Abdellah-
- Menad, W. (2019). Approche modèle pour une prise en charge globale des risques hydrologiques dans le bassin méditerranéen. Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège, 88, 21.
Disponible sur : <https://doi.org/10.25518/0037-9565.8402>
- Idrici, A. (2017). Modélisation et simulation numérique d'écoulement d'eau à surface libre avec HEC-ras cas d'oued de Saida.
Disponible sur :
https://butec.univ-saida.dz/admin/opac_css/doc_num.php?explnum_id=523
- Boubchir, A. (2008). Risques d'inondation et occupation des sols dans le thore (region de Labruguère et de Mazamet)
Disponible sur : <https://docplayer.fr/8918784-Risques-d-inondation-et-occupation-des-sols-dans-le-thore-region-de-labruguere-et-de-mazamet.html>
- Bouguerra, S., Bouanani, A., & Baba-Hamed, K. (2016). Transport solide dans un cours d'eau en climat semi-aride : Cas du bassin versant de l'Oued Boumessaoud (nord-ouest de l'Algérie). Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science, 29(3), 179-195.
Disponible sur : <https://doi.org/10.7202/1038923ar>
- M.E.D.D (2004), (Ministère de l'écologie et du développement durable) France, direction de la Prévention des pollutions et des risques, sous-direction de la Prévention des risques majeurs. 2004. Risques naturels majeurs : Les inondations.
- Strahler, A. N. (1952). HYPSONETRIC (AREA-ALTITUDE) ANALYSIS OF EROSIONAL TOPOGRAPHY. Geological Society of America Bulletin, 63(11), 1117. Disponible sur : [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1952\)63\[1117:HAAOET\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63[1117:HAAOET]2.0.CO;2)

Annexes :





