الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

NATIONAL HIGHER SCHOOL FOR HYDRAULICS

"The Mujahid Abdellah ARBAOUI"

المدرسة الوطنية العليا للري

"المجاهد عبد الله عرباوي"

ⵓⵢⵙⵔⵔⴰⵣ ⵓⵢⵙⵏⵍⵓ ⵉⵎⵉⵙⵙⵉⵡⵏ ⵏ ⵜⵎⵙⵓⵍⵉⵜ

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

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

Option : CONCEPTION DES OUVRAGES HYDROTECHNIQUES

THEME :

Protection des communes de Bordj El Kiffan et Bordj El Bahri contre les risques des inondations de l'oued El Hamiz (W.Alger).

Présenté par :
KADI Karim

Devant les membres du jury

Nom et Prénoms	Grade	Qualité
HADJ SADOK Ahmed	Professeur	Président
ZAIBAK Issam	M.A.A	Examinateur
BOUZIANE Mamar	M.A.A	Examinateur
ZEROUAL Ayoub	M.C.A	Promoteur

Session Octobre 2023

Dédicace

A mes chers parents, mes merveilleux frères et mes sœurs,

Ce mémoire est dédié à vous, ma famille qui a toujours été mon pilier. Votre amour, votre soutien et votre encouragement inconditionnels ont été la force qui m'a porté tout au long de ce parcours académique. Votre confiance en moi a été ma plus grande motivation, et chaque succès que j'ai rencontré est le résultat de votre soutien indéfectible. Merci d'avoir été à mes côtés à chaque étape de ce voyage académique.

Avec tout mon amour et ma gratitude.

Karim

Remerciements

Tout d’abord je tiens à remercier le Dieu tout puissant de m’avoir donnée le courage et la volonté pour accomplir ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers mes encadreurs, Mr ZEROUAL Ayoub et Mr BELMOKRE Ahmed, pour leurs rôles essentiels dans la réalisation de ce mémoire, leurs contributions, leurs expertises, leurs conseils en or et leurs aides.

La patience et la disponibilité de Mr BELMOKRE Ahmed m'ont permis de surmonter les défis et d'améliorer continuellement la qualité de ce mémoire.

Merci, Mr ZEROUAL Ayoub et Mr BELMOKRE Ahmed, pour votre soutien inestimable et votre dévouement à mon succès académique. Ce mémoire est le fruit de notre collaboration et de votre expertise combinée, et je vous en suis profondément reconnaissant.

J’exprime mes sincères reconnaissance envers mes professeurs et enseignants qui ont joué un rôle essentiel dans mon parcours d’étude.

Mes profonds remerciements aux responsables et au personnel de l’Ecole Nationale Supérieure de l’Hydraulique ENSH -Blida-.

J’adresse mes remerciements et mon profond respect aux membres du jury qui auront l'honneur d'évaluer ce travail.

À mes amis, qui ont partagé les hauts et les bas de ce voyage académique, je vous remercie du fond du cœur pour votre présence et votre amitié inestimable.

ملخص

الهدف الرئيسي لهذا المشروع هو تحديد الأبعاد الضرورية لنظام حماية هيدروليكي يسمح بمرور الفيضانات لواد الحميز، الذي يمر عبر مدن برج الكيفان وبرج البحري. تهدف هذه الدراسة إلى ضمان سلامة الممتلكات والسكان. في هذا المشروع، قمنا باتباع عدة خطوات أساسية. أولاً، قدمنا نظرة عامة على المنطقة المعنية. ثم، أجرينا دراسة جيولوجية وجيوتقنية لتحديد خصائص التربة. في المرحلة التالية، تم إجراء دراسة هيدرولوجية لتحليل الأمطار وقياس معدلات التدفق. وأخيراً، تم إجراء دراسة هيدروليكية مفصلة باستخدام برنامج المحاكاة لتحديد المناطق المعرضة للفيضانات وتقييم مخاطر الفيضانات. خلال هذه الدراسة الهيدروليكية، تم اقتراح خيارات حماية متنوعة. في النهاية، تم اختيار خيار واحد ودراسته بالتفصيل.

الكلمات المفتاحية: نظام حماية، هيدروليكي، الفيضانات، واد الحميز، برج الكيفان، برج البحري، المناطق المعرضة للفيضانات،

Résumé

L'objectif principal de ce projet consiste à déterminer les dimensions nécessaires d'un système d'aménagement hydraulique pour la protection de la zone aval d'oued El Hamiz contre les crues centennales de ce cours d'eau, qui traverse les villes de Bordj El Kiffan et Bordj El Bahri. Cette étude vise à garantir la sécurité des biens et des habitants. Dans ce projet, nous avons suivi plusieurs étapes essentielles. Tout d'abord, nous avons présenté la zone concernée. Ensuite, nous avons réalisé une étude géologique et géotechnique pour déterminer les caractéristiques du sol. Par la suite, une étude hydrologique a été effectuée afin d'analyser les précipitations et de quantifier les débits. Enfin, une étude hydraulique approfondie a été menée en utilisant le logiciel HEC-RAS pour définir les zones inondables et évaluer les risques d'inondations. Au cours de cette étude hydraulique, différentes variantes d'aménagement ont été proposées. En fin de compte, une variante a été sélectionnée et étudiée en détail.

Mots clés : aménagement hydraulique, protection, crues centennales, oued El Hamiz, Bordj El Kiffan, Bordj El Bahri, variantes d'aménagements.

Abstract

The main objective of this project is to determine the necessary dimensions of a hydraulic system for the protection of the downstream area of the El Hamiz river against its centennial floods, which affect the cities of Bordj El Kiffan and Bordj El Bahri. This study aims to ensure the safety of properties and residents. In this project, several essential steps were followed. Firstly, we introduced the concerned area. Then, a geological and geotechnical study was conducted to determine the soil characteristics. Subsequently, a hydrological study was performed to analyze precipitation and quantify flow rates. Finally, a detailed hydraulic study was carried out using the HEC-RAS software to define flood-prone areas and assess flood risks. During this hydraulic study, various development options were proposed. Ultimately, one variant was selected and thoroughly studied.

Keywords: hydraulic system, protection, centennial floods, El Hamiz river, Bordj El Kiffan, Bordj El Bahri, development options

Sommaire

Introduction générale **1**

Chapitre I : Présentation de la zone d'étude

Introduction 3
I.1 Présentation de la zone d'étude 3
I.2 Conditions climatiques de la zone d'étude 6
I.2.1 Climat 6
I.2.2 Température 6
I.2.3 Pluviométrie 7
I.2.4 Vents 9
I.2.5 Sismicité 9
I.3 Population 10
Conclusion 10

Chapitre II : Etude géologique et géotechnique

Introduction 11
II.1 Etude géologique 11
II.1.1 Géomorphologie de la région 11
II.1.2 Morphologie du site 12
II.1.2.1 De l'embouchure de Mer vers la RN 24 12
II.1.2.2 De la RN 24 vers oued Bakora 12
II.1.3 Analyse lithologique et géologique de la zone d'étude 14
II.2 Etude géotechnique 16
II.2.1 Essais de reconnaissances in situ 16
II.2.1.1 Essais de pénétration dynamique 16
II.2.2 Essais au laboratoire 23
II.2.2.1 Essais Proctor 23
II.2.2.2 Essais d'analyse granulométrique 24
II.2.2.3 Essais de limites d'Atterberg 25
II.2.2.4 Essais de cisaillement 26
Conclusion 28

Chapitre III : Etude Hydrologique

Introduction 29

III.1 Bassin versant 29

III.1.1 Etude géomorphologique 32

a. Caractéristiques morphologiques 32

b. Caractéristiques géométriques 34

III.1.2 Etude du relief 36

a. Courbe hypsométrique 36

b. Indices de pente 40

III.1.3 Etude du réseau hydrographique 43

III.1.3.1 Caractéristiques du réseau hydrographique 43

III.1.3.2 Paramètres hydrographiques 45

III.2 Etude des crues 51

III.2.1 Présentation des stations utilisées dans l'étude des crues 52

a. Stations pluviométriques 52

b. Stations hydrométriques 52

III.2.2 Analyse fréquentielle des évènements extrêmes des crues maximales annuelles de la station hydrométrique Ouled Ali 20627 54

III.2.2.1 Choix du modèle fréquentiel 54

III.2.3 Détermination des débits maximums fréquentiels en utilisant la méthode de GRADEX 61

III.2.3.1 Description de la méthode 61

III.2.3.2 Principe de la méthode 61

III.2.3.3 Hypothèses de la méthode 62

III.2.3.4 Etapes de la méthode 62

III.2.3.5 Application de la méthode de GRADEX 64

III.2.3.6 Interprétation des résultats 68

III.2.4 Hydrogramme de crue 68

III.2.5 Choix de la crue du projet 72

Conclusion 73

Chapitre IV : Etude Hydraulique

Introduction 74

IV.1 Notions hydrauliques 74

IV.1.1 Paramètres hydrauliques 74

IV.1.2 Paramètres géométriques 76

IV.2 Cours d'eau 77
IV.2.1 Cours d'eau naturels 77
IV.2.2 Cours d'eau artificiels 78
IV.3 Mode d'écoulement dans les Oueds 82
IV.3.1 Modes d'écoulement 83
IV.3.2 Régime d'écoulement 84
IV.4 Modélisation d'écoulement 87
IV.4.1 Etapes de la simulation 87
a. Importation des données géométriques du terrain 87
b. Condition aux limites (Boundary condition) 89
c. Simulation 90
IV.4.2 Résultats de la simulation 91
a. Vue 3D de l'oued avant l'aménagement 91
b. Profils en travers 91
IV.4.3 Interprétation 94
IV.5 Etude des aménagements 95
IV.5.1 Hypothèses de calcul 95
IV.5.2 Formule de dimensionnement 96
IV.5.3 Principe de conception de l'aménagement d'oued El Hamiz 98
IV.5.3.1 Pente 98
IV.5.3.2 Coefficient de rugosité (n) 100
IV.5.3.3 Marge de sécurité dans les canaux (Revanche) 100
IV.5.3.4 Vitesse d'érosion 101
IV.5.4 Etude des variantes 102
IV.5.4.1 Variante 1 : canal trapézoïdale en enrochement 102
IV.5.4.2 Variante 2 : canal rectangulaire en béton 108
IV.5.4.3 Variante 3 : canal trapézoïdale en enrochement avec la conception d'un bassin de rétention 114
IV.6 Variante adoptée pour l'aménagement d'oued El Hamiz 124
Conclusion 125

Chapitre V : Etude détaillée de la variante d'aménagement adoptée

Introduction 126
V.1 Détails de la variante adoptée 126
V.2 Détails de la conception 127
V.2.1 Canal trapézoïdale 127

V.2.2 Déversoir 129
V.2.3 Canal d'approche 132
V.2.4 Ouvrages dissipateurs d'énergie 133
V.2.4.1 Détermination du type de bassin de dissipation 133
V.2.4.2 Dimensionnement du bassin de dissipation 136
V.2.5 Bassin de rétention 140
V.2.5 Ouvrage de vidange 141
a. Calcul du débit de vidange 141
b. Calcul de la section du vidange 141
V.3 Calcul d'enrochements 142
V.3.1 Dimensions d'enrochements 143
V.3.2 Quantité du géotextile 145
V.4 Etude de stabilité des talus 146
V.4.1 Présentation du logiciel GeoStudio 146
V.4.2 Facteur de sécurité F_s 146
V.4.2 Etapes pour l'étude de stabilité des talus avec SLOPE/W 147
V.4.3 Etude et résultats 147
V.5 Modélisation hydraulique et simulation 151
V.5.1 Interprétation 154
Conclusion 154
Conclusion générale 155

Listes des figures

Chapitre I : Présentation de la zone d'étude

Figure I. 1 : Présentation du tracé d'oued El Hamiz. 4
Figure I. 2 : Partie de l'oued El Hamiz concerné par l'aménagement. 5
Figure I. 3 : Variation mensuelle des températures de la station Dar El Beida. 7
Figure I. 4 : Répartition des pluies mensuelles moyennes de la station Dar El Beida. 8
Figure I. 5 : Diagramme ombro thermique de la Station Dar El Beida. 8
Figure I. 6 : Carte de zonage sismique du nord d'Algérie. 9

Chapitre II : Etude géologique et géotechnique

Figure II. 1 : Image satellitaire présente le lieu de l'oued El Hamiz et le Pont de la RN24. ... 13
Figure II. 2 : Extrait de la carte géologique d'Alger (Région est). 15
Figure II. 3 : Image descriptive des essais de pénétration dynamique. 17
Figure II. 4 : Image satellitaire pour les lieux des essais de pénétration dynamique. 19
Figure II. 5 : Coupe lithologique de l'oued El Hamiz entre l'embouchure en mer jusqu'à la confluence avec oued Bakora. 22

Chapitre III : Etude Hydrologique

Figure III. 1 : Présentation du bassin versant oued El Hamiz. 30
Figure III. 2 : Présentation du bassin versant du Barrage oued El Hamiz. 31
Figure III. 3 : Présentation du bassin versant d'étude. 33
Figure III. 4 : Différents types des BV selon le coefficient de Gravélius K_G. 34
Figure III. 5 : Carte hypsométrique du bassin versant d'oued El Hamiz. 37
Figure III. 6 : Courbe hypsométrique du bassin versant d'oued El Hamiz. 38
Figure III. 7 : Réseau hydrographique du bassin versant d'oued El Hamiz. 44
Figure III. 8 : Carte présente la position des stations utilisées dans l'étude des crues. 53
Figure III. 9 : Interface du logiciel HYFRAN. 56
Figure III. 10 : Graphique d'ajustement à la loi de Gumbel. 57
Figure III. 11 : Graphique d'ajustement à la loi de Log Normale. 59
Figure III. 12 : Graphe représente ajustement graphique pour les pluies et droit d'extrapolation pour les débits (Laborde, 2000). 63
Figure III. 13 : Résultats d'ajustement par la loi de Gumbel des pluies maximales journalières de la station pluviométrique de Dar El Beida (390). 65
Figure III. 14 : Graphique d'ajustement des pluies et la droite d'extrapolation des débits. 66
Figure III. 15 : Hydrogramme de crue pour période de retour 100 ans pour les différentes stations. 72
Figure III. 16 : Hydrogramme de crue du projet pour la station pluviométrique Hamiz Barrage (20602). 73

Chapitre IV : Etude Hydraulique

Figure IV. 1 : Schéma représente la pente. 75
Figure IV. 2 : Canal naturel. 77
Figure IV. 3 : Canal artificiel d'une forme rectangulaire. 78
Figure IV. 4 : Canal artificiel d'une forme trapézoïdal. 78

Figure IV. 5 : Canal en enrochement (Source : Google). 79
Figure IV. 6 : Canal en gabion (Source : Google). 79
Figure IV. 7: Canal en Béton (photo prise au barrage de Ghrib). 80
Figure IV. 8 : Canal en blocs végétalisable (oued El Harrache). 81
Figure IV. 9 : Canal en géomembrane. 81
Figure IV. 10: Canal mixte en enrochement et béton (M'sila). 82
Figure IV. 11 : Modes des écoulements. 83
Figure IV. 12 : Passage d'un régime fluvial vers un régime torrentiel. 86
Figure IV. 13 : Passage d'un régime torrentiel vers un régime fluvial. 86
Figure IV. 14 : Interface d'HEC-RAS. 87
Figure IV. 15 : Importation des données géométriques dans HEC-RAS. 88
Figure IV. 16 : Introduction des valeurs de Manning (terrain naturel). 88
Figure IV. 17 : Introduction du débit de projet (crues centennales). 89
Figure IV. 18 : Conditions aux limites. 89
Figure IV. 19 : Lancement de la simulation. 90
Figure IV. 20 : Fin de simulation. 90
Figure IV. 21 : Vue 3D de l'oued El Hamiz. 91
Figure IV. 22 : Résultats de la simulation pour la station 4539.52. 91
Figure IV. 23 : Résultats de la simulation pour la station 1575. 92
Figure IV. 24 : Résultats de la simulation pour la station 0. 92
Figure IV. 25 : Présentation les lieux des tronçons. 98
Figure IV. 26 : Présentation du tronçon 1 oued El Hamiz amont. 99
Figure IV. 27 : Présentation du tronçon 2 oued El Hamiz aval. 100
Figure IV. 28 : Schéma de la variante 1. 102
Figure IV. 29 : Schéma de la variante 1 Amont. 103
Figure IV. 30 : Schéma de la variante 1 Aval. 104
Figure IV. 31 : Canal en enrochement. 105
Figure IV. 32 : Schéma de la variante 2. 108
Figure IV. 33 : Schéma de la variante 2 Amont. 109
Figure IV. 34 : Schéma de la variante 2 Aval. 110
Figure IV. 35 : Schéma du canal rectangulaire en béton. 111
Figure IV. 36 : Schéma de la variante 3. 114
Figure IV. 37 : Schéma de la variante 3 Amont. 115
Figure IV. 38 : Schéma de la variante 3 Aval. 116
Figure IV. 39 : Image satellitaire présente le lieu d'oued El Hamiz et du bassin de rétention. 118
Figure IV. 40 : Hydrogramme de crue. 122
Figure IV. 41 : Présentation du bassin de rétention (emplacement). 124
Figure IV. 42 : Histogramme présente les coûts des variantes. 125

Chapitre V : Etude détaillée de la variante d'aménagement adoptée

Figure V. 1 : Schéma de la variante adoptée. 127
Figure V. 2 : Schéma de la variante adoptée amont. 128
Figure V. 3 : Schéma de la variante adoptée aval. 128
Figure V. 4 : Profil du déversoir d'après Creager pour H = 1.6 m. 131
Figure V. 5 : Principe de conservation d'énergie de Bernoulli. 134
Figure V. 6 : Bassin de dissipation USBR type II. 135

Figure V. 7: Schéma du bassin de dissipation de type II. 136
Figure V. 8 : Abaque pour la détermination des caractéristiques du bassin de dissipation type II. 136
Figure V. 9 : Schéma du bassin de dissipation du projet d'aménagement oued El Hamiz. ... 139
Figure V. 10 : Géométrie du talus. 148
Figure V. 11 : Application des charges des rochers. 149
Figure V. 12 : Dessin de la ligne pièzométrique. 149
Figure V. 13 : Résultats de calcul (cercle critique du talus). 150
Figure V. 14 : Résultats de la simulation pour la station 4539.52 (amont). 151
Figure V. 15 : Résultats de la simulation pour la station 25 (aval). 151
Figure V. 16 : Vue 3D de l'oued El Hamiz (entre les stations 4539.52 et 2000)..... 152
Figure V. 17 : Profil de la surface d'eau et du fond du canal le long d'oued El Hamiz. 152

Listes des tableaux

Chapitre I : Présentation de la zone d'étude

Tableau I. 1 : Valeurs des températures de la station Dar El Beida (Source ONM). 6
Tableau I. 2 : Précipitations moyennes mensuelles de la station Dar El Beida. 7
Tableau I. 3 : Vitesse du vent en (m/s) de la station Dar El Beida. 9
Tableau I. 4: Données récapitulatif de la population (source OMS). 10

Chapitre II : Etude géologique et géotechnique

Tableau II. 1 : Coordonnées des points des essais pénétrométriques. 18
Tableau II. 2 : Récapitulatif des résultats des essais de pénétration dynamique. 20
Tableau II. 3 : Récapitulatif sur nature du sol de la zone d'étude. 21
Tableau II. 4 : Récapitulatif sur les résultats de l'essai Proctor. 23
Tableau II. 5 : Pourcentages de la granulométrie en fonction du diamètre et les sondages. 24
Tableau II. 6 : Résultats des essais de limites d'Atterberg. 25
Tableau II. 7 : Qualificatif de la fraction du sol constituée d'éléments inférieurs à 400 µm en fonction de l'indice de plasticité. 25
Tableau II. 8 : Résultats obtenus de l'essai de cisaillement. 26
Tableau II. 9 : Qualificatif du sol en fonction de la cohésion non drainée. 26
Tableau II. 10 : Récapitulatif des essais géotechniques. 27

Chapitre III: Etude Hydrologique

Tableau III. 1 : Paramètres géomorphologiques du bassin versant d'oued El Hamiz. 36
Tableau III. 2 : Paramètres Hypsométriques du bassin versant d'oued El Hamiz. 38
Tableau III. 3 : Caractéristiques d'altimétries du bassin versant d'oued El Hamiz. 39
Tableau III. 4 : Pente moyenne du bassin versant d'oued El Hamiz. 40
Tableau III. 5 : Classification O.R.S.T.O.M du relief à partir de l'indice de pente global. 42
Tableau III. 6 : Classification des reliefs d'après l'O.R.S.T.O.M. 42
Tableau III. 7 : Résultats de calculs des pentes et la dénivelée spécifique du bassin versant d'oued El Hamiz. 43
Tableau III. 8 : Résultats de calculs de temps de concentration. 48
Tableau III. 9 : Choix du temps de concentration. 49
Tableau III. 10 : Paramètres hydrographiques d'oued El Hamiz. 49
Tableau III. 11 : Caractéristiques géomorphologiques du bassin versant d'oued El Hamiz. 50
Tableau III. 12.a : Présentation de la station hydrométrique utilisées dans l'étude. 52
Tableau III. 12.b : Présentation des stations pluviométriques utilisées dans l'étude. 52
Tableau III. 13 : Série des débits maximaux annuels prise de la station de Ouled Ali 20627. 54
Tableau III. 14 : Modèles fréquentielle. 55
Tableau III. 15 : Résultats d'ajustement à la loi de Gumbel. 57
Tableau III. 16 : Comparaison des caractéristiques de la loi de GUMBEL et de l'échantillon. 58
Tableau III. 17 : Résultats d'ajustement à la loi de Log Normale. 58
Tableau III. 18 : Comparaison des caractéristiques de la loi de Log Normale et de l'échantillon. 59
Tableau III. 19 : Résultats du test de $\chi 2$. 60

Tableau III. 20 : Précipitations maximales journalières de la station pluviométrique de Dar El Beida (390). 64
Tableau III. 21 : Résultats d'ajustement par la loi de Gumbel des pluies maximales journalières de la station pluviométrique de Dar El Beida (390). 65
Tableau III. 22 : Résultat de calcul pour la station de Dar El Beida (390) pour les différentes périodes de retour. 67
Tableau III. 23 : Résultats de calcul par la méthode de GRADEX des débits pour les différentes stations. 67
Tableau III. 24 : Valeur du coefficient de forme de l'hydrogramme de crue δ. 69
Tableau III. 25 : Paramètres de calcul de l'hydrogramme de crue. 69
Tableau III. 26 : Résultats de calcul pour l'hydrogramme de crue. 70

Chapitre IV: Etude Hydraulique

Tableau IV. 1 : Valeurs du coefficient de rugosité 'n'. (Chen et Cotton, 1986). 75
Tableau IV. 2 : Principaux paramètres hydraulique d'oued El Hamiz. 93
Tableau IV. 3 : Différents types des canaux avec leurs caractéristiques géométriques. 97
Tableau IV. 4 : Revanches utilisées (Degoutte, 2012). 101
Tableau IV. 5 : Valeurs de vitesse moyenne limite d'érosion pour les lits. 101
Tableau IV. 6 : Caractéristiques du canal de la variante 1 Amont. 103
Tableau IV. 7 : Résultats de calcul de la variante1 Amont. 103
Tableau IV. 8 : Caractéristiques du canal de la variante 1 Aval. 104
Tableau IV. 9 : Résultats de calcul de la variante 1 Aval. 104
Tableau IV. 10 : Hauteurs de la variante 1. 106
Tableau IV. 11 : Sections d'enrochement du canal de la variante 1. 106
Tableau IV. 12 : Volumes d'enrochement de la variante 1. 106
Tableau IV. 13 : Sections du géotextile de la variante 1. 106
Tableau IV. 14 : Volume des déblais et remblais de la variante 1. 107
Tableau IV. 15 : Devis quantitatif estimatif de la variante 1. 107
Tableau IV. 16 : Caractéristiques du canal de la variante 2 Amont. 109
Tableau IV. 17 : Résultats de calcul de la variante 2 Amont. 109
Tableau IV. 18 : Caractéristiques du canal de la variante 2 Aval. 110
Tableau IV. 19 : Résultats de calcul de la variante 2 Aval. 110
Tableau IV. 20 : Epaisseurs des bétons de la variante 2. 111
Tableau IV. 21 : Hauteurs de la variante 2. 111
Tableau IV. 22 : Sections des bétons du canal de la variante 2. 112
Tableau IV. 23 : Volumes des bétons de la variante 2. 112
Tableau IV. 24 : Volume des déblais et remblais de la variante 2. 112
Tableau IV. 25 : Devis quantitatif estimatif de la variante 2. 113
Tableau IV. 26 : Caractéristiques du canal de la variante 3 Amont. 115
Tableau IV. 27 : Résultats de calcul de la variante 3 Amont. 115
Tableau IV. 28 : Caractéristiques du canal de la variante 3 Aval. 116
Tableau IV. 29 : Résultats de calcul de la variante 3 Aval. 116
Tableau IV. 30 : Hauteurs de la variante 3. 117
Tableau IV. 31 : Sections d'enrochement du canal de la variante 3. 117
Tableau IV. 32 : Volumes d'enrochement de la variante 3. 117
Tableau IV. 33 : Sections du géotextile du canal de la variante 3. 117
Tableau IV. 34 : Volume des déblais et remblais du canal de la variante 3. 118

Tableau IV. 35 : Calcul du volume de bassin de rétention. 120
Tableau IV. 36 : Sections du géotextile du bassin de rétention. 122
Tableau IV. 37 : Volumes des déblais et remblais du bassin de rétention. 122
Tableau IV. 38 : Devis quantitatif estimatif de la variante 3. 123

Chapitre V : Etude détaillée de la variante d'aménagement adoptée

Tableau V. 1 : Caractéristiques du canal de la variante adoptée. 128
Tableau V. 2 : Coordonnées du profil du barrage déversoir type Creager pour H = 1 m. 130
Tableau V. 3 : Coordonnées du profil du déversoir type Creager pour H = 1.6 m. 131
Tableau V. 4 : Choix du type de bassin de dissipation selon l'USBR. 133
Tableau V. 5 : Résultats des dimensions du bassin de dissipation USBR type II. 139
Tableau V. 6 : Caractéristiques du bassin de rétention. 140
Tableau V. 7 : Résultats du calcul d'enrochements. 144
Tableau V. 8 : Granularités des roches. 145
Tableau V. 9 : Quantité du géotextile du canal de la variante adoptée. 145
Tableau V. 10 : Résultats des essais géotechniques. 148
Tableau V. 11 : Caractéristique du cercle critique du talus amont. 150
Tableau V. 12 : Principaux paramètres hydraulique d'oued El Hamiz après l'aménagement. 153

Introduction générale

Les inondations sont des phénomènes naturels les plus courants affectants aujourd'hui presque toutes les régions du monde. Elles sont considérées parmi les catastrophes naturelles les plus coûteuses en termes d'impacts humains et matériels. Les risques d'inondations sont dus, à l'interaction de plusieurs facteurs topographiques, géologiques, hydrologiques et météorologiques.

Les inondations font partie de ces événements climatiques extrêmes qui caractérisent le dérèglement et le changement du climat qu'en train de vivre le monde depuis des années. Des fortes précipitations se font de plus en plus récurrentes, et bouleversent les vies de millions de personnes.

La gravité et la fréquence des inondations, au cours des trois dernières décennies, ont considérablement augmenté dans nombreux pays méditerranéens. Les inondations se produisent le plus souvent suite à des pluies abondantes, courtes et localisées sur de petits bassins versants produisant une augmentation rapide du niveau de l'eau dans les oueds et les rivières.

L'Algérie est l'un de ces pays vulnérables aux inondations constituant ainsi une contrainte majeure pour le développement économique et social. S'appuyant sur des études scientifiques, nombreux experts estiment que des pluies torrentielles et des orages comme ceux qui ont ravagé les régions de Bab El Oued, Ghardaïa ou Béchar seront de plus en plus fréquentes.

Depuis les années de 1900, la région d'Alger a connu plusieurs inondations catastrophiques, on peut citer comme exemple les inondations de Décembre 1957 des bassins versants de Mazafran et Sebaou, les inondations du 28 au 31 Mars 1974 dans les wilayas d'Alger et Tizi Ouzzou des bassins versants de l'Algérois et de la Sebaou et les inondations du 24 au 28 Janvier 1992.

La partie est d'Alger est situé dans la plaine orientale de la Mitidja, qu'est traversée par plusieurs oueds, parmi eux oued El Hamiz, ce dernier traversent le bassin versant de El Hamiz depuis les montagnes de Médéa jusqu'à son exutoire en mer méditerranée.

La zone aval de l'Oued El Hamiz présente un environnement propice pour l'occurrence des inondations dévastatrices. Depuis 1921 à ce jour, la région enregistre plusieurs inondations liées au débordement de l'oued au moment de passage des crues exceptionnels. De plus, l'explosion démographique dans les communes de Bordj El Kiffan et Bordj El Bahri pousse la population à s'installer dans les rives de l'oued El Hamiz et ériger leurs habitats dans le domaine public hydraulique du cours d'eau. Cela provoque des dégâts matériels importants dans les villes de Bordj El Kiffan et Bordj El Bahri suite aux manifestations des inondations.

Donc il est indispensable de prévoir un aménagement adéquat pour protéger la région aval de l'oued El Hamiz et assurer la sécurité des habitants et de leurs biens contre les inondations générées par le passage des crues exceptionnelles.

Le présent mémoire fait l'objet de dimensionnement et de conception d'un système pour la protection de la zone aval d'oued El Hamiz contre les inondations générées par le passage d'une crue centennale, le travail sera présenté sous forme de cinq chapitre répartis comme suit :

Chapitre 01 : Présente la zone d'étude concernées par l'aménagement du cours d'eau oued El Hamiz.

Chapitre 02 : Sert à présenter la géologie de la zone d'étude, y compris la géomorphologie et la morphologie du site, et aussi présente les essais géotechniques réalisés pour obtenir les caractéristiques du sol et de la région nécessaire à la conception appropriée de l'aménagement de l'oued El Hamiz.

Chapitre 03 : Concerne l'étude hydrologique qui vise à délimiter le bassin versant de l'oued El Hamiz et à obtenir ses caractéristiques. Ensuite, une analyse des crues est effectuée pour évaluer les débits de crue à différentes périodes de retour. Cette étude repose sur une analyse statistique fréquentielle des données de débit disponibles, utilisant le logiciel HYFRAN.

Chapitre 04 : Étude hydraulique visant à comprendre le comportement de l'écoulement dans l'oued avant toute intervention d'aménagement, dans cette étude on utilise le logiciel HEC RAS pour acquérir les connaissances nécessaires en vue de proposer des solutions d'aménagement appropriées pour l'oued El Hamiz.

Chapitre 05 : Dans cette partie nous allons étudier en détailles la conception de la variante choisie en évaluant le comportement de l'oued après l'aménagement.

Chapitre I
Présentation de la zone d’étude

Introduction

Prévoir un système de protection contre les inondations pour une ville commence d'abord par connaitre sa situation géographique, le climat de la région, la morphologie du terrain, la densité de population et son occupation du sol. Ces informations présentent une clé essentielle pour définir le degré de vulnérabilité de la zone aux inondations et choisir le type d'aménagement le plus adéquat qui assure le plus de sécurité à la ville. Dans ce sens, le premier chapitre présente la partie aval d'oued El Hamiz.

I.1 Présentation de la zone d'étude

Oued El Hamiz est un cours d'eau qui prend naissance depuis les montagnes de Tamesguida dans la région de Médea et parcours un linéaire de 47,85 Km, pour se jeter dans la Méditerranée. À partir de l'aval du barrage d'El Hamiz, le cours d'eau d'oued El Hamiz traverse la partie Est de la plaine de Metidja, en passant par les communes de Khemis El Khechna et Hammadi appartenant à la wilaya de Boumerdes. Dans le territoire de la wilaya d'Alger, oued El Hamiz traverse les champs agricoles des communes de Dar El Beida et Rouiba avant son arrivée aux communes de Bordj El Kiffan et Bordj El Bahri. La partie de l'oued El Hamiz concerné par l'aménagement est comprise entre sa confluence avec oued Bakora et son embouchure en mer sur un linéaire de 4 Km (Figure I.2). Le tronçon du cours d'eau faisant l'objet de cette étude traverse les communes de Bordj El Kiffan par sa rive gauche et la commune de Bordj El Bahri par sa rive droite.

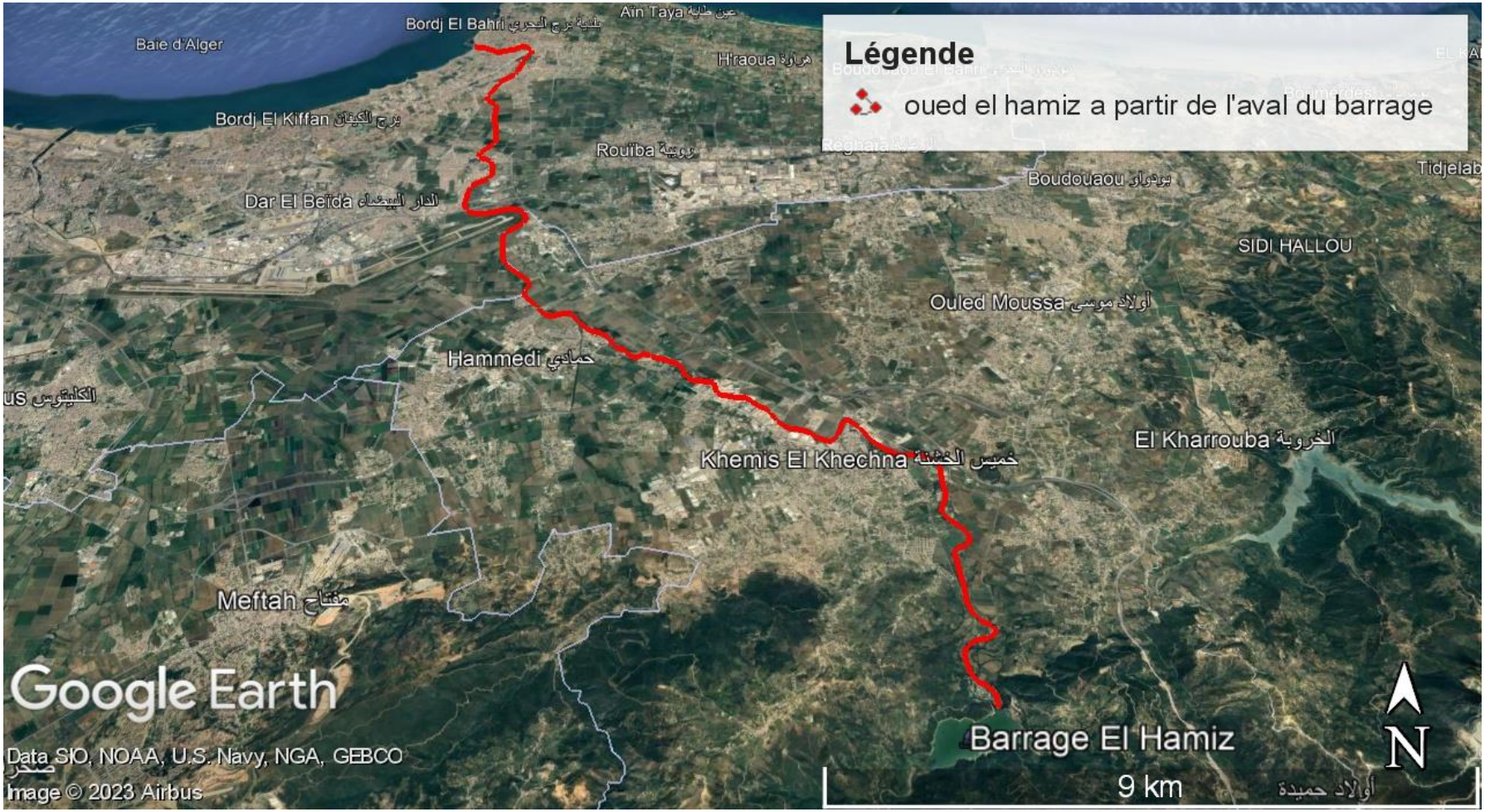


Figure I. 1 : Présentation du tracé d'oued El Hamiz.



Figure I. 2 : Partie de l'oued El Hamiz concerné par l'aménagement.

I.2 Conditions climatiques de la zone d'étude

Les différents paramètres météorologiques sont obtenus à partir des observations enregistrées à la station climatologique Dar El Beida. Cette station est située dans la zone d'étude au Sud-est de Bordj El Kiffan à environ 6 Km et à une altitude de 24 m dont les coordonnées géographiques sont : latitude = 36°43 N et longitude = 03°15 E. La station de Dar El Beida (indice 390) est un poste professionnel qui fournit tous les paramètres climatiques.

I.2.1 Climat

Le bassin d'oued El Hamiz se situe dans la zone littorale où le climat est méditerranéen soumis à l'influence de la mer et le relief, caractérisé par un hiver pluvieux qui s'étend de septembre à mai (96,2 % de la pluie moyenne annuelle) dont les mois de novembre, décembre et janvier sont les plus froids et humides et un été sec et ensoleillé aux mois de juin, juillet et aout avec des pluies très faibles.
À Bordj El Kiffan et Bordj El Bahri, les étés sont très chauds, sec et dégagé dans l'ensemble et les hivers sont, venteux et partiellement nuageux. Au cours de l'année, la température varie généralement de 6 °C à 31 °C et est rarement inférieure à 2 °C ou supérieure à 35 °C.

I.2.2 Température

Les températures sont relativement douces, la moyenne annuelle est de 17,9 °C, et les températures moyennes mensuelles varient entre 10,9 °C en janvier et 26,2 °C en août.
La saison très chaude dure 3,0 mois, du Juin au Septembre, le mois le plus chaud de l'année à la zone d'étude est Août, avec une température moyenne maximale de 32.5 °C et minimale de 20.3 °C.
La saison fraîche dure 4,0 mois, du Novembre au Mars, le mois le plus froid de l'année à la zone d'étude est Janvier, avec une température moyenne minimale de 6.1 °C et maximale de 16.9 °C.

Tableau I. 1 : Valeurs des températures de la station Dar El Beida (Source ONM).

Mois	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
Min (m)	6.1	5.8	7.2	9.1	12.9	16.4	19.3	20.3	17.6	14.4	9.9	7.3
Max (M)	16.9	17.6	19.5	21.6	25.0	28.8	31.8	32.5	29.4	26.2	21.0	18.1
Moyenne	10.9	11.3	13.3	15.1	18.9	22.8	25.5	26.2	23.3	19.9	15.0	12.1

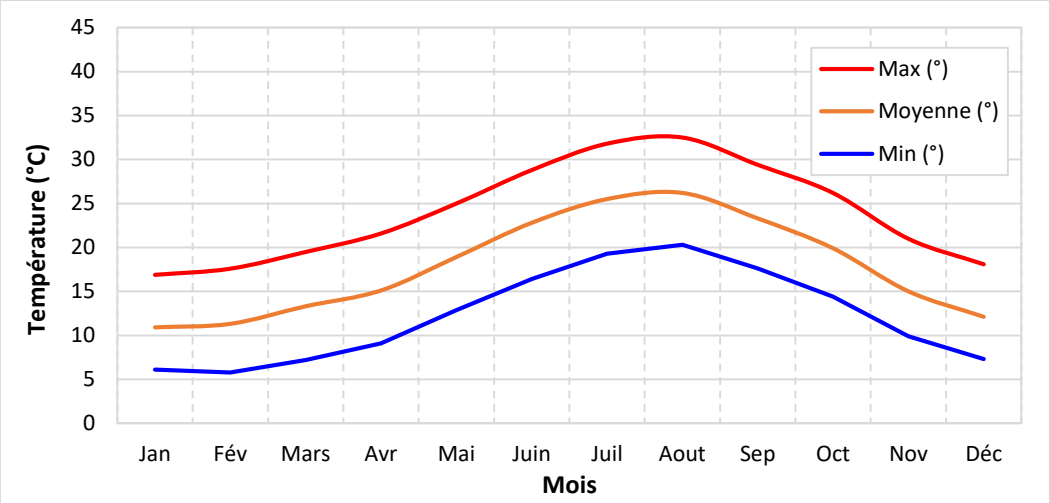


Figure I. 3 : Variation mensuelle des températures de la station Dar El Beida.

I.2.3 Pluviométrie

Le bassin versant d'oued El Hamiz dispose d'un réseau pluviométrique suffisant, constitué par une dizaine de stations pluviométriques. Bordj El Kiffan et Bordj El Bahri connaît des variations saisonnières considérables en ce qui concerne les précipitations de pluie mensuelles. La période pluvieuse de l'année dure 9,3 mois, du 31 août au 9 juin, avec une chute de pluie d'au moins 13 millimètres sur une période glissante de 31 jours. Le mois le plus pluvieux à Bordj El Kiffan et Bordj El Bahri est décembre, avec une chute de pluie moyenne de 94 millimètres.

La période sèche de l'année dure 2,7 mois, du 9 juin au 31 août. Le mois le moins pluvieux à Bordj El Kiffan et Bordj El Bahri est juillet, avec une chute de pluie moyenne de 4 millimètres.

Tableau I. 2 : Précipitations moyennes mensuelles de la station Dar El Beida.

Mois	**Jan**	**Fév**	**Mars**	**Avr**	**Mai**	**Jui**	**Juil**	**Aout**	**Sep**	**Oct**	**Nov**	**Déc**
Pluie (mm)	79	74	53	58	46	7	4	13	28	65	103	94

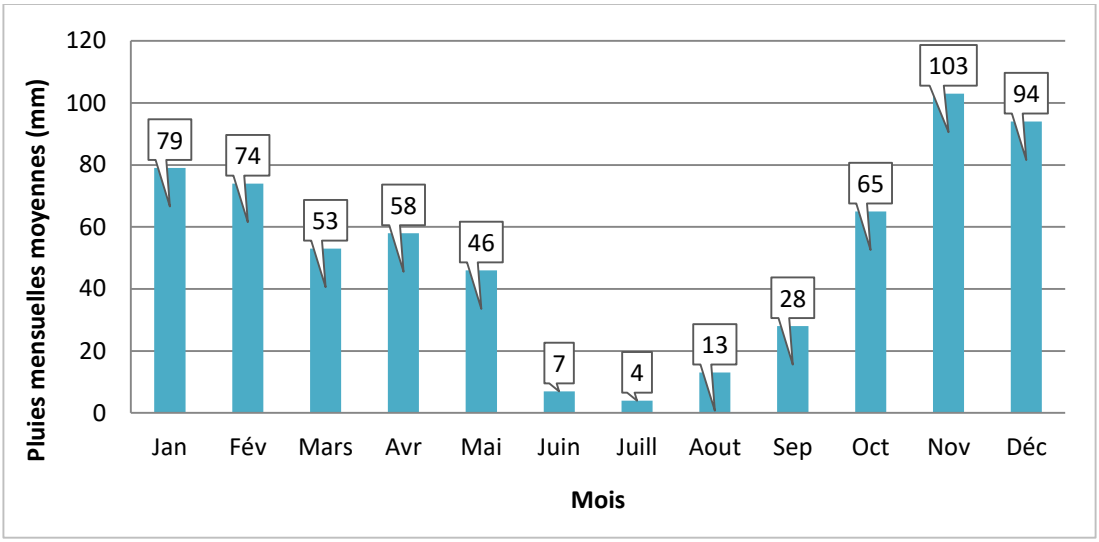
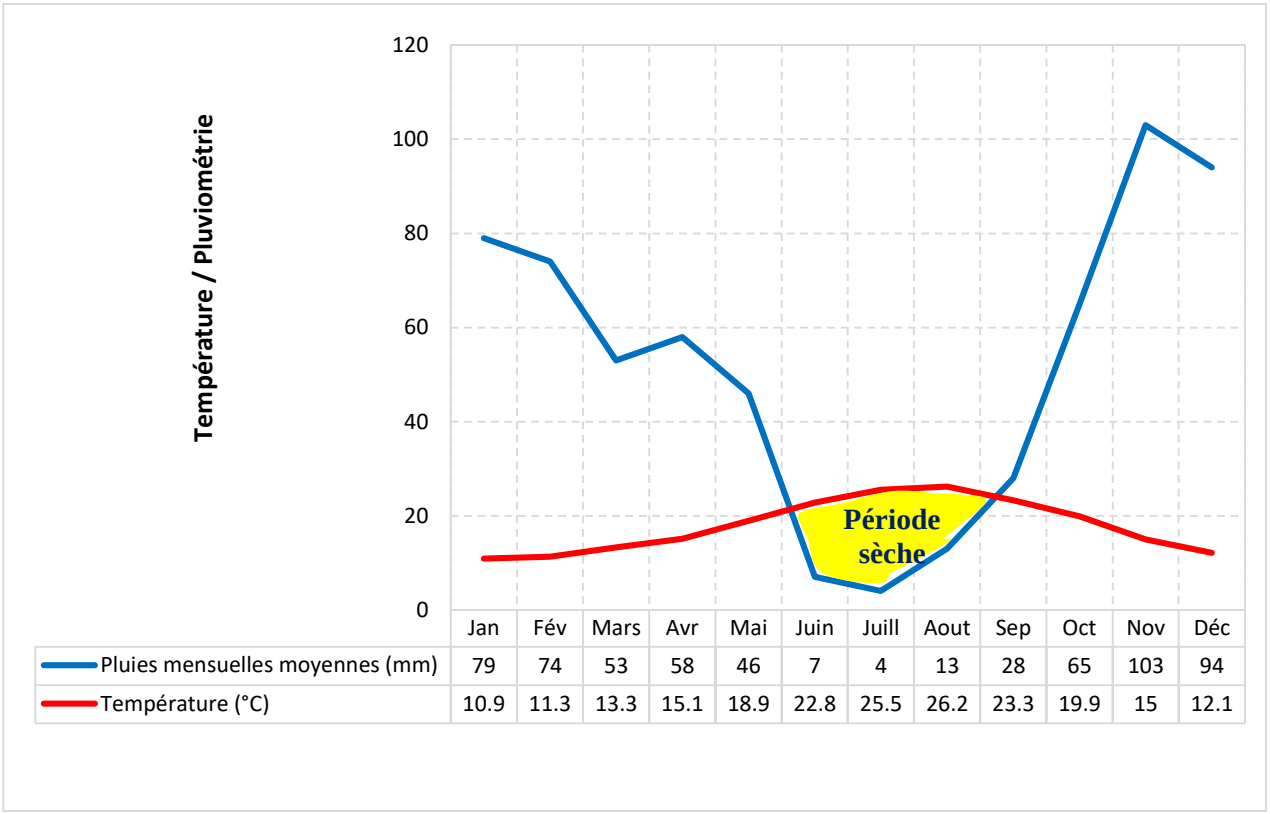


Figure I. 4 : Répartition des pluies mensuelles moyennes de la station Dar El Beida.