Sarf TAGHASTE Engineering
Laboratoire Central

Essai de Pénétration Dynamique
NF P 94-115

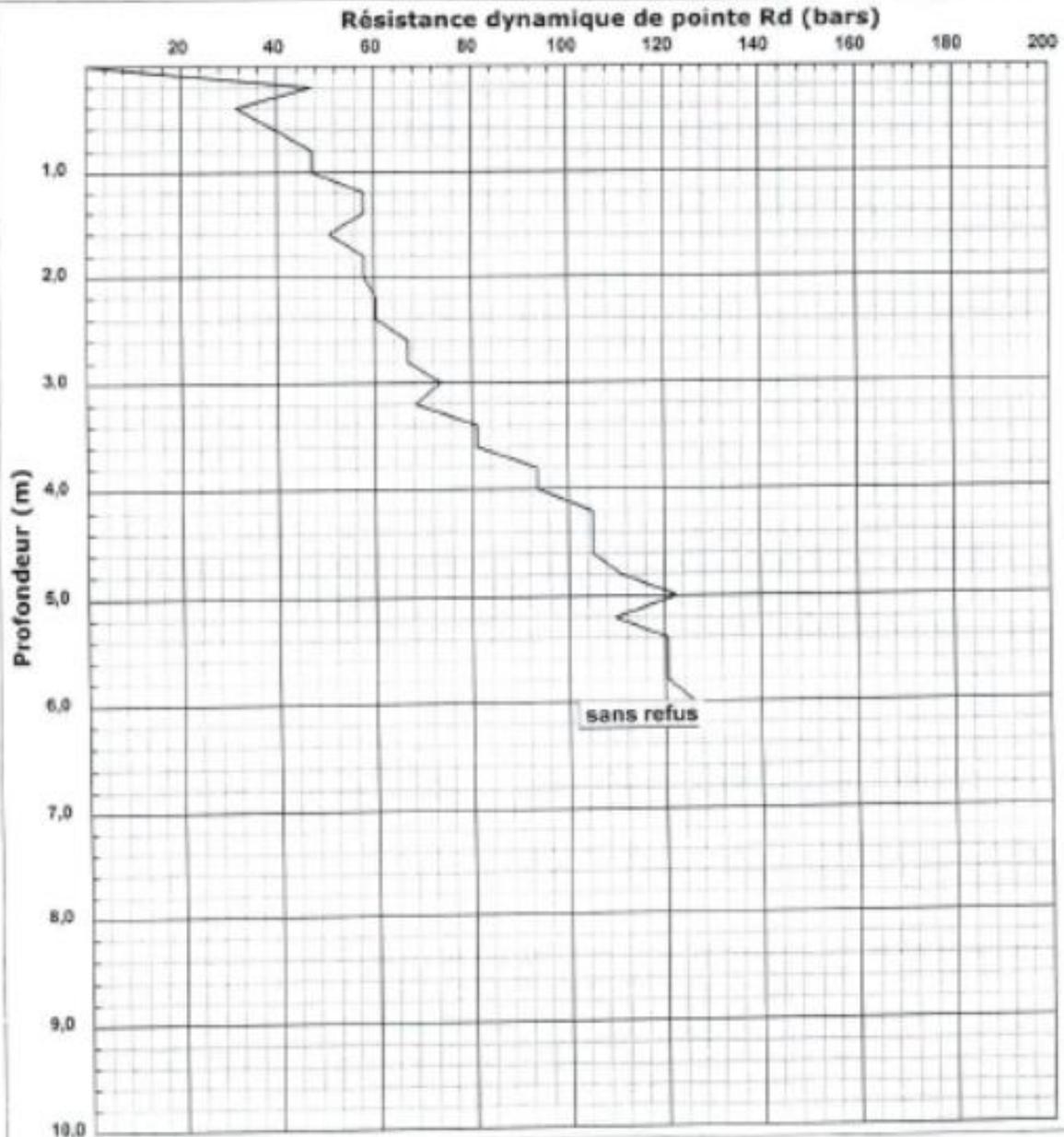
INTITULE : ETUDE DE LA PROTECTION CONTRE LES EAUX DES CRUES DU CENTRE DE BAGHAI
N°DOSSIER : A23-41-02
LIEU : BAGHAI - KHENCHLA
CLIENT : BET AQUA ENGINEERING
DATE ESSAIS : 19/01/2023 au 19/01/2023

Localisation :

Coordonnées GPS :

X : Z :

Y :



Caractéristiques du pénétromètre dynamique

Masse enduite + guidage Mouton (m') : 25 kg
Masse du Mouton (m) : 64 kg
Hauteur de chute (H) : 0.75 m
Aire de la section droite de la pointe (A) : 20 cm²

Longueur des tiges : 1 m
Masse d'une tige (m') : 8,5 kg
Enfoncement (e) : 20 cm

Formule de Battage :

$$Rd = \frac{m^2 \times H}{A \times \frac{e}{14} \times (m + \sum m')}$$



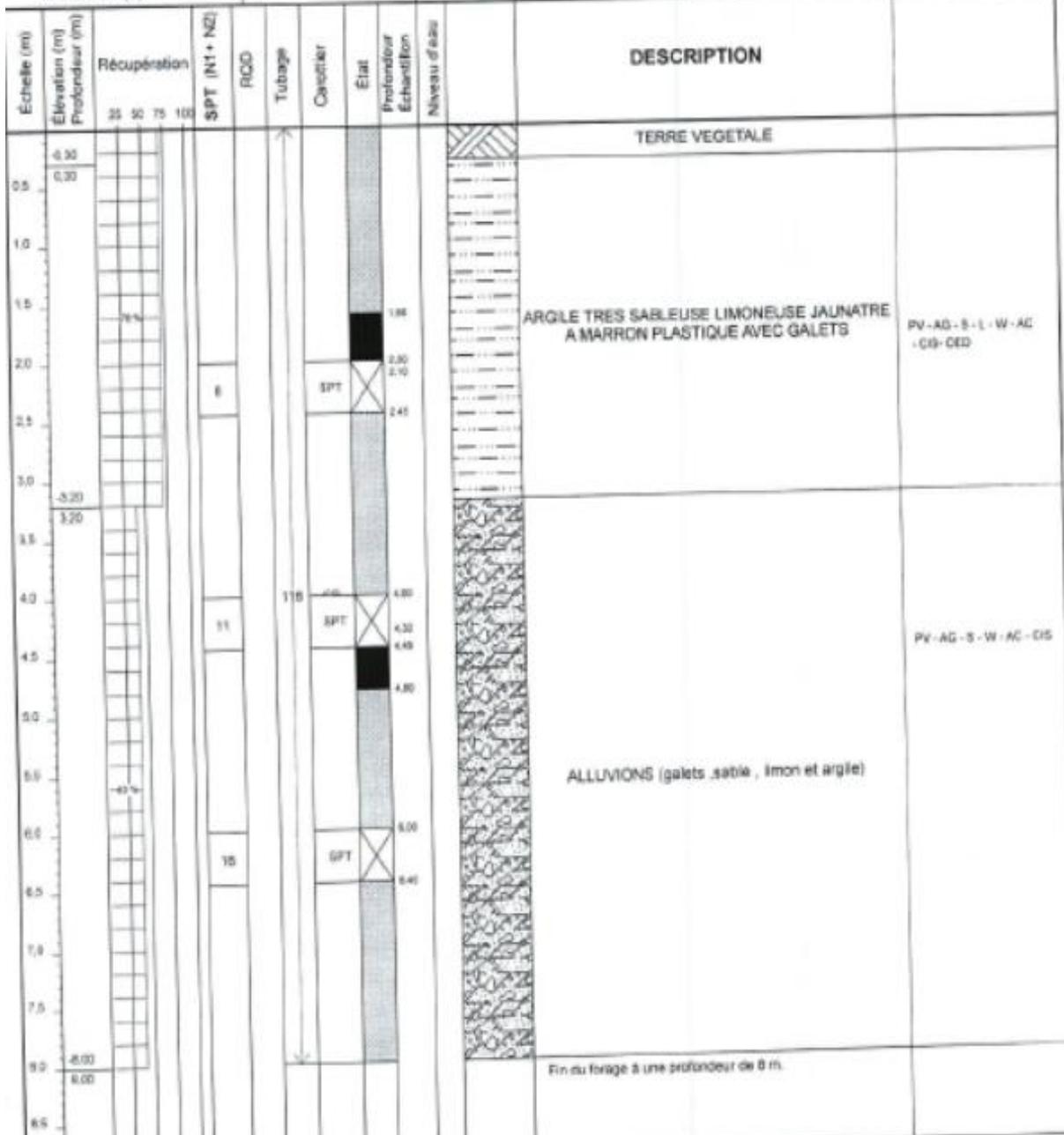
Sarl TAGHASTE Engineering
Laboratoire Central

RAPPORT DE FORAGE

Sondage : SC 02

Projet : ETUDE DE LA PROTECTION CONTRE LES EAUX DES CRUES DU CENTRE DE BAGHAI
 Endroit : BAGHAI - KHENCHLA
 Dossier N° : A23-41-02
 Client : BET AQUA ENGINEERING

Date début : 19/01/2023 Date fin : 19/01/2023 Profondeur forée (m) : 0 Niveau d'eau (m) :	Coordonnées GPS X : 328604.00 Y : 3931847.00 Z :	Boue de forage : SS Type forage : CAROTTE Foreuse : ABYSS 70 XH	Etat des échantillons : Intact <input type="checkbox"/> Remanié <input checked="" type="checkbox"/> Paraffiné <input checked="" type="checkbox"/> Roche <input type="checkbox"/>
--	---	---	---