Diagramme ombro thermique, est un graphique qui représente graphiquement les précipitations mensuelles et les températures mensuelles moyennes d'une région ou d'une zone géographique donnée sur une période de temps spécifique (une année). Ce type de diagramme est largement utilisé en climatologie pour visualiser et comprendre le climat d'une région.



	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juill	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
Pluies mensuelles moyennes (mm)	79	74	53	58	46	7	4	13	28	65	103	94
Température (°C)	10.9	11.3	13.3	15.1	18.9	22.8	25.5	26.2	23.3	19.9	15	12.1

Figure I. 5 : Diagramme ombro thermique de la Station Dar El Beida.

I.2.4 Vents

Cette section traite du vecteur vent moyen horaire étendu (vitesse et direction) à 10 mètres au-dessus du sol. Le vent observé à un emplacement donné dépend fortement de la topographie locale et d'autres facteurs, et la vitesse et la direction du vent instantané varient plus que les moyennes horaires.

La vitesse horaire moyenne du vent à la zone d'étude connaît une variation saisonnière modérée au cours de l'année. Les vitesses moyennes mensuelles du vent au niveau de notre zone d'étude sont comprises entre 2,1 m/s et 2,9 m/s.

Tableau I. 3 : Vitesse du vent en (m/s) de la station Dar El Beida.

Mois	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
Vent (m/s)	2.3	2.4	2.4	2.8	2.7	2.9	2.8	2.6	2.5	2.1	2.4	2.5

I.2.5 Sismicité

L'activité sismique de la région d'Alger est localisée essentiellement dans le bassin néogène de la Mitidja. Dans cette région, d'importants séismes se sont produits au cours de l'histoire, causant parfois la mort de milliers de personnes.

Le bassin néogène post-nappes de la Mitidja (région centre de l'Algérie) est le siège d'une sismicité importante continue qui a imprimé sa marque dans les sédiments quaternaires depuis quelques milliers d'années.

Les terrasses marines tyrrhéniennes affleurent sur la façade maritime et renferment un matériel sédimentaire majoritairement détritique potentiellement liquéfiable au moment de son dépôt.

Selon le Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique (CGS), elle appartient à la zone III de forte sismicité.



Figure I. 6 : Carte de zonage sismique du nord d'Algérie.

I.3 Population

La plaine orientale de la Mitidja est fortement urbanisée dans sa partie septentrionale, tel que on voit dans le long de cours d'eau (oued EL Hamiz), des habitations anarchiques se sont développées ces dernières décennies.
Les données statistiques relatives à la population sont établies sur la base du RGPHII 2008, selon le dernier recensement général de la population et de l'habitat, on a pour :

Tableau I. 4: Données récapitulatif de la population (source OMS).

Communes	Populations (habitants)	Densité (hab/Km^2)
Bordj El Kiffan	151950	7006
Bordj El Bahri	52816	7042

Conclusion

A travers ce chapitre, nous avons donné un aperçu sur le climat, la topographie et la population de l'oued El Hamiz sur un linéaire de 4 Km qui est située dans les villes de Bordj El Kiffan et Bordj El Bahri dans la wilaya d'Alger. La présentation de la zone d'étude nous a permet de tirer que la zone est caractérisée par une haute densité de population, ce qu'il faut concevoir un aménagement d'oued El Hamiz pour protéger les vies humaines et leurs bien

Chapitre II

Etude géologique et géotechnique

Introduction

La mise en place d'un système de protection contre les inondations des communes de Bordj El Kiffan et Bordj El Bahri contre les risques des inondations d'oued El Hamiz doit passer par le dimensionnement et la conception d'un aménagement sure et conforme aux exigences de la région. Pour cela, il est important de procéder à une étude géologique et géotechnique pour définir la nature et les caractéristiques physico-chimique du sol en se basant sur les observations et les essais de reconnaissances in-situ, les essais au laboratoire et sur la bonne interprétation des cartes géologiques. Ce chapitre présente une étude géologique et géotechnique détaillée de la partie aval du bassin versant de l'oued El Hamiz.

II.1 Etude géologique

L'étude géologique de l'oued El Hamiz de la wilaya d'Alger est basée sur la recherche et l'exploitation de la documentation de la région, le levé géologique du site et les résultats de la reconnaissance géologique faites sur le site de l'oued.

II.1.1 Géomorphologie de la région

Les communes de Bordj El Kiffan et Bordj El Bahri se trouvent dans le Sahel oriental d'Alger Est. Cette région est une région côtière caractérisée par géomorphologie spécifique, elle comprend :

a. **Une plaine côtière :** le Sahel d'Alger Est est bordé par une plaine côtière qui s'étend sur environ 10 km de largeur et qui est séparée de la mer Méditerranée par une bande de dunes littorales. Cette plaine est constituée de dépôts alluviaux et de sédiments marins, et traversée par plusieurs oueds (cours d'eau saisonniers) qui se jettent dans la mer.

b. **Des collines :** à l'arrière de la plaine côtière, on trouve une série de collines qui s'étendent sur environ 20 km de largeur et qui culminent à des altitudes allant jusqu'à 300 mètres. Ces collines sont constituées de roches sédimentaires et volcaniques et présentent des reliefs assez accidentés.

c. **Des zones humides :** le Sahel d'Alger Est comprend également plusieurs zones humides, notamment la lagune de la Macta, qui s'étend sur environ de 2500 hectares et qui est une zone de nidification pour de nombreuses espèces d'oiseaux.

d. **Une côte rocheuse :** la côte du Sahel d'Alger Est est caractérisée par des falaises et des rochers, qui sont sculptés par les vagues de la mer Méditerranée. On y trouve également des criques et des plages de sable fin.

La géomorphologie du Sahel d'Alger Est est influencée par plusieurs facteurs, notamment la tectonique des plaques, l'érosion et la sédimentation, ainsi que les mouvements de la mer Méditerranée. Cette région est également soumise à des risques naturels tels que les inondations, les glissements de terrain et les feux de forêt.

II.1.2 Morphologie du site

La morphologie décrit la forme, la structure et les caractéristiques qui composent un lieu spécifique. Dans la morphologie d'un site on peut inclure : topographie, reliefs, hydrographie, formations géologiques, végétation et les éléments créer par l'homme.

De point de vue morphologique au niveau de notre zone d'étude oued El Hamiz on a :

II.1.2.1 De l'embouchure de Mer vers la RN 24

- Le site est situé sur les limites d'un périmètre urbanisé.
- Sur le site la berge gauche est un terrain peu couvert par les remblais.
- La rive droite est recouverte sur toute sa longueur de remblais ayant donné par conséquence une large bande de l'amont à l'aval traduisant des étranglements par endroits, souvent avec un changement du lit mineur.
- Le relief topographique est légèrement incliné du Sud vers le Nord et présente une dénivellation estimée de 3 à 5 m.

II.1.2.2 De la RN 24 vers oued Bakora

- Le site est situé sur les limites d'un périmètre urbanisé.
- Le site se situe le long des deux berges qui sont souvent couvertes de la broussaille.
- La rive droite est recouverte sur toute sa longueur végétation ayant donné par conséquence une large bande de l'amont à l'aval traduisant des étranglements par endroits, souvent avec un changement du lit mineur.
- Le relief topographique est sensiblement plat et ne présente aucune dénivelée.



Figure II. 1 : Image satellitaire présente le lieu de l'oued El Hamiz et le Pont de la RN24.

II.1.3 Analyse lithologique et géologique de la zone d'étude

La nature lithologique du Sahel est constituée des sables dunaires fins légèrement argileux par endroits, souvent cimentés à la base avec des grés calcaires formant des petites corniches.
L'ensemble de la formation ne dépasse pas les 30 m d'épaisseur repose sur un substratum imperméable représenté par des marnes du plaisancien. Le sahel est un ensemble de collines, formant la limite Nord de la Mitidja où l'altitude moyenne avoisine les 20 à 30m, suivant une pente ne dépassant pas les 4.5%.
Une lecture approfondie de la carte géologique d'Alger nous a permis de déterminer les formations géologiques présentes dans la zone d'étude. A l'embouchure en mer les formations sont représentées par des plages émergées qui se limite par un cordon des dunes actuelles et récentes de prédominance litholique des sables fins sombres à grisâtre (a^d).

Toute la bordure Nord de la RN24 est constituée par des alluvions récentes dans une région exposée aux risques d'inondations dont les formations prédominantes sont les sables, les limons et des argiles avec des alternances de dalles gréseuses relevées lors des excavations des fondations dans le quartier de Hai Doum (a^2).

Le long de la berge et le plus proche du lit majeur d'oued El Hamiz, on relève une présence d'un sable vasard remonté à l'état saturé par une eau polluée d'une couleur grisâtre (issue d'une vase).

Au sud de RN24, l'anticlinal du Sahel se caractérise par des affleurements de sables consolidés et des grès calcaires beige jaunâtre (q^d).

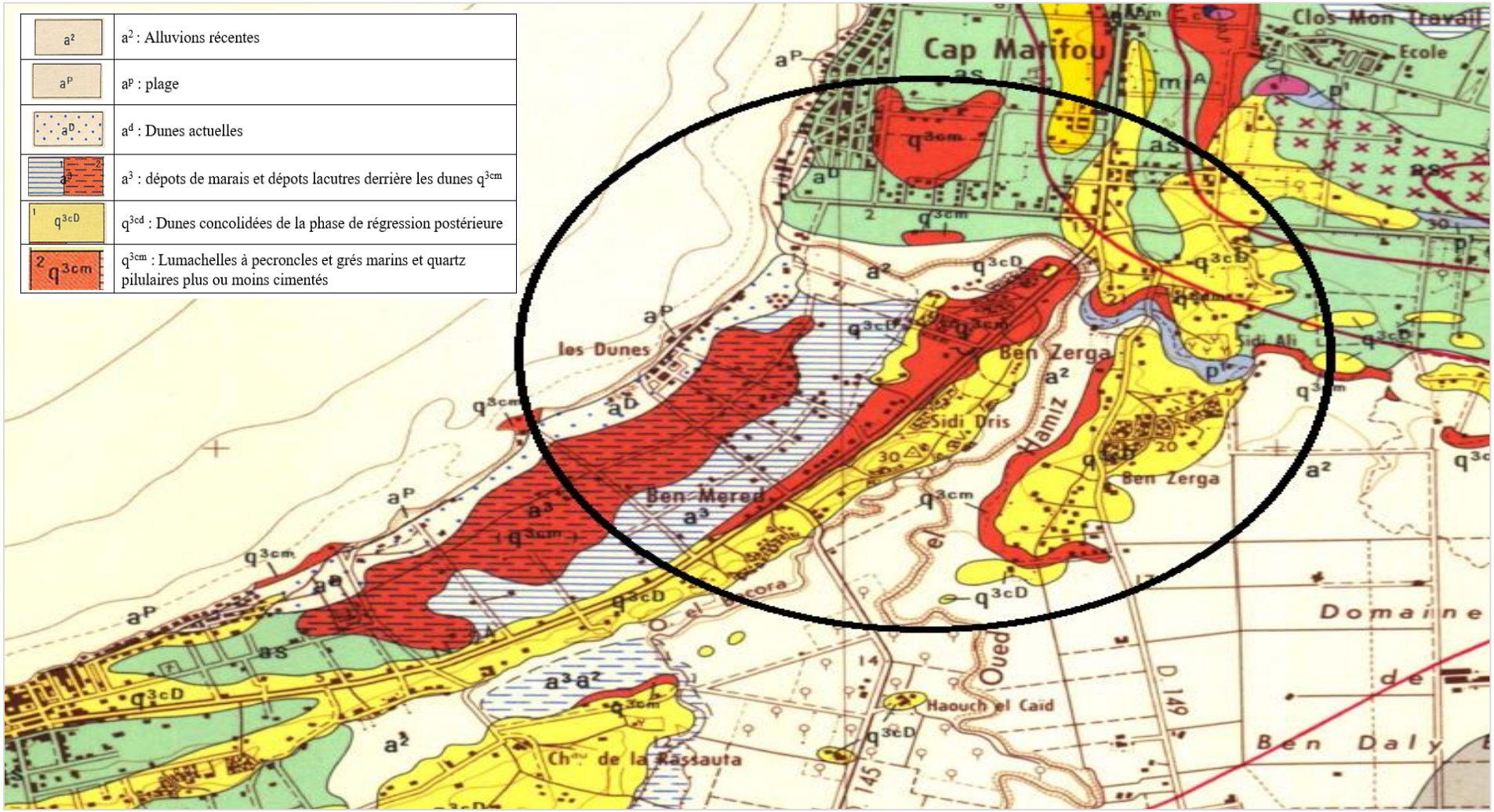


Figure II. 2 : Extrait de la carte géologique d'Alger (Région Est).

II.2 Etude géotechnique

Dans le but de déterminer les caractéristiques du sol pour l'aménagement d'oued El Hamiz et la protection des villes de Bordj El Kiffan et Bordj El Bahri contre les risques des inondations, l'étude géotechnique est basée essentiellement sur les visites de reconnaissance, les essais réalisés dans le terrain (in situ), et aussi sur les essais en laboratoire.

II.2.1 Essais de reconnaissances in situ

Les essais de reconnaissance in situ, sont des tests réalisés directement sur le site pour évaluer les caractéristiques géotechniques. La campagne de reconnaissance in situ a consisté à la mise en évidence la nature lithologique en plan et en profondeur du sol support. Les travaux de reconnaissance in situ ont consisté à la réalisation de 10 essais de pénétration dynamique.

II.2.1.1 Essais de pénétration dynamique

Les essais de pénétration dynamique sont des méthodes d'investigation géotechnique qui permettent de mesurer la résistance du sol et déterminer sa nature à l'aide d'un dispositif appelé pénétromètre dynamique. Il consiste à enfoncer d'un train de tiges, par battage et de compter le nombre de coups nécessaire à la pénétration de 20 cm de la pointe. La profondeur d'un sondage de pénétration dynamique est fixée quand les tiges pénétrées atteint une roche dure consolidée (le refus) est ne peuvent plus la pénétrer sous le battage.

Le calcul de la résistance du sol s'obtient suivant la relation des Hollandais :

$$R_p = \frac{M^2 . g . h}{(M + m) . e . A} . N_d \qquad \text{(II.1)}$$

M: masse de Mouton. 63.5 Kg.
g : pesanteur g = 9.81 m/s^2
h : hauteur de chute 50 cm.
m : masse de tige et de l'enclume
A : section droite de points 19 cm².
e : enfoncement de référence e = 20 cm.
N_d : nombre de coups nécessaire à l'enfoncement.

Les résultats de ces essais peuvent être utilisés pour déterminer les caractéristiques géotechniques des sols, telles que la résistance au cisaillement, la densité, la compressibilité et la capacité portante.

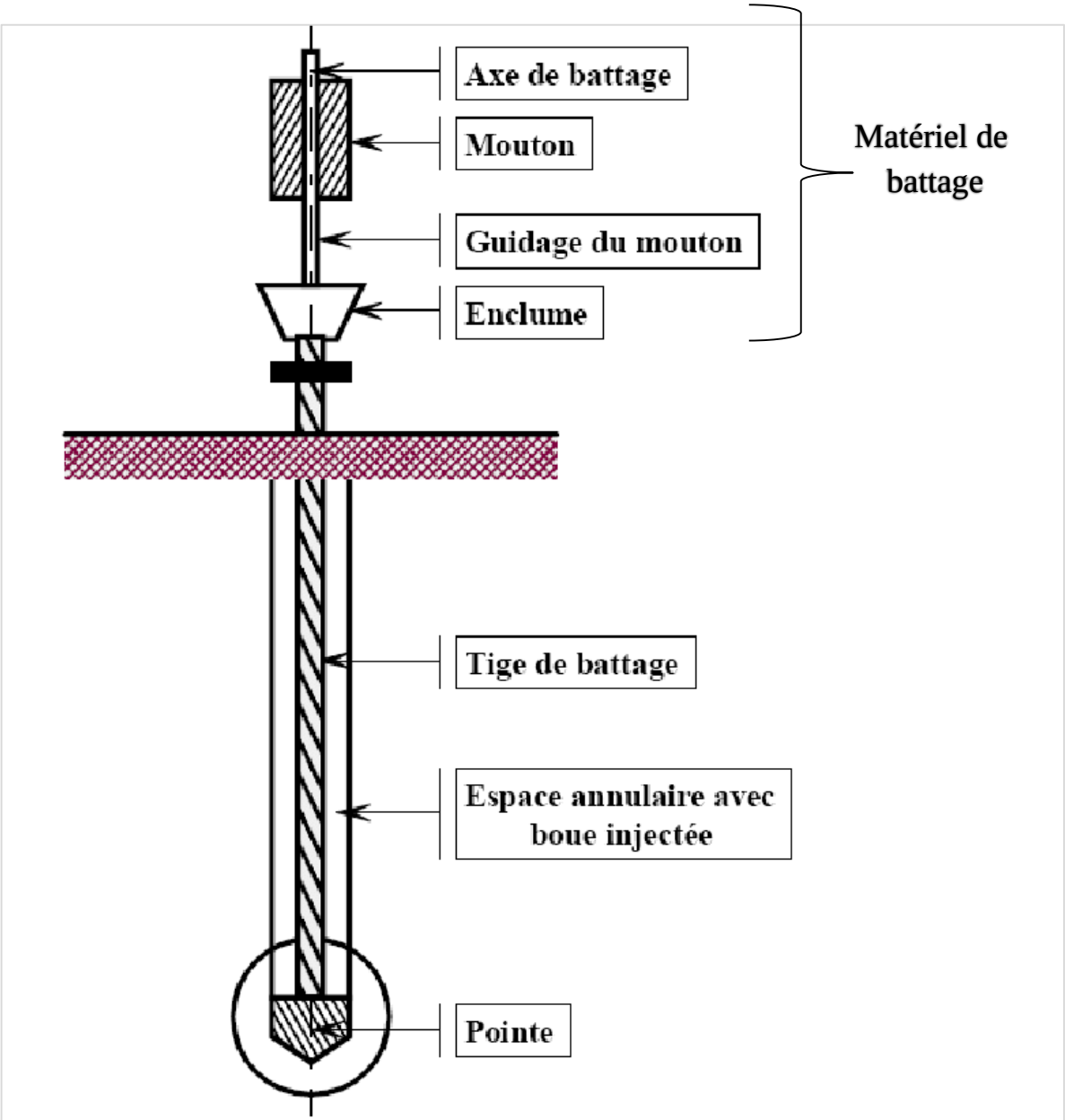


Figure II. 3 : Image descriptive des essais de pénétration dynamique.

Dix (10) essais au pénétromètre dynamique ont été réalisés et implantés de manière à couvrir tout le linéaire de la partie concernée par l'aménagement de l'oued El Hamiz dans le but d'avoir une idée sur la capacité portante du sol et sa nature. Les essais de pénétration dynamique sont implantés et distants de 350 m en moyenne. Les coordonnées des points de sondages pénétrométrique sont regroupées dans le tableau n° 1

Tableau II. 1 : Coordonnées des points des essais pénétrométriques.

	Points d'essais	X(m)	Y (m)	Z(m)
De l'embouchure de mer jusqu'à RN24	P1	31.S.0520786	4070134	3.5
	P2	31.S.0520991	4070064	4.2
	P3	31.S.0521190	4069940	5.40
	P4	31.S.0521499	4069992	4.2
	P5	31.S.0521898	4070169	6.3
De la RN24 jusqu'à oued Bakora	P6	31.S.0522113	4069933	7.3
	P7	31.S.0522052	4069632	7.3
	P8	31.S.0521953	4069335	6.7
	P9	31.S.0521880	4069019	7.8
	P10	31.S.0521670	4068665	6.4

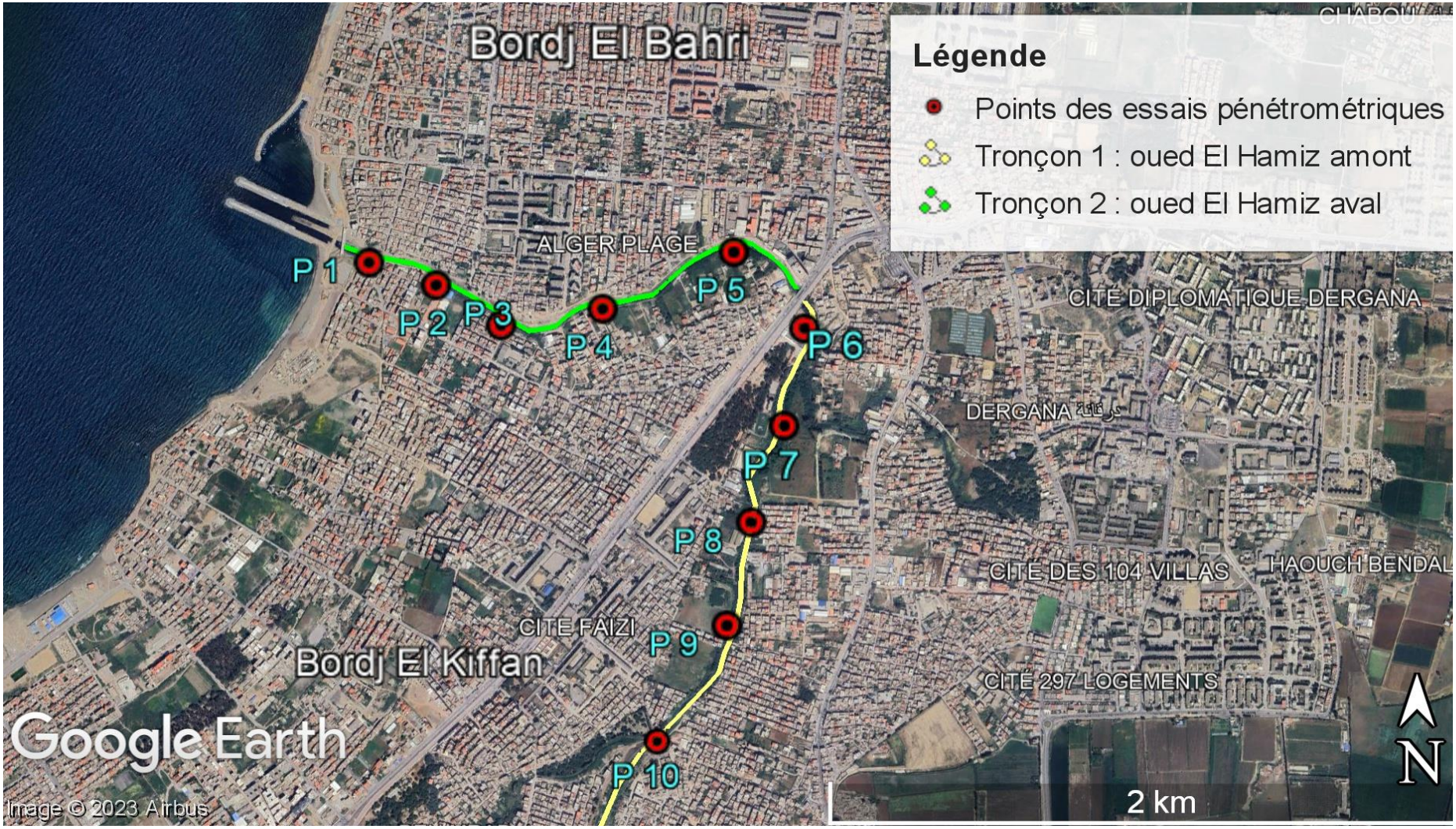


Figure II. 4 : Image satellitaire pour les lieux des essais de pénétration dynamique.

Les résultats obtenus à partir des essais de pénétration se résument dans le tableau ci-dessous. Les graphes enregistrés pour chaque essai pénétrométrique sont regroupés en annexe n° 1

Tableau II. 2 : Récapitulatif des résultats des essais de pénétration dynamique.

	Sondage	Profondeur (m)	Résistance R_{pmin} (bars)	Contrainte admissibles δ_{adm} (bars)
De l'embouchure de mer jusqu'à RN24	P1	2.0 - 4.0	6	0.30
	P2	3.0 - 5.0	6	0.30
	P3	2.5 - 6.0	6	0.30
	P4	1.5 - 9.0	24	1.20
	P5	2.0 - 6.0	20	0.40
De la RN24 jusqu'à oued Bakora	P6	5.0 - 6.0	20	0.80
	P7	1.0 - 2.0	60	2.40
	P8	1.0 - 5.0	16	0.64
	P9	1.0 - 3.0	16	0.64
	P10	1.0 - 7.0	6.0	0.30

Pour calculer la contrainte admissible on utilise l'équation suivante :

$$\boldsymbol{\delta_{adm} = R_p * F_s} \qquad \text{(II.2)}$$

δ_{adm} : Contrainte admissible.
R_p : Résistance du sol.
F_s : Facteur de sécurité 5%.

D'après les résultats obtenus on peut remarquer que :

a. **De l'embouchure en Mer jusqu'à la RN 24 :** la contrainte admissible la plus faible est rencontrée au Pont de sondage P3 est de 0.3 bars à une profondeur de 6 m à partir du terrain naturel.

b. **De la RN 24 jusqu'à Oued Bakora :** on peut retenir que la contrainte admissible la plus faible est de 0.3 bars à une profondeur de 7 m à partir du terrain naturel au point de sondage.

Pour le dimensionnement de l'aménagement de l'oued El Hamiz, on va adopter la valeur la plus défavorable de la contrainte admissible pour le sol formant le lit mineur et les rives de l'oued El Hamiz dans le tronçon faisant l'objet de cette étude. Donc δ_{adm} sera pris égale à 0.3 bars.
La nature du sol et la coupe lithologique suivant la profondeur de chaque sondage pénétrométrique sont déterminées par inspection visuelle au moment de réalisation de sondage pénétrométrique. Un échantillon de sol est pris à chaque variation de la nature de sol par profondeur pour effectuer les essais physiques au laboratoire. Le tableau suivant présente la nature du sol tout le long de la profondeur de chaque sondage pénétrométrique réalisé.
A partir des informations résumées dans le tableau n° 3, nous avons déterminé la coupe lithologique du lit mineur de l'oued El Hamiz dans sa partie à aménager (Voir la figure 5).

Tableau II. 3 : Récapitulatif sur nature du sol de la zone d'étude.

Les sondages de reconnaissances	**De l'embouchure de mer jusqu'à RN24**	**SR 1**	**0.0 à 2.0m**	**2.0 à 7.0m**	**7.0 à 10m**	**10 à 13m**
			Remblai récent hétérogène	Sable vaseux grisâtre	Argile sableuse plastique	Sable limoneux compact à graves beige
		SR 2	**0.0 à 1.5m**	**1.5 à 6.0m**	**6.0 à 10m**	**10 à 13m**
			Remblai récent hétérogène	Sable vaseux grisâtre	Argile sableuse compacte grisâtre	Sable graveleux compact à graves beige.
		SR 3	**0.0 à 1.6m**	**1.6 à 4.0m**	**4.0 à 8.0m**	**8.0 à 13m**
			Remblai récent hétérogène	Limon sableux marron	Sable vaseux grisâtre	Sable à grave gréseuse beige à jaunâtre
		SR 4	**0.0 à 1.5m**	**1.5 à 5.0m**	**5.0 à 9.0m**	**9.0 à 14m**
			Remblai récent hétérogène	Limon sableux brunâtre	Limon argileux grisâtre	Sable argileux à grave gréseuse beige à jaunâtre
		SR 5	**0.0 à 2.0m**	**2.0 à 6.0m**	**6.0 à 10m**	**10 à 13m**
			Remblai récent hétérogène	Limon sableux marron	Limon sablo-argileux compact	Sable grossier grisâtre
	De la RN24 jusqu'à oued Bakora	**SR 6**	**0.0 à 3.0m**	**3.0 à 5.0m**	**5.0 à 8m**	**8 à 12m**
			Remblai hétérogène	Sable beige caillouteux	Sable graveleux beige jaunâtre	Sable limoneux compact beige
		SR 7	**0.0 à 1.0m**	**1.0 à 5.0m**	**5.0 à 9.0m**	**9.0 à 12m**
			Terre végétale	Limon brunâtre plastique	Limon argileux peu compact grisâtre	Sable graveleux compact beige
		SR 8	**0.0 à 1.0m**	**1.0 à 6.0m**	**6.0 à 8.0m**	**8.0 à 13m**
			Terre végétale	Limon brunâtre	Limon argileux brunâtre	Limon sableux compact beige à jaunâtre
		SR 9	**0.0 à 2.0m**	**2.0 à 6.0m**	**6.0 à 13m**	
			Remblai hétérogène en débris de briques.	Limon sableux plastique brunâtre	Sable argileux plastique à grave gréseuse beige à jaunâtre	
		SR 10	**0.0 à 1.0m**	**1.0 à 5.0m**	**5.0 à 11m**	**11 à 11.5m**
			Remblai hétérogène	Sable jaunâtre compact	Sable graveleux jaunâtre compact	Sable grossier avec des cailloux et blocs gréseux beige jaunâtre

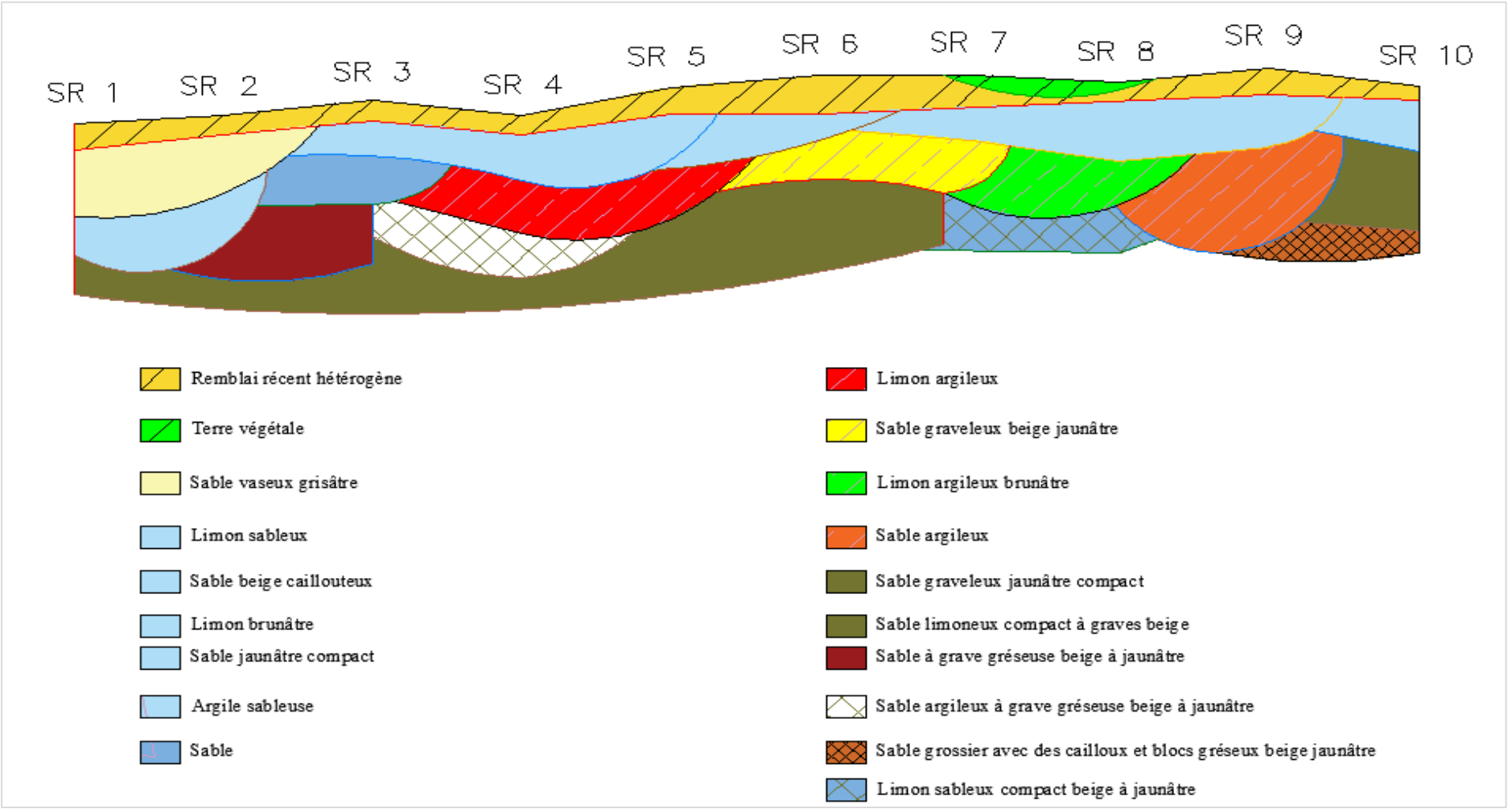


Figure II. 5 : Coupe lithologique de l'oued El Hamiz entre l'embouchure en mer jusqu'à la confluence avec oued Bakora.

II.2.2 Essais au laboratoire

Les essais en laboratoire sont des méthodes d'investigation géotechnique qui permettent de caractériser les propriétés physiques et mécaniques des échantillons de sol prélevés sur le terrain. Ces essais sont réalisés dans des conditions contrôlées et permettent d'obtenir des données précises sur le comportement du sol dans différentes situations. Il existe des nombreux types d'essais en laboratoire, qui diffèrent selon les propriétés du sol que l'on souhaite caractériser.
Les échantillons prélevés sur le terrain depuis les sondages de reconnaissance, ont subi des essais physiques et mécaniques au laboratoire. Les essais réalisés au laboratoire sont :

- Essais Proctor
- Essais de granulométrie
- Essais de limites d'Atterberg
- Essais de Cisaillement

II.2.2.1 Essais Proctor

L'essai de Proctor consiste à prendre un échantillon de sol et le compacter en utilisant un moule normalisé de forme cylindrique avec une masse donnée et une hauteur de chute fixe.

Le sol est compacté en plusieurs couches en appliquant un nombre fixe de coups de mouton sur chaque couche. Les mesures de la densité sèche et de la teneur en eau sont prises à chaque étape de compactage. Les résultats de l'essai sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau II. 4 : Récapitulatif sur les résultats de l'essai Proctor.

	Sondages	Profondeur (m)	Densité sèche (t/m^3)	Teneur en eau %	Densité humide (t/m^3)
De l'embouchure de mer jusqu'à RN24	SR1	3.0/3.50	1.35	32	1.79
		8.0/8.50	1.58	25	1.97
	SR2	3.50/4.0	1.53	27	1.94
		7.0/7.50	1.63	22	1.99
	SR3	2.5 / 3.00	1.61	23	1.98
		5.0/5.50	1.35	30	1.75
	SR4	2.0/2.50	1.46	25	1.82
		6.0/6.50	1.55	23	1.90
	SR5	2.50/3.00	1.58	22	1.72
		6.5/7.00	1.65	20	1.98
De la RN24 jusqu'à oued Bakora	SR7	2.5/3.0	1.63	17	1.90
		6.0/6.5	1.69	19	2.01
	SR8	3.0 / 3.5	1.71	18	2.01
		6.0/6.5	1.75	20	2.10
	SR9	3.0/3.50	1.56	23	1.92
		5.0/5.50	1.65	26	2.07

II.2.2.2 Essais d'analyse granulométrique

Les essais granulométriques permettent de déterminer les dimensions des grains de sol dans un échantillon. Il existe plusieurs méthodes pour réaliser les essais granulométriques, mais le plus courante est l'analyse granulométrique par tamisage.
L'analyse granulométrique par tamisage est une méthode qui consiste à faire passer l'échantillon de sol à travers une série de tamis de mailles différentes pour séparer les grains de sol en différentes tailles. La façon la plus courante de représenter les résultats des essais de tamisage et de sédimentométrie consiste à tracer une courbe granulométrique

La granulométrie d'un sol peut être caractérisée par un coefficient d'uniformité ou coefficient de Hazen :

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \qquad \text{(II.3)}$$

Si :

- $C_u > 2 \rightarrow$ granulométrie étalée.
- $C_u < 2 \rightarrow$ granulométrie uniforme ou serrée.

Tableau II. 5 : Pourcentages de la granulométrie en fonction du diamètre et les sondages.

Sondages	ϕ<2µm	ϕ<80µm	ϕ<0.2mm	ϕ<2mm
SR1	25	90	90	100
SR2	20	85	100	100
SR3	22	90	100	100
SR4	20	88	93	100
SR5	18	93	100	100
SR7	12	84	98	100
SR8	17	80	92	100
SR9	20	84	98	100

Les résultats des essais granulométriques de la zone d'étude sous forme de courbes granulométriques sont représentés dans l'annexe n° 1.

Selon les résultats de l'analyse granulométrique, on peut déduire que le sol est constitué de plus de 90% de particules dont les dimensions sont inférieures de 80µm.

II.2.2.3 Essais de limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg sont les paramètres caractéristiques de la fraction du sol passant au travers du tamis à la maille carrée de 400 µm.

- **W_l :** la limite de liquidité traduisant la teneur en eau du passage de l'état plastique à l'état liquide.
- **W_p :** la limite de plasticité représente la teneur en eau de la phase du passage de l'état solide à l'état plastique.
- **I_p :** indice de plasticité est la teneur en eau entre les deux phases

$$I_p = W_l - W_p. \qquad \text{(II.4)}$$

Dans le tableau suivant on donne les résultats des essais d'Atterberg.

Tableau II. 6 : Résultats des essais de limites d'Atterberg.

	Sondages	Profondeur (m)	W_l	W_p	I_p
De l'embouchure de mer jusqu'à RN24	SR 1	3.0/3.50	36.88	25.37	11.07
		8.0/8.50	46.37	26.37	20.02
	SR 2	3.50/4.0	35.47	22.14	13.33
		7.0/7.50	45.56	20.41	25.15
	SR 3	2.5 / 3.00	37.95	20.51	17.42
		5.0/5.50	40.45	22.45	18.01
	SR 4	2.0/2.50	42.92	22.41	20.51
		6.0/6.50	45.44	22.42	23.01
	SR 5	2.50/3.00	38.79	22.86	15.99
		6.5/7.00	41.79	20.63	21.16
De la RN24 jusqu'à oued Bakora	SR 7	2.5/3.0	33.72	17	13.9
		5.0/5.5	36.85	19	13.15
	SR 8	3.0/3.5	36.39	18	14.26
		6.0/6.5	37.24	20	12.84
	SR 9	4.0/4.5	32.16	23	10.75
		5.5/6.0	46.02	26	21.34

Les indices de plasticité montrent que le sol est dans la zone des matériaux peu plastique, constitués à la base des éléments sableux.

Tableau II. 7 : Qualificatif de la fraction du sol constituée d'éléments inférieurs à 400 µm en fonction de l'indice de plasticité.

Indice de plasticité (%)	Qualificatif
$Ip \leq 12$	Non plastique
$12 < Ip \leq 25$	Peu plastique
$25 < Ip \leq 40$	Plastique
$Ip > 40$	Très plastique

II.2.2.4 Essais de cisaillement

L'essai de cisaillement est un essai de laboratoire utilisé pour déterminer la résistance au cisaillement qui permet d'évaluer la stabilité de l'ouvrage. Cet essai consiste à appliquer une force à un échantillon de sol confiné dans une boîte appelée boîte de Casagrande.
Une fois l'échantillon confiné, une force horizontale est appliquée à la plaque supérieure en augmentant progressivement la force de façon à provoquer la rupture du sol en cisaillement. Pendant l'essai, la force horizontale et la déformation de l'échantillon sont mesurées pour déterminer la résistance au cisaillement du sol.

$$\tau = C + \sigma . tan\, \varphi \qquad \text{(II.5)}$$

τ : Contrainte de cisaillement
C : Cohésion non-drainée du sol
σ : Contrainte normale
φ : Angle de frottement

Les résultats des essais de cisaillement sont comme suivis :

Tableau II. 8 : Résultats obtenus de l'essai de cisaillement.

Sondages	Profondeur (m)	Cohésion C_{uu} (bars)	Frottement ϕ°
SR1	3.0/3.5	0.61	8.95
SR2	3.5/4.0	0.50	11.85
SR3	5.0/5.5	0.55	10.59
SR4	6.0/6.5	0.64	13.12
SR5	6.5/7.0	0.57	13.66

D'après le tableau au-dessus (Tableau II.8) la cohésion caractérisant la composante des contraintes de liaison inter granulaire varie de 0.50 à 0.64 bars.

Tableau II. 9 : Qualificatif du sol en fonction de la cohésion non drainée.

Sol	Cohésion non drainée C_u (kPa)
Liquide à très mou	< 20
Mou	20 à 40
Plastique	40 à 75
Ferme	75 à 150
Très ferme	150 à 300
Dur	> 300

Le tableau 9 de la norme **XP94-011**, qualifie le sol en fonction de la cohésion non consolidée, non drainée comme un sol plastique : **$0.5 \leq C_{uu} \leq 0.64$bar**

Tableau II. 10 : Récapitulatif des essais géotechniques.

Type d'essai	Paramètre	Symbole	Unité	Résultats	
				De l'embouchure de mer jusqu'à le pont de la RN24	Du pont de la RN24 jusqu'à Oued Bakora
Pénétration dynamique	La Résistance	R_p	bars	6 à 24	6 à 60
	Contraintes	τ	bars	0.3 à 1.2	0.3 à 2.4
Proctor	Densité	γ_d	t/m^3	1.529	1.66
	Qualificatif du sol	/	/	Peu dense	Dense
Limites d'Atterberg	Indice de plasticité	Ip	/	≤ 25 Sol peu plastique	≤ 25 Sol peu platique
Cisaillement	Cohésion	C_{uu}	bars	0.5 à 0.64	0.5 à 0.64
	Angle de frottement	φ	°	8.95 à 13.66	8.95 à 13.66

Conclusion

L'étude présentée dans ce chapitre est très importante dans l'aménagement d'oued El Hamiz, et pour la protection des villes de Bordj El Kiffan et Bordj El Bahri contre les risques des inondations. L'étude géologique permet de comprendre la structure géologique et connaitre la géomorphologie de la région, la morphologie du site (zone d'étude) et la géologie locale du site.

Les essais géotechniques effectués in situ et en laboratoire dans le cadre de l'étude géotechnique pour l'aménagement d'oued El Hamiz ont permis d'obtenir les propriétés physiques du sol de la région et sa capacité portante sis à vis l'aménagement qui sera proposé.

Les résultats obtenus dans l'étude géotechnique seront employés dans les prochains chapitres pour définir les dimensions finales de la variante adoptée pour l'aménagement d'oued El Hamiz ainsi que pour la sélection des matériaux de construction.

Chapitre III
Etude Hydrologique

Introduction

L'hydrologie est la branche des sciences de la Terre qui étudie la distribution, la circulation et la qualité de l'eau sur la surface terrestre. Cela inclut l'étude des précipitations, de l'évaporation, de l'infiltration, de la circulation de l'eau dans les rivières, les lacs et les aquifères, ainsi que de la qualité de l'eau et de son utilisation pour les activités humaines et les écosystèmes

Une étude hydrologique est une analyse systématique et scientifique des caractéristiques hydriques d'un bassin versant, d'un cours d'eau ou d'un système aquifère. Les études hydrologiques peuvent être réalisées pour différents objectifs, tels que la planification de projets de gestion des ressources en eau, la gestion des risques d'inondation, la conception des structures hydrotechniques.

Ce chapitre a donc pour objectif de déterminer les principaux paramètres hydrologiques de la zone d'étude après avoir délimité le bassin versant de « oued El Hamiz » des villes de Bordj El Kiffan et Bordj El Bahri, et déterminer ces caractéristiques en utilisant le logiciel ArcGIS. Estimer les périodes de retours et déterminer les débits de crue nécessaire pour la conception de l'aménagement de l'oued qui servira à la protection de la zone contre les inondations.

III.1 Bassin versant

Le bassin versant est une zone géographique délimitée par des crêtes topographiques, à l'intérieur de laquelle toute l'eau qui tombe sous forme de précipitations est collectée et drainée par un réseau hydrographique commun, généralement une rivière ou un cours d'eau principale, vers un point de sortie unique est le point le plus bas appelée l'exutoire.

Pour de la délimitation du bassin versant d'oued El Hamiz on a utilisé le logiciel ArcGis et la carte satellitaire DEM *(Digital Elevation Model).*

Après la délimitation et l'obtention du bassin versant (Figure 1), on a remarqué que dans notre zone on a un barrage « Barrage oued El Hamiz », tel que son bassin versant (Figure 2) est inclus dans le bassin versant total (Figure 1).

Notre bassin versant d'étude est le bassin versant aval de l'oued El Hamiz (à partir du barrage jusqu'à l'embouchure de mer) (Figure 3).

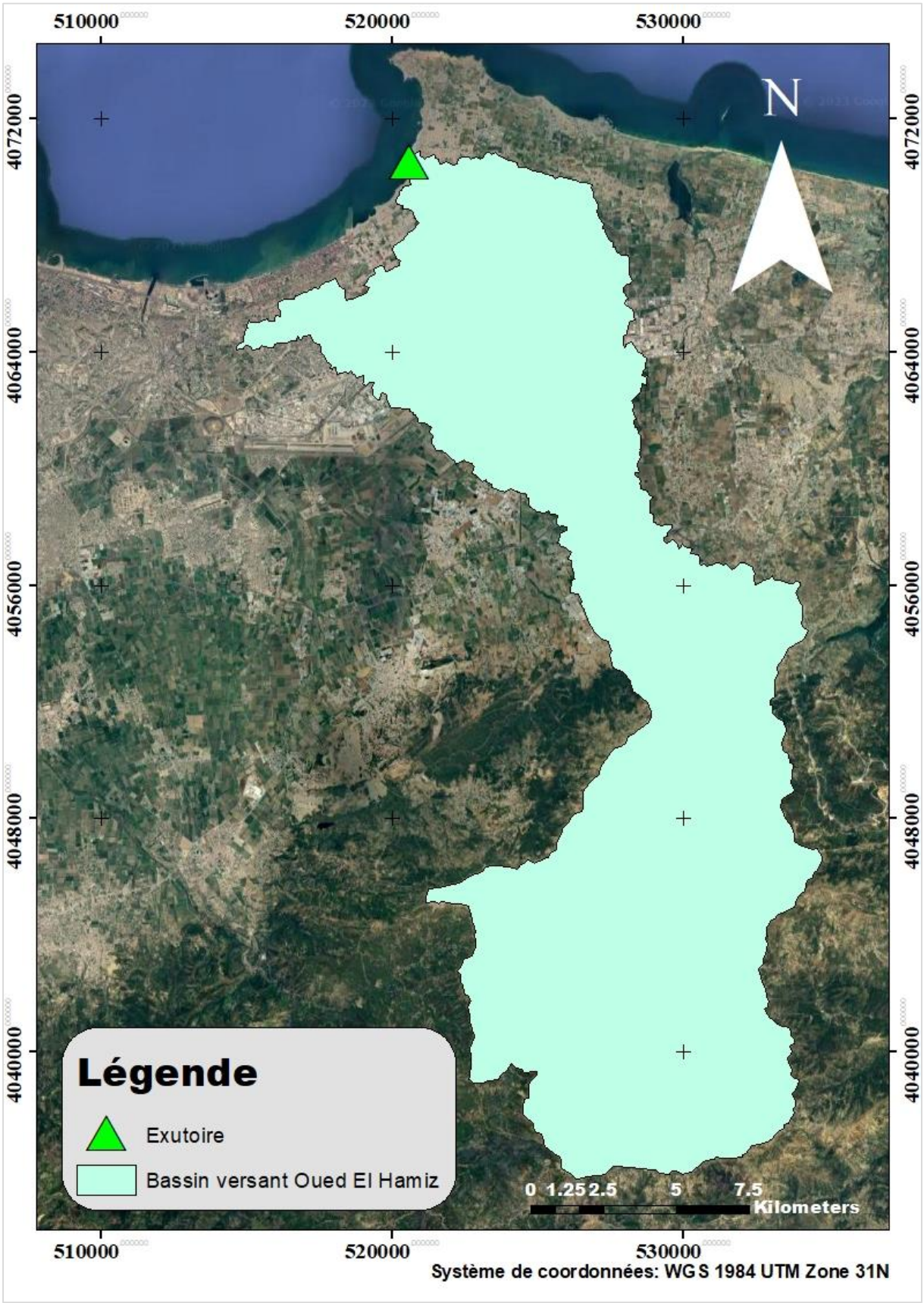


Figure III. 1 : Présentation du bassin versant oued El Hamiz.