REMARQUES :	TYPE CAROTTIER :	ABREVIATIONS :
	CF : Carotier foré TM : Tube à paroi mince PS : Tube à pression fixe CR : Tube carotier TF : Tube foré	AG : Analyse granulométrique S : Scléromètre L : Lunette de lecture (75, 80) ST : Tendeur à eau PV : Press. volumétrique (54, 58) AC : Analyse chimique
Préparé par :	Validé par :	2023/01/19 Page : 1 de 1



Sari TAGHASTE Engineering
Laboratoire Central

RAPPORT D'ESSAI
ANALYSE GRANULOMETRIQUE
NF P 94-056 / NF P 94-057

Client : BET AQUA ENGINEERING
Projet : ETUDE DE LA PROTECTION CONTRE LES EAUX DES CRUES DU CERéf. Client : AGHAI
Endroit : BAGHAI - KHENCHLA

N° Projet : A23-41-02
N° rapport :

Sondage n° : SC 01

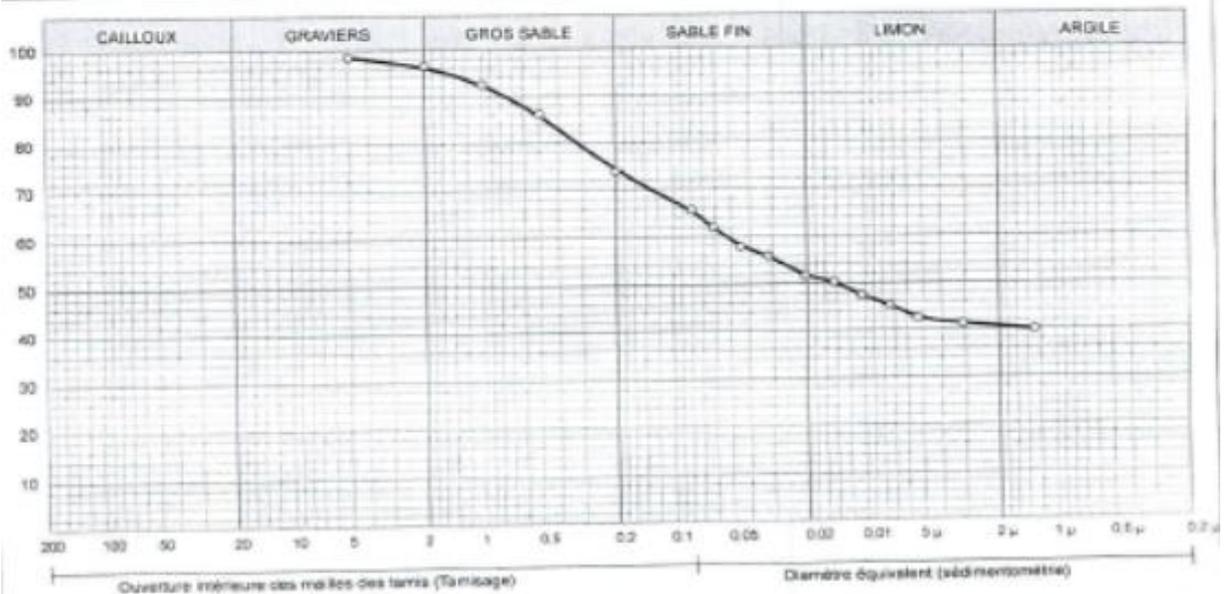
—○— Sondage: SC 01 : 01.50 - 02.00

Profondeur : 01.50 - 02.00

Matériaux : ARGILE LIMONEUSE A SABLEUSE

Provenance :

Date essais : 20/01/2023



Analyse Granulométrique		Analyse sédimentométrique	
Tamis (mm)	Tamisaat (%)	Diamètre équivalent	Tamisaat (%)
5,00	96,50	81,90 μm	62,02
2,00	96,60	44,50 μm	57,66
1,00	92,47	31,70 μm	56,76
0,50	86,17	20,40 μm	51,68
0,20	73,70	14,50 μm	50,33
0,08	65,67	10,40 μm	47,40
		7,40 μm	45,32
		5,30 μm	42,59
		3,10 μm	41,14
		1,30 μm	39,89

Echant	< 60 μ	LIMITES D'ATTERBERG			Classification
		WLL (%)	Wp (%)	L.P (%)	
—○—	65,67 %	42 %	21 %	22 %	Ap

Echant	D80 (mm)	D50 (mm)	D10 (mm)	Cc	Cu



Sarl TAGHASTE Engineering
Laboratoire Central

Essai de Pénétration Dynamique
NF P 94-115

INTITULE : ETUDE DE LA PROTECTION CONTRE LES EAUX DES CRUES DU CENTRE DE BAGHAI

N°DOSSIER : A23-41-02

LIEU : BAGHAI - KHENCHLA

CLIENT : BET AQUA ENGINEERING

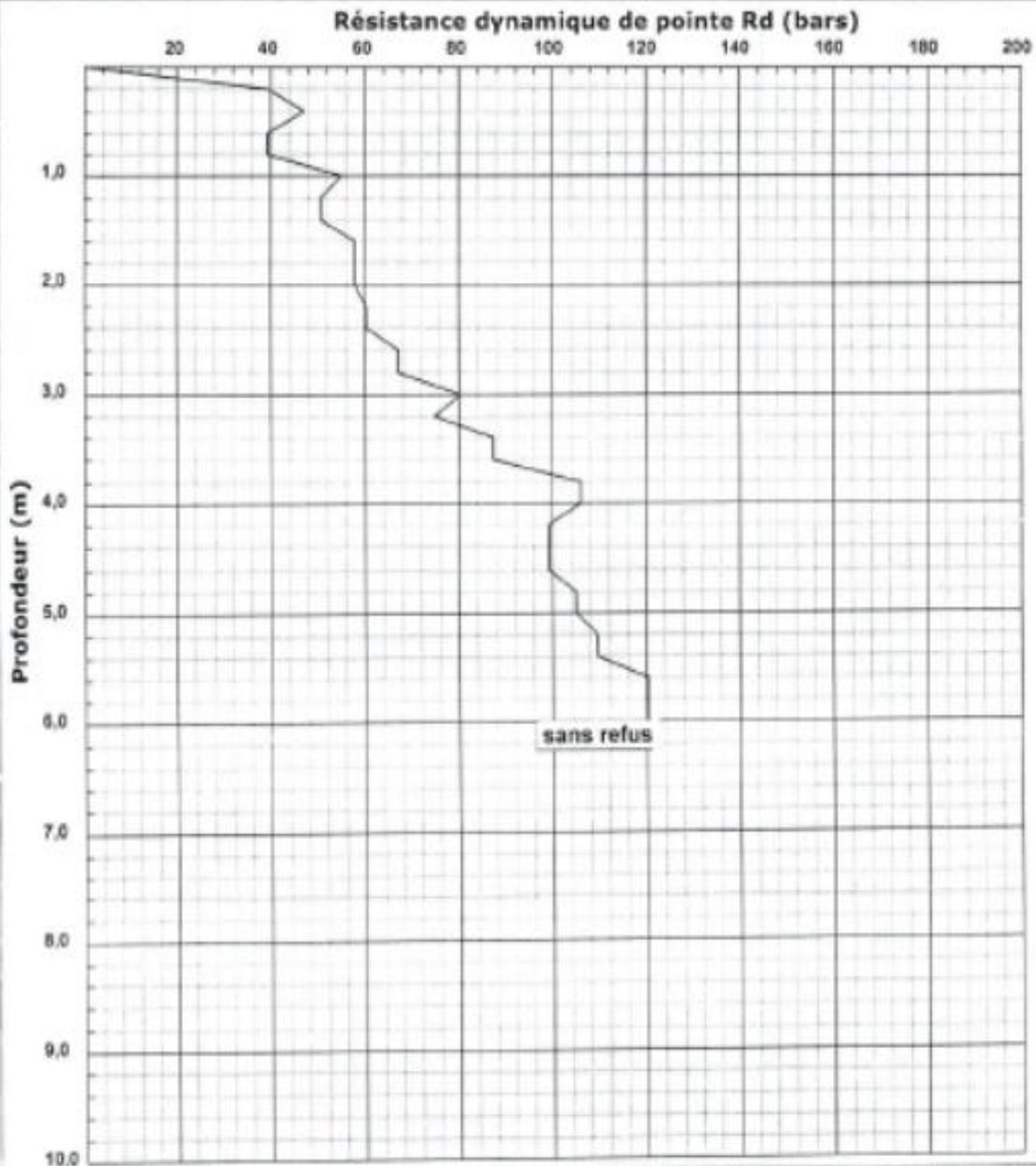
DATE ESSAIS : 19/01/2023 au 19/01/2023

Localisation :

Coordonnées GPS :

X : Z :

Y :