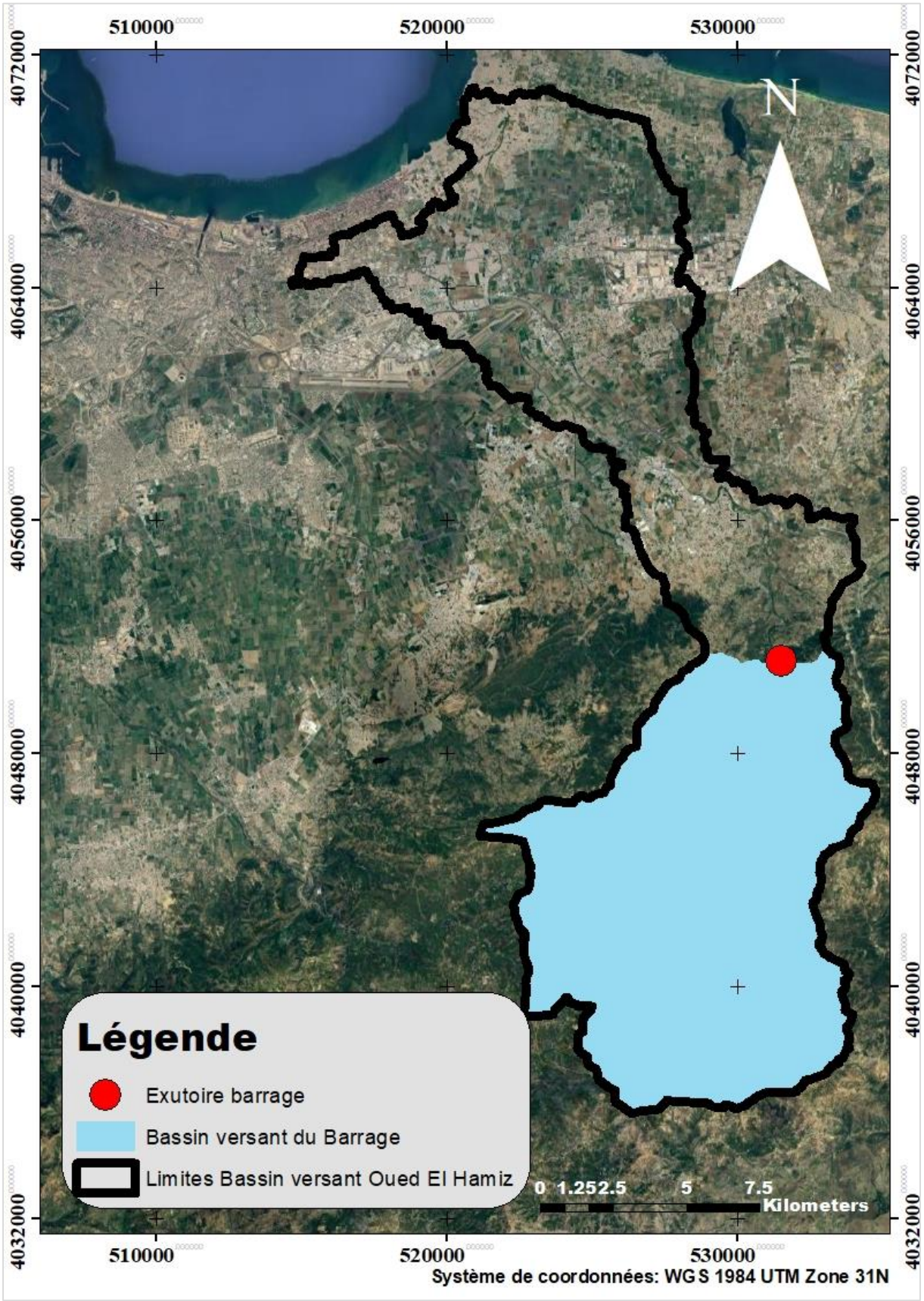


Figure III. 2 : Présentation du bassin versant du Barrage oued El Hamiz.

III.1.1 Etude géomorphologique

a. Caractéristiques morphologiques

Les caractéristiques morphologiques d'une région, en particulier d'un bassin versant, qui est l'unité fondamentale dans une étude hydrologique, jouent un rôle crucial dans la détermination des différents comportements du régime hydrologique. En d'autres termes, même si deux bassins versants voisins partagent des conditions climatiques et géologiques similaires, leurs caractéristiques morphologiques distinctes entraînent des réponses hydrologiques différentes. Cela signifie que la topographie, la forme, la taille, la pente et d'autres aspects géomorphologiques d'un bassin versant peuvent avoir un impact significatif sur la manière dont l'eau s'écoule, s'accumule et réagit aux précipitations et aux conditions météorologiques. Il est donc essentiel de prendre en compte ces caractéristiques morphologiques dans l'analyse et la modélisation des régimes hydrologiques pour une meilleure compréhension et gestion des ressources en eau.

➢ Surface

La surface dans le contexte d'un bassin versant, représente le terrain délimité par la ligne de crête ou le contour du bassin. Pour mesurer cette surface, on peut utiliser un planimètre, ou appliquer la méthode des petits carrés, elle est exprimée en Km^2.

Le bassin versant d'oued El Hamiz (notre bassin d'étude) a une superficie de **137.34 Km^2**.

➢ Périmètre

Le périmètre est la longueur de la ligne de contour du bassin, généralement exprimée en Km, sa mesure est faite à l'aide d'un curvimètre.
Le périmètre du bassin versant d'Oued El Hamiz (bassin d'étude) a un périmètre de **104.33 Km**.

➢ Longueur du thalweg (cours d'eau principal)

Le thalweg est une ligne de partage des eaux, aussi il est le lit de du cours d'eau.

La longueur du cours d'eau principal est : **L_{cp} = 32.22 Km.**

La carte ci-dessous nous présente le BV d'étude d'oued El Hamiz et son cours d'eau principal, et aussi nous indique l'emplacement du barrage (Exutoire Barrage)

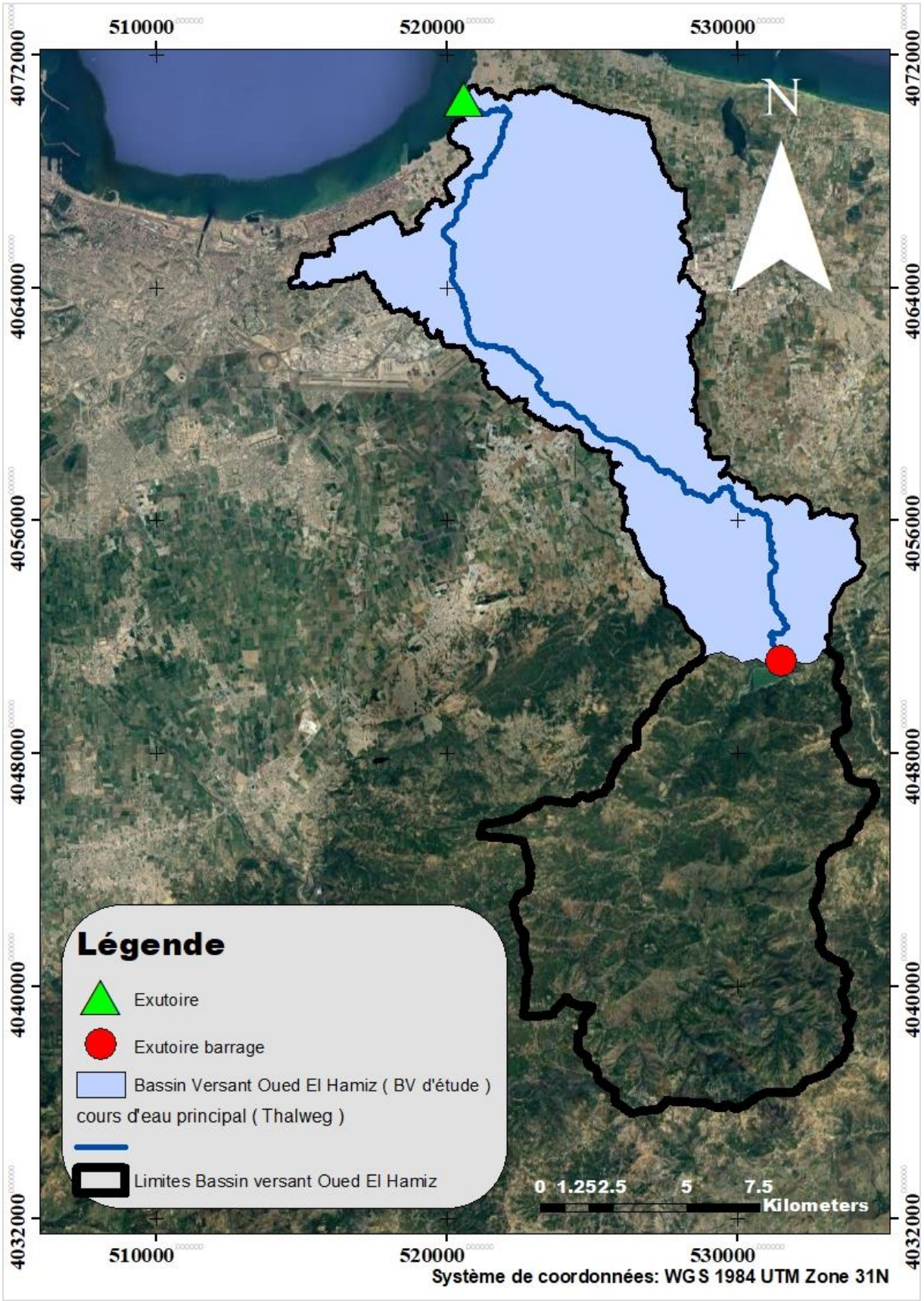


Figure III. 3 : Présentation du bassin versant d'étude.

b. Caractéristiques géométriques

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

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 :

$$K_h = \frac{A}{L^2} \qquad \text{(III. 1)}$$

Avec :

K_h : Indice de compacité de Horton.
S : Aire totale du bassin de drainage (Km^2).
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 (K_G)**

Selon M. GRAVELIUS (Loaborde 2000), la forme du bassin a une influence directe sur le comportement de l'écoulement superficiel. On caractérise cette forme par un paramètre appelé : Indice de compacité (K_G), appelé aussi indice de forme, qui n'est autre que le rapport entre le périmètre P en (Km) du bassin et le périmètre d'un cercle de même superficie A (Km^2).

Il est donné par la formule suivante :

$$K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} \approx 0.282 \frac{P}{\sqrt{A}} \qquad \text{(III. 2)}$$

Avec :

A : Superficie du bassin (Km^2).
P : Périmètre du bassin (Km).
K_G : Indice de compacité de Gravélius.

Pour : - KC =1 : bassin compacte.
- 1 < KC <1.3 : bassin moins compacte.
- KC >1.3 : bassin allongé.

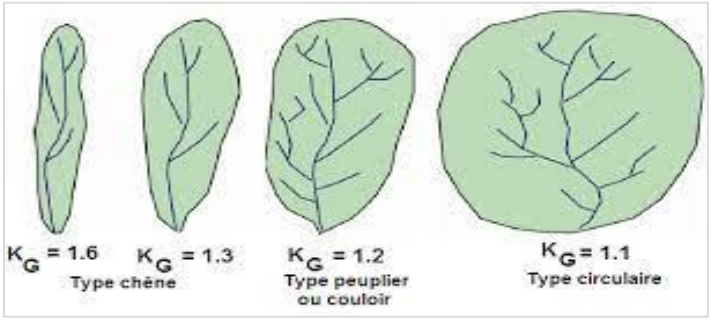


Figure III. 4 : Différents types des BV selon le coefficient de Gravélius K_G.

Dans notre cas le bassin versant est caractérisé par un K_G = 2.51 >,1.3, alors il est de forme relativement allongée.

- **Coefficient d'allongement C_a**

Il est donné par la formule suivante :

$$C_a = \frac{L_{cp}^{\ 2}}{A} \qquad \text{(III. 3)}$$

L_{cp} : La longueur du talweg principal (Km).
S : La surface du bassin versant (Km^2).

- **Rectangle équivalent**

Le rectangle équivalent ou rectangle de Gravélius, est une en vertu de laquelle on assimile le bassin à un rectangle ayant le même indice de compacité et la même hypsométrie que le bassin étudié. Ce dernier permet de comparer les bassins versants entre eux du point de vue de l'écoulement.

Le périmètre et la surface du rectangle sont respectivement :

$$P = 2\,(L + l) \qquad et \qquad A = L.l \qquad \text{(III. 4)}$$

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

$$K_G = 0.282\frac{P}{\sqrt{A}} \qquad \text{(III. 5)}$$

De (4) et (5) on obtient une équation de 2éme degré admet deux solutions L et l :

$$L = \frac{K_G\sqrt{A}}{1.12}\left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_G}\right)^2}\right] \quad et \quad l = \frac{K_G\sqrt{A}}{1.12}\left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_G}\right)^2}\right] \qquad \text{(III. 6)}$$

Avec :

« L » et « l » : la longueur la largeur du rectangle (Km).
A : la surface du bassin versant (Km^2).
K_G : l'indice de compacité.

Les paramètres géomorphologiques du bassin versant d'oued El Hamiz sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau III. 1 : Paramètres géomorphologiques du bassin versant d'oued El Hamiz.

Désignation		Symbole	Unités	Valeur
Superficie		A	Km²	137.34
Périmètre		P	Km	104.33
Longueur du talweg principal		L_{cp}	Km	32.22
Indice de compacité de Gravélius		K_G	/	2.51
Indice de compacité de Horton		K_h	/	0.13
Coefficient d'allongement		C_a	/	7.56
Rectangle équivalent	**longueur**	L	Km	49.80
	largeur	l	Km	2.76

III.1.2 Etude du relief

Le relief d'une région exerce une influence sur la forme de l'hydrogramme de crue. Une pente prononcée du terrain entraîne un écoulement plus rapide, ce qui se traduit par un temps de concentration plus court. Cela signifie que l'eau de pluie s'écoule plus rapidement vers les rivières et les cours d'eau, ce qui peut entraîner une montée rapide des niveaux d'eau en cas de crue. L'importance de cette étude est caractérisée par la répartition altimétrique du terrain par une courbe appelée « Courbe hypsométrique ».

a. Courbe hypsométrique

La courbe hypsométrique est une représentation graphique qui montre la distribution des superficies d'un bassin versant en fonction de leurs altitudes. Elle offre une vue synthétique de la topographie ou du relief d'une région. En examinant cette courbe, il est possible de déduire des informations importantes sur la pente du bassin et sur la manière dont les différentes altitudes sont réparties dans la zone étudiée.

Elle est tracée en plaçant les altitudes en ordonnée et les pourcentages de surface en abscisse. La courbe hypsométrique est générée à partir des calculs qui déterminent la répartition des surfaces du bassin versant par tranches d'altitudes, en calculant les surfaces partielles entre les courbes de niveau successives. Cette courbe représente la fraction de la superficie totale située entre deux courbes de niveau adjacentes.

Elle est considérée comme une représentation synthétique du profil du bassin versant. Sa pente moyenne, qui peut être calculée à partir de cette courbe, est un indicateur essentiel pour comparer la topographie de différents bassins versants ou impluviums. La répartition des

surfaces élémentaires et leurs cumule en fonction des altitudes ont été obtenues avec logiciel ArcGis.

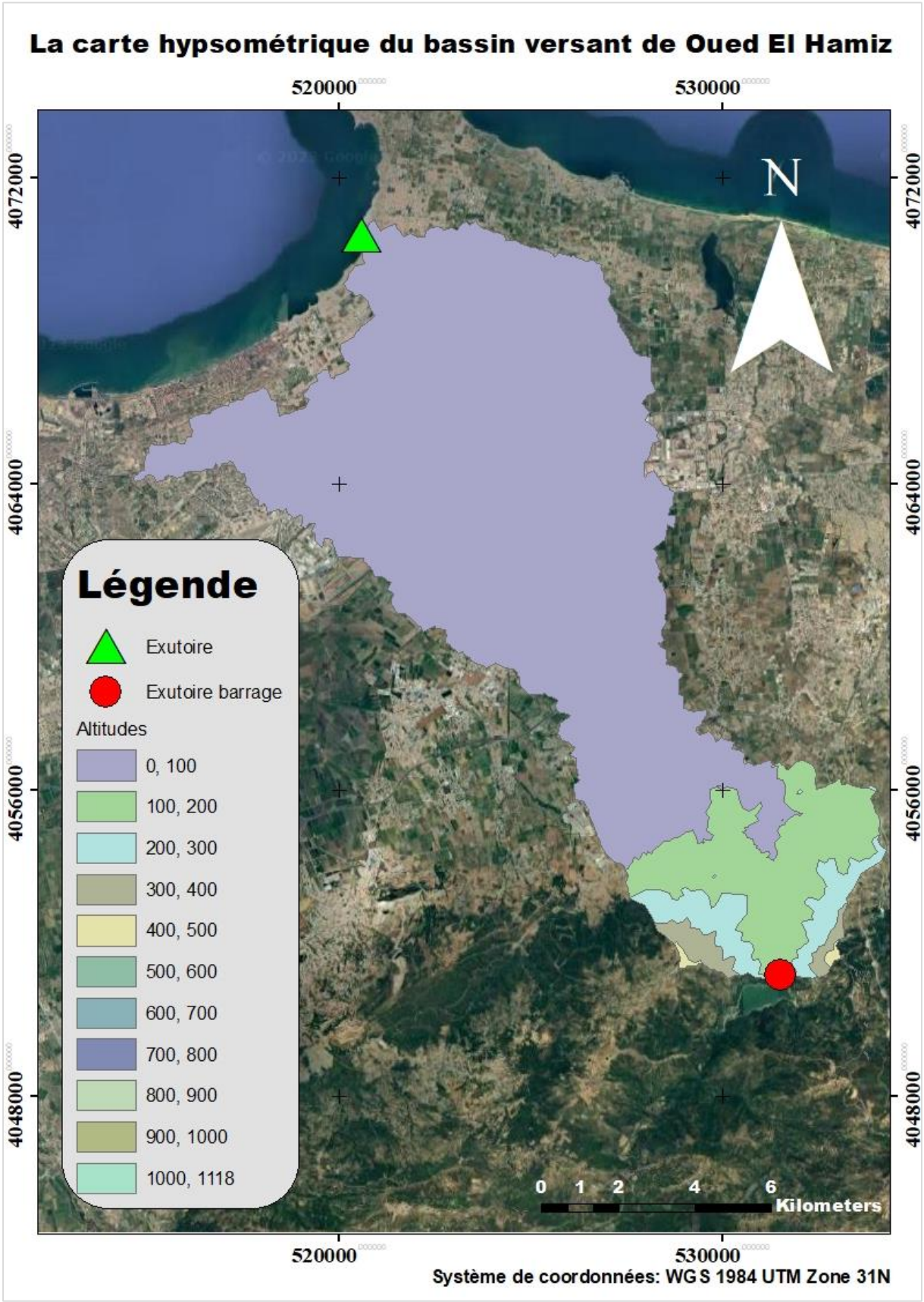


Figure III. 5 : Carte hypsométrique du bassin versant d'oued El Hamiz.

Tableau III. 2 : Paramètres Hypsométriques du bassin versant d'oued El Hamiz.

Altitude (m)	Hi (m)	Surface (Km^2)	Surfaces partielles (%)	Surfaces cumulées (Km^2)	Surfaces cumulées (%)
1000 - 1118	1059	0.003	0.002	0.003	0.002
900 - 1000	950	0.021	0.016	0.025	0.018
800 - 900	850	0.024	0.017	0.048	0.035
700 - 800	750	0.032	0.023	0.080	0.058
600 - 700	650	0.021	0.015	0.101	0.073
500 -600	550	0.018	0.013	0.119	0.087
400 - 500	450	0.307	0.224	0.426	0.310
300 - 400	350	1.898	1.381	2.324	1.691
200 - 300	250	5.522	4.017	7.846	5.708
100 - 200	150	15.750	11.458	23.597	17.166
0 - 100	50	113.863	82.834	137.459	100.000

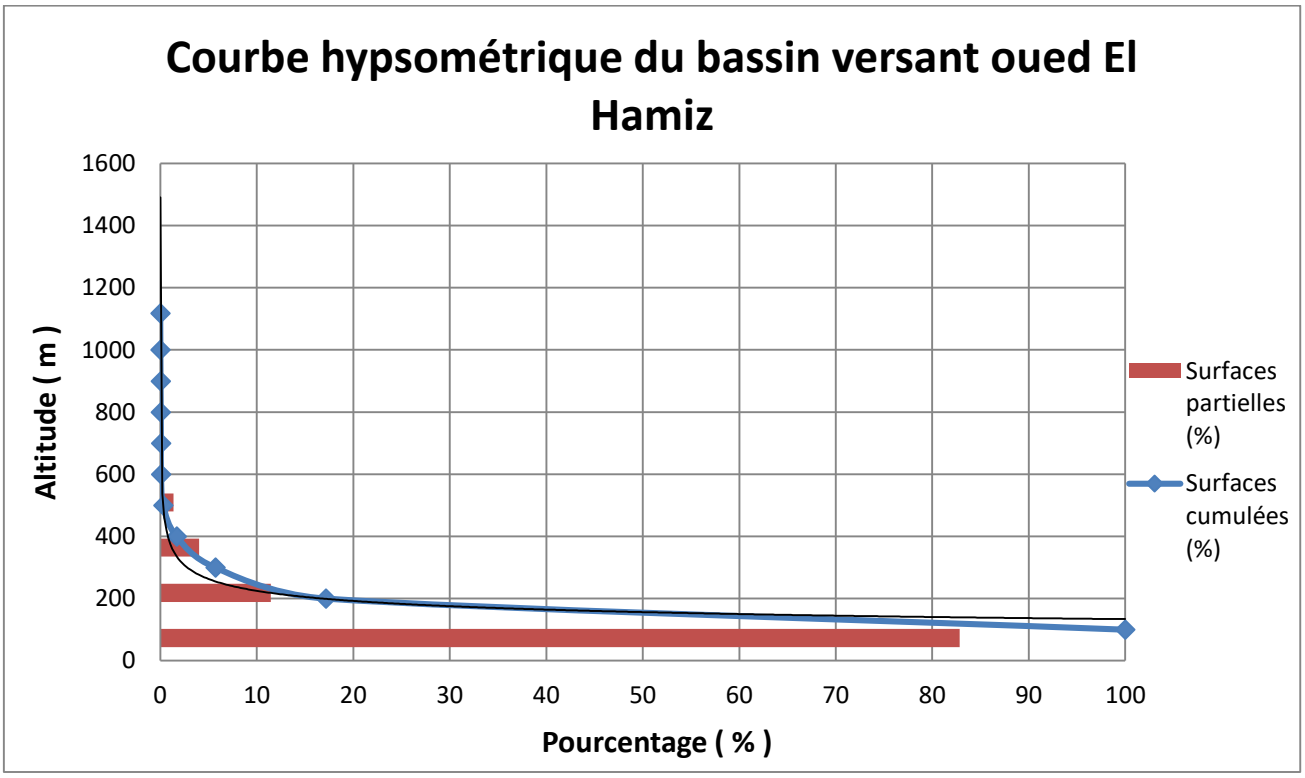


Figure III. 6 : Courbe hypsométrique du bassin versant d'oued El Hamiz.

Les principales caractéristiques d'altimétries correspondent à :

1. Altitude maximale et minimale $H_{max} - H_{min}$

Les altitudes maximale et minimale d'un bassin versant sont obtenues directement à partir des cartes topographiques. L'altitude maximale indique le point le plus élevé du bassin, tandis que l'altitude minimale correspond au point le plus bas, généralement situé à l'exutoire du bassin.

2. Altitude moyenne H_{moy}

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

$$H_{moy} = \sum \frac{A_i * H_i}{A} \qquad \text{(III. 7)}$$

Avec :

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

3. Altitude $H_{5\%}$

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

4. Altitude médiane $H_{50\%}$

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

5. Altitude médiane $H_{95\%}$

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

Les résultats de calculs sont résumés dans le tableau (Tableau 3) :

Tableau III. 3 : Caractéristiques d'altimétries du bassin versant d'oued El Hamiz.

Altitudes	H min	H max	H moy	H 5%	H 50%	H 95%
Bassin versant oued El Hamiz	0	1118	75.15	234.92	139.61	120.76

b. Indices de pente

Les indices de pente permettant de caractériser les pentes d'un bassin versant, ce qui facilite les comparaisons et les classifications de ces bassins. Ils sont également utilisés pour estimer les vitesses d'écoulements superficiels.

1. Pente du bassin versant I_{BV}

$$I_{BV} = \frac{H_{max} - H_{min}}{L_{Talweg}} \quad \text{(III. 8)}$$

2. Pente moyenne du bassin versant I_m

$$I_m = \frac{\Delta H\,(0.5L_1 + L_2 + \cdots + 0.5L_n)}{S_{BV}} \quad \text{(III. 9)}$$

Avec :

ΔH : Dénivelés entre deux courbes de niveaux successives (m).
$L_1, L_2, \ldots, L_n$: Les longueurs des courbes de niveaux (Km).
S_b : Superficie du bassin versant (Km^2).

Tableau III. 4 : Pente moyenne du bassin versant d'oued El Hamiz.

Courbes	Longueur (Km)	ΔH	Surface BV (Km^2)	I_m (m/Km)
100	78.04	100	137.34	101.65
200	35.04			
300	27.54			
400	12.12			
500	6.74			
600	2.98			
700	3.06			
800	5.38			
900	3.59			
1000	3.81			
1100	0.63			

3. Indice de pente de Roche I_p

L'indice de pente I_P de M. Roche sert à déterminer la pente moyenne avec les données réelles du bassin versant.
I_P est donné par la formule :

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L_r}} \sum \sqrt{S_i * H_i} \qquad \text{(III. 10)}$$

Avec :

I_P : Indice de pente de Roche.
L_r : Longueur du rectangle équivalent (m).
S_i : Surface partielle (%) comprise entre 2 courbes de niveau consécutives H_i et H_{i+1}.

4. Indice de pente moyenne I_{pm}

La pente moyenne d'un cours d'eau elle a une influence sur la vitesse à laquelle l'eau se déplace vers la sortie du bassin (exutoire) et sur le temps de concentration.

Pour calculer les pentes moyennes des cours d'eau, on se base sur le profil en long du cours d'eau principal ainsi que de ses affluents. La méthode la plus couramment employée pour calculer la pente longitudinale du cours d'eau 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 :

$$I_{pm} = \frac{H_{max} - H_{min}}{L_r} \qquad \text{(III. 11)}$$

Avec :
H_{min} et H_{max} : Altitude minimale et maximale (m).
L_r : Longueur du rectangle équivalent (Km).

5. Indice de pente globale I_g

L'indice de pente globale représente la pente moyenne de 90% de la superficie du bassin, il est obtenu à partir de la courbe hypsométrique, on prend la différence (D) entre les altitudes $H_{5\%}$ et $H_{95\%}$.

$$I_g = \frac{D}{L_r} = \frac{H_{5\%} - H_{95\%}}{L_r} \qquad \text{(III. 12)}$$

Avec :
$H_{5\%}$: Altitude de fréquence correspondante au 5% de la surface total (m).
$H_{95\%}$: Altitude de fréquence correspondante au 95% de la surface total (m).
L_r : Longueur du rectangle équivalant (Km).

Tableau III. 5 : Classification O.R.S.T.O.M du relief à partir de l'indice de pente global.

Relief		Valeur de I_g
1	Relief très faible	Ig <0.002
2	Relief faible	0.002<Ig <0.005
3	Relief assez faible	0005<Ig <0.01
4	Relief modéré	0.01<Ig <0.02
5	Relief assez fort	0.02<Ig <0.05
6	Relief fort	0.05<Ig <0.1
7	Relief très fort	0.1<Ig

6. Dénivelée spécifique D_s

La dénivelée spécifique « D_S » permet d'utiliser la classification de l'O.R.S.T.O.M. (Tableau 6) qui permet définir les différents types de relief des bassins versants quelque soient leurs superficies. La dénivelée spécifique donne une idée générale sur le relief du bassin, elle est donnée par la formule suivante :

$$D_s = I_g\sqrt{A} = D\sqrt{\frac{I}{L_r}} \qquad \text{(III. 13)}$$

Tableau III. 6 : Classification des reliefs d'après l'O.R.S.T.O.M.

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

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

Les résultats des calculs sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau III. 7 : Résultats de calculs des pentes et la dénivelée spécifique du bassin versant d'oued El Hamiz.

Paramètres	Symboles	Unités	Valeurs
Pente du bassin versant	I_{BV}	m/Km	34.70
Pente moyenne du bassin versant	I_m	m/Km	101.65
Indice de pente de Roche	I_p	%	0.90
Indice de pente moyenne	I_{pm}	m/Km	22.45
Indice de pente globale	I_g	m/Km	2.29
Dénivelée spécifique	D_s	m	26.87
Relief	/	/	Assez faible

III.1.3 Etude du réseau hydrographique

III.1.3.1 Caractéristiques du réseau hydrographique

Le cours principal d'un fleuve reçoit des apports de ses affluents les plus significatifs, qui à leur tour sont alimentés par des affluents de second ordre, et ainsi de suite, jusqu'à atteindre les ruisseaux et petits cours d'eau à la source du bassin. Ces petits cours d'eau à la tête du bassin forment ce que l'on appelle le chevelu hydrographique du bassin versant. Pour décrire un réseau hydrographique de manière complète, plusieurs paramètres doivent être déterminés.

- **Hiérarchisation du réseau**

La ramification d'un cours d'eau est établie en attribuant un système de numérotation à chaque segment du cours d'eau en fonction de son niveau d'importance.

- Tout cours d'eau dépourvu d'affluent est d'ordre 1.
- A la jonction de deux cours d'eau de même ordre n, le cours d'eau résultant est d'ordre n+1.
- Le cours d'eau formé par la confluence de deux cours d'eau d'ordre différents prend l'ordre du plus élevé des deux.
- L'ordre du plus élevé est l'ordre du cours d'eau principal à l'exutoire.

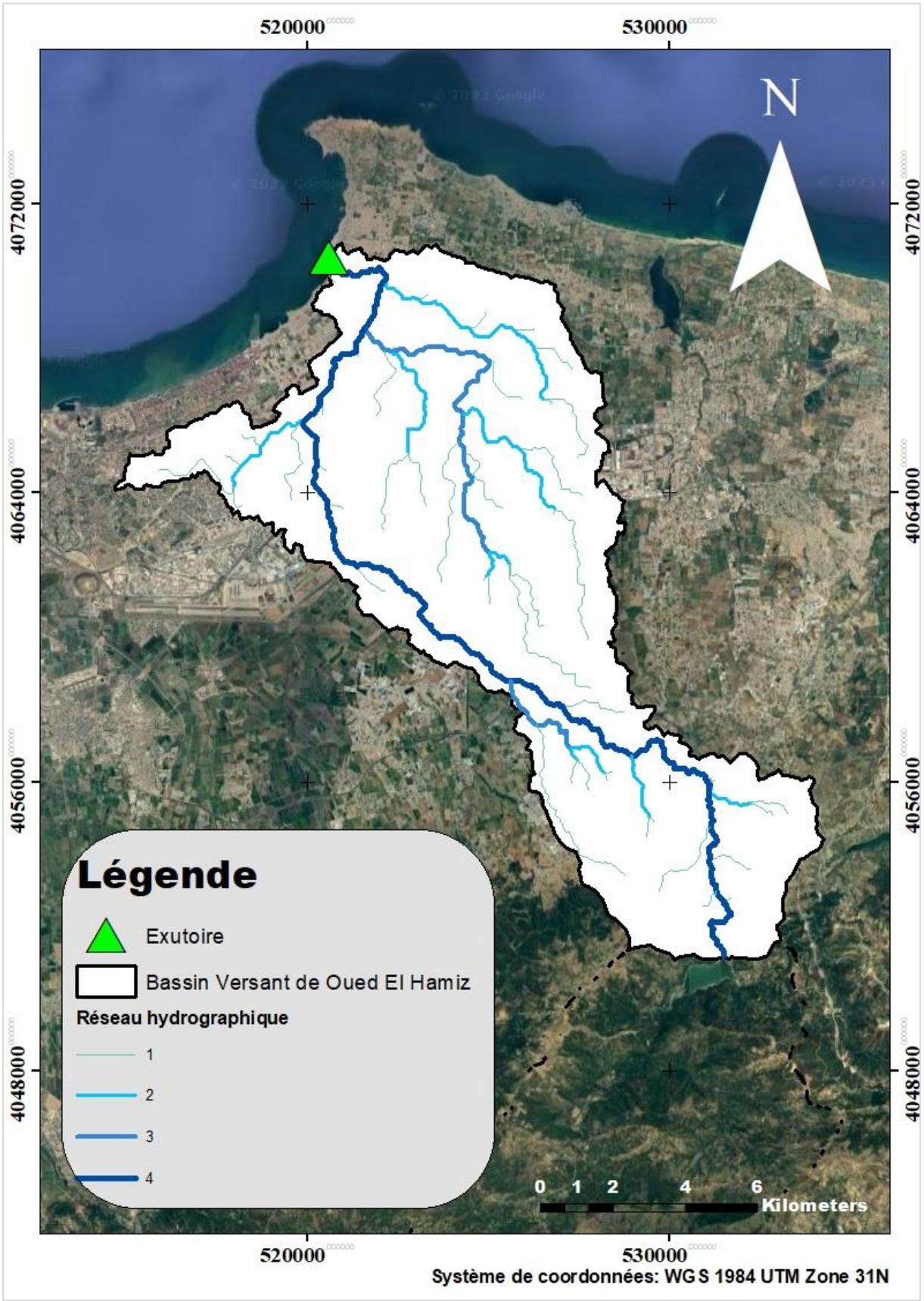


Figure III. 7 : Réseau hydrographique du bassin versant d'oued El Hamiz.

III.1.3.2 Paramètres hydrographiques

III.1.3.2.1 Densité de drainage D_d

La densité de drainage est définie comme le rapport entre la longueur totale de tous les cours d'eau dans un bassin versant donné et la superficie de ce bassin. Cette mesure reflète la complexité et la dynamique du réseau hydrographique. Une valeur élevée de la densité de drainage indique un réseau hydrographique relativement dense. Elle est exprimée en Km/Km² et donnée par la formule suivante :

$$D_d = \frac{\sum_{i=1}^{n} l_i}{A} \qquad \text{(III. 14)}$$

Avec :

D_d : Densité de drainage en Km/Km².
$\sum_{i=1}^{n} l_i$: Longueur totale de tous les thalwegs du bassin en Km.
n : L'ordre le plus élevé dans la classification. (n=4)
A : Superficie du bassin en Km².

La densité de drainage représente deux formes différentes de drainage.

- Densité de drainage temporaire (D_{dt}) représente les talwegs qui coulent temporairement :

$$D_{dt} = \frac{\sum_{i=1}^{n} l_{it}}{A} \qquad \text{(III. 15)}$$

l_{it} : Longueurs des oueds temporaires.

- Densité de drainage permanente (D_{dp}) : représente les talwegs qui coulent en permanence :

$$D_{dp} = \frac{\sum_{i=1}^{n} l_{ip}}{A} \qquad \text{(III. 16)}$$

l_{ip}: Longueurs des oueds permanents.

III.1.3.2.2 Profil en long

Le profil en long d'un cours d'eau nous permet d'estimer sa pente moyenne. Cette pente est nécessaire dans l'estimation du temps de concentration du bassin.

III.1.3.2.3 Densité hydrographique des thalwegs élémentaires « F »

La densité hydrographique représente le nombre de canaux d'écoulement par unité de surface.

$$F = \frac{\sum N_1}{S} \qquad \text{(III. 17)}$$

Avec :
F : Densité hydrographique .

N_1 : Nombre de cours d'eau d'ordre 1.
S : Superficie du bassin versant (Km^2).

III.1.3.2.4 Coefficient de torrentialité Ct

Le coefficient de torrentialité est le produit de la densité de drainage par la densité hydrographique des thawlwegs élémentaires :

$$C_t = D_d * F \quad \text{(III. 18)}$$

Avec :

D_d : Densité de drainage ;
F : Densité hydrographique.

III.1.3.2.5 Temps de concentration T_c

Le temps de concentration *Tc* des eaux sur un bassin versant se définit comme le maximum de durée nécessaire à une goutte d'eau pour parcourir le chemin hydrologique entre un point du bassin et l'exutoire de ce dernier, c'est une grandeur difficile à évaluer. Il existe plusieurs formules d'usage courant, certaines relativement vieilles comme la formule de Kirpich qui date de 1940 et a été élaborée à la suite des crues qui ont frappé le nord-est des États-Unis en 1936 (Folmar et al. 2007).

Les méthodes et les formules utilisées pour l'analyse des bassins versants reflètent souvent des caractéristiques régionales spécifiques, qui sont définies par des paramètres propres à la région où ces formules ont été développées. Lorsque nous analysons un bassin versant particulier, il est généralement recommandé de choisir la formule qui correspond le mieux aux caractéristiques de ce bassin. Pour ce faire, on donne la priorité aux formules élaborées dans des conditions physiogéographiques similaires à celles de la partie Nord de l'Algérie, afin d'assurer une meilleure adéquation avec le contexte local

L'estimation du temps de concentration est obtenue grâce aux formules empiriques suivantes :

- **Formule de VENTURA**

Donnée par :

$$T_C = 0.1275 \frac{\sqrt{S}}{\sqrt{I_{BV}}} \quad \text{(III. 19)}$$

Avec :

T_c: Temps de concentration (h) ;
I_{BV} : Pente du bassin versant (m/m) ;
S : Surface du bassin versant (Km2).

- **Formule de KIRPICH**

Cette méthode est adaptée aux bassins versants dont la superficie varie entre 0,4 ha et 81 ha, dont les sols sont argileux et dont la pente moyenne est comprise entre 3% et 10%. Le temps de concentration est alors calculé à partir de l'équation suivante :

$$T_C = 0.0663 \frac{L_{cp}^{0.77}}{I_g^{0.385}} \quad \text{(III. 20)}$$

Avec :

T_c : Temps de concentration (h).
L_{cp}: Longueur du cours d'eau principal (m).
I_g: Indice de pente globale (%).

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

Donnée par :

$$T_C = \frac{4\sqrt{S} + 1.5L_{cp}}{0.8\sqrt{H_{moy} - H_{min}}} \quad \text{(III. 21)}$$

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 (Km^2).
L_{cp} : Longueur du cours d'eau principal (Km).

- **Formule de TURAZZA**

Donnée par :

$$T_C = \frac{0.108\sqrt[3]{S * L_{CP}}}{\sqrt{I_{pm}}} \quad \text{(III. 22)}$$

Avec :

T_c : Temps de concentration (h) .
L_{cp}: Longueur du cours d'eau principal (Km).
S : Surface du bassin versant (Km^2).
H_{moy} : Altitude moyenne du bassin versant (m).
H_{min} : Altitude minimale du bassin versant (m).

- **Formule ESPAGNOLE**

Donnée par :

$$T_C = 0.126 * 60 * \left(\frac{L_{cp}}{I_{pm}^{0.25}}\right)^{0.76} \quad \text{(III. 23)}$$

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 SOLOVSKY**

Donnée par :

$$T_C = 4 * \left(\frac{S * L_{cp}^{0.333}}{\sqrt{I_{bv}}} \right)^{0.75} \quad \text{(III. 24)}$$

Avec :

T_c: Temps de concentration (h) .

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

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

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

- **Formule de SCS ANRH**

Donnée par :

$$T_c = \left(\frac{0.87 L_{cp}^3}{H_{moy} - H_{min}} \right)^{0.385} \quad \text{(III. 25)}$$

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 (Km^2).

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

Choix du temps de concentration

Le tableau ci-dessous récapitule les résultats de calcul du temps de concentration obtenus à l'aide des différentes formules :

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

Formules utilisées	Temps de Concentration	Unités
Formule de VENTURA	8.02	h
Formule de KIRPICH	non applicable	h
Formule de GIANDOTTI	13.73	h
Formule de TURAZZA	11.83	h
Formule ESPAGNOLE	8.35	h
Formule de SOLOVSKY	102.9	h
Formule de SCS ANRH	9.92	h

Les formules que nous avons utilisées sont celles recommandées pour les régions du Nord de l'Algérie. Cependant, elles ont généré des résultats différents. Pour déterminer le temps de concentration final, nous avons suivi une approche consistant à retenir la valeur minimale parmi les résultats qui se trouvent dans une fourchette proche. Les valeurs extrêmes, qu'elles soient très élevées ou très basses, ont été exclues, et nous avons conservé les valeurs centrales. La valeur finale choisie est celle qui se rapproche le plus de la moyenne des valeurs retenues.

Tableau III. 9 : Choix du temps de concentration.

Formules utilisées	Temps de Concentration	Unités
Formule de GIANDOTTI	13.73	h
Formule de TURAZZA	11.83	h
Formule de SCS ANRH	9.92	h

Donc on prend la valeur qui est estimée par la formule de TURAZZA qui est recommandée pour les grands bassins versants, T_c = 11.83 heures.

III.1.3.2.6 Vitesse de ruissellement V_r

Le ruissellement est défini comme étant l'écoulement par gravité à la surface du sol, suivant la pente du terrain des eaux météorologiques qui ont échappé à l'infiltration, à l'évaporation et au stockage superficiel. La vitesse de ruissellement est calculée en utilisant le temps de concentration de la formule de TURAZZA car c'est la méthode la plus utilisé en Algérie.

La vitesse de ruissellement se calcule par la formule suivante :

$$V_r = \frac{L_{cp}}{T_C} \qquad \text{(III. 26)}$$

Avec :

V_r : vitesse de ruissellement (Km/h).

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

T_c : Temps de concentration (h).

Le tableau suivant récapitule les résultats de calculs des paramètres hydrographiques :

Tableau III. 10 : Paramètres hydrographiques d'oued El Hamiz.

Désignation	Symbole	Unités	Valeur
Densité de drainage	Dd	Km/Km^2	1.03
Densité hydrographique	F	Km^{-2}	1.10
Coefficient de torrentialité	Ct	/	1.13
Temps de concentration	Tc	Heures	11.83
Vitesse de ruissellement	Vr	Km/h	2.72

Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques géomorphologiques du bassin versant d'oued El Hamiz.

Tableau III. 11 : Caractéristiques géomorphologiques du bassin versant d'oued El Hamiz.

Désignation		Symbole	Unités	Valeur
Superficie		A	Km²	137.34
Périmètre		P	Km	104.33
Longueur du talweg principal		L_{cp}	Km	32.22
Indice de compacité de Gravélius		K_G	/	2.51
Indice de compacité de Horton		K_h	/	0.13
Coefficient d'allongement		C_a	/	7.56
Rectangle équivalent	**longueur**	L	Km	49.80
	largeur	l	Km	2.76
	Surface	S_R	Km²	137.4
	Périmètre	P_R	Km	105.12
Altitudes	**Maximale**	H_{max}	m	1118
	Moyenne	H_{moy}	m	75.15
	Minimale	H_{min}	m	0
	Médiane 5%	$H_{5\%}$	m	234.92
	Médiane 50%	$H_{50\%}$	m	139.61
	Médiane 95%	$H_{95\%}$	m	120.76
Pente du bassin versant		I_{BV}	m/Km	34.70
Pente moyenne du bassin versant		I_m	m/Km	101.65
Indice de pente de Roche		I_p	%	0.90
Indice de pente moyenne		I_{pm}	m/Km	22.45
Indice de pente globale		I_g	m/Km	2.29
Dénivelée spécifique		D_s	m	26.87
La somme des longueurs des cours d'eau		$\sum L_i$	Km	141.42
Nombre des talwegs d'ordre 1		$\sum N1$	/	151
Densité de drainage		D_d	Km/Km^2	1.03
Densité hydrographique		F	Km^{-2}	1.10
Coefficient de torrentialité		C_t	/	1.13
Temps de concentration		T_c	Heures	11.83
Vitesse de ruissellement		V_r	Km/h	2.72

III.2 Etude des crues

L'analyse fréquentielle en hydrologie est une approche statistique utilisée pour prédire les fréquences d'apparition des crues futures. La détermination des crues est généralement basée sur les observations hydrométriques, lorsque celles-ci sont disponibles pour le bassin versant spécifique du site à étudier. Dans le cas où ces données font défaut, une alternative consiste à utiliser des modèles et des formules empiriques basées sur la pluviométrie.

L'estimation du débit de crue fréquentielle du bassin versant peut-être calculée en utilisant deux approches :

a. **Série d'observation de la station hydrométrique :** Cette approche repose sur l'utilisation des données historiques de débit mesurées à une station hydrométrique située dans le bassin versant étudié. À partir de ces données, des analyses statistiques sont effectuées pour estimer les débits de crue fréquentielle en utilisant des méthodes telles que la méthode des moments, la méthode de la loi de Gumbel, la méthode de la loi de Pearson III, etc.
b. **Méthode de GRADEX :** La méthode de GRADEX est une approche alternative qui peut être utilisée lorsque les données hydrométriques sont insuffisantes. Elle se base sur une relation empirique entre les précipitations et les débits de crue observés dans un bassin versant voisin qui présente des caractéristiques similaires. Cette méthode permet de transférer les informations du bassin voisin vers le bassin étudié en ajustant les données de précipitation en fonction des différences de surface, de pente, de géologie, etc., entre les deux bassins.