Caractéristiques du pénétromètre dynamique

Masse enclume + guidage Mouton (m') : 25 kg

Masse du Mouton (m) : 64 kg

Hauteur de chute (H) : 0.75 m

Aire de la section droite de la pointe (A) : 20 cm²

Longueur des tiges : 1 m

Masse d'une tige (m') : 8,5 kg

Enfoncement (e) : 20 cm

Formule de Batiage :

$$R_d = \frac{m^2 \times H}{A \times \frac{e}{N} \times (m + \sum m')}$$



Sarl TAGHASTE Engineering
Laboratoire Central

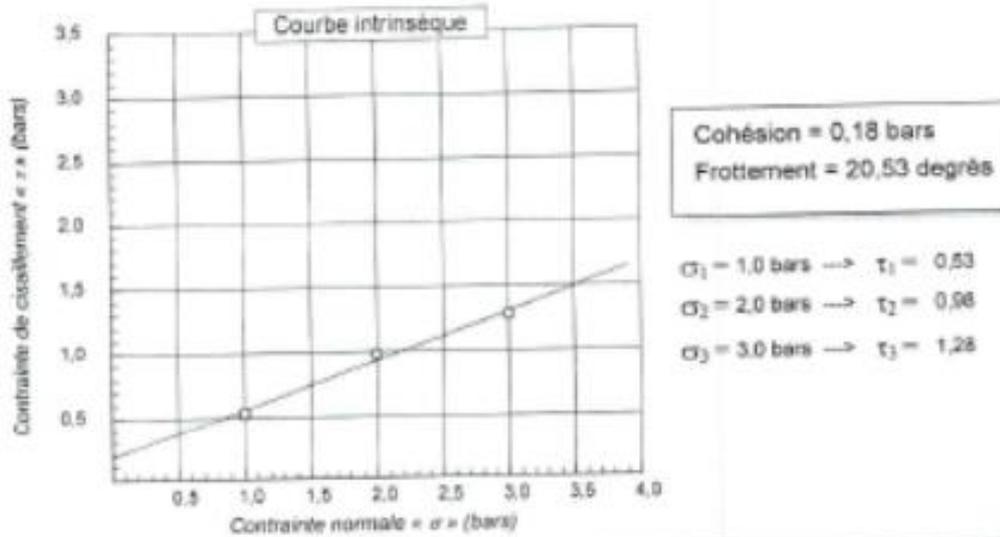
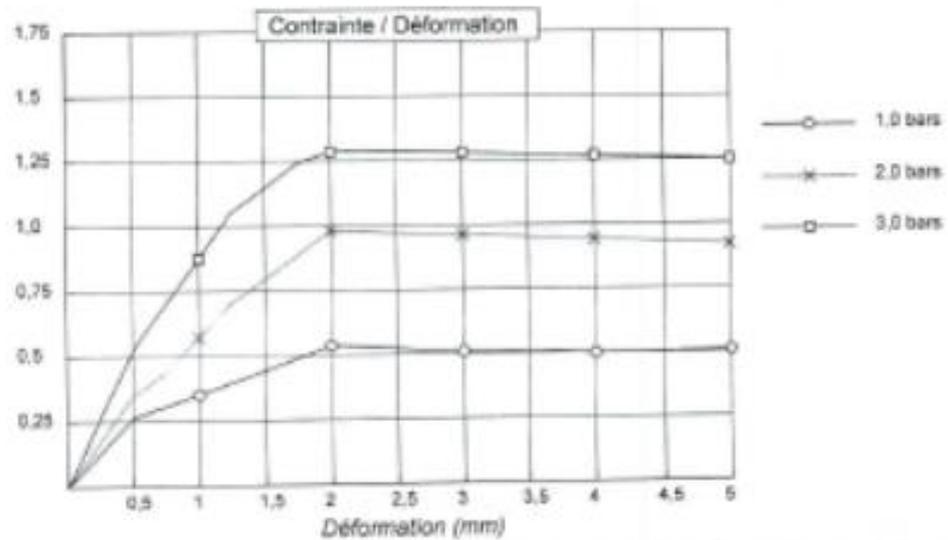
RAPPORT D'ESSAI
ESSAI DE CISAILLEMENT
NF P 94-071-1