Ces deux approches visent à estimer les débits de crue fréquentielle en utilisant des méthodes probabilistes et statistiques. Cependant, il est important de noter que les résultats obtenus à partir de ces méthodes peuvent présenter des incertitudes et doivent être interprétés avec précaution.

L'objectif principal de l'étude des crues est de mieux comprendre les processus hydrologiques impliqués dans les crues et d'obtenir des informations précieuses pour la gestion des ressources en eau, la planification des infrastructures, l'élaboration de mesures d'atténuation des risques et l'élaboration de plans d'urgence. Ces études peuvent également être utilisées pour la conception de systèmes 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 l'étude des crues, différentes stations de mesure sont utilisées pour collecter des données hydrologiques et météorologiques. Voici quelques-unes des stations couramment utilisées dans cette étude :

a. Stations pluviométriques

Ces stations sont spécifiquement conçues pour mesurer les quantités de précipitations. Elles utilisent des jauges ou des capteurs pour enregistrer la pluviométrie sur une période donnée. Les données pluviométriques sont cruciales pour évaluer les apports d'eau dans un bassin versant et prévoir les crues.

b. Stations hydrométriques

Ces stations sont utilisées pour les mesures de débit. Elles sont essentielles 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.

Le tableau suivant présente les différentes stations utilisées :

Tableau III. 12.a : Présentation de la station hydrométrique utilisées dans l'étude.

Code de la station	Nom de la station	Type de la station	Les coordonnées			Période d'observation
			X	Y	Z	
020627	Ouled Ali	Hydrométrique	3.29	36.64	67	1983-2004

Tableau III. 13.b : Présentation des stations pluviométriques utilisées dans l'étude.

Code de la station	Nom de la station	Type de la station	Les coordonnées			Période d'observation
			X	Y	Z	
390 (ONM)	Dar El Beida	Pluviométrique	3.25	36.72	25	1975-2010
020602	Hamiz Barrage	Pluviométrique	3.352	36.61	130	1905-2019
020627	Ouled Ali	Pluviométrique	3.29	36.64	67	1973-2013
020629	Pond D9	Pluviométrique	3.328	36.656	77	1973-2012

Ces différentes stations sont réparties stratégiquement dans le bassin versant d'oued El Hamiz et les zones à risque d'inondation pour collecter des données en temps réel et fournir des informations précieuses pour la gestion des crues. Les données recueillies à partir de ces stations sont utilisées pour l'analyse, la modélisation et la prévision des crues, ce qui contribue à la prise de décision en matière de gestion des risques d'inondation.

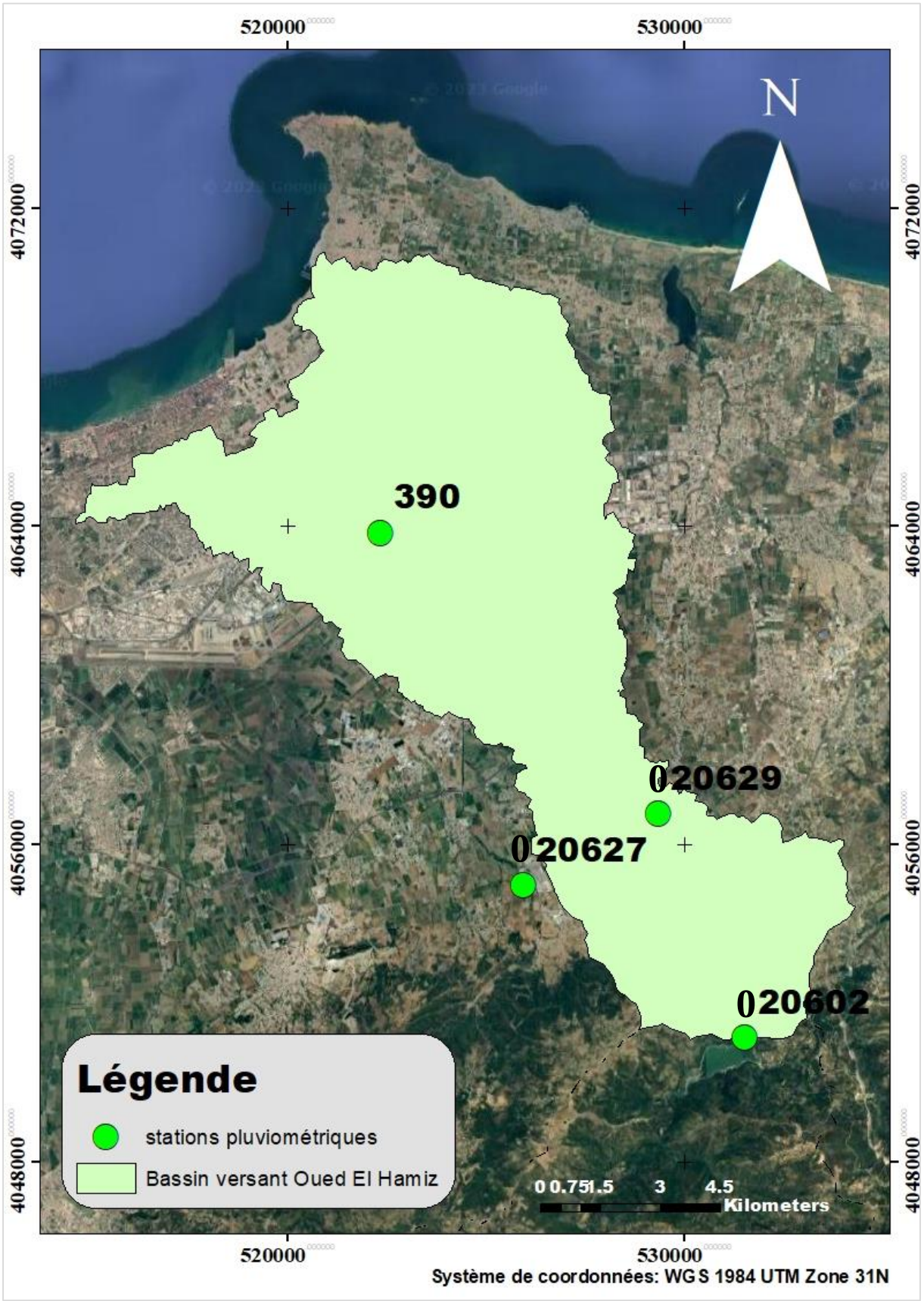


Figure III. 8 : Carte présente la position des stations utilisées dans l'étude des crues.

III.2.2 Analyse fréquentielle des évènements extrêmes des crues maximales annuelles de la station hydrométrique Ouled Ali 20627

Après avoir testé plusieurs lois de probabilité, notamment la loi de Gumbel et la loi log normale, l'analyse fréquentielle en hydrologie permet d'estimer les quantiles correspondant aux périodes de retour spécifiées, telles que 5, 10, 20, 50, 100 et 1000 ans. Cette approche statistique repose sur des calculs probabilistes qui utilisent l'historique des événements passés pour prédire les fréquences d'apparition futures.

Le tableau ci-dessous présente la série des débits maximaux annuels pour la station hydrométrique de Ouled Ali.

Tableau III. 14 : Série des débits maximaux annuels prise de la station de Ouled Ali 20627.

Année	$Q_{max,j}$ (m^3/s)	Année	$Q_{max,j}$ (m^3/s)
1983	/	1994	/
1984	/	1995	/
1985	/	1996	/
1986	/	1997	/
1987	12	1998	/
1988	47.04	1999	39.12
1989	15.29	2000	28.75
1990	/	2001	4.27
1991	/	2002	54.5
1992	2.82	2003	51.7
1993	29.98	2004	32.13

III.2.2.1 Choix du modèle fréquentiel

Pour l'étude des crues, plusieurs modèles fréquentiels sont utilisés afin de mieux comprendre et prédire le comportement des cours d'eau lors d'événements extrêmes. Ces modèles permettent d'estimer les débits correspondant à différentes périodes de retour et sont basés sur l'analyse statistique des données hydrologiques. Voici quelques-uns des modèles fréquentiels les plus couramment utilisés pour l'étude des crues avec leurs variables hydrologiques associées, ainsi que leurs validités :

Tableau III. 15 : Modèles fréquentielle.

Modèle fréquentiel	Loi de probabilité	Variables hydrologiques	Validité
Normale	Distribution normale	Précipitations annuelles, Débits, Volume de stockage des réservoirs	Conditions où les données suivent une distribution normale
Log Normale	Distribution log-normale	Débits maximales annuels, Précipitations journalières, Précipitations annuelles, Volume du ruissellement mensuel, Volume du ruissellement annuel	Conditions où les logarithmes des données suivent une distribution normale
Pearson type III (Gamma)	Distribution de Pearson de type III	Débits maximales annuels, Précipitations journalières, Précipitations annuelles, Volume du ruissellement mensuel, Volume du ruissellement annuel	Conditions où les données suivent une distribution de Pearson de type III
Loi de Gumbel	Distribution de Gumbel	Débits maximales annuels	Conditions où les débits maxima annuels suivent une distribution de Gumbel
Loi exponentielle	Distribution exponentielle	Précipitations journalières, Durée entre deux événements	Conditions où les données suivent une distribution exponentielle

- **Logiciel HYFRAN**

Le logiciel HYFRAN (HYdrologie FRéquentielle ANalyse) est un logiciel développé spécifiquement pour l'analyse fréquentielle en hydrologie. Il est conçu pour aider les hydrologues et les professionnels de l'eau à effectuer des analyses statistiques et à estimer les quantiles correspondant à différentes périodes de retour.

HYFRAN permet de réaliser différentes étapes de l'analyse fréquentielle, notamment l'estimation des paramètres des lois de probabilité (comme la loi de Gumbel, la loi log normale, etc.), le calcul des quantiles, la réalisation de tests de validité, et la création de graphiques et de rapports. Le logiciel facilite également l'importation et la manipulation des données hydrologiques, en offrant des fonctionnalités de filtrage, de tri et de traitement des données.

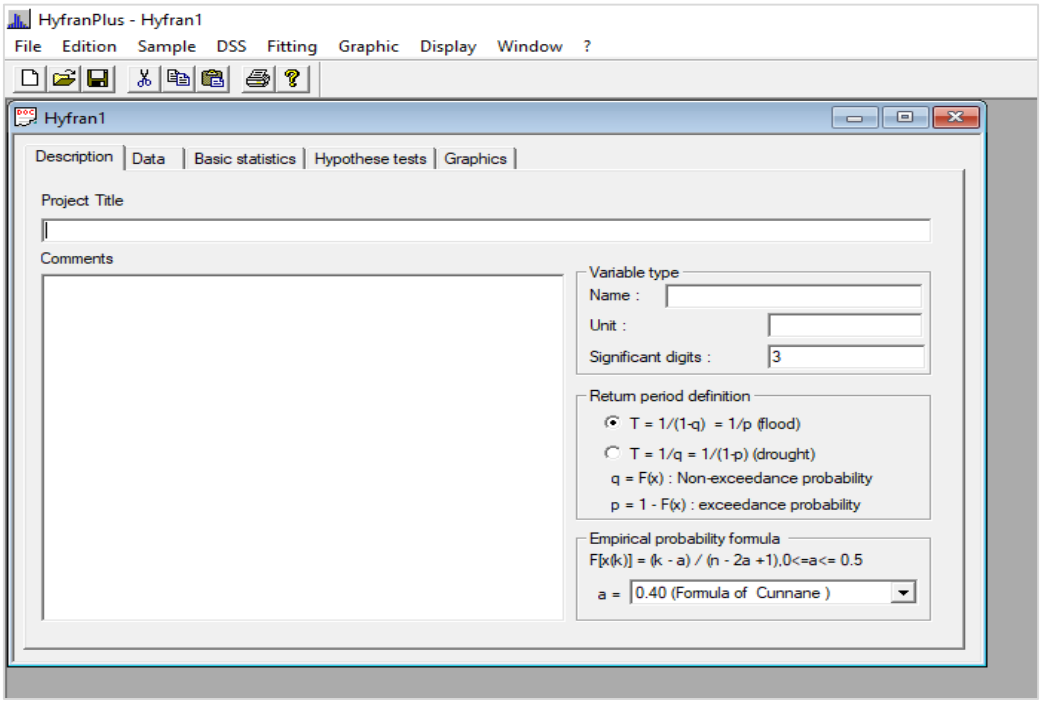


Figure III. 9 : Interface du logiciel HYFRAN.

A. Ajustement de la série à la loi de GUMBEL

La loi de Gumbel est largement employée dans la caractérisation des distributions de valeurs extrêmes. En réalité, la loi double exponentielle 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 nécessaire que cette loi soit en mesure de décrire les séries de maximales annuels.

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

$$\boldsymbol{F(x) = e^{-e^{\frac{x-\beta}{\alpha}}}} \qquad \text{(III. 27)}$$

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

$$\boldsymbol{u = \frac{x-\beta}{\alpha}} \qquad \text{(III. 28)}$$

On obtient :

$$\boldsymbol{F(x) = e^{-e^{u}}} \qquad \text{(III. 29)}$$

Où α et β sont les paramètres de la loi. Le paramètre α est un paramètre caractéristique de la dispersion. On démontre que β est le mode (la valeur la plus probable).

Les paramètres de la loi de Gumbel peuvent être estimés à l'aide de la méthode des moments.

Tel que :

$$\boldsymbol{\alpha = 0.78\bar{x}} \qquad \text{(III. 30)}$$

$$\boldsymbol{\beta = \bar{x} - 0.45\sigma} \qquad \text{(III. 31)}$$

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 :

$$\boldsymbol{u = -log(-log F(x))} \qquad \text{(III. 32)}$$

Le logiciel HYFRAN a été utilisé pour ajuster la série à la loi de Gumbel, et les résultats obtenus sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Tableau III. 16 : Résultats d'ajustement à la loi de Gumbel.

Période de retour (ans)	Probabilité de fréquence (q)	Débit max jour (m^3/s)	Ecart type	Intervalle de confiance
1000	0.999	120	32	56.8 - 182
100	0.99	86.5	21.7	43.9 - 129
50	0.98	76.5	18.7	39.9 - 113
20	0.95	63.2	14.6	34.5 - 91.8
10	0.9	52.8	11.6	30.2 - 75.5
5	0.8	42.1	8.57	25.3 - 58.9
2	0.5	25.9	5.09	15.9 - 35.8

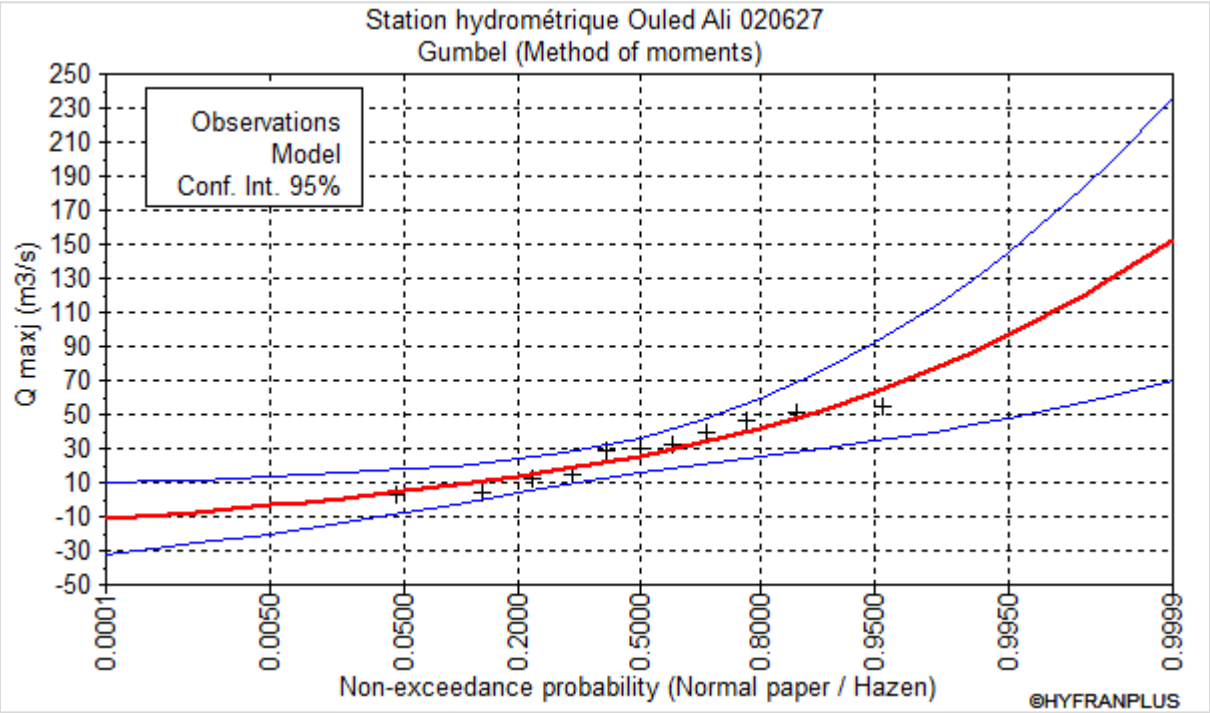


Figure III. 10 : Graphique d'ajustement à la loi de Gumbel.

La comparaison entre les caractéristiques de l'échantillon et la loi de Gumbel est présentée dans le tableau suivant.

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

Paramètres	Caractéristiques de la loi	Caractéristiques de l'échantillon
Minimum	Aucun	2.82
Maximum	Aucun	54.5
Moyenne	28.9	28.9
Standard deviation	18.4	18.4
Mediane	25.9	30
Coefficient de variation (Cv)	0.637	0.637
Coefficient d'asymétrie (Cs)	1.14	-0.0797
Coefficient d'aplatissement (Ck)	2.4	1.41

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

On dit qu'une Variable aléatoire x a une distribution Log Normal lorsque : $y = ln(x)$ est normal. La loi de Galton résulte de la loi normale mais rendue dissymétrique par un changement de variable.

La fonction de répartition de la loi Log Normale est donnée par :

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{u} e^{-\frac{1}{2}u^2}\, du \qquad \text{(III. 33)}$$

Avec :

$$u = \frac{ln\, x - \overline{ln\, x}}{\sigma_{ln\, x}} \qquad \text{(III. 34)}$$

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 III. 18 : Résultats d'ajustement à la loi de Log Normale.

Période de retour (ans)	Probabilité de fréquence (q)	Débit max jour (m^3/s)	Ecart type	Intervalle de confiance
1000	0.999	87.8	28.4	N/D
100	0.99	72.7	17.2	N/D
50	0.98	67.4	14	39.9 - 94.9
20	0.95	59.5	10.2	39.6 - 79.5
10	0.9	52.6	7.76	37.4 - 67.8
5	0.8	44.3	6.17	32.2 - 56.4
2	0.5	28.6	6.02	16.8 - 40.4

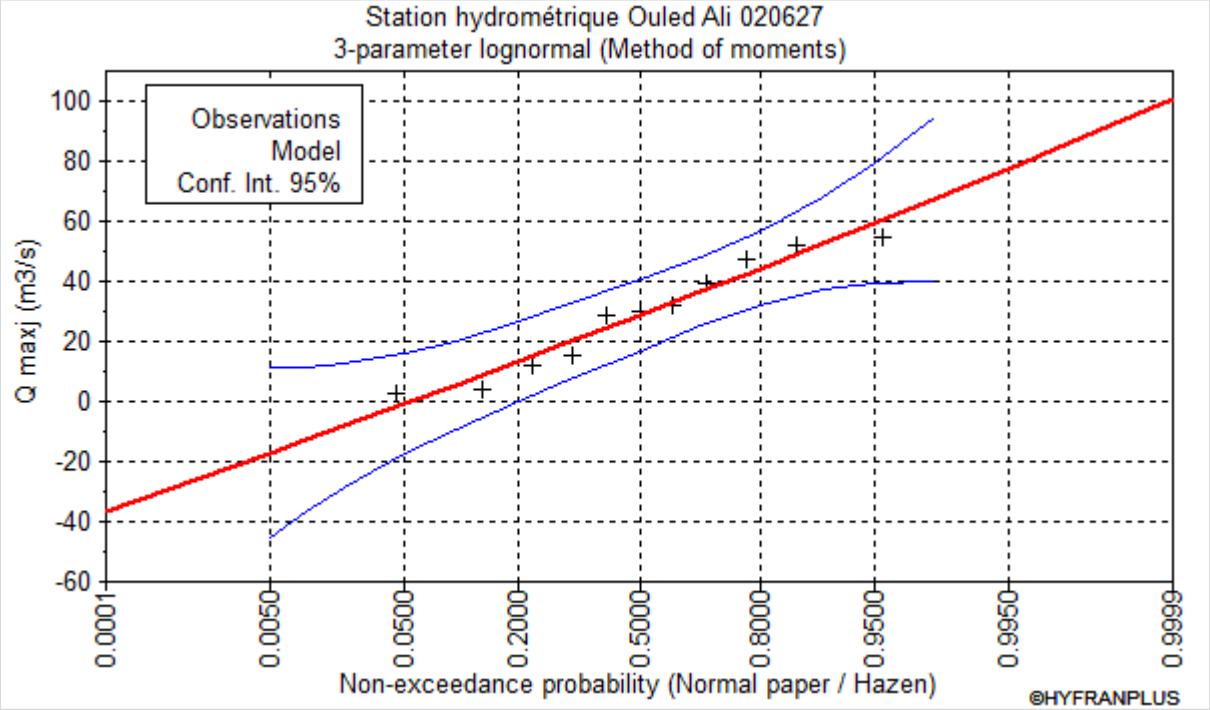


Figure III. 11 : Graphique d'ajustement à la loi de Log Normale.

La comparaison entre les caractéristiques est présentée dans le tableau suivant.

Tableau III. 19 : Comparaison des caractéristiques de la loi de Log Normale et de l'échantillon.

Paramètres	Caractéristiques de la loi	Caractéristiques de l'échantillon
Minimum	-663	2.82
Maximum	Aucun	54.5
Moyenne	28.9	28.9
Standard deviation	18.4	18.4
Mediane	28.6	30
Coefficient de variation (Cv)	0.637	0.637
Coefficient d'asymétrie (Cs)	0.0797	-0.0797
Coefficient d'aplatissement (Ck)	3.01	1.41

C. Choix de la loi d'ajustement

Il existe souvent des écarts entre les fréquences expérimentales des valeurs observées et les fréquences calculées à partir d'une fonction de répartition quelconque. L'ajustement graphique constitue la première étape, mais il n'est pas suffisant pour faire un choix définitif de la loi théorique. Le test statistique d'adéquation permet de comparer plusieurs lois afin de sélectionner le meilleur ajustement possible. Les tests les plus couramment utilisés sont le test du $\chi 2$ (chi-carré) et le test de Kolmogorov-Smirnov.

- **Ajustement graphique visuelle**

Les figures 10 et 11 représentent les graphiques des résultats obtenus, illustrant les probabilités empiriques et théoriques des distributions Gumbel et log-normale à l'aide du logiciel Hyfran. Visuellement, il n'est pas possible de déterminer quel ajustement est le plus adéquat, c'est pour ça une analyse statistique est nécessaire.

- **Le test d'adéquation de χ^2**

Le but d'un test d'adéquation (ou test d'ajustement) est de vérifier si le modèle choisi est cohérent avec les données. Plus précisément, il s'agit de construire une procédure de test pour vérifier si l'hypothèse selon laquelle les observations proviennent d'une loi spécifique est valide. Le test le plus couramment utilisé est le test du χ2 (chi-carré).

Effectivement, pour prendre une décision concernant le choix de la loi, nous allons comparer les variables $\chi^2_{\text{calculée}}$ et $\chi^2_{\text{théorique}}$ (tabulé) à un niveau de risque de 5%, c'est-à-dire un seuil de signification de 95%. Cette comparaison nous permettra de déterminer si les différences observées entre les fréquences empiriques et théoriques sont statistiquement significatives. Si la valeur χ^2 calculée est supérieure à la valeur χ^2 théorique, cela suggère un écart significatif entre les données observées et la distribution théorique envisagée.
$\chi^2_{\text{théorique}}$ (tabulé) est tiré de la table de χ^2 en fonction de ɣ et α

Le test de Khi carré (χ^2) est utilisé pour un seuil de signification α imposé en général à 5%, et un degré de liberté ɣ (Touaibia, 2015).

- Si $\chi^2_{\text{calculée}} > \chi^2_{\text{théorique}}$ (tabulé) : On refuse la loi d'ajustement
- Si $\chi^2_{\text{calculée}} > \chi^2_{\text{théorique}}$ (tabulé) : La loi d'ajustement sera retenue

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

Tableau III. 20 : Résultats du test de χ2.

Loi de distribution	Degré de liberté ɣ	Nombre de classe	χ2 calculée	$\chi2_{\text{théorique}}$ (tabulé)
Gumbel	2	5	1.27	5.99
Log Normale	2	5	2.18	5.99

D'après le test de χ^2 les deux lois d'ajustements sont justes et fiables, on choisir 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

La méthode du GRADEX est une approche hydro-pluviométrique probabiliste utilisée pour le calcul des débits de crues extrêmes d'une rivière sur des périodes de retour allant de 100 à 10 000 ans. Cette méthode a été développée par l'EDF (Guillot et Duband, 1967) dans le but de garantir la sécurité des grands barrages. Elle est largement utilisée dans différentes régions du monde pour estimer les débits associés à des fréquences rares et exceptionnelles. La méthode du GRADEX se base sur l'utilisation de données pluviométriques pour extrapoler la distribution de fréquence des débits. Son succès est en partie dû à sa mise en œuvre relativement simple, qui résulte de la simplification du processus de transformation de la pluie en débit.

III.2.3.2 Principe de la méthode

La méthode du GRADEX repose sur le principe selon lequel lorsque le débit dépasse une certaine valeur, le sol est saturé. Cette valeur, appelée débit seuil ou point pivot, peut varier en fonction des sols et des caractéristiques du bassin versant. Ainsi, pendant la durée de base de ruissellement D (également appelée durée caractéristique), chaque augmentation de précipitations entraîne la même augmentation de débit.

Cette méthode se base sur les observations climatologiques historiques pour déduire 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. La valeur moyenne de la capacité de rétention du bassin tend à devenir constante pour les crues avec une période de retour décennale.

La méthode du GRADEX fournit un support de calcul cohérent 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 proportionnel 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 fondamental dans cette méthode.

III.2.3.3 Hypothèses de la méthode

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

- **Hypothèse N° 1 :** La fonction de répartition des précipitations tombant sur le bassin est asymptotiquement, décrite par une loi de Gumbel ou par une loi exponentielle selon le type d'échantillonnage utilisé. Le Gradex correspond à la pente de la fonction de répartition sur un graphique représentant la pluie en fonction du logarithme de la période de retour.
- **Hypothèse N° 2 :** Le déficit d'écoulement, défini comme la différence entre le volume d'eau précipité et le volume d'eau écoulé à l'exutoire du bassin versant pendant un pas de temps équivalent, n'augmentent plus, en valeur moyenne, au-delà d'une certaine valeur de pluie. En d'autres termes, nous pouvons dire que, à partir d'un certain état de saturation du bassin versant, la distribution du déficit d'écoulement ne dépend plus de la valeur de pluie ou de débit. Cette hypothèse se traduit graphiquement par un parallélisme entre la fonction de répartition des précipitations et celle des écoulements au pas de temps n'équivalent point de départ de cette extrapolation, nommé point pivot, est fixé à une période de retour T_P comprise, le plus souvent, entre 10 et 50 ans selon le bassin versant considéré.
- **Hypothèse N° 3 :** Quelle que soit sa fréquence ou durée de retour, le débit de pointe de crue (valeur maximale observée) peut être calculé à partir du volume écoulé (sur le pas de temps considéré) en utilisant un coefficient de multiplication moyen caractéristique du bassin versant. Ce coefficient, nommé coefficient de forme ou coefficient d'affinité, peut être estimé à partir des hydrogrammes de crues enregistrées sur le bassin versant.

III.2.3.4 Etapes de la méthode

Les étapes à suivre pour mettre en œuvre cette approche sont énumérées ci-dessous :

- 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.
- Déterminer le gradex **'a'** à partir de l'ajustement des précipitations maximales journalières (Pjmax) à la loi de Gumbel

$$\boldsymbol{Pj,max\ (mm)\ =\ a.\mu\ +\ b} \qquad \text{(III. 35)}$$

  Avec μ : représentant la variable réduite de Gumbel (μ= -ln (-ln (F)))).
- Déterminer le débit décennal via l'ajustement des débits à la loi de Gumbel.
- Convertir le débit décennal (m3/s) en lame d'eau (mm) en utilisant l'équation de transformation suivante :

$$\boldsymbol{R(mm) = \frac{Q(m^3/s) * 3.6 * n(heures)}{S(Km^2)}} \qquad \text{(III. 36)}$$

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

$$Q_{\mu\%} = \alpha\mu + b' \quad \text{(III. 37)}$$

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

$$\mu = -ln\,(-ln\,(F)) \;\; et \;\; F = \frac{1}{1-T} \quad \text{(III. 38)}$$

Pour T=10ans :

$$b' = Q_{10ans\%} - \alpha\mu \quad \text{(III. 39)}$$

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

$$Q(m^3/s) = \frac{Q(mm) * S(Km^2)}{3.6 * n(heures)} \quad \text{(III. 40)}$$

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

$$Q_p(m^3/s) = Q(m^3/s) * P \quad \text{(III. 41)}$$

Avec le coefficient de pointe égal au rapport :

$$P = Q_{max} / Q_{moy} \quad \text{(III. 42)}$$

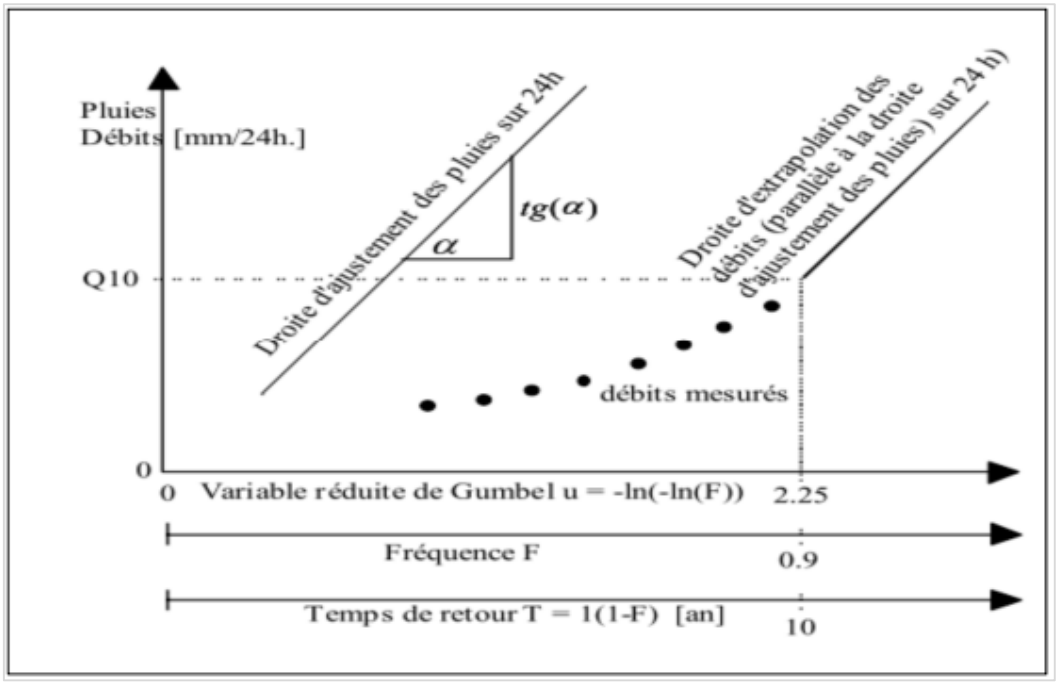


Figure III. 12 : Graphe représente ajustement graphique pour les pluies et droit d'extrapolation pour les débits (Laborde, 2000).

III.2.3.5 Application de la méthode de GRADEX

Nous allons appliquer la méthode du GRADEX à la station pluviométrique de Dar El Beida (390). Cette méthode nous permettra d'estimer les débits de crues extrêmes en se basant sur les données pluviométriques de cette station.

Aussi nous allons appliquer la méthode de GRADEX sur les autres stations pluviométriques, pour tirer le débit maximum afin de comparer entre tous stations.

Tableau III. 21 : Précipitations maximales journalières de la station pluviométrique de Dar El Beida (390).

Année	P_{jmax} (mm)	Année	P_{jmax} (mm)
1975	42	1993	37
1976	61	1994	50.3
1977	48.5	1995	41
1978	93.3	1996	65
1979	55	1997	53
1980	39.3	1998	49
1981	39.7	1999	42
1982	44.3	2000	43
1983	46.9	2001	46
1984	115.2	2002	35
1985	/	2003	42
1986	/	2004	53
1987	/	2005	34
1988	/	2006	60.8
1989	/	2007	66
1990	/	2008	27
1991	/	2009	30
1992	/	2010	53

- Nombres d'heures : n=24h.
- Ajustement par la loi de Gumbel des pluies maximales journalières de la station pluviométrique de Dar El Dar El Beida (390).

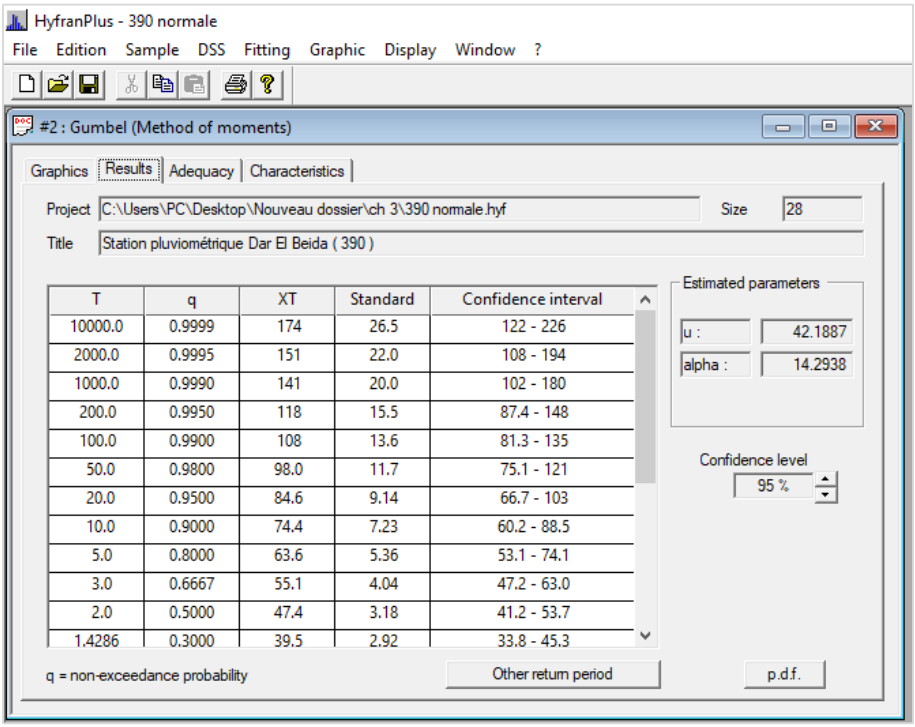


Figure III. 13 : Résultats d'ajustement par la loi de Gumbel des pluies maximales journalières de la station pluviométrique de Dar El Beida (390).

Tableau III. 22 : Résultats d'ajustement par la loi de Gumbel des pluies maximales journalières de la station pluviométrique de Dar El Beida (390).

Période de retour (ans)	Probabilité de fréquence (q)	Précipitation max jour (mm)	Ecart type	Intervalle de confiance
1000	0.999	141	20	102 - 180
100	0.99	108	13.6	81.3 - 135
50	0.98	98	11.7	75.1 - 121
20	0.95	84.6	9.14	66.7 - 103
10	0.9	74.4	7.23	60.2 - 88.5
5	0.8	63.6	5.36	53.1 - 74.1
2	0.5	47.4	3.18	41.2 - 53.7

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

$$\mathbf{P(mm) = 14.29*\mu + 42.189}$$

- Le Gradex **'a' :** a= 14.29
  b= 42.189
- Le débit décennal de la station hydrométrique de Ouled Ali 20627 est :

$$\boldsymbol{Q_{10ans} = 52.8\ m^3/s}$$

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

$$\boldsymbol{R_{10\ ans}(mm) = \frac{Q_{10\ ans}(m^3/s) * 3.6 * n(heures)}{S(Km^2)}}$$

$$\boldsymbol{R_{10\ ans}(mm) = 16.5\ mm/24h}$$

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

$$\boldsymbol{b' = Q_{10ans\%} - \alpha\mu}$$

$$\boldsymbol{\mu = -ln\ (-ln\ (F))}$$

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

Alors $\boldsymbol{b' = 20.65}$

$$\boldsymbol{Q_{\mu\%} = 14.29\mu + 20.65}$$

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

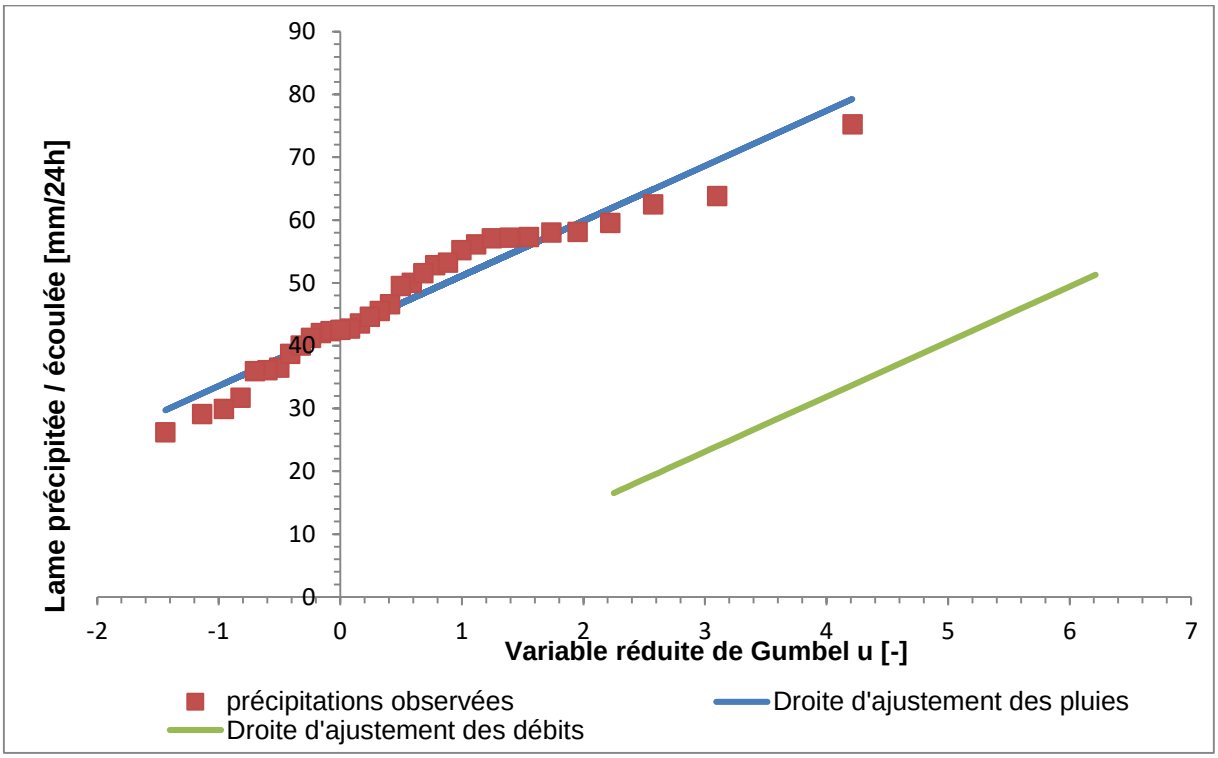


Figure III. 14 : Graphique d'ajustement des pluies et la droite d'extrapolation des débits.

- On calcule les débits de pointe pour les différentes périodes de retour, tel que on a le coefficient de pointe : P = ***3.5*** avec (**P = Q_{max} / Q_{moy}**).

Tableau III. 23 : Résultat de calcul pour la station de Dar El Beida (390) pour les différentes périodes de retour.

Temps de retour	fréquence empirique selon Hazen	variable réduite de Gumbel u	précipitations estimées	débits moyen extrapolés	débits moyen extrapolés 2	débits de pointe extrapolés
[ans]	[-]	[-]	[mm/24h]	[mm/24h]	[m^3/s]	[m^3/s]
10	0.900	2.25	74.4	**16.5**	**53**	185
20	0.950	2.97	84.6	**26.8**	**86**	300
50	0.980	3.90	98.0	**40.1**	**128**	449
100	0.990	4.60	107.9	**50.1**	**160**	560
1000	0.999	6.91	140.9	**83.1**	**265**	928

On applique les mêmes étapes de la méthode de GRADEX sur les autres stations :

- Hamiz barrage 20602
- Pond D9 20629
- ouled Ali 20267

Voilà les résultats de l'application de la méthode de GRADEX sur les autres stations :

Tableau III. 24 : Résultats de calcul par la méthode de GRADEX des débits pour les différentes stations.

Période de retours (ans)	Station hydrométrique Ouled Ali (20627)	GRADEX avec les stations pluviométriques			
		Dar El Beida (390)	Hamiz barrage (20602)	Pond D9 (20629)	ouled Ali (20267)
10	52.8	184.80	184.80	184.80	184.80
20	63.2	299.74	321.60	303.08	255.29
50	76.5	448.52	498.68	456.17	346.54
100	**86.5**	**560.01**	**631.38**	**570.90**	**414.92**
1000	120	928.40	1069.85	949.99	640.86

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 Hamiz Barrage (20602) donne un débit centennal supérieur aux autres stations, donc le débit de projet pour l'aménagement d'oued El Hamiz est de **631.38 m³/s.**

III.2.4 Hydrogramme de crue

L'hydrogramme de crue est une représentation graphique qui représente la variation du débit d'un cours d'eau en fonction du temps pendant la crue.

Dans un hydrogramme de crue on distingue :

- Une partie montante dite courbe de concentration, sa durée est temps de montée.
- Un pic de l'hydrogramme qui est le débit de pointe.
- Une partie décroissante dite courbe dite courbe de décrue, sa durée est temps de décrue.
- Le temps total est appelé temps de base, il est la somme de temps de montée et temps de décrue.

Pour tracer l'hydrogramme de crue on utilise la méthode de SOKOLOVSKY. Cette méthode qui consiste à tracer la courbe à partir de deux équations paraboliques l'une pour la montée de la crue et l'autre pour la décrue.

- Pour la montée :

$$\boldsymbol{Q(t) = Q_{max}\left[\frac{t}{T_c}\right]^n} \qquad \text{(III. 43)}$$

- Pour la décrue :

$$\boldsymbol{Q(t) = Q_{max}\left[\frac{T_b - t}{T_d}\right]^m} \qquad \text{(III. 44)}$$

Avec :

- Q(t) : Débit à l'instant t (m^3/s)
- Q_{max} : Débit maximal de la crue (m^3/s)
- T_m : temps de montée (h) $\boldsymbol{T_m = T_c}$ (III. 45)
- T_d : temps de décrue (h) $\boldsymbol{T_d = \delta \times T_m}$ (III. 46)
- T_b : temps de base (h) $\boldsymbol{T_b = T_m + T_d}$ (III. 47)
- m,n : puissances des paraboles (m=3 ; n=2)

Tableau III. 25 : Valeur du coefficient de forme de l'hydrogramme de crue δ.

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

Tableau III. 26 : Paramètres de calcul de l'hydrogramme de crue.

Paramètre	Unités	Valeur
$\mathbf{T_c}$	Heures	11.83
$\mathbf{T_m}$	Heures	11.83
$\mathbf{T_d}$	Heures	23.67
$\mathbf{T_b}$	Heures	35.50
m	/	3
n	/	2
δ	/	2

Le tableau suivant présente l'hydrogramme de crue pour période de retour 100 ans les différentes stations :

Tableau III. 27 : Résultats de calcul pour l'hydrogramme de crue.