Cliant : BET AQUA ENGINEERING
Projet : ETUDE DE LA PROTECTION CONTRE LES EAUX DES CRUES DU CENTRE DE BAGHAI
Endroit : BAGHAI - KHENCHLA

N° Projet : A23-41-02

Sondage n° : SC 02
Profondeur : 04.30 - 04.60
Nature : ALLUVION
Date essais : 20/01/2023

Type d'essai : UU
Vitesse de cisaillement : 1 mm/min



© Sarfaels 2013

Remarque :

Préparé par :

Approuvé par :

Date :

TABLEAUX RCAPITULATIF DES ESSAIS

Sondage- puit		S01	S01	S02	S02
Profondeur de prélèvement (m)		01.50-02.00m	04.60-05.10m	01.60-02.10m	04.30-04.80m
Nature apparente des échantillons		Argile limoneuse a sableuse marron plastique	Alluvions (galets, sable limon et argile)	Argile tres sableuse limoneuse jaunâtre à marron	Alluvions (sable, galets limon et argile)
Densité sèche γ_d : (t/m ³)		1.85	1.81	1.69	1.81
Teneur en eau naturelle : w (%)		22.8	10.2	16.2	11.3
Degré de saturation : S_r (%)		87.0	57.0	73.0	62.0
Poids spécifique : γ_h (t/m ³)		1.94	2.00	1.96	2.01
Granulométrie (%) de passant	2mm	96.60	85.83	96.33	85.37
	0.08mm	65.67	28.47	58.50	26.47
Limite d'Atterberg	WL	43.0	30.0	42.0	29.0
	IP	22.0	14.0	20.0	14.0
Indice de consistance : IC		>1	>1	>1	>1
Indice de groupe I_g		14.03	15.20	13.97	6.03
Caractéristique Oedométrique	P_c : (Kg/cm ²)	1.72	-	1.71	-
	C_c	27.97	-	26.29	-
	C_g	0.42	-	0.42	-
Cisaillement rectiligne ou tri-axiale	W (%)	22.8	10.2	16.2	11.3
	C_{uu} (Kg/cm ²)	0.44	0.18	0.41	0.18
	ϕ_{uu} (°)	14.22	20.76	15.46	20.53
Teneur en sulfates (mg/l)		485.9	214.6	548.9	114.9
(%) de CaCO ₃		42.12	28.0	42.0	26.0
Teneur en chlorures (%)		Trace	Trace	Trace	Trace
Teneur en gypse (%)		15.31	-	20.5	-