Temps (h)	Période de retour 100 ans				
	Station hydrométrique	Stations pluviométrique			
	Ouled Ali (20627)	Dar El Beida (390)	Hamiz barrage (20602)	Pond D9 (20629)	Ouled Ali (20267)
	Q (m^3/s)	Q (m^3/s)	Q (m^3/s)	Q (m^3/s)	Q (m^3/s)
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.5	0.15	1.00	1.13	1.02	0.74
1	0.62	4.00	4.51	4.08	2.96
1.5	1.39	9.00	10.15	9.18	6.67
2	2.47	16.01	18.05	16.32	11.86
2.5	3.86	25.01	28.20	25.50	18.53
3	5.56	36.01	40.60	36.71	26.68
3.5	7.57	49.02	55.27	49.97	36.32
4	9.89	64.02	72.18	65.27	47.44
4.5	12.52	81.03	91.36	82.61	60.04
5	15.45	100.04	112.79	101.98	74.12
5.5	18.70	121.05	136.47	123.40	89.69
6	22.25	144.06	162.41	146.86	106.73
6.5	26.11	169.06	190.61	172.35	125.26
7	30.29	196.08	221.06	199.89	145.28
7.5	34.77	225.09	253.77	229.46	166.77
8	39.56	256.10	288.74	261.08	189.75
8.5	44.66	289.11	325.96	294.73	214.21
9	50.06	324.12	365.43	330.43	240.15
9.5	55.78	361.14	407.16	368.16	267.57
10	61.81	400.15	451.15	407.93	296.48
10.5	68.14	441.17	497.39	449.75	326.87
11	74.79	484.19	545.89	493.60	358.74
11.5	81.74	529.20	596.65	539.49	392.10
11.83	**86.55**	**560.32**	**631.73**	**571.22**	**415.15**
12	84.65	548.03	617.87	558.69	406.04
12.5	79.36	513.79	579.27	523.78	380.67
13	74.30	481.00	542.30	490.36	356.38
13.5	69.45	449.64	506.95	458.39	333.15
14	64.82	419.68	473.16	427.84	310.95
14.5	60.41	391.07	440.91	398.68	289.75
15	56.19	363.80	410.16	370.87	269.55
15.5	52.18	337.82	380.88	344.39	250.30
16	48.36	313.12	353.02	319.20	231.99
16.5	44.74	289.64	326.56	295.27	214.60
17	41.30	267.37	301.45	272.57	198.10
17.5	38.04	246.27	277.66	251.06	182.47

18	34.96	226.32	255.16	230.72	167.68
18.5	32.05	207.47	233.91	211.50	153.72
19	29.30	189.69	213.87	193.38	140.55
19.5	26.72	172.97	195.01	176.33	128.15
20	24.29	157.25	177.29	160.31	116.51
20.5	22.01	142.52	160.68	145.29	105.60
21	19.88	128.74	145.14	131.24	95.38
21.5	17.90	115.87	130.64	118.13	85.85
22	16.05	103.90	117.14	105.92	76.98
22.5	14.33	92.77	104.60	94.58	68.74
23	12.74	82.48	92.99	84.08	61.11
23.5	11.27	72.97	82.27	74.39	54.06
24	9.92	64.22	72.41	65.47	47.58
24.5	8.68	56.21	63.37	57.30	41.64
25	7.55	48.88	55.11	49.83	36.22
25.5	6.52	42.23	47.61	43.05	31.29
26	5.59	36.21	40.82	36.91	26.83
26.5	4.75	30.78	34.71	31.38	22.81
27	4.01	25.93	29.24	26.44	19.21
27.5	3.34	21.62	24.38	22.04	16.02
28	2.75	17.81	20.09	18.16	13.20
28.5	2.24	14.48	16.33	14.77	10.73
29	1.79	11.60	13.07	11.82	8.59
29.5	1.41	9.12	10.28	9.30	6.76
30	1.09	7.03	7.92	7.16	5.21
30.5	0.82	5.28	5.95	5.38	3.91
31	0.59	3.85	4.34	3.92	2.85
31.5	0.42	2.70	3.05	2.76	2.00
32	0.28	1.81	2.04	1.85	1.34
32.5	0.18	1.14	1.29	1.16	0.84
33	0.10	0.66	0.74	0.67	0.49
33.5	0.05	0.34	0.38	0.34	0.25
34	0.02	0.14	0.16	0.15	0.11
34.5	0.01	0.04	0.05	0.04	0.03
35	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00
35.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

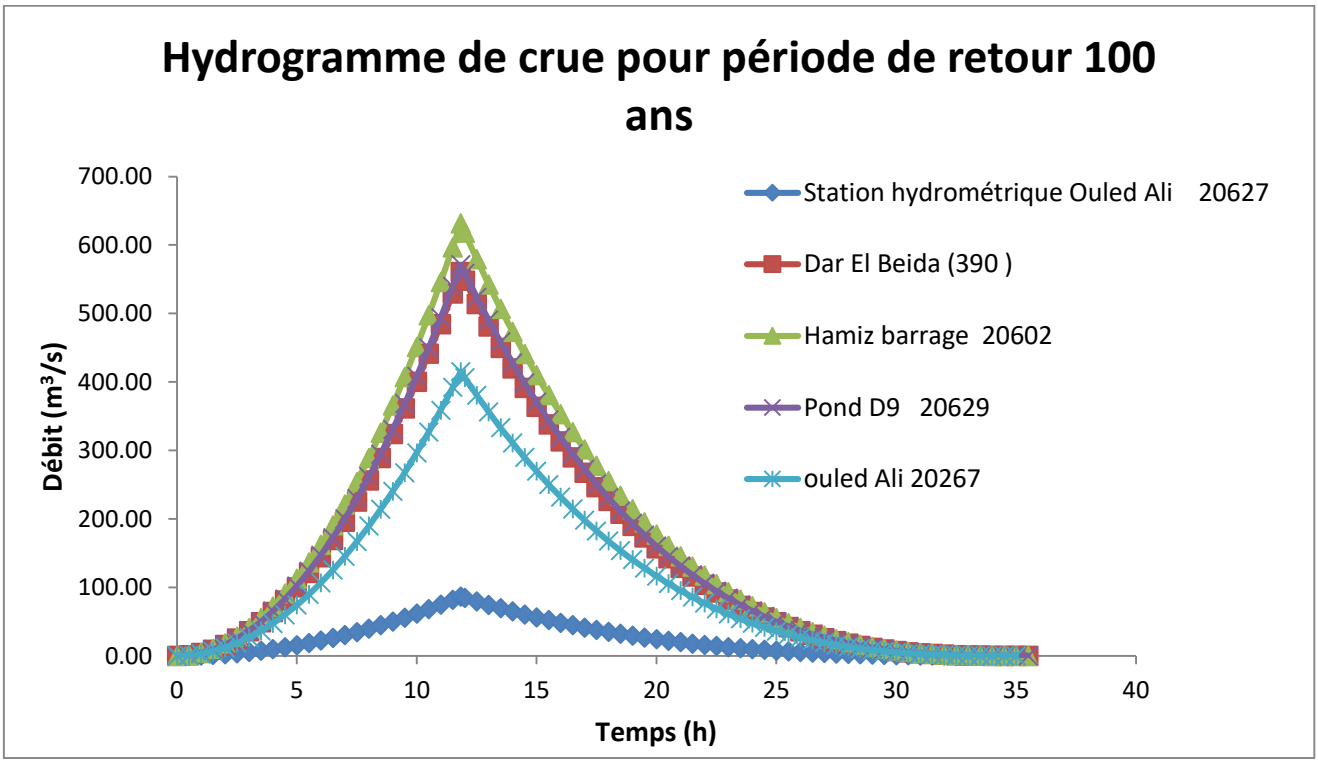


Figure III. 15 : Hydrogramme de crue pour période de retour 100 ans pour les différentes stations.

III.2.5 Choix de la crue du projet

La crue de projet est la crue maximale que l'ouvrage doit être capable d'évacuer et supporter.

Le choix de la crue de ce projet protection des communes de Bordj El Kiffan et Bordj El Bahri contre les inondations d'oued El Hamiz dépend :

- De l'importance de l'ouvrage a réalisé.
- Des conséquences qui peuvent se produire à l'aval de projet.
- Des considérations technico-économiques liées à l'aménagement et à l'environnement.

Dans notre cas il s'agit d'un aménagement du cours d'eau oued El Hamiz, pour cet aménagement on opte pour une période de retour de 100 ans, le débit de projet centennal **631.38 m³/s**, donnée par la station pluviométrique de Hamiz Barrage (20602).

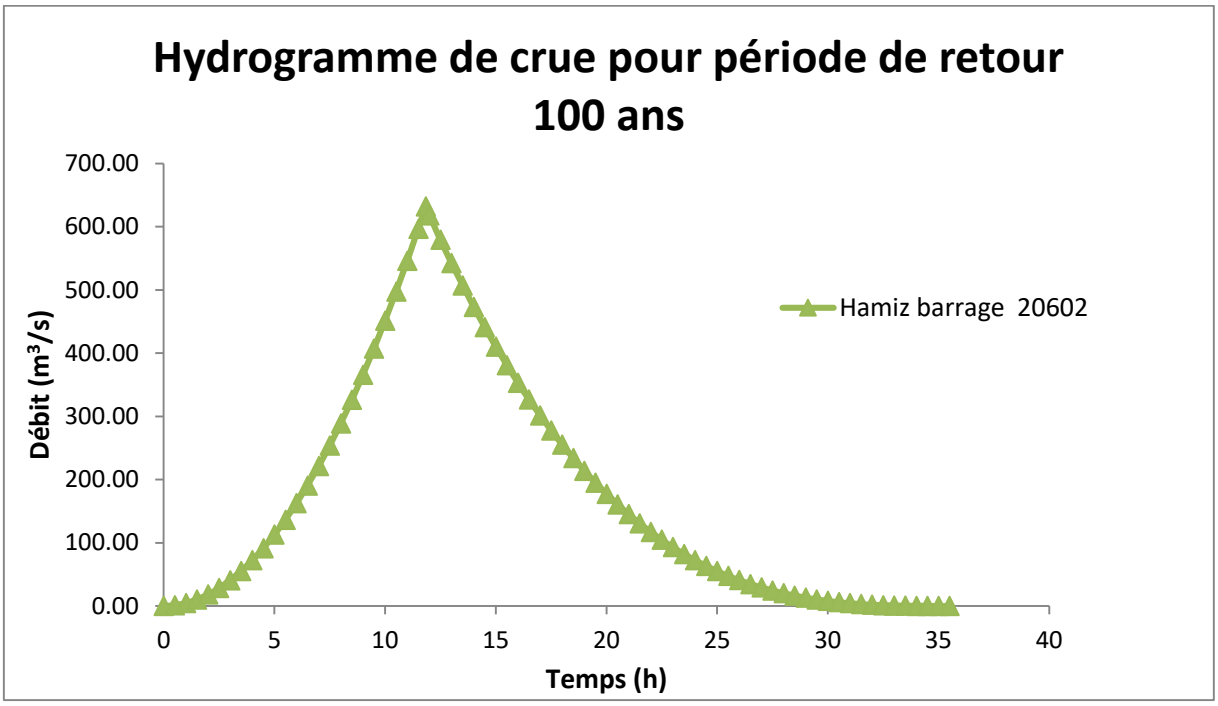


Figure III. 16 : Hydrogramme de crue du projet pour la station pluviométrique Hamiz Barrage (20602).

Conclusion

Ce chapitre a pour but de déterminer les paramètres hydrologiques nécessaires à l'aménagement d'oued El Hamiz pour protéger les villes de Bordj El Kiffan et Bordj El Bahri contre les crues centennales.

Pour cette étude hydrologique, nous avons utilisées les données fournis par la station hydrométrique et les stations pluviométriques qui sont réparties sur le bassin versant d'oued El Hamiz, et nous avons appliqué la méthode de GRADEX pour déterminer le débit centennal de la crue. A la fin nous avons opté le débit de projet qui est : $\mathrm{Q} = 631.38\ \mathrm{m}^3/s$.

Chapitre IV
Etude Hydraulique

Introduction

Dans le cadre de la protection des communes de Bordj El Kiffan et Bordj El Bahri contre les risques des inondations d'oued El Hamiz, et après la détermination du débit de projet il est nécessaire de passer par l'étude hydraulique pour la bonne détermination des dimensions de l'aménagement de l'oued El Hamiz.
Dans ce chapitre étude hydraulique nous allons bien comprendre les principes fondamentaux de l'hydraulique et connaître les notions hydrauliques, les lois et les équations utilisées pour le calcul des caractéristiques hydrauliques et géométriques de l'aménagement. Ce chapitre nous permet d'évaluer les risques d'inondations dans la zone d'étude, et aussi il nous permet de concevoir et de dimensionner des mesures de protection appropriées pour réduire les risques d'inondation.

IV.1 Notions hydrauliques

Les notions hydrauliques présentées au-dessous sont essentielles pour comprendre les cours d'eau naturels et artificiels, et permet au calcul et simulation pour savoir les caractéristiques d'écoulement. Ces notions se divisent en deux : paramètres hydrauliques et paramètres géométriques.

IV.1.1 Paramètres hydrauliques

Les paramètres hydrauliques sont des variables ou des caractéristiques qui décrivent l'écoulement de l'eau dans un système hydraulique. Ils sont utilisés pour analyser et évaluer les performances hydrauliques d'un système. Voici quelques paramètres hydrauliques couramment utilisés :

- **Débit (Q) :** Le débit est la quantité d'eau qui s'écoule à travers le canal par unité de temps. Il est un paramètre fondamental pour comprendre la quantité d'eau qui traverse un système hydraulique. Il est généralement exprimé 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 est la vitesse à laquelle l'eau se déplace dans le système. Elle peut varier en fonction de la géométrie du canal, de la pente, de la rugosité de la surface, etc. La vitesse de l'écoulement est importante pour évaluer les performances hydrauliques et le transport des sédiments. Elle est généralement mesurée en mètres par seconde (m/s).

- **Pente hydraulique (i) :** La pente représente la déclivité du terrain sur laquelle l'eau s'écoule. Elle influence sur la vitesse de l'écoulement et est utilisée pour évaluer les caractéristiques et les performances hydrauliques d'un système. Elle est souvent exprimée en pourcentage.

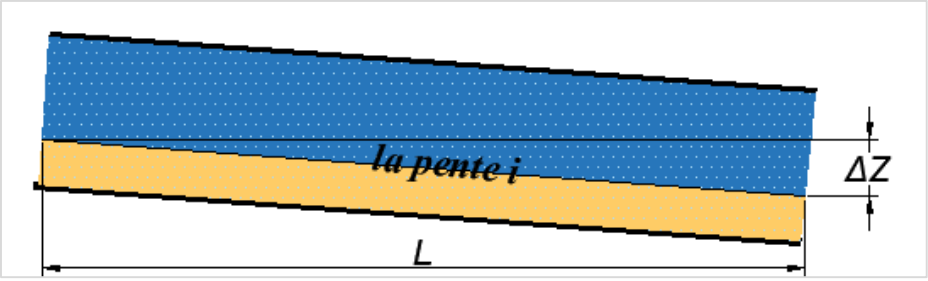


Figure IV. 1 : Schéma représente la pente.

On calcule la pente par la relation suivante :

$$I = \frac{\Delta Z}{L} \qquad \text{(IV. 1)}$$

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 est un paramètre qui caractérise la rugosité de la surface d'écoulement ou du lit du cours d'eau. Le coefficient de Manning est généralement déterminé expérimentalement pour différents types de surfaces, comme le béton, l'herbe, les graviers, etc. Il est souvent noté "n" et est sans unité.

Tableau IV. 1 : Valeurs du coefficient de rugosité 'n'. (Chen et Cotton, 1986).

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

- **Profondeur critique (h_c) :** La profondeur critique correspond à la profondeur d'eau spécifique à un débit donné, à laquelle l'écoulement passe d'un régime subcritique à un régime supercritique ou vice versa.

- **Pression :** La pression est la force exercée par l'eau sur une surface donnée. Elle est généralement mesurée en Pascal (Pa) ou en bar, La pression à la surface libre d'un canal est donc approximativement égale à la pression atmosphérique égale à 1 bar.

- **Poids volumique γ_w :** Le poids volumique de l'eau est noté :

$$\gamma_w = g\rho_w \qquad \text{(IV. 2)}$$

  - 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 se réfèrent aux propriétés physiques et dimensionnelles d'un système hydraulique, tels que les canaux, les rivières, les réservoirs et les conduites. Ils décrivent la forme, la taille et la configuration géométrique du système. Voici les paramètres géométriques :

- **Largeur au miroir (B) :** C'est la distance horizontale entre les parois du canal mesurée à la surface de l'eau, elle exprimé en mètres.

- **Profondeur de l'eau (y) :** C'est la distance verticale entre la surface libre de l'eau et le fond du canal. Elle est mesurée à partir de la surface de l'eau jusqu'au fond du canal, elle exprimé en mètres.

- **Surface mouillée transversale (S) :** C'est l'aire de la section transversale du canal occupée par l'eau.

- **Périmètre mouillé (P) :** C'est la longueur du contour de la section transversale du canal en contact avec l'eau.

- **Rayon hydraulique (R) :** Le rayon hydraulique est calculé en divisant la surface mouillée transversale (S) par le périmètre mouillé (P). Le rayon hydraulique est souvent utilisé pour caractériser l'efficacité hydraulique d'une section transversale de canal. Il est exprimé en mètres.

$$\boldsymbol{R = \frac{S}{P}} \qquad \text{(IV. 3)}$$

- **Pente longitudinale (i) :** la pente longitudinale représente la pente du fond du canal dans la direction de l'écoulement.

- **Largeur au fond (b) :** c'est la distance horizontale entre les deux parois ou les bords inférieurs d'un canal.

IV.2 Cours d'eau

Dans les oueds et les rivières, l'eau s'écoule librement en surface, généralement à ciel ouvert, il est influencé par nombreux facteurs tels que la pente, la géométrie du canal et la rugosité de profil hydraulique. Selon le type d'aménagement, on distingue deux types de cours d'eau :

IV.2.1 Cours d'eau naturels

Les cours d'eau naturels sont des voies d'eau formées naturellement, généralement par l'érosion ou par des cours d'eau existants tels que les rivières, les fleuves ou les lacs. Ces cours d'eau sont créés par les forces naturelles et sont souvent présents depuis longtemps.

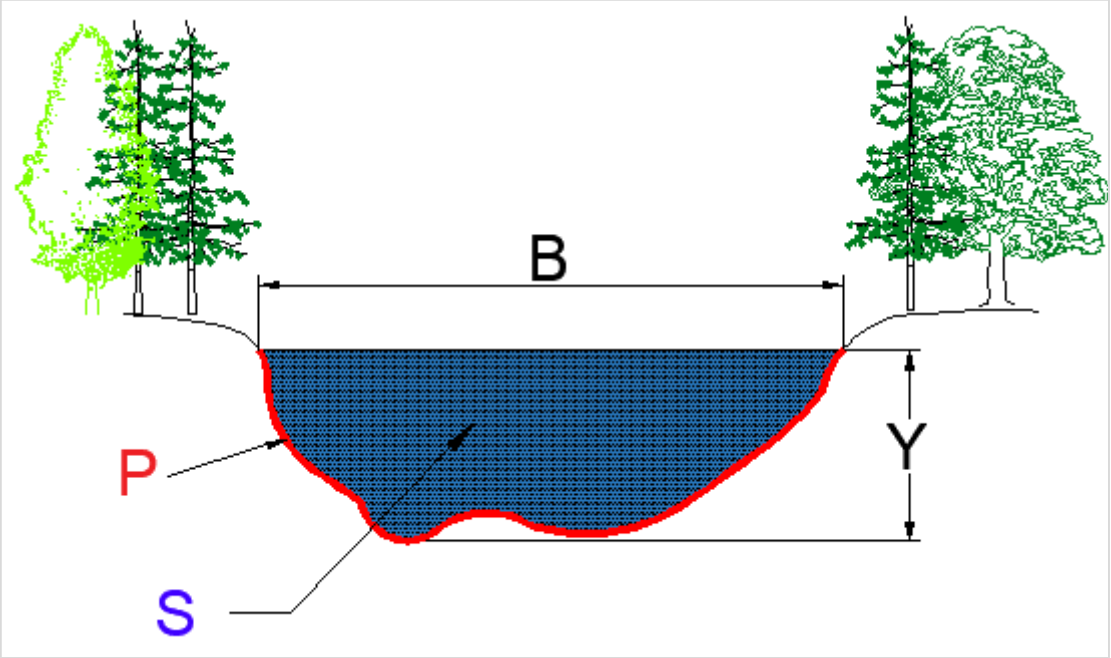


Figure IV. 2 : Canal naturel.

IV.2.2 Cours d'eau artificiels

Les cours d'eau artificiels sont des cours d'eau aménagés par l'homme dans le but spécifique de véhiculer de l'eau vers un exutoire. Selon la forme géométrique de la section transversale, on distingue plusieurs types d'aménagements : trapézoïdale, rectangulaire…

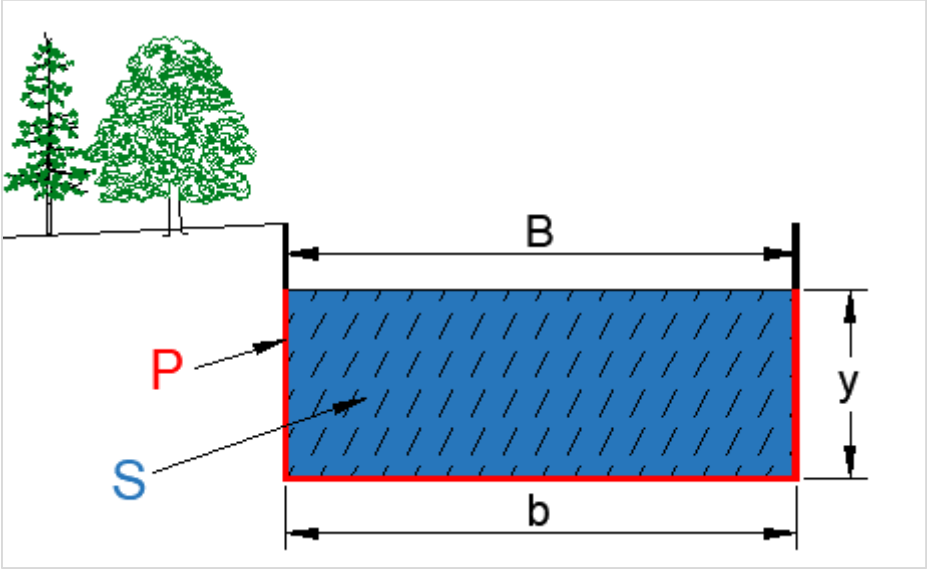


Figure IV. 3 : Canal artificiel d'une forme rectangulaire.

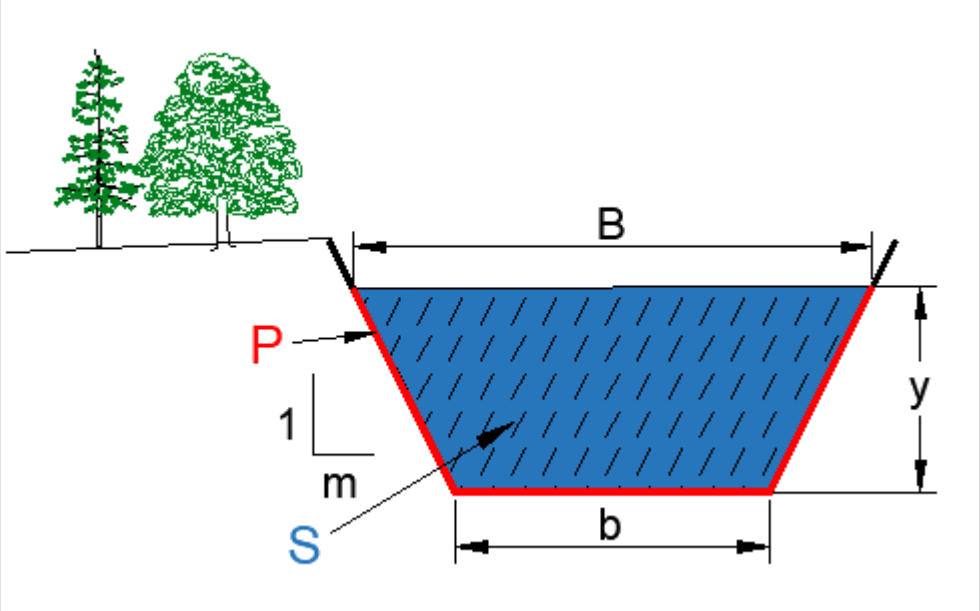


Figure IV. 4 : Canal artificiel d'une forme trapézoïdal.

Selon le matériau de construction, il existe plusieurs types d'aménagement :

- **Aménagements en matériaux minéraux**

  Enrochement : c'est une technique d'ingénierie et de construction utilisée pour stabiliser ou protéger les rives d'un cours d'eau, en utilisant des roches, des pierres ou des blocs de béton.



Figure IV. 5 : Canal en enrochement (Source : Google).

Gabions : c'est une technique similaire à l'enrochement. Les gabions sont des conteneurs rectangulaires, généralement fabriqués à partir de treillis métalliques ou de grillage, remplis de pierres.



Figure IV. 6 : Canal en gabion (Source : Google).

- **Aménagements en béton ou en métal**

  Béton : L'aménagement d'un cours d'eau en béton est une méthode de génie civil qui implique la construction de structures en béton le long des berges ou du lit d'un cours d'eau dans le but de le canaliser, ou de le protéger contre l'érosion et les inondations. Le béton est un matériau de construction composé d'un mélange de granulats, de sable, et d'eau.



Figure IV. 7: Canal en Béton (photo prise au barrage de Ghrib).

  Palplanches : Panneaux métalliques enfoncés dans le sol pour créer une barrière contre l'érosion le long des berges.

- **Aménagements en végétalisation**

  L'aménagement d'un cours d'eau en végétalisation est de génie biologique qui consiste à utiliser des plantes et des techniques de végétalisation pour stabiliser les berges et améliorer la qualité de l'eau le long du cours d'eau.



Figure IV. 8 : Canal en blocs végétalisable (oued El Harrache).

- **Aménagements en matériaux synthétiques**

  Géotextiles : Les géotextiles sont des matériaux synthétiques spécialement conçus pour être utilisés dans des applications géotechniques. Ils peuvent être utilisés pour stabiliser les sols, renforcer les talus.

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



Figure IV. 9 : Canal en géomembrane.

- **Aménagements en combinant plusieurs matériaux**

  L'aménagement d'un cours d'eau en utilisant des aménagements combinant plusieurs matériaux fait référence à une approche de génie civil qui intègre différents types de matériaux, tels que des roches, des matériaux synthétiques, du béton, des géotextiles, des végétaux, etc., pour atteindre des objectifs spécifiques le long du cours d'eau. Cette approche permet de combiner les avantages de chaque matériau pour créer des solutions d'aménagement plus efficaces et durables.



Figure IV. 10: Canal mixte en enrochement et béton (M'sila).

IV.3 Mode d'écoulement dans les Oueds

L'écoulement dans les cours d'eau naturels et artificiels est un écoulement à surface libre.

L'écoulement à surface libre, qui est la caractéristique des cours d'eau tels que les rivières et les oueds, est principalement influencé par la pente du fond du canal ou du lit du cours d'eau. Cet écoulement se produit lorsque l'eau s'écoule librement à l'air libre, sans être confinée par des parois rigides comme dans le cas des conduites en charge.

Le mouvement de l'eau dans un écoulement à surface libre est principalement dû à la force de la gravité. Lorsque l'eau s'écoule en aval le long d'une pente, la force de gravité agit sur l'eau pour la faire descendre. La pente est essentielle car elle crée une différence de hauteur entre deux points du cours d'eau, ce qui entraîne un écoulement du point le plus élevé vers le point le plus bas.

La vitesse de l'écoulement dans un écoulement à surface libre dépend également de la pente du canal. Plus la pente est grande, plus l'eau s'écoulera rapidement. En revanche, si la pente est faible, l'écoulement sera plus lent.

IV.3.1 Modes d'écoulement

En hydraulique fluviale, on rencontre plusieurs régimes d'écoulements à surface libre. Voici dans la figure suivante les types des écoulements les plus courants :

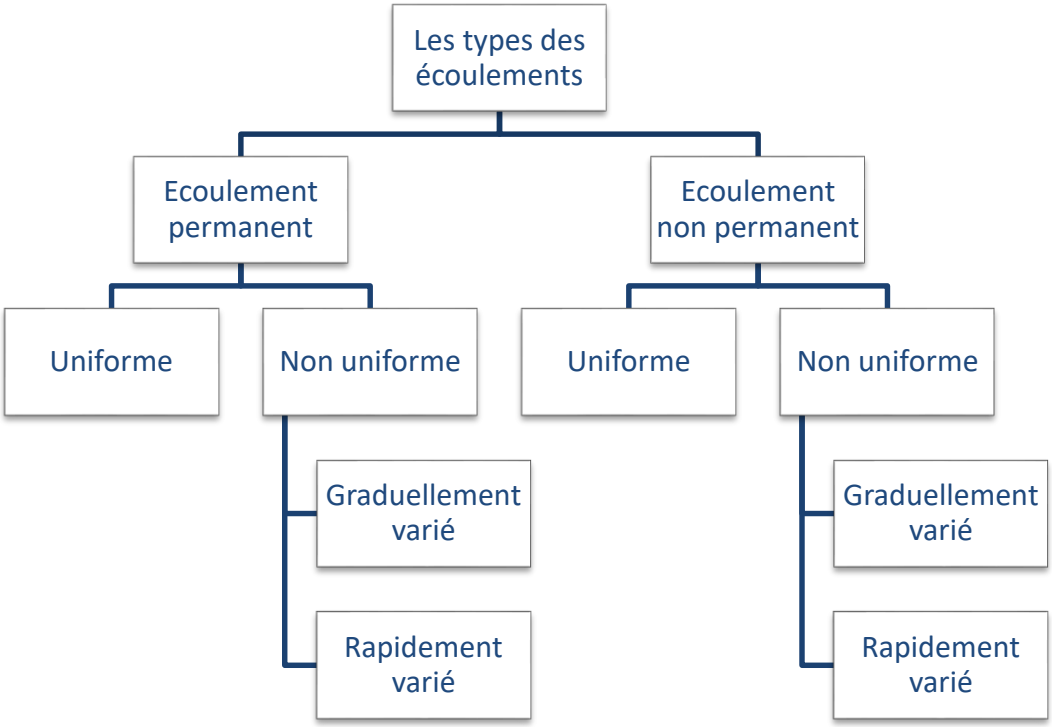


Figure IV. 11 : Modes des écoulements.

Les écoulements peuvent présenter une variabilité dans leurs caractéristiques hydrauliques, telles que le tirant d'eau et la vitesse, qui peut varier dans le temps et dans l'espace.

A. Variabilité dans le temps

- **Ecoulement permanent**
  Dans un écoulement permanent, les caractéristiques telles que la profondeur, la vitesse et le débit du fluide restent constants dans le temps.

- **Écoulement non permanent :**
  Dans un écoulement permanent, les caractéristiques telles que la profondeur, la vitesse et le débit du fluide varient dans le temps.

B. Variabilité dans l'espace

- **Ecoulement uniforme :**
  Dans un écoulement uniforme, la vitesse et la profondeur du fluide restent constantes le long du cours d'eau.

- **Ecoulement non uniforme :**
  Dans un écoulement non uniforme, la vitesse et la profondeur du fluide varient le long du cours d'eau.
  - Ecoulement non uniforme graduellement varié : la profondeur et la vitesse du fluide, varient progressivement le long d'un canal.
  - Ecoulement non uniforme rapidement varié : la profondeur et la vitesse du fluide, varient rapidement et de manière abrupte le long d'un canal.

IV.3.2 Régime d'écoulement

Le régime d'écoulement à surface libre fait référence à la classification des écoulements qui se produisent dans les canaux à surface libre, où le fluide est en contact direct avec l'air. Les régimes d'écoulement à surface libre sont principalement déterminés par les caractéristiques hydrauliques telles qu'on calcule le nombre de Froude pour bien déterminer le régime d'écoulement.

L'écoulement dans un canal à surface libre est soumis aux forces suivantes :

- Forces d'inertie
- Forces de gravité.
- Forces de frottement (viscosité et rugosité).

Le nombre de Froude est souvent représenté par l'équation :

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{g.h}} \qquad \text{(IV. 4)}$$

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 nombre adimensionnel utilisé dans l'étude hydraulique. Il est souvent utilisé conjointement avec le nombre de Froude pour décrire le régime d'écoulement d'un fluide. Le nombre de Reynolds (Re) est défini comme le rapport entre les forces inertielles et les forces visqueuses dans un écoulement :

$$\boldsymbol{R_e = \frac{VL}{\vartheta}} \qquad \text{(IV. 5)}$$

Où :

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

Lorsque :

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

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

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

Voici ci-dessous les deux exemples sur le changement du régime

Passage d'un régime fluvial vers un régime torrentiel

La ligne d'eau amont est fluviale et le tirant d'eau tend vers l'amont vers le tirant d'eau normal y_n. Dans la partie torrentielle, le tirant d'eau tend vers le tirant d'eau normal vers l'aval.

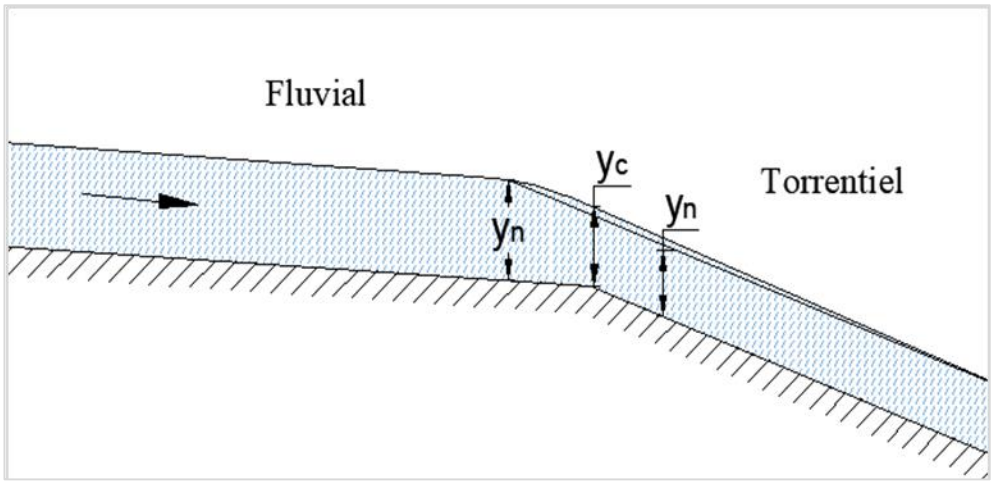


Figure IV. 12 : Passage d'un régime fluvial vers un régime torrentiel.

Passage d'un régime torrentiel vers un régime fluvial

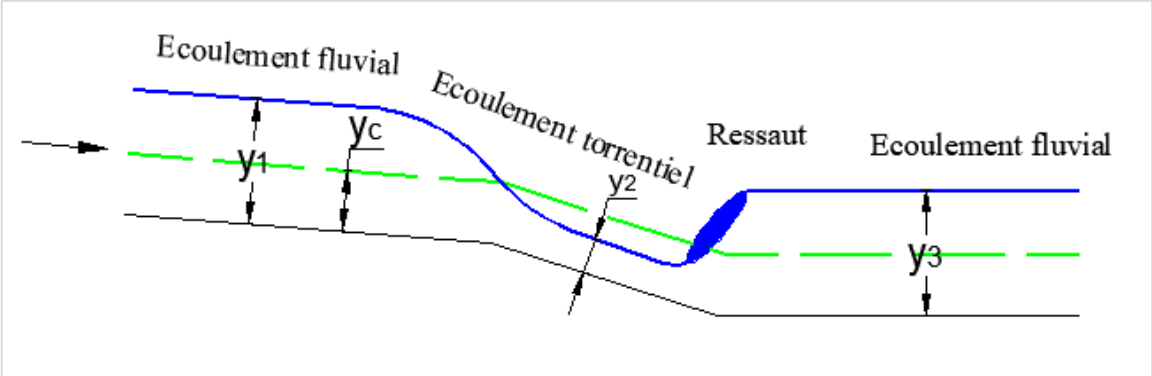


Figure IV. 13 : Passage d'un régime torrentiel vers un régime fluvial.

IV.4 Modélisation d'écoulement

La modélisation d'écoulement permet de comprendre le comportement des cours d'eau en période des crues. Elle consiste à utiliser des outils informatiques et des données hydrologiques pour simuler le comportement du cours d'eau lors des évènements extrêmes de crue.

La modélisation permet d'évaluer les risques des inondations et de les gérer en proposant des aménagements des cours d'eau pour le but de réduire les risques des inondations.

Nous allons modéliser oued El Hamiz en utilisant le logiciel HEC RAS, et pour les données hydrologiques on prend le débit de projet Q_{projet} = 631.38 m^3/s.

IV.4.1 Etapes de la simulation

La simulation avec le logiciel HEC RAS comprend plusieurs étapes pour une modélisation précise.

a. Importation des données géométriques du terrain

Après le lancement de notre projet HEC-RAS et la configuration des unités et des paramètres, on importe la géométrie de l'oued El Hamiz avec ses sections en travers tout le long du cours d'eau.

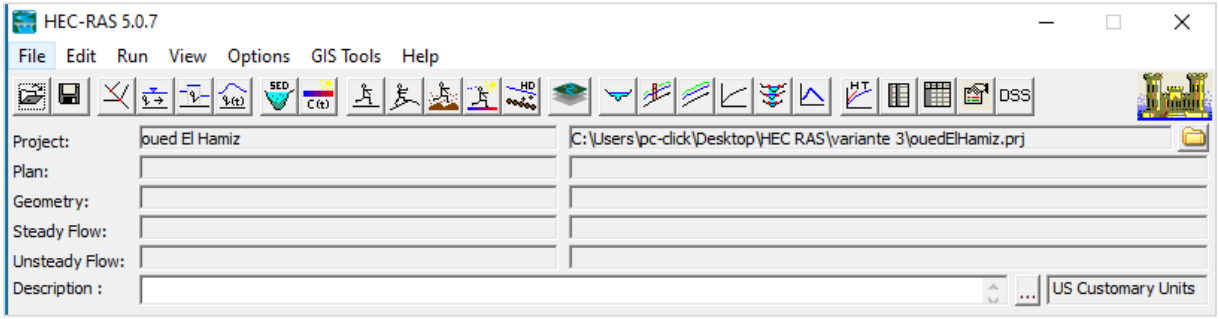


Figure IV. 14 : Interface d'HEC-RAS.

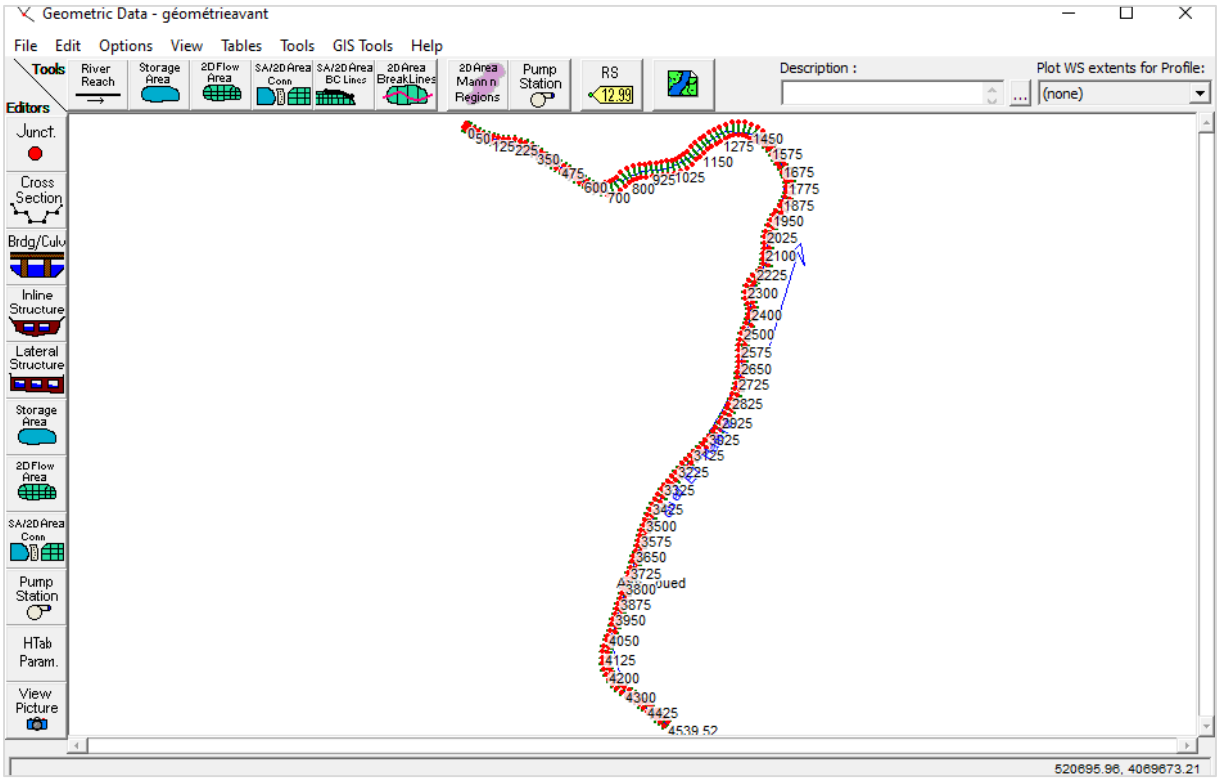
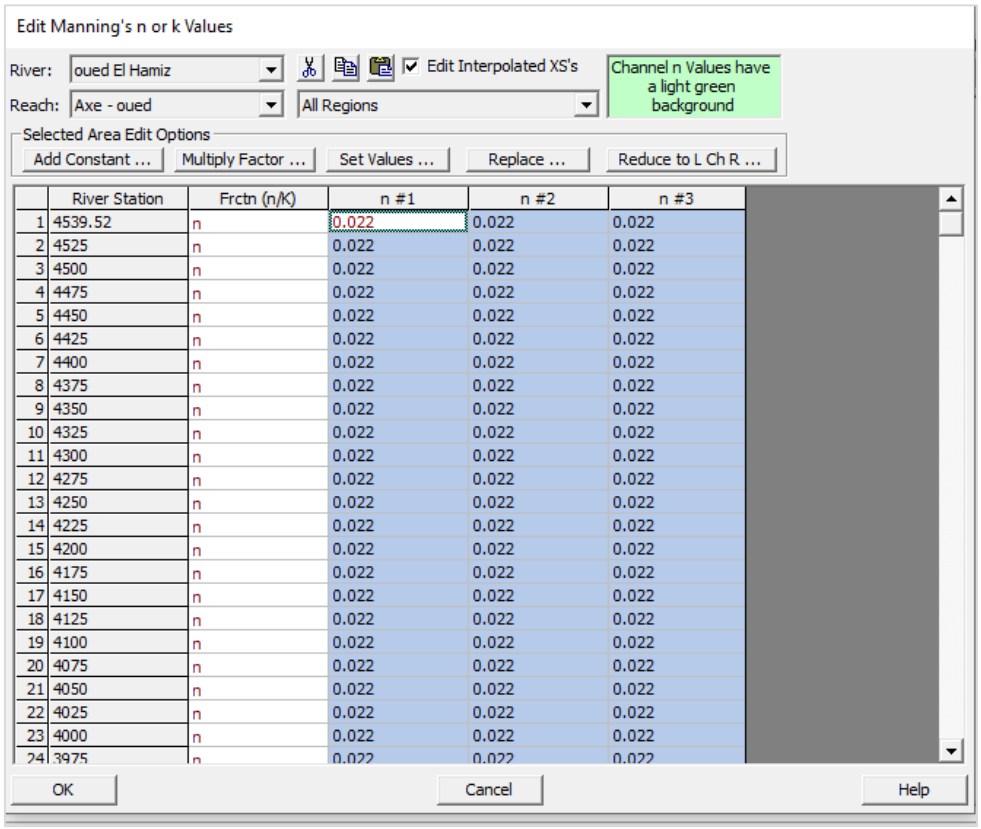


Figure IV. 15 : Importation des données géométriques dans HEC-RAS.



	River Station	Frctn (n/K)	n #1	n #2	n #3
1	4539.52	n	0.022	0.022	0.022
2	4525	n	0.022	0.022	0.022
3	4500	n	0.022	0.022	0.022
4	4475	n	0.022	0.022	0.022
5	4450	n	0.022	0.022	0.022
6	4425	n	0.022	0.022	0.022
7	4400	n	0.022	0.022	0.022
8	4375	n	0.022	0.022	0.022
9	4350	n	0.022	0.022	0.022
10	4325	n	0.022	0.022	0.022
11	4300	n	0.022	0.022	0.022
12	4275	n	0.022	0.022	0.022
13	4250	n	0.022	0.022	0.022
14	4225	n	0.022	0.022	0.022
15	4200	n	0.022	0.022	0.022
16	4175	n	0.022	0.022	0.022
17	4150	n	0.022	0.022	0.022
18	4125	n	0.022	0.022	0.022
19	4100	n	0.022	0.022	0.022
20	4075	n	0.022	0.022	0.022
21	4050	n	0.022	0.022	0.022
22	4025	n	0.022	0.022	0.022
23	4000	n	0.022	0.022	0.022
24	3975	n	0.022	0.022	0.022

Figure IV. 16 : Introduction des valeurs de Manning (terrain naturel).

b. Condition aux limites (Boundary condition)

Les conditions aux limites (Boundary Conditions) dans le contexte de la modélisation hydraulique, définissent les conditions qui régissent sur le comportement de l'eau à la périphérie de la zone de modélisation.

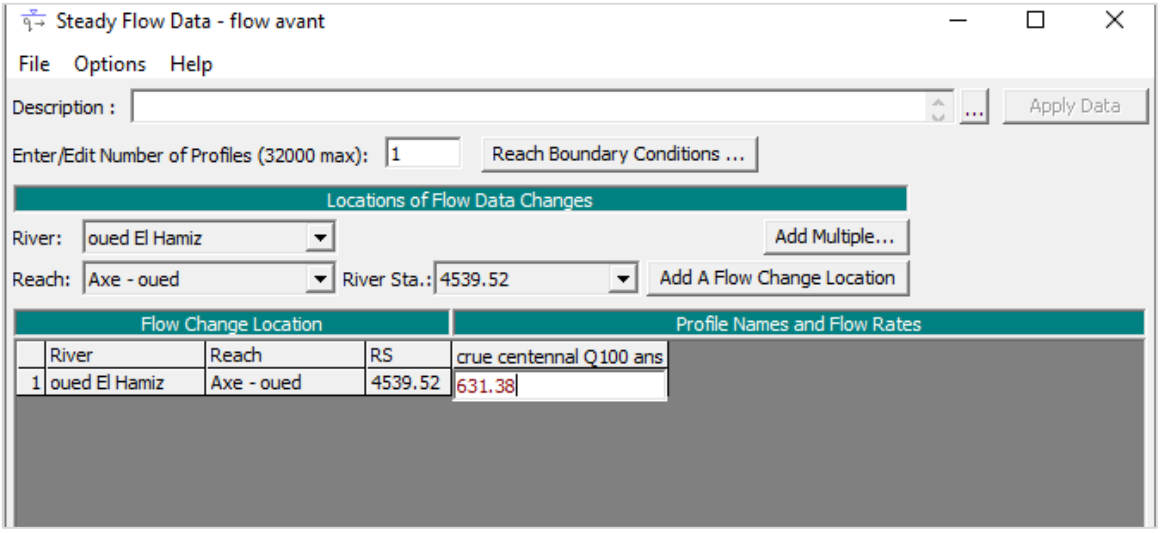


Figure IV. 17 : Introduction du débit de projet (crues centennales).

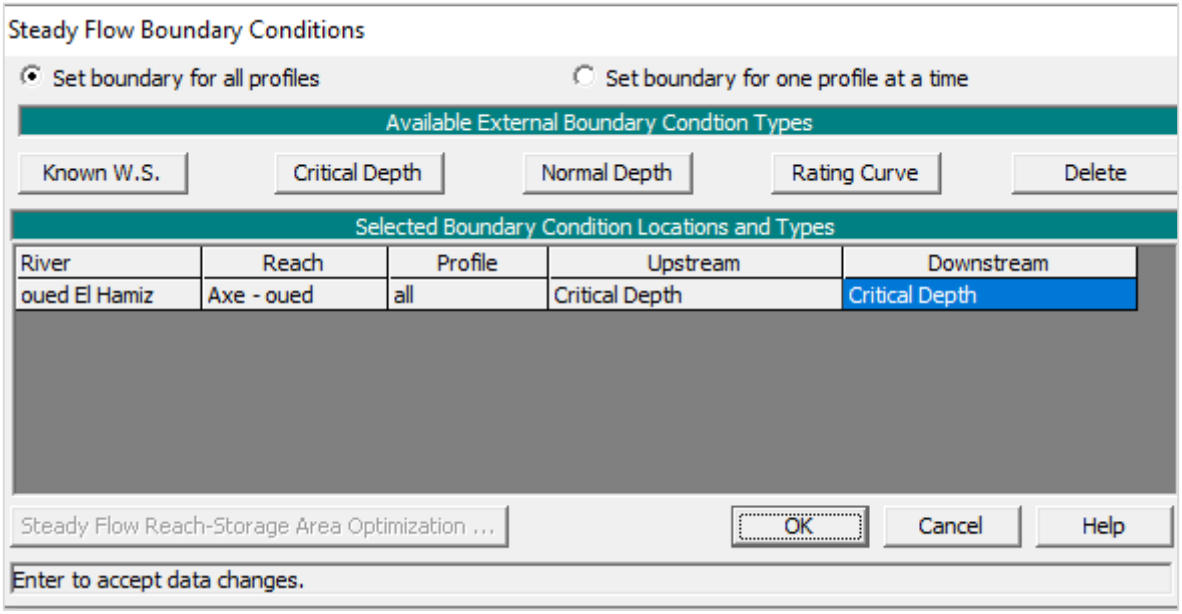


Figure IV. 18 : Conditions aux limites.

c. Simulation

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

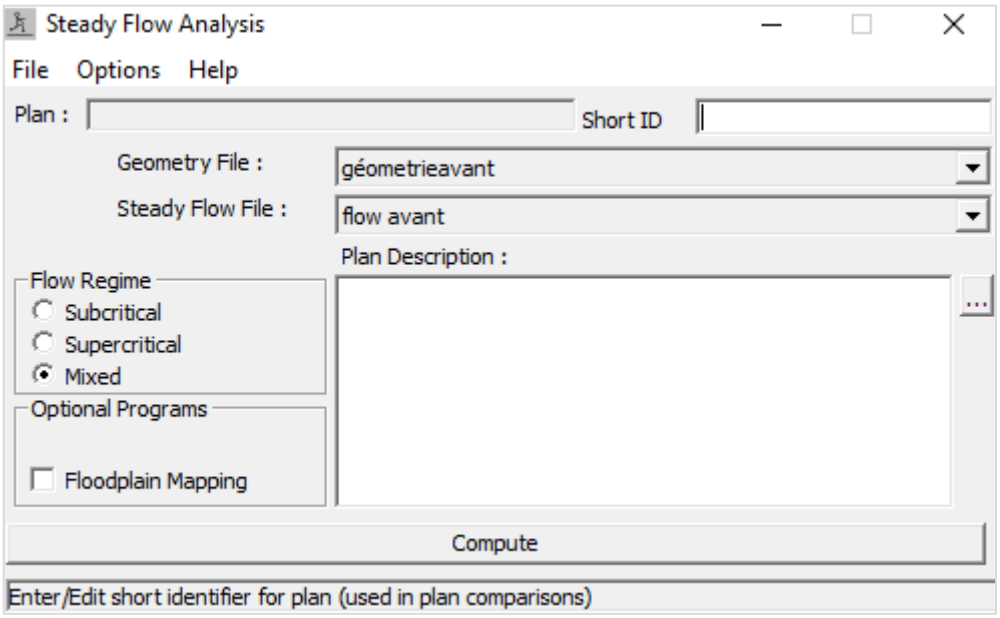


Figure IV. 19 : Lancement de la simulation.

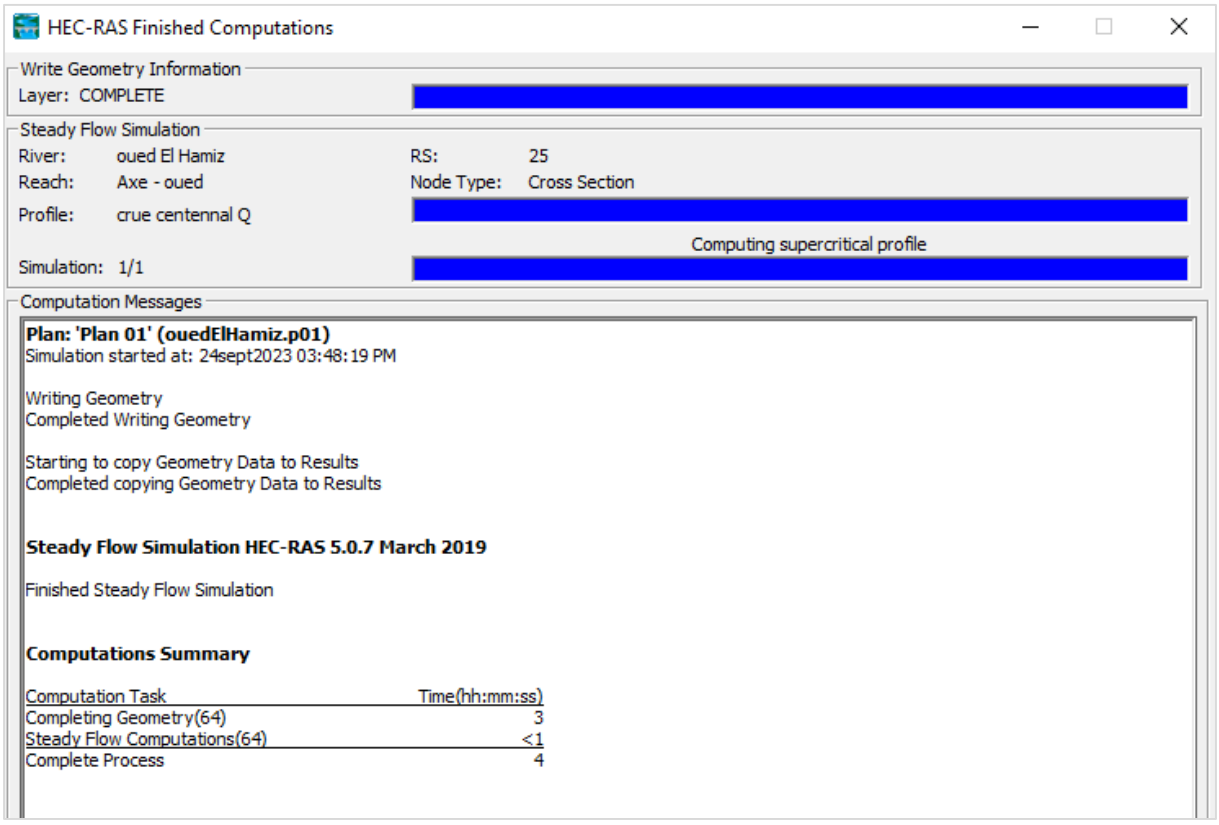


Figure IV. 20 : Fin de simulation.

IV.4.2 Résultats de la simulation

Les résultats de la simulation avec HEC-RAS fournissent une précieuse compréhension de l'écoulement constant dans un système fluvial ou hydraulique donné. Cette simulation permet d'analyser en détail la répartition des vitesses, des niveaux d'eau et des débits à travers le réseau hydrographique. Cela nous aide de prévoir les risques des inondations.

a. Vue 3D de l'oued avant l'aménagement

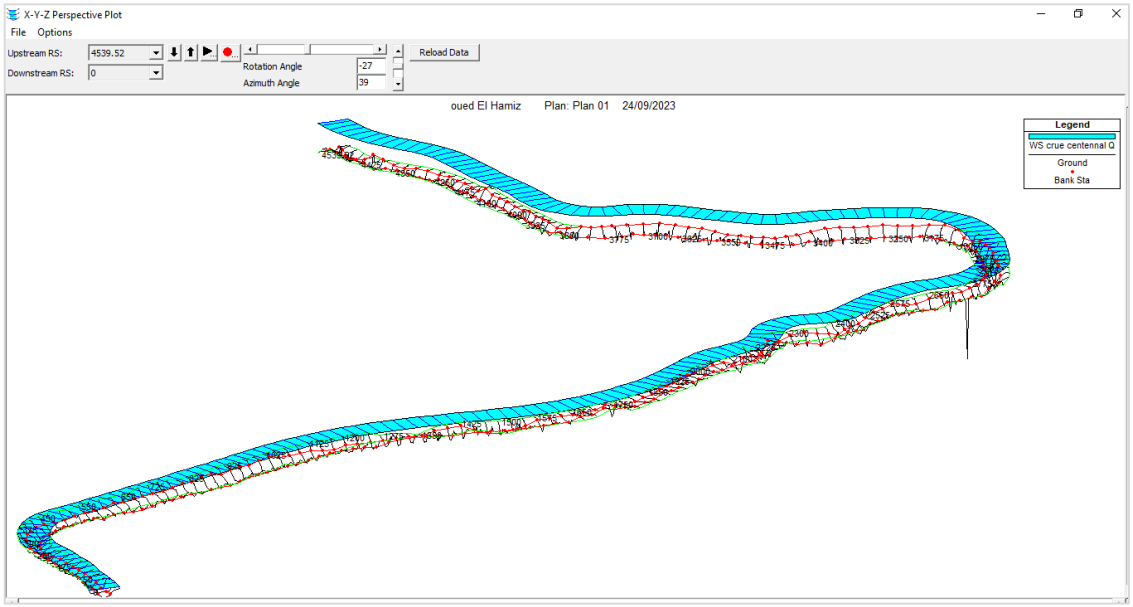


Figure IV. 21 : Vue 3D de l'oued El Hamiz.

b. Profils en travers

L'option de visualisation des résultats par profil en travers offre la possibilité d'obtenir une quantité maximale de détails à chaque emplacement spécifique le long du tracé du cours d'eau.

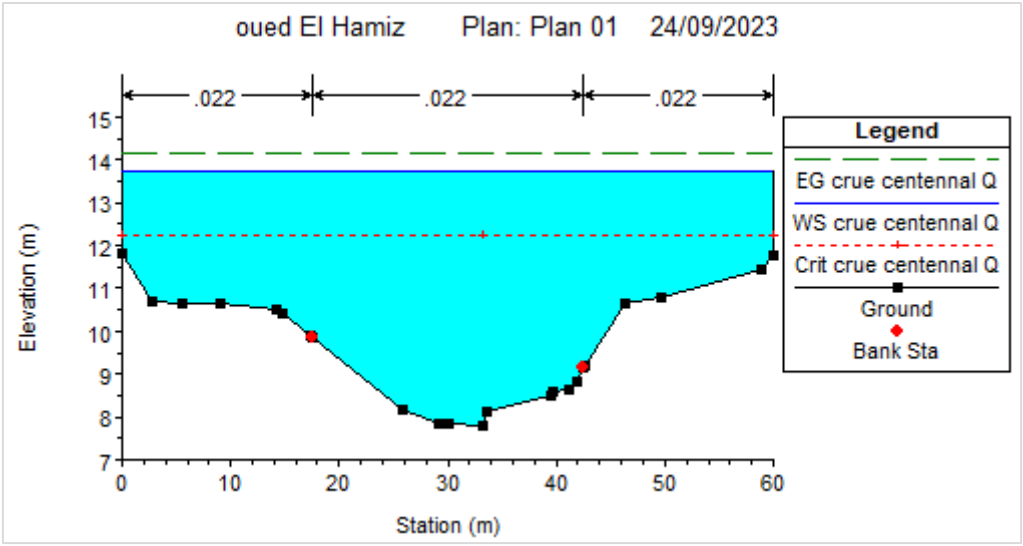


Figure IV. 22 : Résultats de la simulation pour la station 4539.52.

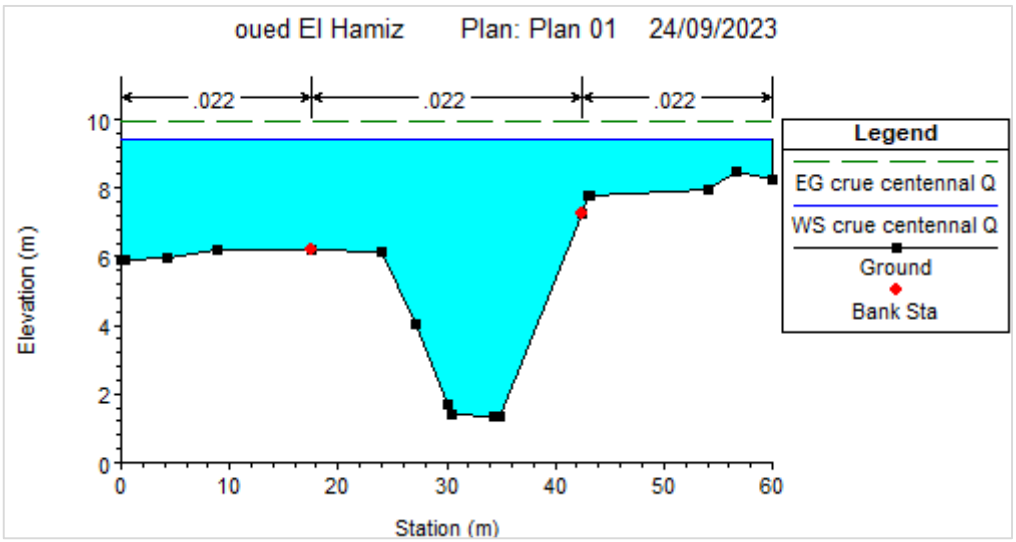


Figure IV. 23 : Résultats de la simulation pour la station 1575.

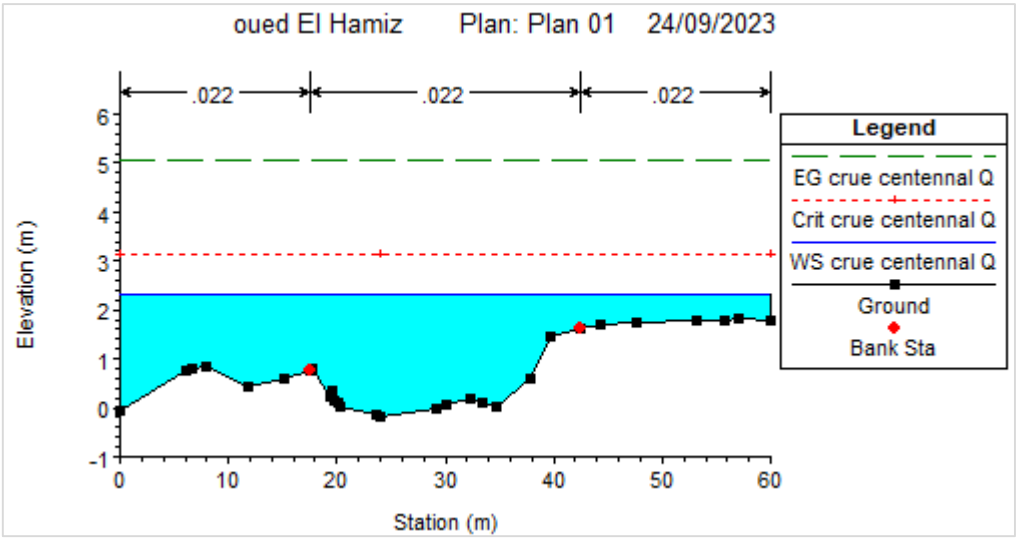


Figure IV. 24 : Résultats de la simulation pour la station 0.

Le logiciel HEC-RAS donne des tableaux récapitulatifs contient 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.

Le tableau suivant résume les résultats de la simulation d'oued El Hamiz avec le débit centennal $Q_{100\ ans}$.

Tableau IV. 2 : Principaux paramètres hydraulique d'oued El Hamiz.

River Station	Min Ch El	W.S.Elev	Crit W.S	E.G Elev	E.G Slope	Vel Ch	Flow Area	Top Width	Froude #Chl
/	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m^2)	(m)	/
4539.52	7.81	13.72	12.23	14.14	0.000548	3.18	236.19	60	0.44
4475	7.39	13.53		14.07	0.000735	3.59	205.99	55.46	0.51
4100	6.54	13.02		13.41	0.000492	3.03	240.38	60	0.42
4000	6.24	12.88		13.32	0.000607	3.25	228.49	60	0.46
3975	6.47	12.91		13.28	0.000551	2.95	241.34	60	0.44
3950	7.17	12.82		13.26	0.000701	3.13	221.59	60	0.49
3925	6.73	12.65		13.23	0.00097	3.52	195	60	0.56
3825	6.6	12.69		13.09	0.000598	2.99	232.16	60	0.45
3800	5.78	12.74		13.06	0.000373	2.74	265.39	60	0.37
3775	4.97	12.79		13	0.000203	2.2	325.18	60	0.28
3650	4.36	12.74		12.95	0.000194	2.21	326.46	60	0.27
3550	4.2	12.68		12.91	0.000216	2.34	315.18	60	0.28
3525	4.13	12.65		12.9	0.000253	2.43	299.61	60	0.3
3100	5.31	12.42		12.73	0.000445	2.74	264.36	60	0.37
2850	7.81	11.49		12.49	0.002257	4.43	148.47	60	0.82
2825	4.15	11.58		12.38	0.001575	4.31	165.1	53.84	0.68
1725	2.18	10.78		11.09	0.000356	2.75	271.75	60	0.36
1700	1.47	10.78		11.08	0.00033	2.66	281.37	60	0.33
1675	1.92	9.85	9.85	10.98	0.002819	5.09	145.78	60	0.82
1650	2.44	7.98	8.95	10.7	0.008581	7.53	91.32	40.55	1.28
1625	2.62	7.73	8.62	10.52	0.006265	7.8	91.75	37.43	1.33
1600	1.11	9.55	7.46	9.94	0.000444	3.05	247.09	60	0.39
1575	1.35	9.41		9.92	0.000753	3.44	214.04	60	0.48
1550	1.09	8.56	8.56	9.81	0.002412	5.23	138.76	56.7	0.82
1525	1.15	7.2	7.99	9.6	0.006617	7.31	96.17	40.1	1.33
1500	0.97	7.59	8.04	9.24	0.00504	5.7	110.87	43.67	1.14
1475	0.67	8.56	6.41	8.95	0.000743	2.79	226.19	60	0.46
1400	0.54	8.43		8.82	0.000721	2.78	226.98	60	0.46
1225	0.44	8.38		8.61	0.000324	2.15	293.83	60	0.31
1025	0.36	8.15		8.43	0.000447	2.36	267.39	60	0.36
850	1.66	7.89		8.26	0.000674	2.7	233.89	60	0.44
450	0.12	6.79		7.27	0.000742	3.37	217.94	60	0.49
425	0.06	5.8	5.8	7.15	0.003638	5.27	124.6	48.42	0.99
400	-0.12	4.59	5.29	6.92	0.007846	7.26	99.85	60	1.45
375	-0.15	4.19	4.92	6.66	0.012555	7.66	93.63	60	1.74
350	-0.41	5.53	4.6	6.09	0.001037	3.71	199.04	60	0.58
75	-0.31	5.05		5.48	0.000636	3.21	227	60	0.47
50	-2.09	4.87		5.45	0.001195	3.41	193.56	57.15	0.51
25	0.29	4.22	4.22	5.35	0.002697	5.22	144.83	60	0.9
0	-0.2	2.31	3.12	5.06	0.012429	7.88	90.07	60	1.79

IV.4.3 Interprétation

La modélisation d'écoulement est une étape essentielle dans la compréhension du comportement hydraulique d'oued El Hamiz et les risques des inondations associés, Elle se fait avec l'utilisation des outils informatiques.

Nous observons que le niveau d'eau tout le long du cours oued El Hamiz déborde dans la plupart des sections.

D'après les résultats présentées dans le tableau nous observons que :

- La vitesse d'écoulement tout le long d'oued El Hamiz varie entre 2.15 et 7.88 m/s.
- La profondeur d'eau varie entre 2.51 et 9.31 m.
- Nombre de Froude varie entre 0.27 et 1.79, ça veut dire qu'il y a variation de régime d'écoulement tout le long du l'oued.

D'après la simulation nous tirons que, les riverains installés tout le long du cours d'eau oued El Hamiz dans les villes de Bordj El Kiffan et Bordj El Bahri sont vulnérable aux risques d'inondation de ce dernier, ce qu'il faut prévenir aux ces risques par des aménagements hydrauliques adéquates.

IV.5 Etude des aménagements

L'étude des aménagements pour la protection des villes Bordj El Kiffan et Bordj El Bahri contre les crues centennales est un processus d'analyse et de conception spécifiquement axé sur la réduction des risques d'inondation d'oued El Hamiz.

Cette étude vise à savoir dimensionner et de la conception des ouvrages hydrauliques adéquats pour minimiser le danger et faciliter le passage des crues centennales sans risque, et nous allons dans cette étude proposer des variantes pour l'aménagement d'oued El Hamiz. En fin de compte, une variante sera sélectionnée pour une étude détaillée afin de garantir la protection des villes Bordj El Kiffan et Bordj El Bahri (Alger) contre les risques des inondations d'oued El Hamiz.

IV.5.1 Hypothèses de calcul

Dans le dimensionnement des canaux a surface libre l'écoulement est considéré écoulement uniforme tout le long du canal.
Un écoulement est considéré comme étant uniforme lorsque ses caractéristiques sont invariables dans le temps et dans l'espace.

Pour l'écoulement qu'il soit uniforme il faut que :

- Le débit de l'eau dans le canal est constant (Q=constant).
- Le canal est prismatique
- La profondeur d'eau dans le canal est constante en sa longueur
- Le canal a une pente constante
- La rugosité du fond et des parois est constante en longueur (n=constante)

Nous avons observé que :

- La longueur du cours d'eau est estimée à 4540 m
- Présence d'un pont de la RN 24 et du tramway au PK 1+575 avec une côte de radier z = 2 m
- Amont du projet est de l'altitude z = 4 m
- Aval du projet (embouchure de mer) : présence d'un nouveau pont avec une côte de radier z=-2 m

IV.5.2 Formule de dimensionnement

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

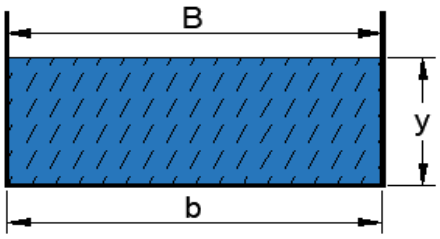
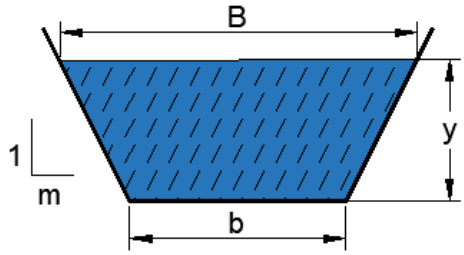
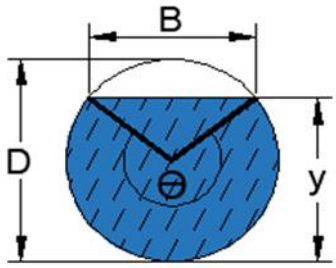
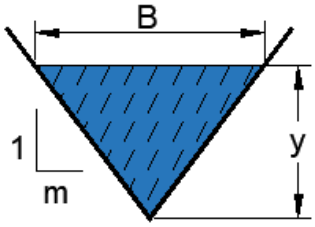
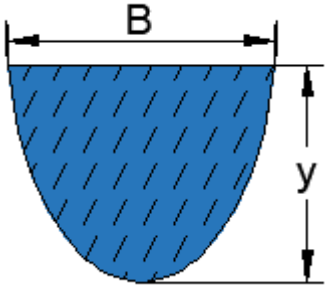
$$\boldsymbol{Q = \frac{1}{n} S R^{\frac{2}{3}} \sqrt{I}} \qquad \text{(IV. 6)}$$

Avec :

- Q : Débit de dimensionnement (m^3/s).
- n : Rugosité du canal.
- S : Section mouillée (m^2).
- I : pente du fond du canal (m/m).
- R : Rayon hydraulique (m)

Le tableau suivant donne les formules des éléments géométriques pour les différents types de section des canaux :

Tableau IV. 3 : Différents types des canaux avec leurs caractéristiques géométriques.

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

IV.5.3 Principe de conception de l'aménagement d'oued El Hamiz

Dans la conception de l'aménagement d'un cours d'eau il y a des principes et des normes à respecter et suivre.

Pour notre cas d'étude d'aménagement d'oued El Hamiz, la conception de l'aménagement de ce dernier doit être réalisé en tenant compte des paramètres hydrauliques ($Q_{aménagée}$, pente et la rugosité), aussi on prend en considération les ouvrages d'art existant qu'on ne peut pas les touchées ou de modifier ses paramètres, lors de la conception en respectent la norme de sécurité qui est présenté dans la marge de sécurité (revanche).

La conception d'aménagement d'oued El Hamiz pour protéger les villes de Bordj El Kiffan et Bordj El Bahri est très importantes, ce qu'il faut une très bonne connaissance du site de ce projet pour bien déterminer la conception adéquate pour ce dernier.

IV.5.3.1 Pente

La pente est définie comme le rapport de différence de niveau sur la longueur du cours d'eau.

Avant d'effectuer le calcul hydraulique, le choix de la pente du projet revêt une grande importance. Dans notre cas, nous avons opté pour deux pentes différentes tel que chaque une est uniforme sur son tronçon concerné.

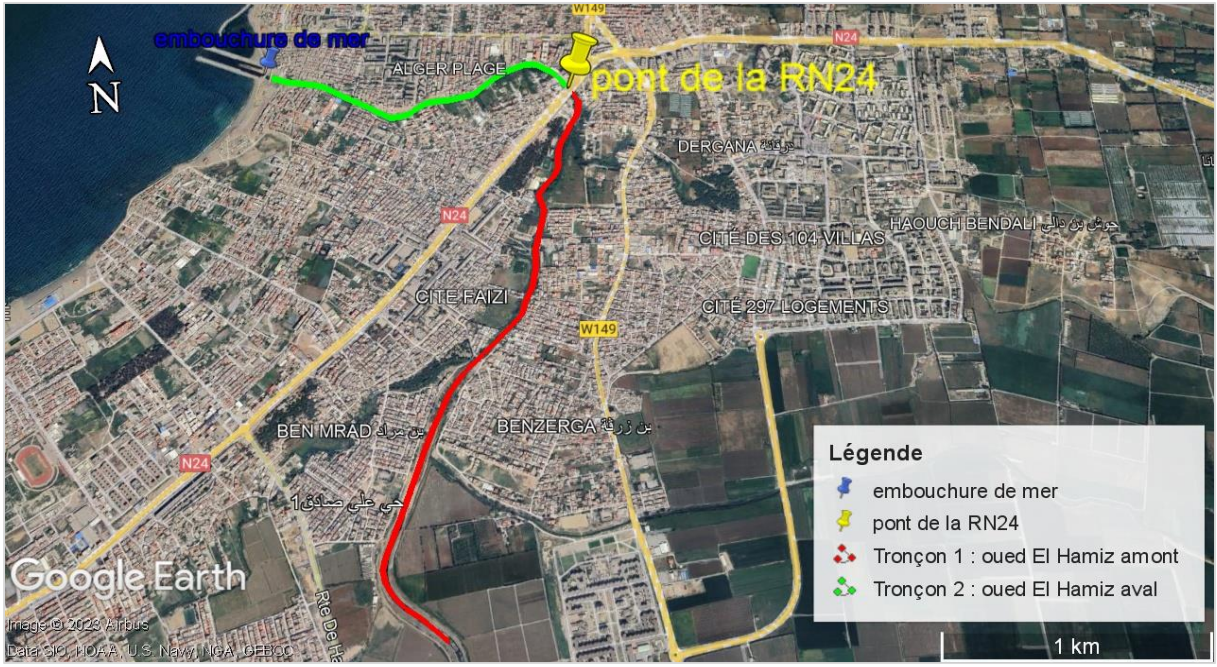


Figure IV. 25 : Présentation les lieux des tronçons.

- **Tronçon 1 (amont) :** du début de projet jusqu'à le pont de la RN 24, du PK 4+540 au PK 1+575.



Figure IV. 26 : Présentation du tronçon 1 oued El Hamiz amont.

On estime la valeur de la pente en utilisant l'équation (1) :

- Pour le tronçon 1 :

L_{amont} = 2965 m

Z_1= 7.85 m Z_2= 2 m

$$I_{amont} = \frac{\Delta Z}{L_{amont}} = \frac{7.85 - 2}{2965} = 2 \times 10^{-3}$$

$$\boldsymbol{I_{amont} = 0.2\ \%}$$

- **Tronçon 2 (aval) :** du le pont de la RN 24 jusqu'à l'embouchure de mer, du PK 1+575 au PK 0+000.



Figure IV. 27 : Présentation du tronçon 2 oued El Hamiz aval.

❖ Pour le tronçon 2 :

L_{aval} = 1575 m

Z_1= 2 m Z_2= -2 m

$$I_{aval} = \frac{\Delta Z}{L_{aval}} = \frac{2-(-2)}{1575} = 2.5 \times 10^{-3}$$

$$\boldsymbol{I_{aval} = 0.25\ \%}$$

IV.5.3.2 Coefficient de rugosité (n)

La rugosité du canal dépendant de la nature du revêtement, les valeurs de la rugosité de certain revêtement à titre d'exemple est donnée dans le tableau (Tableau 1).

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

Dans les canaux à surface libre, il est important de prévoir une marge de sécurité au-dessus de la ligne d'eau calculée afin d'éviter une élévation non prévue de la surface libre et le risque de débordement. Cette marge de sécurité est nécessaire pour prendre en compte des 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 la marge de sécurité varie généralement en fonction de la taille du canal. Pour les petits canaux, une marge de sécurité 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. Il est essentiel de considérer toutes les circonstances spécifiques qui pourraient nécessiter une adaptation de ces valeurs (Lencastre, 2008).

Tableau IV. 4 : Revanches utilisées (Degoutte, 2012).

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

IV.5.3.4 Vitesse d'érosion

Afin éviter les ruptures du fond et des berges des canaux sur l'action dynamique d'un courant d'eau, la vitesse de celui-ci ne doit pas être supérieure à la vitesse limite maximale. Les valeurs de vitesse moyenne limite d'érosion pour les lits consolides sont données dans le tableau ci-dessous (Degoutte, 2012).

Tableau IV. 5 : 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, on propose trois (03) variantes pour l'aménagement de l'oued El Hamiz et pour protéger les villes Bordj El Kiffan et Bordj El Bahri contre les crues centennales, tel que ces variantes ayant une capacité d'évacuer le débit de projet Q = 631.38 m^3/s.

Les trois variantes proposées :

- **Variante 1 :** canal trapézoïdale en enrochement.
- **Variante 2 :** canal rectangulaire en béton.
- **Variante 3 :** canal trapézoïdale en enrochement avec la conception d'un bassin de rétention.

IV.5.4.1 Variante 1 : canal trapézoïdale en enrochement

IV.5.4.1.1 Canal trapézoïdale

La première variante proposée consiste à la construction d'un canal trapézoïdal en enrochement. Sa géométrie a été choisie pour sa grande capacité d'évacuer les eaux et permettre le passage des crues sans problèmes.

Pour la variante 1 nous avons choisi une largeur au fond b = 60 m, un fruit de talus m = 2, et nous avons pris le coefficient de rugosité n = 0.025 (enrochement).

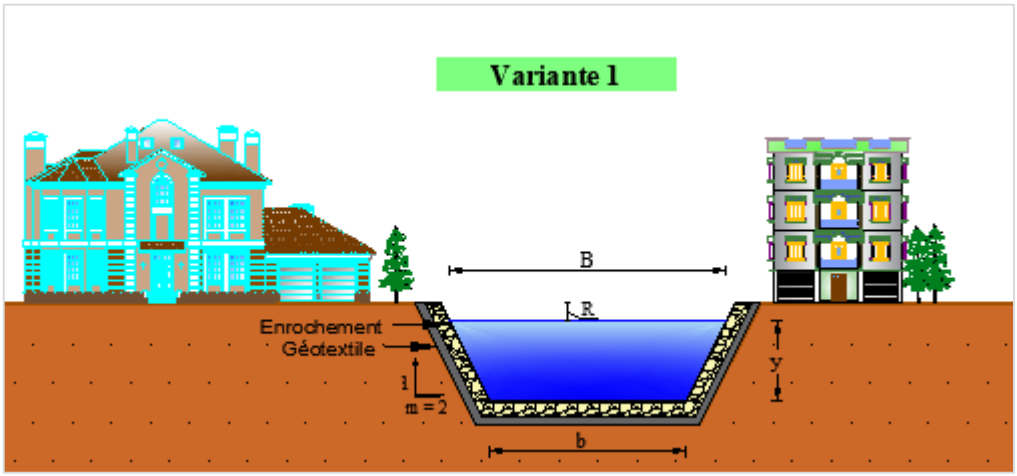


Figure IV. 28 : Schéma de la variante 1.

➢ **Variante 1 Amont :** Tronçon 1 (amont) : du début de projet jusqu'à le pont de la RN24.

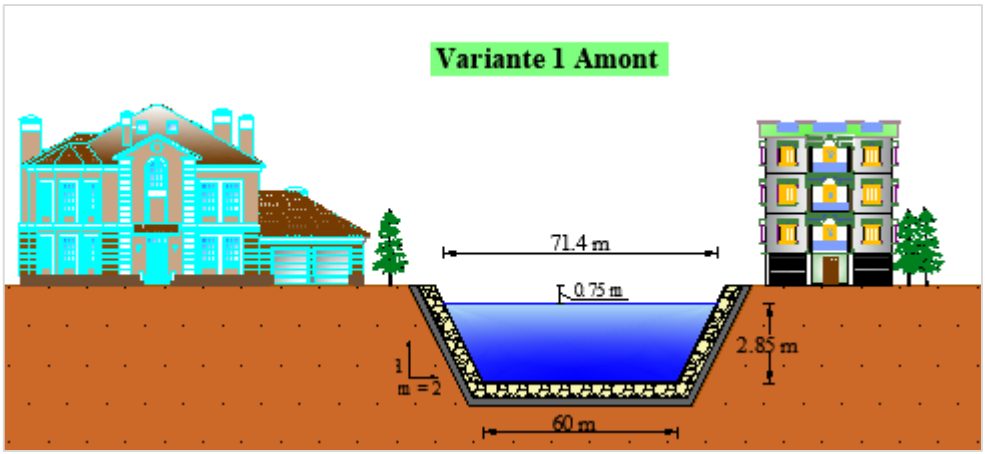


Figure IV. 29 : Schéma de la variante 1 Amont.

Les tableaux suivant présentent les dimensions et les résultats de calcul du canal de la variante 1 Amont.

Tableau IV. 6 : Caractéristiques du canal de la variante 1 Amont.

Paramètre	Symbole	Valeur
Type de section	/	Trapézoïdale
Largeur au fond (m)	b	60
Fruit de talus	m	2
Tirant d'eau (m)	y	2.85
La pente (%)	I	0.2
La rugosité	n	0.025
Débit (m^3/s)	Q	631.38

Tableau IV. 7 : Résultats de calcul de la variante1 Amont.

Paramètre	Valeur
Débit Q (m^3/s)	631.38
Largeur au miroir B (m)	71.4
Section S (m^2)	187.25
Périmètre P (m)	83.67
Hauteur critique y_c (m)	2.19
La vitesse V (m/s)	3.37
Energie spécifique (m)	3.43
Nombre de Froude F_r	0.64
Régime d'écoulement	fluviale

- **Variante 1 Aval :** Tronçon 2 (aval) : du le pont de la RN 24 jusqu'à l'embouchure de mer.

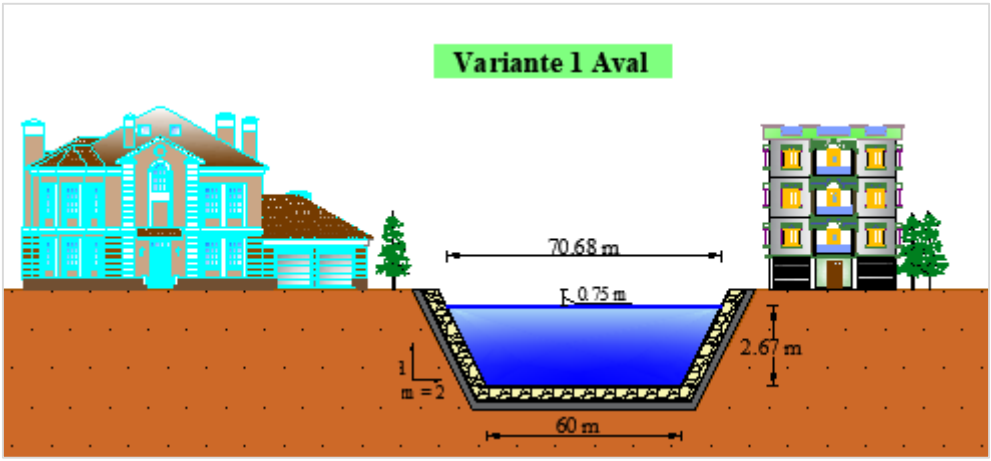


Figure IV. 30 : Schéma de la variante 1 Aval.

Tableau IV. 8 : Caractéristiques du canal de la variante 1 Aval.

Paramètre	Symbole	Valeur
Type de section	/	Trapézoïdale
Largeur au fond (m)	b	60
Fruit de talus	m	2
Tirant d'eau (m)	y	2.67
La pente (%)	I	0.25
La rugosité	n	0.025
Débit (m^3/s)	Q	631.38

Tableau IV. 9 : Résultats de calcul de la variante 1 Aval.

Paramètre	Valeur
Débit Q (m^3/s)	631.38
Largeur au miroir B (m)	70.68
Section S (m^2)	174.46
Périmètre P (m)	80.86
Hauteur critique y_c (m)	2.19
La vitesse V (m/s)	3.62
Energie spécifique (m)	3.34
Nombre de Froude F_r	0.71
Régime d'écoulement	fluviale

IV.5.4.1.2 Conception du canal en enrochement

Enrochement c'est une technique très fréquente qui consiste à stabiliser les berges et le fond par un empilement d'enrochement de carrière avec un fruit des talus assez faible de l'ordre de 3/2 à 2/1 pour l'enrochement libre sans lien de béton.

Le tonnage supposé pour réaliser l'aménagement d'oued El Hamiz en enrochement pour la protection des villes de Bordj El Bahri et Bordj El Kiffan contre les crues il varie de 1 à 1.5t. Tel que son diamètre médian D_{50} est environ 1 m.

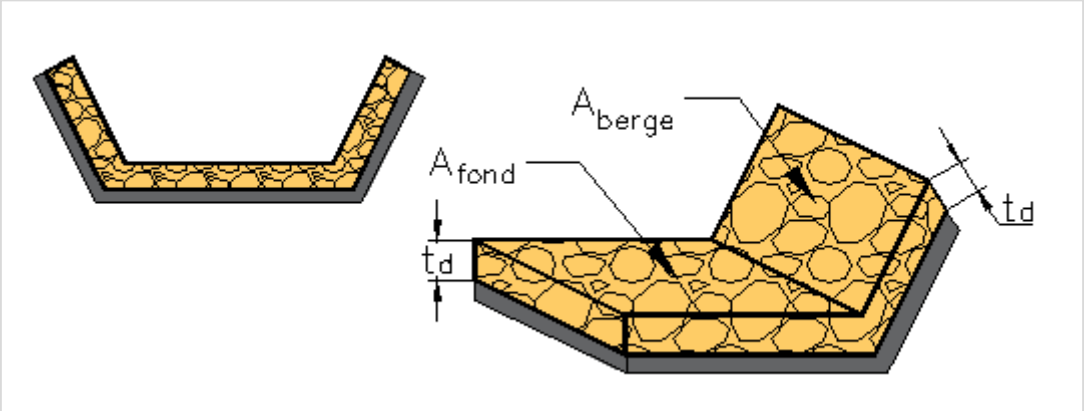


Figure IV. 31 : Canal en enrochement.

Epaisseur orthogonale théorique t_d (m) :

$$t_d = n.D_{50} \quad \text{(IV. 7)}$$

Volume globale de dimensionnement $\vartheta_{b.d}$ (m^3):

$$\vartheta_{b.d} = A.t_d \quad \text{(IV. 8)}$$

Avec :
n: nombre de couche n = 1.
D_{50} : Diamètre médian D_{50} = 1 m.
A : Aire (surface) (m^2).

- **Calcul des sections d'enrochement de la variante 1**

$$A = L.l \quad \text{(IV. 9)}$$

$$l_{talus} = Y\sqrt{1+m^2} \quad \text{(IV. 10)}$$

Tableau IV. 10 : Hauteurs de la variante 1.

	y (m)	R (m)	Y=y+R (m)
Amont	2.85	0.75	3.6
Aval	2.67	0.75	3.42

Tableau IV. 11 : Sections d'enrochement du canal de la variante 1.

		L (m)	*l* (m)	A (m²)
Amont	**Fond**	2965	60	177900
	Talus droite	2965	8.05	23867.7896
	Talus gauche	2965	8.05	23867.7896
Aval	**Fond**	1575	60	94500
	Talus droite	1575	7.65	12044.5802
	Talus gauche	1575	7.65	12044.5802

- **Calcul des volumes d'enrochement de la variante 1**

Tableau IV. 12 : Volumes d'enrochement de la variante 1.

		n	D_{50} (m)	t_d (m)	A (m²)	V (m^3)
Amont	**Fond**	1	1	1	177900	177900
	Talus droite	1	1	1	23867.7896	23867.7896
	Talus gauche	1	1	1	23867.7896	23867.7896
Aval	**Fond**	1	1	1	94500	94500
	Talus droite	1	1	1	12044.5802	12044.5802
	Talus gauche	1	1	1	12044.5802	12044.5802
				Volume global (m^3)		**344224.7395**

- **Calcul des sections du géotextile de la variante 1**

Tableau IV. 13 : Sections du géotextile de la variante 1.

		A (m²)	A total (m²)
Amont	**Fond**	177900	344224.7395
	Talus droite	23867.7896	
	Talus gauche	23867.7896	
Aval	**Fond**	94500	
	Talus droite	12044.5802	
	Talus gauche	12044.5802	

- **Volume des déblais et remblais**

L'estimation des volumes déblai et remblai peut se faire directement sous AutoCAD, ceci en projetant la section du canal aménagé dans le cours d'eau naturel, alors la section se superpose sur la section naturelle du cours d'eau, un calcul rapide permet d'en déduire les volumes en calculant les sections du terrain à enlever et ou à ajouter, en multipliant par la longueur du tronçon considéré on obtient le volume.

Tableau IV. 14 : Volume des déblais et remblais de la variante 1.

	Volume (m^3)		Volume totale (m^3)
	Amont	**Aval**	
Déblais	610419.43	387208.7	997628.13
Remblais	22418.19	1733.71	24151.9

- **Démolition et délocalisation**

La démolition est déconstruction ou destruction contrôlée d'une structure, d'un bâtiment, d'une installation ou d'autres types de constructions. Dans notre projet est nécessaire pour l'aménagement d'oued El Hamiz et pour la protection des villes de Bordj El Bahri et Bordj El Kiffan contre les crues, le nombre des maisons (N) à démolir est de 168 maisons.
N=168 maisons

IV.5.4.1.3 Estimation du coût de la variante 1

Tableau IV. 15 : Devis quantitatif estimatif de la variante 1.

N°	Désignation des travaux	Unité	Quantité	Prix unitaire (DA)	Montant (DA)
1	**Déblais**	m^3	997628.13	700	698339691
2	**Remblais**	m^3	24151.9	700	16906330
3	**Démolition**	maison	168	40000	6720000
4	**Enrochement**	m^3	344224.74	15000	5163371093
5	**Géotextile**	m^2	344224.74	5000	1721123698
				Total (DA)	7606460811
				TVA (%)	19
				Total TTC (DA)	9051688365

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 60 m, après en utilisant l'équation de Manning Strickler on a calculé ses dimensions pour les deux tronçons (Amont et Aval) pour un débit de 631.38 m^3/s. La variante 1 a une profondeur pour l'amont de projet de 2.85 m, et pour l'aval de 2.67 m. Elle a une vitesse qui varie entre 3.37 et 3.64 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 El Hamiz sont les plus adéquates pour la protection contre les crues centennales.

Pour réaliser cette variante, il serait nécessaire de démolir et de délocaliser les riverains des villes Bordj El Kiffan et Bordj El Bahri, tel que nous avons estimé le nombre de maisons à démolir est de 168 maisons. Pour le coût de la variante 1 nous avons calculé les volumes des déblais, remblais, d'enrochement et aussi la quantité du géotextile nécessaires pour la réalisation.

IV.5.4.2 Variante 2 : canal rectangulaire en béton

IV.5.4.2.1 Canal rectangulaire

La deuxième variante proposée consiste en la construction d'un canal de profil rectangulaire 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 = 60 m, et nous avons pris le coefficient de rugosité n = 0.014 (béton).

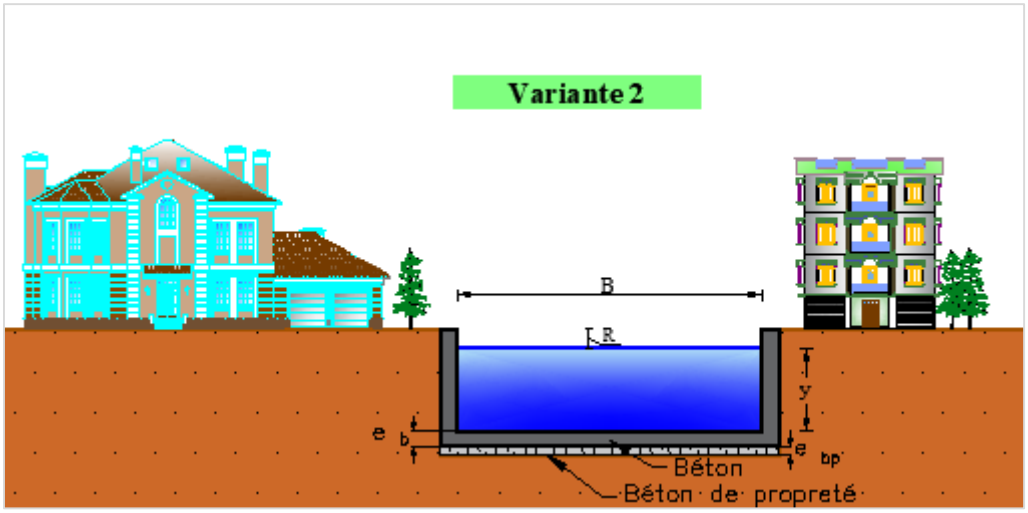


Figure IV. 32 : Schéma de la variante 2.

➢ **Variante 2 Amont :** Tronçon 1 (amont) : du début de projet jusqu'à le pont de la RN24.

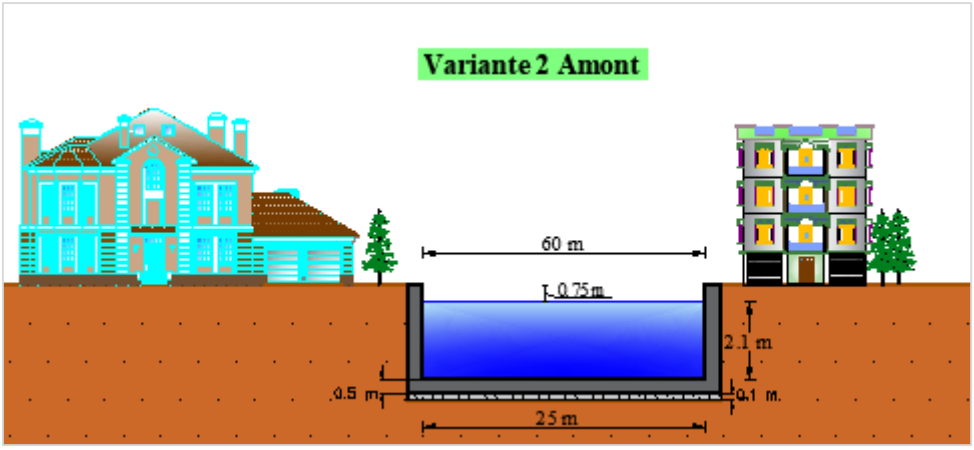


Figure IV. 33 : Schéma de la variante 2 Amont.

Tableau IV. 16 : Caractéristiques du canal de la variante 2 Amont.

Paramètre	Symbole	Valeur
Type de section	/	Rectangulaire
Largeur au fond (m)	b	60
Fruit de talus	m	/
Tirant d'eau (m)	y	2.1
La pente (%)	I	0.2
La rugosité	n	0.014
Débit (m^3/s)	Q	631.38

Tableau IV. 17 : Résultats de calcul de la variante 2 Amont.

Paramètre	Valeur
Débit Q (m^3/s)	631.38
Largeur au miroir B (m)	60
Section S (m^2)	126.00
Périmètre P (m)	64.20
Hauteur critique y_c (m)	2.25
La vitesse V (m/s)	5.01
Energie spécifique (m)	3.38
Nombre de Froude F_r	1.10
Régime d'écoulement	torrentiel

- **Variante 2 Aval :** Tronçon 2 (aval) : du le pont de la RN 24 jusqu'à l'embouchure de mer,

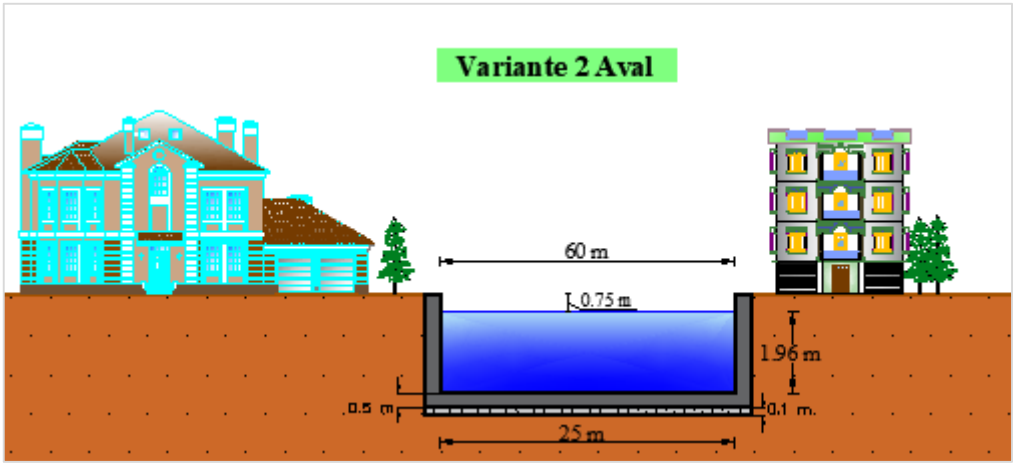


Figure IV. 34 : Schéma de la variante 2 Aval.

Tableau IV. 18 : Caractéristiques du canal de la variante 2 Aval.

Paramètre	Symbole	Valeur
Type de section	/	Trapézoïdale
Largeur au fond (m)	b	60
Fruit de talus	m	/
Tirant d'eau (m)	y	1.96
La pente (%)	I	0.25
La rugosité	n	0.014
Débit (m^3/s)	Q	631.38

Tableau IV. 19 : Résultats de calcul de la variante 2 Aval.

Paramètre	Valeur
Débit Q (m^3/s)	631.38
Largeur au miroir B (m)	60
Section S (m^2)	117.60
Périmètre P (m)	63.92
Hauteur critique y_c (m)	2.25
La vitesse V (m/s)	5.37
Energie spécifique (m)	3.43
Nombre de Froude F_r	1.22
Régime d'écoulement	torrentiel

IV.5.4.2.2 Conception du canal en béton

Dans cette variante le béton fait partie dominante du canal rectangulaire, une épaisseur de e_b=50 cm pour la radier et les côtés du canal ainsi qu'une épaisseur e_{bp}=10 cm pour le béton de propreté, la figure suivante illustre les dimensions dans une section en travers d'un canal trapézoïdal.

Tableau IV. 20 : Epaisseurs des bétons de la variante 2.

	Epaisseur	Unité
Béton e_b	0.5	m
Béton de propreté e_{bp}	0.1	m

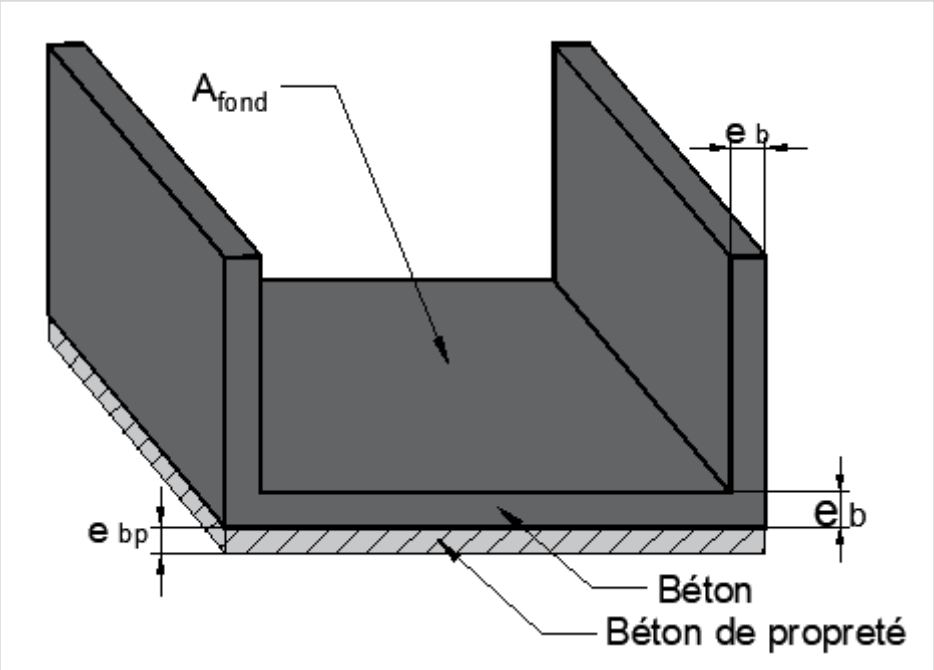


Figure IV. 35 : Schéma du canal rectangulaire en béton.

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

Tableau IV. 21 : Hauteurs de la variante 2.

	y (m)	R (m)	y+R (m)
Amont	2.1	0.75	2.85
Aval	1.96	0.75	2.71

Tableau IV. 22 : Sections des bétons du canal de la variante 2.

			L (m)	l (m)	A (m²)
Béton	**Amont**	**fond**	2965	61	180865
		talus droite	2965	2.85	8450.25
		talus gauche	2965	2.85	8450.25
	Aval	**fond**	1575	61	96075
		talus droite	1575	2.71	4268.25
		talus gauche	1575	2.71	4268.25
Béton de propreté	**Amont**	**fond**	2965	61	180865
	Aval	**fond**	1575	61	96075

- **Volumes des bétons**

Tableau IV. 23 : Volumes des bétons de la variante 2.

			A (m²)	e (m)	V (m³)	V totale (m³)
Béton	**Amont**	**fond**	180865	0.5	90432.5	151188.5
		talus droite	8450.25	0.5	4225.125	
		talus gauche	8450.25	0.5	4225.125	
	Aval	**fond**	96075	0.5	48037.5	
		talus droite	4268.25	0.5	2134.125	
		talus gauche	4268.25	0.5	2134.125	
Béton de propreté	**Amont**	**fond**	180865	0.1	18086.5	27694
	Aval	**fond**	96075	0.1	9607.5	

- **Volume des déblais et remblais**

Tableau IV. 24 : Volume des déblais et remblais de la variante 2.

	Volume (m³)		Volume totale (m³)
	Amont	**Aval**	
Déblais	7902677	331090	8233767
Remblais	21419	1526	22945

- **Démolition et délocalisation**

N = 168 maisons.

IV.5.4.2.3 Estimation du coût de la variante 2

Tableau IV. 25 : Devis quantitatif estimatif de la variante 2.

N°	Désignation des travaux	Unité	Quantité	Prix unitaire (DA)	Montant (DA)
1	**Déblais**	m^3	8233767	700	5763636900
2	**Remblais**	m^3	22945	700	16061500
3	**Démolition**	maison	168	40000	6720000
4	**Béton**	m^3	151188.5	30000	4535655000
5	**Béton de propreté**	m^2	27694	6000	166164000
				Total (DA)	10488237400
				TVA (%)	19
				Total TTC (DA)	12481002506

IV.5.4.2.4 Interprétation de la variante 2 :

La deuxième variante proposée consiste à la conception d'un canal de profil rectangulaire en béton, nous avons proposée pour elle une largeur au fond (b) de 60 m comme la première variante, en utilisant l'équation de Manning Strickler nous avons calculé ses dimensions pour les deux tronçons (Amont et Aval) pour un débit de 631.38 m3/s. La variante 2 a une profondeur pour l'amont du projet de 2.1 m, et pour l'aval de 1.96 m. Elle a une vitesse qui varie entre 5.01 et 5.37 m/s, et un régime d'écoulement torrentiel tel que le nombre de Froude varie de 1.10 à 1.22. Les résultats trouvées nous impliquent que les dimensions calculées assurent le passage de la crue avec un régime d'écoulement torrentiel à cause de la rugosité du canal ($n_{béton}$) quelle est apparus dans la vitesse et le nombre de Froude.

Si on réalise la variante 2 il faut faire et passer par les opérations de démolition et délocalisation des riverains, tel que le nombre de maisons à démolir est de 168 maisons. Pour le coût de la variante 2 nous avons calculé les volumes des déblais, remblais, béton et aussi béton de propreté, nécessaires pour la réalisation. La variante 2 est la plus coûteuse que la variante 1.

IV.5.4.3 Variante 3 : canal trapézoïdale en enrochement avec la conception d'un bassin de rétention

Dans la troisième variante, on a proposé de construire un canal de profil trapézoïdal en enrochement avec la conception d'un bassin de rétention. Le bassin est utilisé pour amortir l'écoulement, car les conditions du terrain ne permettent pas de construire un canal large ou d'une profondeur élevée. L'utilisation du bassin de rétention permet de gérer efficacement le débit d'eau et de réduire les risques d'inondation.

Pour la variante 3 pour le canal nous avons choisi une largeur au fond b = 25 m (largeur du lit d'oued El Hamiz), un fruit de talus m = 2, et nous avons pris le coefficient de rugosité n = 0.025 (enrochement), et un débit aménagée $Q_{aménagée}$ = 499.62 m^3/s pour une profondeur y = 4 m en amont et y = 3.76 m en aval. Et pour le bassin de rétention nous allons calculer son volume.

IV.5.4.3.1 Canal trapézoïdale en enrochement

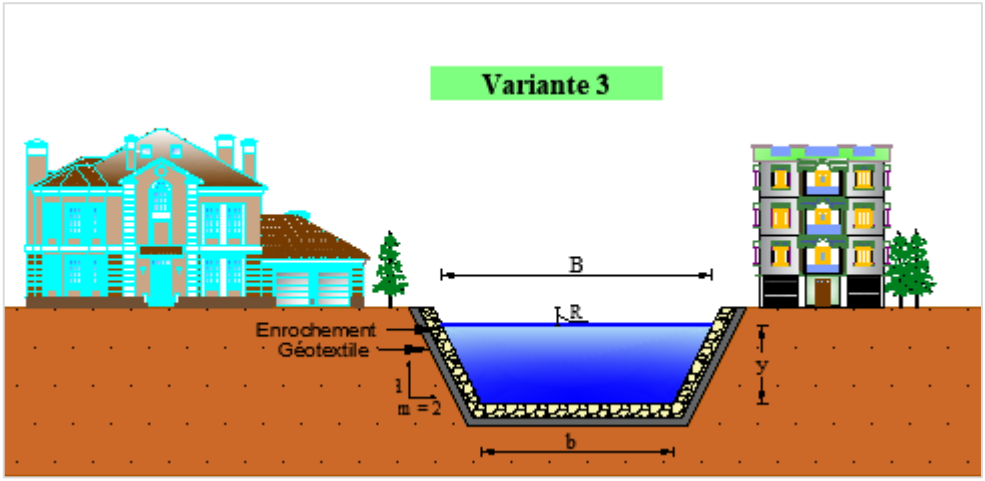


Figure IV. 36 : Schéma de la variante 3.

➢ **Variante 3 Amont :** Tronçon 1 (amont) : du début de projet jusqu'à le pont de la RN 24,

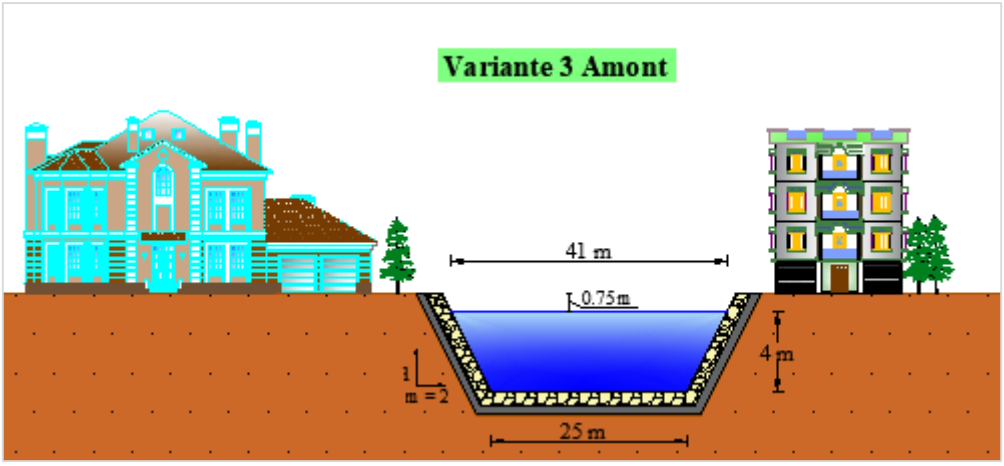


Figure IV. 37 : Schéma de la variante 3 Amont.

Tableau IV. 26 : Caractéristiques du canal de la variante 3 Amont.

Paramètre	Symbole	Valeur
Type de section	/	Trapézoïdale
Largeur au fond (m)	b	25
Fruit de talus	m	2
Tirant d'eau (m)	y	4
La pente (%)	I	0.2
La rugosité	n	0.025
Débit (m^3/s)	Q	499.62

Tableau IV. 27 : Résultats de calcul de la variante 3 Amont.

Paramètre	Valeur
Débit Q (m^3/s)	499.62
Largeur au miroir B (m)	41
Section S (m^2)	132.00
Périmètre P (m)	70.96
Hauteur critique y_c (m)	3.15
La vitesse V (m/s)	3.79
Energie spécifique (m)	4.73
Nombre de Froude F_r	0.60
Régime d'écoulement	fluviale

- **Variante 3 Aval :** Tronçon 2 (aval) : du le pont de la RN 24 jusqu'à l'embouchure de mer,

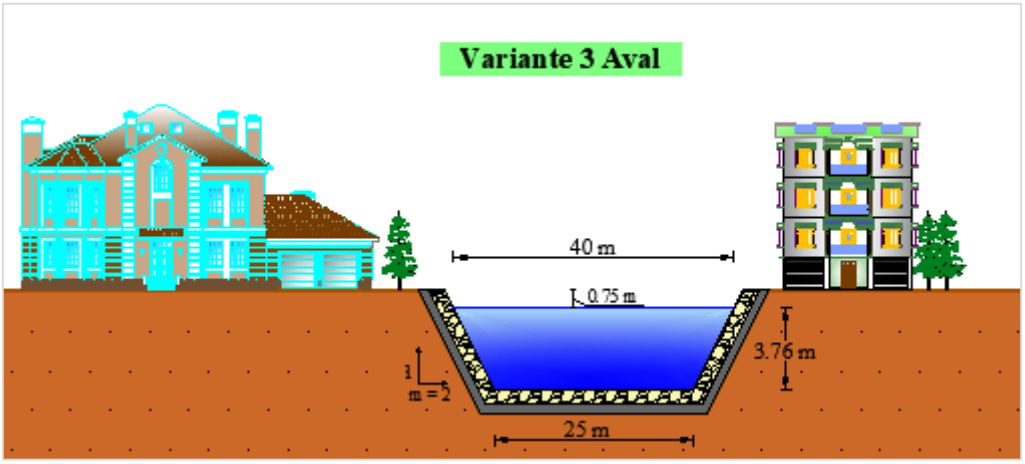


Figure IV. 38 : Schéma de la variante 3 Aval.

Tableau IV. 28 : Caractéristiques du canal de la variante 3 Aval.

Paramètre	Symbole	Valeur
Type de section	/	Trapézoïdale
Largeur au fond (m)	b	25
Fruit de talus	m	2
Tirant d'eau (m)	y	3.76
La pente (%)	I	0.25
La rugosité	n	0.025
Débit (m^3/s)	Q	499.62

Tableau IV. 29 : Résultats de calcul de la variante 3 Aval.

Paramètre	Valeur
Débit Q (m^3/s)	499.62
Largeur au miroir B (m)	40.04
Section S (m^2)	122.28
Périmètre P (m)	65.69
Hauteur critique y_c (m)	3.15
La vitesse V (m/s)	4.09
Energie spécifique (m)	4.61
Nombre de Froude F_r	0.67
Régime d'écoulement	fluviale

IV.5.4.3.2 Conception du canal en enrochement

- **Calcul des sections d'enrochement du canal de la variante 3**

Tableau IV. 30 : Hauteurs de la variante 3.

	y (m)	R (m)	Y=y+R (m)
Amont	4	0.75	4.75
Aval	3.76	0.75	4.51

Tableau IV. 31 : Sections d'enrochement du canal de la variante 3.

		L (m)	l (m)	A (m²)
Amont	**Fond**	2965	25	74125
	Talus droite	2965	10.62	31492.2224
	Talus gauche	2965	10.62	31492.2224
Aval	**Fond**	1575	25	39375
	Talus droite	1575	10.08	15883.3499
	Talus gauche	1575	10.08	15883.3499

- **Calcul des volumes d'enrochement de la variante 1**

Tableau IV. 32 : Volumes d'enrochement de la variante 3.

		n	D_{50} (m)	t_d (m)	A (m²)	V (m³)
Amont	**Fond**	1	1	1	74125	74125
	Talus droite	1	1	1	31492.2224	31492.2224
	Talus gauche	1	1	1	31492.2224	31492.2224
Aval	**Fond**	1	1	1	39375	39375
	Talus droite	1	1	1	15883.3499	15883.3499
	Talus gauche	1	1	1	15883.3499	15883.3499
				Volume global (m³)		208251.1445

- **Calcul des sections du géotextile du canal de la variante 3**

Tableau IV. 33 : Sections du géotextile du canal de la variante 3.

		A (m²)	A total (m²)
Amont	**Fond**	74125	208251.144
	Talus droite	31492.2224	
	Talus gauche	31492.2224	
Aval	**Fond**	39375	
	Talus droite	15883.3499	
	Talus gauche	15883.3499	

- **Volume des déblais et remblais**

Tableau IV. 34 : Volume des déblais et remblais du canal de la variante 3.

	Volume (m^3)		Volume totale (m^3)
	Amont	Aval	
Déblais	178606.4	150288.04	328894.44
Remblais	49084.09	4009.18	53093.27

IV.5.4.3.3 Bassin de rétention

Un bassin de rétention est une structure spécialement conçue dans le but de stocker temporairement les eaux de crue et de réguler leur débit avant de les libérer progressivement dans le cours d'eau en aval après passage de la crue. C'est une mesure d'aménagement hydraulique qui vise à atténuer les inondations et à réduire les pics de crue.

Pour la troisième variante, il est nécessaire de construire un ouvrage hydraulique pour amortir l'écoulement et protéger les villes Bordj El Kiffan et Bordj El Bahri contre les inondations d'oued El Hamiz, tel que nous avons dans la variante 3 proposée des dimensions pour le canal trapézoïdal qui permet au débit aménagée $Q_{aménagée}$ à passer.

Le bassin de rétention que nous allons le construire il situe à l'amont du projet d'aménagement d'oued El Hamiz, l'image satellitaire suivante permet de connaitre le lieu de ce bassin.

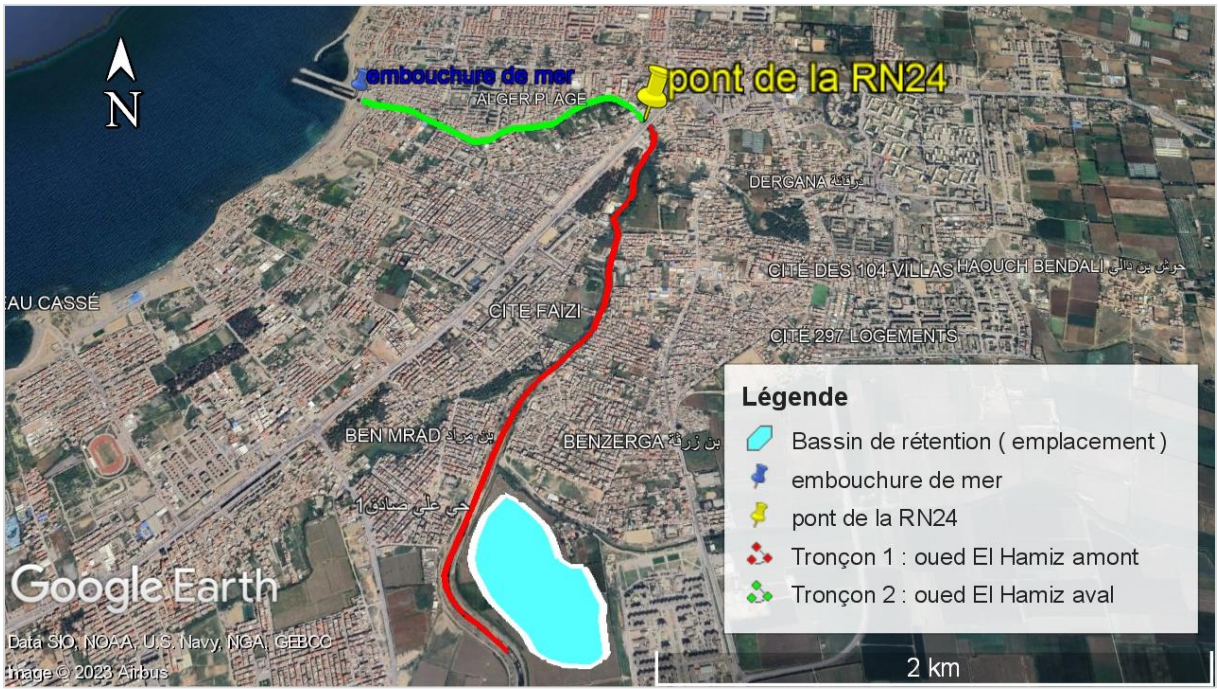


Figure IV. 39 : Image satellitaire présente le lieu d'oued El Hamiz et du bassin de rétention.

- **Calcul du volume du bassin de rétention**

Voici les étapes à suivre pour le calcul du volume du bassin de rétention :

- On prend l'hydrogramme de crue qui présente le débit entrant (I) en fonction du temps.
- Connaitre le débit aménagé $Q_{aménagée}$ débit de canal suivant les dimensions prises.
- On calcul $\boldsymbol{I - Q_{aménagée}}$
- Calcul du volume du bassin de rétention :
  - Graphiquement :
    On dessine $\boldsymbol{I}$ en fonction du temps
    On dessine $\boldsymbol{Q_{aménagée}}$en fonction du temps
    On calcul la surface qui se trouve entre la courbe de l'hydrogramme des crues et la ligne horizontale $\boldsymbol{Q_{aménagée}}$ ce qui présente le volume du bassin**.**
  - Analytiquement :
    Si $\boldsymbol{I - Q_{aménagée} \geq 0}$ on calcule le volume tel que :

$$\boldsymbol{Volume = \left(I - Q_{aménagée}\right) * \Delta t} \qquad \text{(IV. 11)}$$

    Δt : intervalle de temps dans notre cas 0.5heure = 1800 s
    On calcule le cumul du volume
- On obtient le volume du bassin de rétention.

Le tableau ci-dessous présente les étapes suivies pour le calcul :

Tableau IV. 35 : Calcul du volume de bassin de rétention.

Temps (h)	**Δt (s)**	***I* : Hamiz barrage 20602 (m^3/s)**	***I*-Q $_{aménagé}$ (m^3/s)**	**Volume (m^3)**	**volume cumul (m^3)**
0	0	0			
0.5	1800	1.13			
1	1800	4.51			
1.5	1800	10.15			
2	1800	18.05			
2.5	1800	28.2			
3	1800	40.6			
3.5	1800	55.27			
4	1800	72.18			
4.5	1800	91.36			
5	1800	112.79			
5.5	1800	136.47			
6	1800	162.41			
6.5	1800	190.61			
7	1800	221.06			
7.5	1800	253.77			
8	1800	288.74			
8.5	1800	325.96			
9	1800	365.43			
9.5	1800	407.16			
10	1800	451.15			
10.5	1800	497.39			
11	1800	545.89	46.27	41643	41643
11.5	1800	596.65	97.03	128970	170613
11.83	1800	631.73	132.11	206226	376839
12	1800	617.87	118.25	225324	602163
12.5	1800	579.27	79.65	178110	780273
13	1800	542.3	42.68	110097	890370
13.5	1800	506.95	7.33	6597	896967
14	1800	473.16			
14.5	1800	440.91			
15	1800	410.16			
15.5	1800	380.88			
16	1800	353.02			
16.5	1800	326.56			
17	1800	301.45			

17.5	1800	277.66			
18	1800	255.16			
18.5	1800	233.91			
19	1800	213.87			
19.5	1800	195.01			
20	1800	177.29			
20.5	1800	160.68			
21	1800	145.14			
21.5	1800	130.64			
22	1800	117.14			
22.5	1800	104.6			
23	1800	92.99			
23.5	1800	82.27			
24	1800	72.41			
24.5	1800	63.37			
25	1800	55.11			
25.5	1800	47.61			
26	1800	40.82			
26.5	1800	34.71			
27	1800	29.24			
27.5	1800	24.38			
28	1800	20.09			
28.5	1800	16.33			
29	1800	13.07			
29.5	1800	10.28			
30	1800	7.92			
30.5	1800	5.95			
31	1800	4.34			
31.5	1800	3.05			
32	1800	2.04			
32.5	1800	1.29			
33	1800	0.74			
33.5	1800	0.38			
34	1800	0.16			
34.5	1800	0.05			
35	1800	0.01			
35.5	1800	0.00			

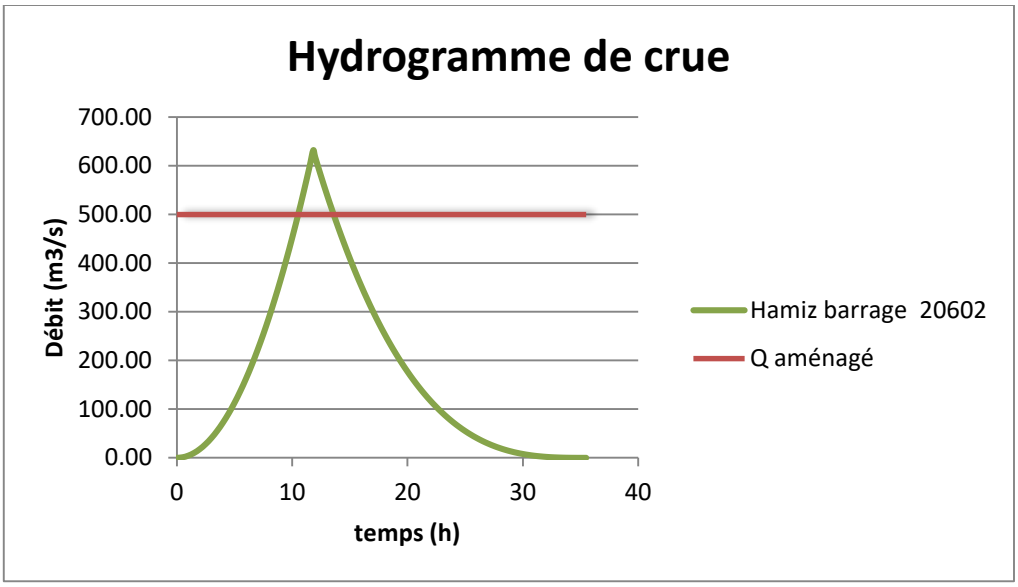


Figure IV. 40 : Hydrogramme de crue.

Le volume du bassin de rétention est : **896967 m³.**

- **Section du géotextile du bassin de rétention**

Tableau IV. 36 : Sections du géotextile du bassin de rétention.

	A (m²)	A total (m²)
fond	258488.27	266749.835
périmètre	8261.5645	

- **Volumes des déblais et remblais du bassin de rétention**

Tableau IV. 37 : Volumes des déblais et remblais du bassin de rétention.

	Volume (m³)
Déblais	775464.81
Remblais	1180.2235

IV.5.4.3.4 Estimation du coût de la variante 3

Tableau IV. 38 : Devis quantitatif estimatif de la variante 3.

	N°	Désignation des travaux	Unité	Quantité	Prix unitaire (DA)	Montant (DA)
Canal	1	Déblais	m3	328894.44	700	230226108
	2	Remblais	m3	53093.27	700	37165289
	3	Enrochement	m3	208251.144	15000	3123767167
	4	Géotextile	m²	208251.144	5000	1041255722
Bassin de rétention	5	Déblais	m3	775464.81	700	542825367
	6	Remblais	m3	1180.2235	700	826156.45
	7	Géotextile	m²	266749.835	5000	1333749173
					Total (DA)	6309814983
					TVA (%)	19
					Total TTC (DA)	7508679829

IV.5.4.3.5 Interprétation de la variante 3

La troisième variante consiste à la conception d'un canal de profil trapézoïdale en enrochement pour oued El Hamiz avec un bassin de rétention à l'amont du projet.

Pour le canal on a pris la largeur au fond (b) disponible qui est de 25 m, et on a proposée pour elle une profondeur de 4 m (amont) et on a choisi un fruit de talus m=2, après avec l'utilisation de l'équation de Manning Strickler nous avons opté le débit aménagée pour le canal qui est de 499.62 m^3/s. Pour le bassin de rétention nous avons utilisée l'hydrogramme de crue pour calculer son volume.

La variante 3 pour le canal a une profondeur à l'amont de projet de 2.1 m, et à l'aval 1.96 m. Elle a une vitesse qui varie entre 3.79 et 4.09 m/s, et un régime d'écoulement fluvial. Pour le bassin de rétention a un volume de 896967 m^3. Les résultats et les dimensions optées assurent le passage de les crues centennal d'oued El Hamiz.

Pour l'estimation du coût de la variante 3 nous avons calculé les volumes des déblais, remblais, d'enrochement et aussi la quantité du géotextile nécessaires pour la réalisation du canal en enrochement et un bassin de rétention. La variante 3 est la plus économique que les deux premières variantes (variante 1 et variante 2).

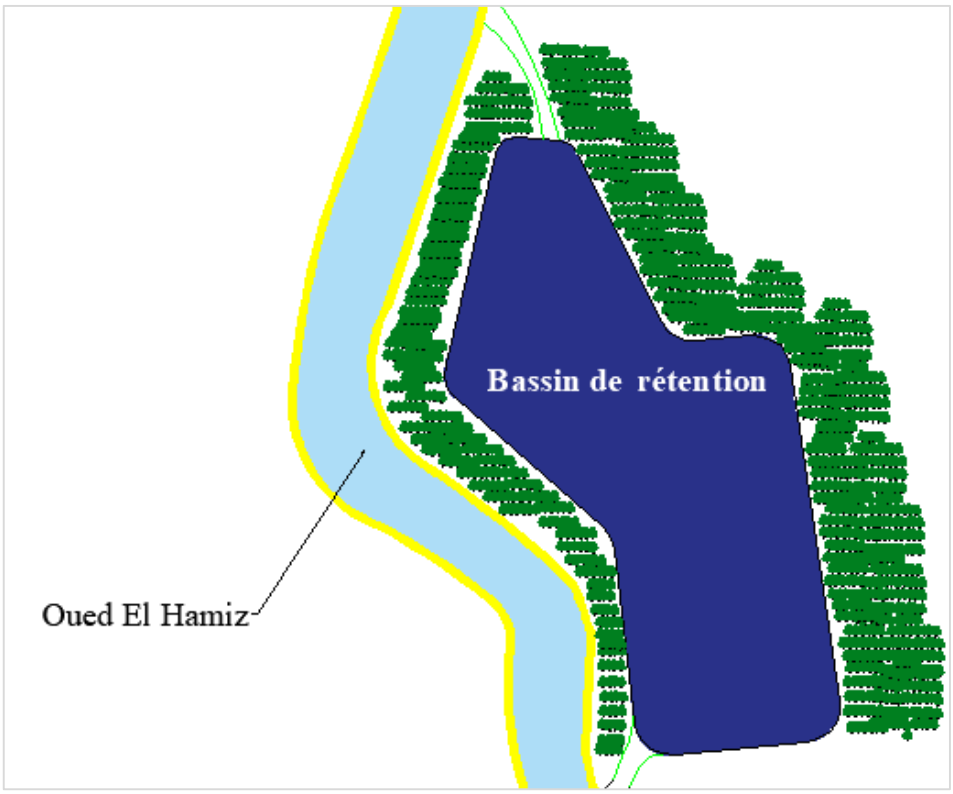


Figure IV. 41 : Présentation du bassin de rétention (emplacement).

IV.6 Variante adoptée pour l'aménagement d'oued El Hamiz

Le choix de la variante d'aménagement d'oued El Hamiz est une décision très importante qui nécessite une évaluation des différentes caractéristiques de chaque variante, après il faut faire une comparaison entre les variantes proposées pour bien choisir la variante adéquate.

Le choix de la variante d'aménagement du cours d'eau oued El Hamiz dépend plusieurs facteurs doivent être pris en compte. Tout d'abord il est essentiel de prendre en considération l'objectif principal du projet qui est la conception d'aménagement d'oued El Hamiz pour protéger les villes de Bordj El Kiffan et Bordj El Bahri contre les crues centennales en évitant le maximum du possible les opérations de démolition ou délocalisation des riverains.

Pour les deux premières variantes : Variante 1, Variante 2, il nous faudra une grande largeur pour l'oued El Hamiz, et dans ces deux cas il faut faire les opérations de démolition et de délocalisation des riverains pour avoir la largeur suffisante pour eux. Pour la troisième variante (Variante 3) on a fait les calculs avec la largeur disponible au terrain qu'elle est inférieure aux largeurs des deux premières variantes.

La variante 3 est la plus économique par rapport aux deux premières variantes (variante 1 et variante 2).

D'après l'étude technico économique nous choisirons la Variante 3 qu'elle est représenté dans la construction d'un canal trapézoïdale en enrochement avec un bassin de rétention.

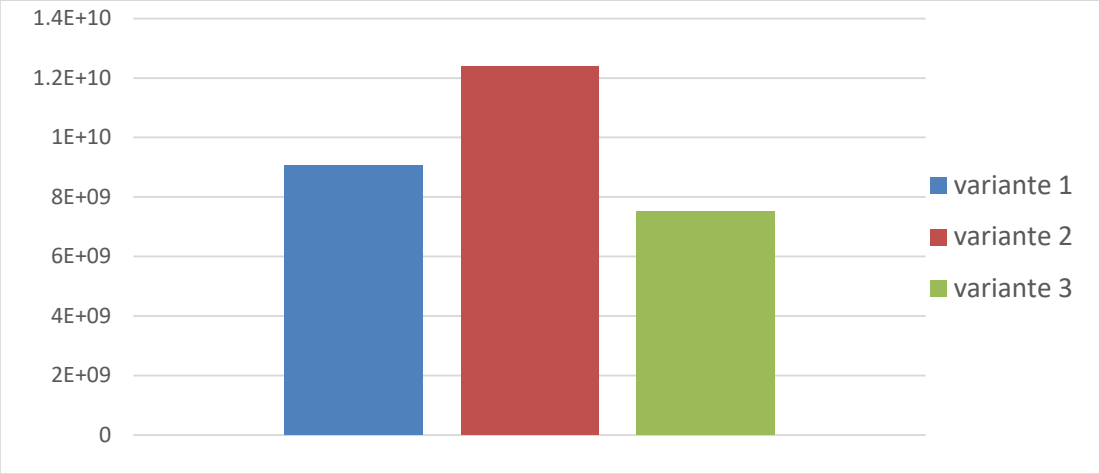


Figure IV. 42 : Histogramme présente les coûts des variantes.

Conclusion

L'étude présenté dans ce chapitre pour la protection des communes de Bordj El Kiffan et Bordj El Bahri contre les risques des inondations d'oued El Hamiz, est une étude essentielle pour la bonne conception d'aménagement nécessaire. Grâce à une compréhension approfondie des principes fondamentaux de l'hydraulique et à la connaissance des notions, lois et équations utilisées pour le calcul des caractéristiques hydrauliques et géométriques de l'aménagement.

Ce chapitre il nous a permis de concevoir et dimensionner des mesures de protection adéquates pour réduire les risques des inondations d'oued El Hamiz. Tel que nous avons proposée trois variantes pour l'aménagement de l'oued El Hamiz qu'ils sont : profil trapézoïdale en enrochement, profil rectangulaire en béton et la dernière c'est un profil trapézoïdal en enrochement avec un bassin de rétention.

Une étude technico-économique a montré que la troisième variante (Variante 3) est la plus adéquate pour la protection qui permettra de préserver la sécurité des habitants des communes concernées ainsi que leurs biens face aux crues centennales d'oued El Hamiz.

Chapitre V
Etude détaillée de la variante d’aménagement adoptée

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons étudier en détail la variante adoptée pour l'aménagement d'oued El Hamiz, qui est représenté dans la conception d'un canal trapézoïdale en enrochement avec un bassin de rétention. L'objectif principal de cette variante choisie est de maitriser le passage des crues centennales en assurant la sécurité des habitants et leurs biens tout le long de ce cours d'eau dans les communes de Bordj El Kiffan et Bordj El Bahri dans la wilaya d'Alger.

V.1 Détails de la variante adoptée

Dans cette section, nous fournirons une description approfondie de la variante d'aménagement choisie pour notre projet protection des villes de Bordj El Kiffan et Bordj El Bahri contre les risques des inondations d'oued El Hamiz, cette variante est représentée dans la conception d'un canal de forme trapézoïdale en enrochement avec un bassin de rétention à l'amont du projet. Cette variante a été choisie après une étude technico-économique, en tenant compte l'objectif principal du projet qui est représentée dans la conception d'un aménagement de l'oued El Hamiz en évitant les opérations de démolitions et de délocalisations des riverains.

Pour notre projet, tout le long de l'oued El Hamiz le site nous impose deux tronçons amont et aval, ils sont séparés par le pont de la RN24, ça veut dire que nous avons deux pentes différentes, ce qui conduit à la conception d'un aménagement de deux variantes pour le canal (variante amont et variante aval). Le bassin de rétention il situe à l'amont du projet d'aménagement d'oued El Hamiz.

Pour le fonctionnement de cette variante adoptée entre le canal et le bassin de rétention, nous allons dimensionner un évacuateur de crue latéral à entonnement latéral, tel que ce dernier il constitue les éléments suivants :

- Canal d'approche.
- Déversoir.
- Bassin de dissipation.

Nous allons calculer la vidange du fond pour le bassin de rétention, et on déduira les dimensions nécessaires pour l'ouvrage de vidange.

Dans les prochaines sections nous allons présenter les caractéristiques principales de cette variante, notamment les dimensions du canal et du bassin de rétention, les dimensions des matériaux nécessaires pour cet aménagement.

V.2 Détails de la conception

V.2.1 Canal trapézoïdale

Pour le canal de la variante adoptée (variante 3) canal de forme trapézoïdale en enrochement sa rugosité n = 0.025, nous allons déterminer son débit aménagée $Q_{aménagée}$ a l'aide de l'équation de Manning Strickler. Le lit de l'oued El Hamiz il nous impose une largeur au fond (b) de 25 m, nous avons proposée pour elle à l'amont du projet une profondeur (y_{amont}) de 4 m avec un fruit de talus m = 2, en utilisant l'équation de Manning Strickler nous déterminons le débit aménagée $Q_{aménagée}$ qu'on va l'utiliser pour calculer la profondeur à l'aval (y_{aval}) et les caractéristiques du canal.

La conception du canal d'oued El Hamiz consiste d'une section transversale de forme trapézoïdale contient du géotextile et d'enrochements.

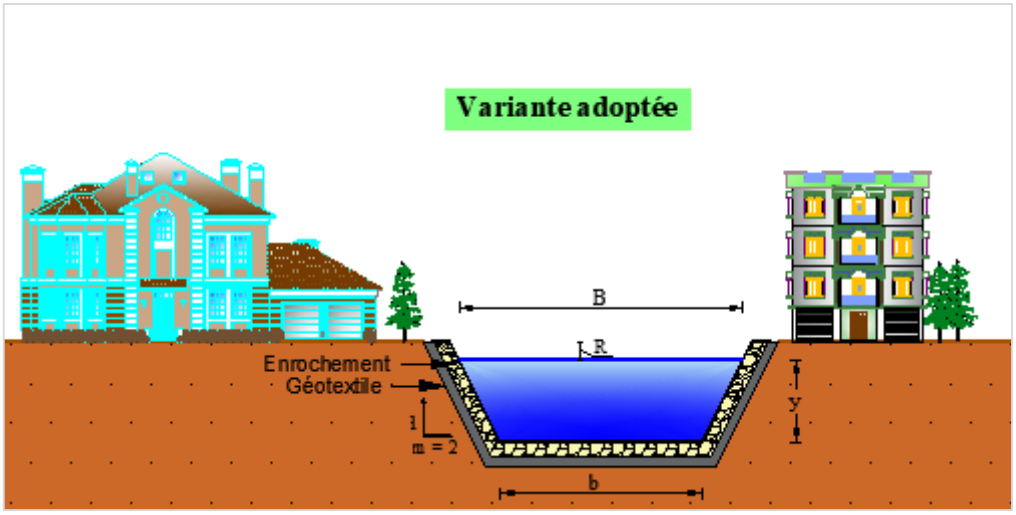


Figure V. 1 : Schéma de la variante adoptée.

Les figures V.2 et V.3 présente le canal de la variante adoptée à l'amont et à l'aval d'oued El Hamiz.

Les caractéristiques du canal de la variante adoptée de l'oued El Hamiz à l'amont et à l'aval sont données dans le tableau suivant (Tableau V.1).

Tableau V. 1 : Caractéristiques du canal de la variante adoptée.

Paramètre	Symbole	Variante adoptée	
		Amont	Aval
Type de section	/	Trapézoïdale	
Largeur au fond (m)	b	25	
Fruit de talus	m	2	
La rugosité	n	0.025	
La pente (%)	I	0.2	0.25
Tirant d'eau (m)	y	4	3.76
Débit (m^3/s)	Q	499.62	499.62
Largeur au miroir (m)	B	41	40.04
Section (m^2)	S	132.00	122.28
Périmètre (m)	P	70.96	65.69
Revanche (m)	R	0.75	0.75

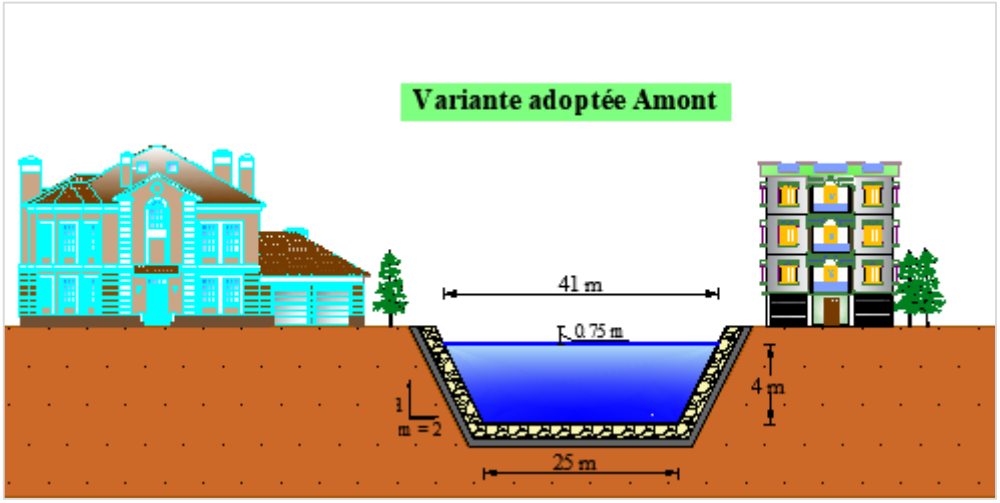


Figure V. 2 : Schéma de la variante adoptée amont.

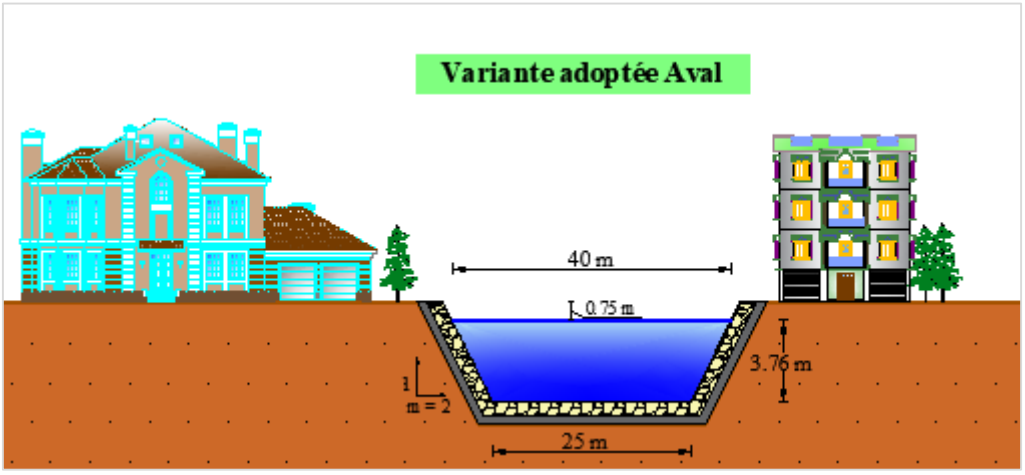


Figure V. 3 : Schéma de la variante adoptée aval.

V.2.2 Déversoir

L'écoulement dans un déversoir est influencé par les caractéristiques géométriques de ce dernier. La forme du profil dépend de plusieurs paramètres, notamment la hauteur (la charge déversant), la longueur …. Nous avons choisi de dimensionner un déversoir de profil type Creager. Ce déversoir fonctionne grâce à une structure en forme de crête qui permet à l'eau de s'écouler de manière contrôlée au-dessus de son sommet.

Le débit déversant est donné par la formule suivante :

$$\boldsymbol{Q_{dév} = C_d\sqrt{2g}LH_D^{\frac{3}{2}}} \quad \text{(V. 1)}$$

Le débit unitaire ou linéaire q en (m3/s/m) est le rapport du débit déversant sur la longueur du déversoir :

$$\boldsymbol{q = \frac{Q_{dév}}{L}} \quad \text{(V. 2)}$$

$$\boldsymbol{q = C_d\sqrt{2g}H_D^{\frac{3}{2}}} \quad \text{(V. 3)}$$

Avec :

- H_D : Charge déversante (m).
- L : Longueur du déversoir (m).
- C_d : Coefficient du débit.

On prend une longueur de 30 m pour le déversoir. Et on calcul H_D :

$$\boldsymbol{Q_{dév} = Q_{projet} - Q_{aménagée}} \quad \text{(V. 4)}$$

$$Q_{dév} = 631.38 - 499.62 = 131.76$$

$$Q_{dév} = 132\ m^3/s$$

$$q = \frac{132}{30} = 4.4\ m^3/s\ /m$$

$$\boldsymbol{H_D = \left(\frac{q}{C_d\sqrt{2g}}\right)^{\frac{2}{3}}} \quad \text{(V. 5)}$$

$$H_D = \left(\frac{4.4}{0.49\sqrt{2 * 9.81}}\right)^{\frac{2}{3}} = 1.6\ m$$

En 1929, William Pitcher Creager (1878-1953) a basé ses recherches sur un modèle de barrage-déversoir spécifique fonctionnant sous une charge de H = 1 m. Il a compilé les coordonnées x et z du profil par rapport à la surface amont de ce barrage-déversoir, comme indiqué dans le tableau 2 de ses travaux.

Tableau V. 2 : Coordonnées du profil du barrage déversoir type Creager pour H = 1 m.

Coordonnées pour construire le profil du déversoir d'après Creager pour H = 1 m			
H (m)	x/H	surface intérieure (profil) Y/H	surface extérieure Y'/H
H = 1 m	0	0.126	-0.831
	0.1	0.036	-0.803
	0.2	0.007	-0.772
	0.3	0	-0.74
	0.4	0.007	-0.702
	0.6	0.06	-0.62
	0.8	0.147	-0.511
	1	0.256	-0.38
	1.2	0.393	-0.219
	1.4	0.565	-0.03
	1.7	0.873	0.305
	2	1.235	0.693
	2.5	1.96	1.5
	3	2.824	2.5

Les coordonnées pour construire le profil du déversoir d'après Creager pour H = 1.6 m, sont présentées dans le tableau suivant (Tableau V.3) :

Tableau V. 3 : Coordonnées du profil du déversoir type Creager pour H = 1.6 m.

Profil du déversoir d'après Creager pour H = 1.6 m			
H (m)	X	Y	Y'
H = 1.6 m	0.00	0.20	-1.33
	0.16	0.06	-1.29
	0.32	0.01	-1.24
	0.48	0.00	-1.19
	0.64	0.01	-1.12
	0.96	0.10	-0.99
	1.28	0.24	-0.82
	1.60	0.41	-0.61
	1.92	0.63	-0.35
	2.24	0.91	-0.05
	2.72	1.40	0.49
	3.20	1.98	1.11
	4.00	3.14	2.40
	4.81	4.52	4.00

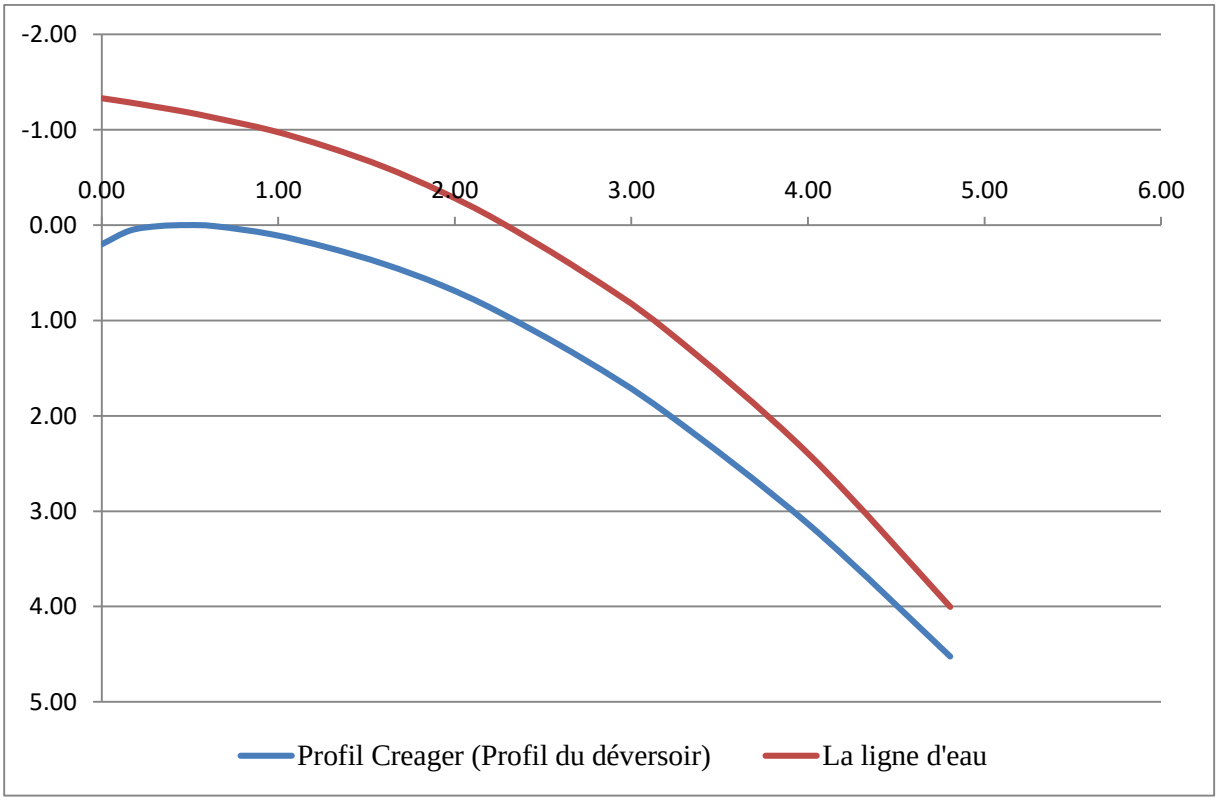


Figure V. 4 : Profil du déversoir d'après Creager pour H = 1.6 m.

V.2.3 Canal d'approche

Le canal d'approche, situé en amont du déversoir, est un canal artificiel conçu pour diriger en douceur le flux de crue vers le seuil du déversoir. Il est nécessaire de calculer la vitesse d'approche V_a afin d'évaluer l'impact de l'écoulement sur le canal d'approche.

La vitesse d'approche est calculée par la formule suivante :

$$\boldsymbol{V_a = \frac{Q_{dév}}{S_c}} \qquad \text{(V. 6)}$$

Avec :

- $Q_{dév}$: débit maximum à évacuer (m^3/s).
- S_c : Section du canal d'approche de forme rectangulaire

$$\boldsymbol{S_c = L * h} \qquad \text{(V. 7)}$$

-
- P : Hauteur de la pelle (m) P = 4m.
- H : La charge d'eau sur le déversoir H = 1.6 m.
- h : Charge hydraulique. h = 5.6 m.

$$\boldsymbol{h = P + H} \qquad \text{(V. 8)}$$

- L : longueur du déversoir L = 30 m.

$$V_a = \frac{132}{30 * (1.6 + 4)} = 0.79\ m/s$$

$V_a = 0.79\ m/s \leq V_{adm} = 4m/s$ Pas de risque d'érosion.

- H_{mur} : Hauteur du mur de canal d'approche (m).

$$\boldsymbol{H_{mur} = h + R} \qquad \text{(V. 9)}$$

- R : Revanche (m). R = 0.75 m.

$$H_{mur} = 5.6 + 0.75 = 6.35\ m$$

V.2.4 Ouvrages dissipateurs d'énergie

Lorsque l'eau traverse un déversoir, elle arrive en bas de la structure avec une quantité significative d'énergie cinétique. L'objectif est de dissiper cette énergie, plutôt que de la laisser agir sur le fond ou les rives, ce qui pourrait éventuellement provoquer un affouillement de la structure du déversoir. Pour atteindre cet objectif, les déversoirs sont généralement suivis par un autre type d'ouvrage appelé ouvrage de dissipation.

Le U.S. Bureau of Reclamation a mené des études approfondies sur les différentes méthodes de dissipation de l'énergie cinétique de l'eau, et les résultats de ces recherches ont été publiés dans le livre "Design of Small Dams". Parmi les méthodes les plus couramment utilisées pour dissiper cette énergie, on retrouve les bassins à ressaut, qui se sont avérés être un moyen très efficace pour réduire la vitesse de sortie de l'eau à un niveau compatible avec la stabilité des rives en aval.

Le principe de la dissipation de l'énergie du flux consiste à provoquer un ralentissement brusque de la vitesse de l'écoulement, ce qui entraîne un changement du régime d'écoulement de torrentiel à fluvial. La forme et le type de bassin utilisé dépendent de l'intensité de l'écoulement torrentiel.

V.2.4.1 Détermination du type de bassin de dissipation

Le ressaut hydraulique est provoqué par un changement de régime d'écoulement et dépend principalement du nombre de Froude ainsi que de l'efficacité de la dissipation d'énergie de l'écoulement. Il se manifeste sous différentes classes : ressaut libre, ressaut forcé ou ressaut submergé.

Les tests réalisés par l'USBR (United States Bureau of Reclamation) ont clairement démontré que le ressaut hydraulique est directement influencé par le nombre de Froude.

Tableau V. 4 : Choix du type de bassin de dissipation selon l'USBR.

Fourchette du nombre de Froude	Type de ressaut hydraulique
$1 \leq F_r \leq 1.7$	Ressaut ondulé
$1.7 \leq F_r \leq 2.5$	Ressaut faible de petites apparitions en surface
$2.5 \leq F_r \leq 4.5$	Ressaut oscillant
$4.5 \leq F_r \leq 9$	Ressaut stable
$F_r \geq 9$	Ressaut fort (écoulement très turbulent)

- **Calcul de la vitesse à l'entrée du bassin de dissipation**

La vitesse à l'entrée du bassin de dissipation est déterminée en utilisant le principe de conservation d'énergie de Bernoulli entre les sections (1) et (2).

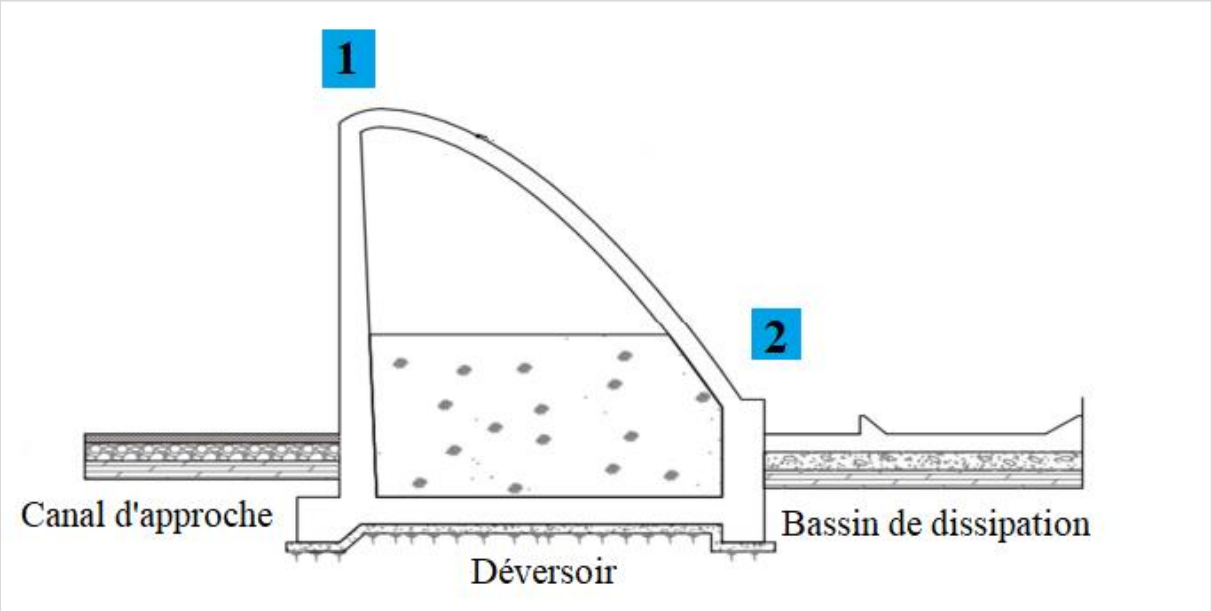


Figure V. 5 : Principe de conservation d'énergie de Bernoulli.

Avec l'application du principe de conservation d'énergie entre (1) et (2), nous aurons :

$$\boldsymbol{P + H_d = \frac{{V_1}^2}{2g} + y_1} \qquad \text{(V. 10)}$$

Avec :

$$\boldsymbol{V_1 = \frac{q}{y_1}} \qquad \text{(V. 11)}$$

En substituant les valeurs et les expressions appropriées dans l'équation précédente (V.10), nous optons :

$$\boldsymbol{y_1^3 - 109.87 y_1^2 + 19.36 = 0} \qquad \text{(V. 12)}$$

Le polynôme (V.12) de 3ème dégrée à une racine évidente de la première hauteur conjuguée :

$$y_1 = 0.42\ m$$

Alors :

$$V_1 = \frac{q}{y_1} = \frac{4.4}{0.42} = 10.48\ m/s$$

- **Calcul du nombre de Froude F_r**

Le nombre de Froude (Fr) est défini comme le rapport entre la vitesse d'écoulement (V) et la racine carrée du produit de la gravité (g) et de la profondeur de l'écoulement (y).

$$\boldsymbol{F_r = \frac{V}{\sqrt{g y_1}}} \qquad \text{(V. 13)}$$

$$F_r = \frac{10.48}{\sqrt{9.81 * 0.42}} = 5.16$$

$4.5 < F_r = 5.16 < 9$. Le ressaut se produit, et il s'agit d'un ressaut stable.

- **Choix du type de bassin de dissipation**

On a :

- Fr = 5.16 > 4.5.
- V = 10.48 m/s < 15 m/s.

D'après USBR, le bassin de dissipation le plus favorable est un bassin USBR de type II.

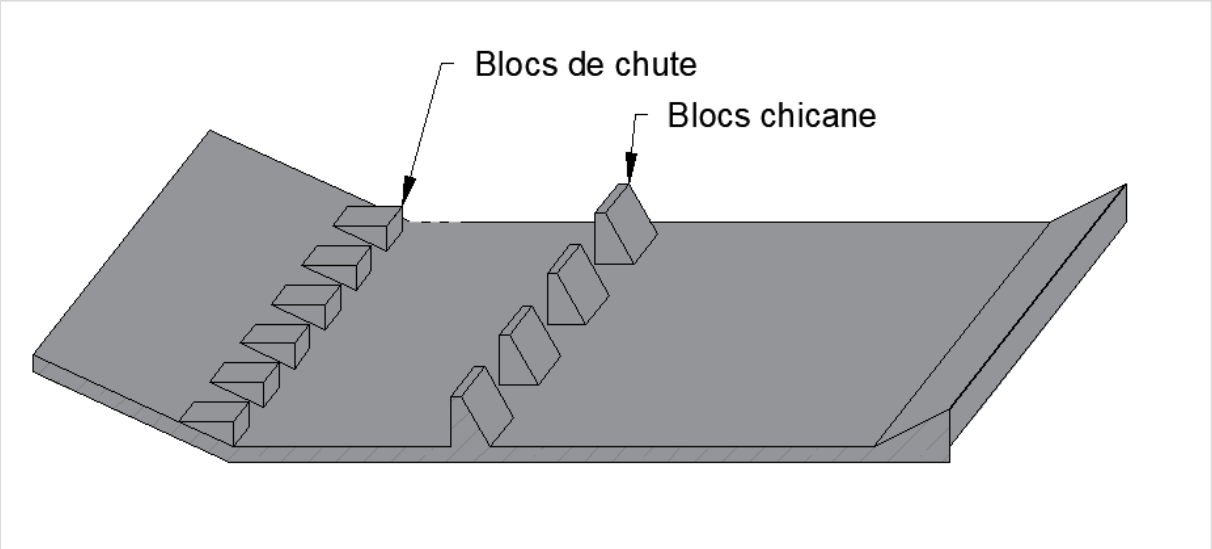


Figure V. 6 : Bassin de dissipation USBR type II.

V.2.4.2 Dimensionnement du bassin de dissipation

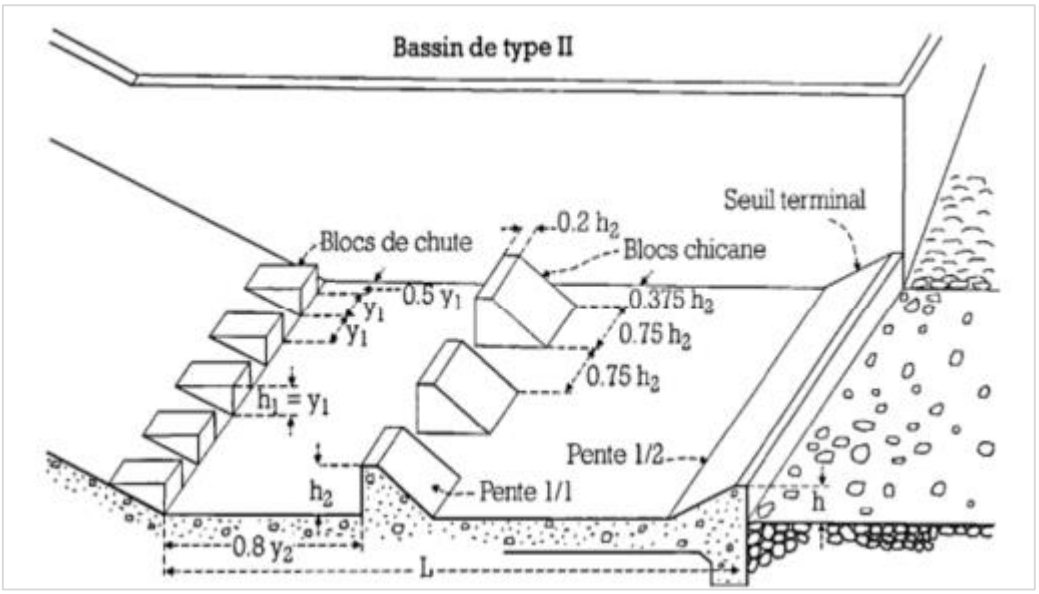


Figure V. 7: Schéma du bassin de dissipation de type II.

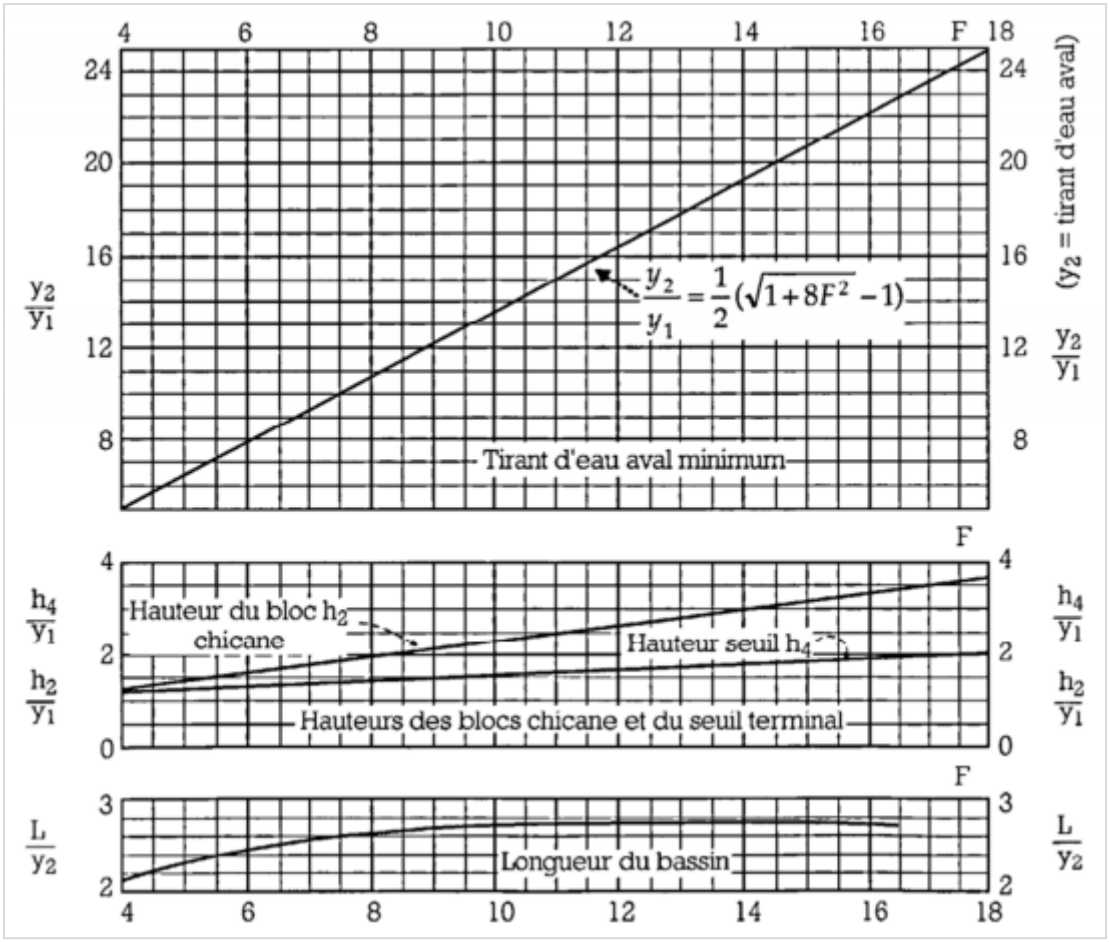


Figure V. 8 : Abaque pour la détermination des caractéristiques du bassin de dissipation type II.

Pour dimensionner le bassin de dissipation, blocs de chute et blocs de chicane, il est nécessaire de commencer par déterminer les profondeurs conjuguées, la hauteur du bloc chicane, la hauteur du seuil, et la longueur du bassin. On utilise la projection du nombre de Froude sur l'abaque approprié (Figure V.8) pour guider le dimensionnement des blocs de chute et de chicanes.

D'après l'abaque :

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2}\left(\sqrt{1 + 8{F_r}^2} - 1\right) = 7$$

$$\frac{h_2}{y_1} = 1.5$$

$$\frac{h_4}{y_1} = 1.25$$

$$\frac{L}{y_2} = 2.4$$

Avec :

- y_1 : tirant d'eau avant le ressaut (m).
- y_2 : tirant d'eau après le ressaut (m).
- h_2 : hauteur du bloc de chicane (m).
- h_4 : hauteur du seuil (m).
- L : longueur de bassin de dissipation.

On aura :

$$y_2 = 7y_1 = 7 * 0.42 = 2.94\ m$$

$$h_2 = 1.5y_1 = 1.5 * 0.42 = 0.63\ m$$

$$h_4 = 1.25y_1 = 1.25 * 0.42 = 0.525\ m$$

$$L = 2.4y_2 = 2.4 * 2.94 = 7.056\ m$$

- **Dimensionnement des blocs de chute**

$$h_1 = y_1 = 0.42\ m$$

$$W_1 = y_1 = 0.42\ m$$

$$S_1 = y_1 = 0.42\ m$$

$$e_1 = \frac{y_1}{2} = 0.21\ m$$

$$n = \frac{b}{2y_1} = 35\ blocs$$

Avec :

- h_1 : hauteur du bloc de chute (m).
- W_1 : l'épaisseur du bloc de chute (m).
- S_1 : l'espacement entre deux blocs de chute (m).
- e_1 : l'espacement entre le mur et le premier bloc de chute (m).
- n : nombre de bloc de chute.

- **Calcul de l'espacement entre les blocs de chute et les blocs de chicane**

$$e_s = 0.8y_2 = 0.8 * 2.94 = 2.35\ m$$

- **Dimensionnement des blocs de chicane**

$$h_2 = 0.63\ m$$

$$W_2 = 0.75h_2 = 0.75 * 0.63 = 0.47\ m$$

$$S_2 = 0.75h_2 = 0.75 * 0.63 = 0.47\ m$$

$$W_s = 0.2h_2 = 0.2 * 0.63 = 0.126\ m$$

$$e_2 = 0.375h_2 = 0.2 * 0.63 = 0.24\ m$$

$$n = \frac{b}{1.5h_2} = 32\ blocs$$

Avec :

- h_2 : hauteur du bloc de chicane (m).
- W_2 : l'épaisseur du bloc de chicane (m).
- S_2 : l'espacement entre deux blocs de chicane (m).
- W_s : Epaisseur supérieur (m).
- e_2 : l'espacement entre le mur et le premier bloc de chicane (m).
- n : nombre de bloc de chicane.

Tableau V. 5 : Résultats des dimensions du bassin de dissipation USBR type II.

Paramètre		Symbole	Unité	Valeurs
Vitesse à l'entrée du bassin		V_1	m/s	10.48
Nombre de Froude		F_r	/	5.16
Tirant d'eau avant le ressaut		y_1	m	0.42
Tirant d'eau après le ressaut		y_2	m	2.94
Longueur de bassin de dissipation		L	m	7.056
Bloc de chute	**Hauteur**	h_1	m	0.42
	Epaisseur	W_1	m	0.42
	Espacement entre deux blocs	S_1	m	0.42
	Espacement entre le mur et le premier bloc	e_1	m	0.21
	Nombre de bloc	n	/	35
Espacement entre les blocs de chutes et blocs chicane		e_s	m	2.352
Blocs chicane	**Hauteur**	h_2	m	0.63
	Epaisseur	W_2	m	0.47
	Epaisseur supérieur	W_s	m	0.126
	Espacement entre deux blocs	S_2	m	0.47
	Espacement entre le mur et le premier bloc	e_2	m	0.24
	Nombre de blocs	n	/	32

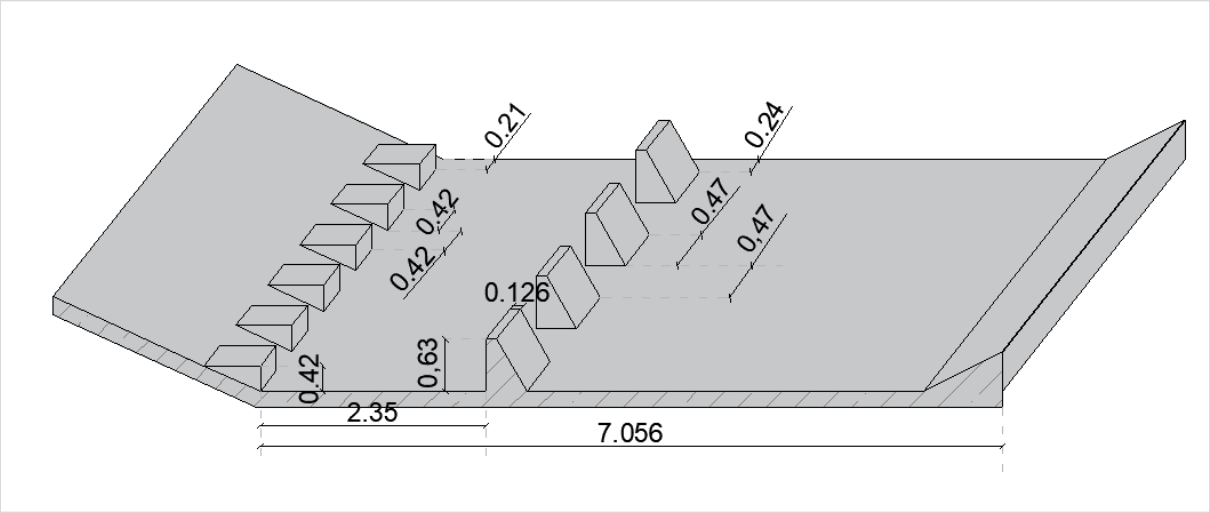


Figure V. 9 : Schéma du bassin de dissipation du projet d'aménagement oued El Hamiz.

V.2.5 Bassin de rétention

La conception du bassin de rétention est un élément essentiel pour notre projet d'aménagement d'oued El Hamiz. Ce bassin joue un rôle efficace dans la gestion des eaux pluviales (les crues) en contribuent à réduire les d'inondations à l'aval d'oued El Hamiz.

Le choix d'emplacement du bassin de rétention a été basé sur divers critères, notamment la topographie du site, la surface disponible pour stocker le volume nécessaire.

La capacité du bassin de rétention a été calculée pour répondre aux besoins du projet en termes de la gestion pour réduire les risques des inondations. Les calculs ont pris en compte le débit d'écoulement et la superficie du bassin. Le bassin a été dimensionné de manière à accueillir efficacement les eaux de ruissellement tout en permettant leur libération contrôlée par l'ouvrage de vidange.

Nous avons calculé le volume du bassin de rétention à l'aide de l'hydrogramme de crue d'oued El Hamiz, et on prend en considération le débit du canal de la variante adoptée $Q_{aménagée}$ = 499.62 m^3/s. Après on calcul la différence entre le débit entrant el le débit du canal, ensuite on obtient les débits entrant dans le bassin de rétention. Le volume de la crue entrant dans le bassin de rétention se calcul par la formule suivante :

$$\vartheta_{entrant\ B.R} = \sum Q_{entarnt\ B.R} * \Delta t \qquad \text{(V. 14)}$$

$$Q_{entarnt\ B.R} = I - Q_{aménagée} \qquad \text{(V. 15)}$$

Avec :

- $\vartheta_{entrant\ B.R}$: Volume entrant dans le bassin de rétention (m^3).
- $Q_{entarnt\ B.R}$: Débit entrant dans le bassin de rétention (m^3/s).
- Δt : intervalle de temps.
- I : Débit entrant (à partir de l'hydrogramme de crue) (m^3/s).
- $Q_{aménagée}$: Débit aménagée (débit du canal 499.62 m^3/s).

Les caractéristiques du bassin de rétention sont présentées dans le tableau suivant ci-dessous :

Tableau V. 6 : Caractéristiques du bassin de rétention.

	Unité	Valeurs
Superficie	m^2	258488.27
Périmètre	m	2360.447
Hauteur	m	3.5
Volume	m^3	896967
Quantité du géotextile	m^2	266749.835

V.2.5 Ouvrage de vidange

L'ouvrage de vidange est une infrastructure ou un dispositif conçu pour assurer la vidange totale ou partielle des eaux stockées.

L'ouvrage de vidange dans un bassin de rétention est conçu pour vider les eaux pluviales stockées en réduisant les risques d'inondation à l'aval lors de la crue, et pour protéger les zones habitées tout au long du cours d'eau.

a. Calcul du débit de vidange

Pendant la période de vidange du bassin de rétention, le volume d'eau a évacué est le volume stockée dans le bassin. Pour le calcul du débit de la vidange du fond on prend juste le volume stockée dans le bassin de rétention.

Lors de notre conception du système d'aménagement d'oued El Hamiz, nous avions pris en considération que le vidange il ne se fait pas lors la crue centennale, pour objectifs d'éviter les débordements à l'aval (en canal).

Le débit de la vidange de fond est calculé par la formule suivante :

$$\boldsymbol{Q_{vf} = \frac{\vartheta_{br}}{T} + Q_e} \qquad \text{(V. 16)}$$

Q_{vf} : Débit de vidange du fond.
ϑ_{br} : Volume du bassin de rétention, ϑ_{br} = 896967 m^3.
T : Temps de vidange, T = 7 heures.
Q_e : Débit entrant dans le bassin. Q_e = 0 m^3/s.

En utilisant l'équation (V.16) on calcule le débit de vidange :

$$Q_{vf} = \frac{896967}{7 * 60 * 60} + 0 = 35.59\ m^3/s$$

b. Calcul de la section du vidange

Nous choisirons la section de la vidange de forme rectangulaire, le calcul pour déterminer les dimensions nécessaires il se fait par la formule d'écoulement en charge suivante :

$$\boldsymbol{Q_{vf} = \mu S\sqrt{2gZ}} \qquad \text{(V. 17)}$$

μ : coefficient de débit μ ∈ (0.8 ÷ 0.85), nous prenons μ=0.80.
S : section de la vidange.
Z : différence de niveau d'eau entre l'amont et l'aval de la vidange. Z = 2 m.

Alors :

$$\boldsymbol{S = \frac{Q_{vf}}{\mu\sqrt{2gZ}}}$$

$$S = \frac{35.59}{0.8\sqrt{2 * 9.81 * 2}} = 7.1\ m^2$$

Pour les dimensions (largeur et hauteur) de la section on les fixes selon la vanne à prendre :

On prend pour la largeur du vanne l = 3 m, et on calcul la hauteur nécessaire pour le vidange.

$$\boldsymbol{S_{vidange} = l_{vanne} * h} \qquad \text{(V. 18)}$$

l_{vanne} : largeur du vanne.
h_{vanne} : hauteur de la vanne.

$$h = \frac{S_{vidange}}{l_{vanne}} = \frac{7.1}{3} = 2.36\ m \approx 2.5\ m$$

Les dimensions de la vanne de vidange de la forme rectangulaire pour une période de 7 heures sont comme suit :

l_{vanne} = 3 m,
h_{vanne} = 2.5 m.

V.3 Calcul d'enrochements

Le rocher est un matériau de construction couramment utilisé en milieu fluvial, aquatique ou maritime sous forme de granulat ou d'enrochement. Il est mis en œuvre pour protéger contre les crues, l'érosion et les affouillements la submersion marine.

L'enrochement naturel, extrait de carrières, est défini comme étant un matériau granulaire utilisé dans les ouvrages hydrauliques et d'autres ouvrages de génie civil. La masse des blocs varie de 1kg approximativement à 20-30 t. Le matériau rocheux peut être employé comme enrochement en carapace, en filtre et en sous-couche, ou comme un matériau de remplissage.

On ajoute du géotextile sous la carapace en enrochement pour séparer le sol du matériaux (roches).

V.3.1 Dimensions d'enrochements

Enrochement c'est une technique très fréquente qui consiste à stabiliser les berges et le fond par un empilement d'enrochement de carrière avec un fruit des talus assez faible de l'ordre de 3/2 à 2/1 pour l'enrochement libre sans lien de béton.

Pour une protection en enrochement sur fond plat, la formule d'Isbash ci-après donne le diamètre médian D_{50} des blocs en fonction de la vitesse V du courant à leur voisinage.

$$\boldsymbol{D_{50\,fond} = \frac{1}{0.7} \times \frac{V^2}{2g\Delta}} \qquad \text{(V. 19)}$$

Avec :

V : vitesse du courant (m/s).

Δ : densité apparente (déjaugée) des matériaux de protection.

$$\Delta = \frac{\boldsymbol{\rho_{app} - \rho_{eau}}}{\boldsymbol{\rho_{eau}}} \qquad \text{(V. 20)}$$

ρ_{app} : masse volumique apparente de la roche (t/m3).

ρ_{eau} : masse volumique de l'eau (t/m3).

Pour les enrochements posés sur un talus, E.W Lane propose de diviser le diamètre calculé pour un fond plat par le facteur $\sqrt{1 - \frac{sin^2\,\beta}{sin^2\,\varphi}}$:

$$\boldsymbol{D_{50\,talus} = \left(\frac{1}{m} \times \frac{V^2}{2g\Delta}\right) \Big/ \sqrt{1 - \frac{sin^2\,\beta}{sin^2\,\varphi}}} \qquad \text{(V. 21)}$$

Où :

m: coefficient d'Isbash dépendant de la position individuelle du bloc. m = 0.7 ou 1.4.

β : angle du talus avec l'horizontale ;

φ : angle au repos des matériaux (φ ≥ 40°).

Le diamètre D et le diamètre nominal D_n sont proportionnels pour une forme d'enrochement donnée. Laan (1981) a déterminée de façon expérimentale, une constante de conversion recommandée à partir de l'étude de plusieurs types de roches et granulométrie d'enrochement.

$$\boldsymbol{D_n = 0.84D} \qquad \text{(V. 22)}$$

Les critères de dimensionnement déterminent l'épaisseur des carapaces, Le concepteur fixe l'épaisseur de la couche pour qu'elle corresponde à une fraction d'une taille caractéristique généralement D_{n50}, pour le calcul de l'épaisseur, les volumes et le nombre des blocs on doit utiliser le D_{n50}.

Epaisseur orthogonale théorique t_d (m):

$$t_d = n.k_t.D_{n50} \quad \text{(V. 23)}$$

Volume globale de dimensionnement $\vartheta_{b.d}$ (m^3):

$$\vartheta_{b.d} = A.t_d \quad \text{(V. 24)}$$

$$A = L.l \quad \text{(V. 25)}$$

Volume de roche ϑ_r (m^3) :

$$\vartheta_r = \vartheta_b(1 - n_v) \quad \text{(V. 26)}$$

$$n_v = \frac{e}{1+e} \quad \text{(V. 27)}$$

Nombre total de blocs dans la zone considérée :

$$N_a = n.A.k_t.(1 - n_v)/D_{n50}^2 \quad \text{(V. 28)}$$

Où :

A: Air totale (m^2).
L : Longueur (m).
l : largeur (m).
n: nombre de couches.
n_v: porosité de couche, varie de 32 % à 40 %.
k_t: coefficient d'épaisseur de couche, varie de 0.71 à 1.03.

Les résultats de calcul sont récapitulés dans le tableau 7 :

Tableau V. 7 : Résultats du calcul d'enrochements.

Paramètre	Unité	Valeurs	
		Amont	Aval
Δ	/	1.65	1.65
$D_{50\ fond}$	m	0.71	0.71
$D_{50\ talus}$	m	1.08	1.08
$D_{n50\ fond}$	m	0.59	0.59
$D_{n50\ talus}$	m	0.91	0.91
$t_{d\ fond}$	m	0.59	0.59
$t_{d\ talus}$	m	0.91	0.91
A_{fond}	m^2	74125	39375
A_{talus}	m^2	62984.4	31766.7
$\vartheta_{b.d\ fond}$	m^3	43962.56	23352.79
$\vartheta_{b.d\ talus}$	m^3	57042.11	28769.64
$\vartheta_{b.d\ total}$	m^3	101004.67	52122.43
$N_{a\ fond}$	/	126438.52	67163.80
$N_{a\ talus}$	/	46074.43	23238

La granularité étalée des roches est une propriété essentielle dans la conception d'enrochement. La répartition des tailles des roches dans une structure est pour but de remplir les vides.

Pour permettre une meilleure imbrication des roches on adoptera une granularité étalée, tel que :

$$D_{min} > 0.7D \quad \text{(V. 29)}$$

$$D_{50} \geq D \quad \text{(V. 30)}$$

$$D_{max} < 2D \quad \text{(V. 31)}$$

Tableau V. 8 : Granularités des roches.

	Paramètre	Unité	Valeurs	
			Amont	Aval
Fond	$D_{n\,min}$	m	0.47	0.47
	$D_{n\,50}$	m	0.59	0.59
	$D_{n\,max}$	m	0.89	0.89
Talus	$D_{n\,min}$	m	0.72	0.72
	$D_{n\,50}$	m	0.91	0.91
	$D_{n\,max}$	m	1.36	1.36

V.3.2 Quantité du géotextile

Le géotextile est un matériau synthétique fabriqué à partir de fibres polymères. Il est conçu spécifiquement pour être utilisé dans des applications géotechniques et de génie civil. Le géotextile se présente sous forme de tissu est caractérisé par ses propriétés de filtration, de renforcement, et de séparation des matériaux du sol.

La quantité du géotextile est exprimé en m², alors on calcul les sections à couvrir par le géotextile.

Tableau V. 9 : Quantité du géotextile du canal de la variante adoptée.

	A (m²)
Variante adoptée (canal)	208251.144

V.4 Etude de stabilité des talus

L'étude de stabilité des talus est une discipline fondamentale de la géotechnique qui vise à évaluer la résistance des pentes face aux forces qui les menacent. Comprendre la stabilité des talus est essentiel pour garantir la sécurité des infrastructures, des habitations et des personnes qui vivent à proximité de ces pentes. Cette étude implique l'analyse des propriétés géologiques et géotechniques du sol. Pour l'étude de stabilité nous allons utiliser le logiciel du GeoStudio.

V.4.1 Présentation du logiciel GeoStudio

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

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

V.4.2 Facteur de sécurité F_s

Le facteur de sécurité (F_S) est une mesure clé 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 résister aux charges et aux 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.4.2 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 :

- Commencez par créer un modèle géométrique du talus que vous souhaitez analyser. Cela implique de définir les dimensions, les angles de pente, et d'autres caractéristiques géométriques du talus.
- Entrez les propriétés géotechniques des matériaux du talus, telles que la cohésion, l'angle de frottement interne, la densité, etc. Il peut s'agir de données spécifiques au site ou de valeurs de référence provenant de tests de laboratoire.
- Spécifiez les conditions de charge, notamment la pression de l'eau, les charges de surcharge,
- Choisissez le type d'analyse que vous souhaitez effectuer, par exemple, une analyse des cercles de glissement, une analyse des tranches, etc. Configurez également les paramètres de l'analyse, tels que le facteur de sécurité cible.
- Utilisez les informations géométriques, les propriétés des matériaux, les conditions de charge et les conditions de contrainte pour générer un modèle numérique du talus dans SLOPE/W.
- Lancez l'analyse en utilisant les paramètres définis. SLOPE/W effectuera des calculs pour évaluer la stabilité du talus en fonction des paramètres d'entrée.

V.4.3 Etude et résultats

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

Pour l'étude d'aménagement d'oued El Hamiz et pour la protection des villes de Bordj El Kiffan et Bordj El Bahri, 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.

Dans le tableau ci-dessous on présente les caractéristiques obtenues de l'étude géotechnique à prendre pour le calcul de la stabilité des talus.

Tableau V. 10 : Résultats des essais géotechniques.

Paramètre	Symbole	Unité	Valeurs	
			De l'embouchure de mer jusqu'à le pont de la RN24	Du pont de la RN24 jusqu'à Oued Bakora
Densité	γ_d	t/m^3	1.9	2
Cohésion	C_{uu}	bars	0.25	0.5
Angle de frottement	φ	°	18	14

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 4 m de haut du fond.

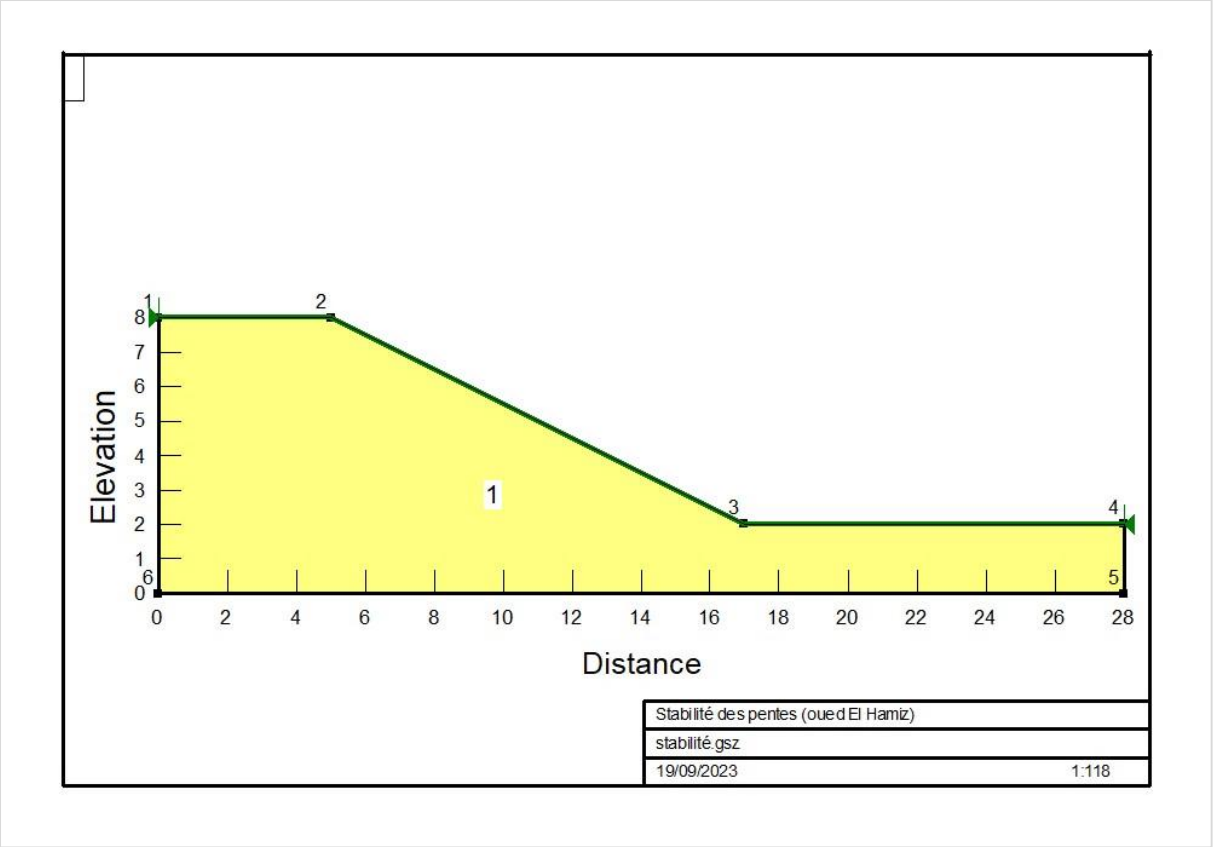


Figure V. 10 : Géométrie du talus.

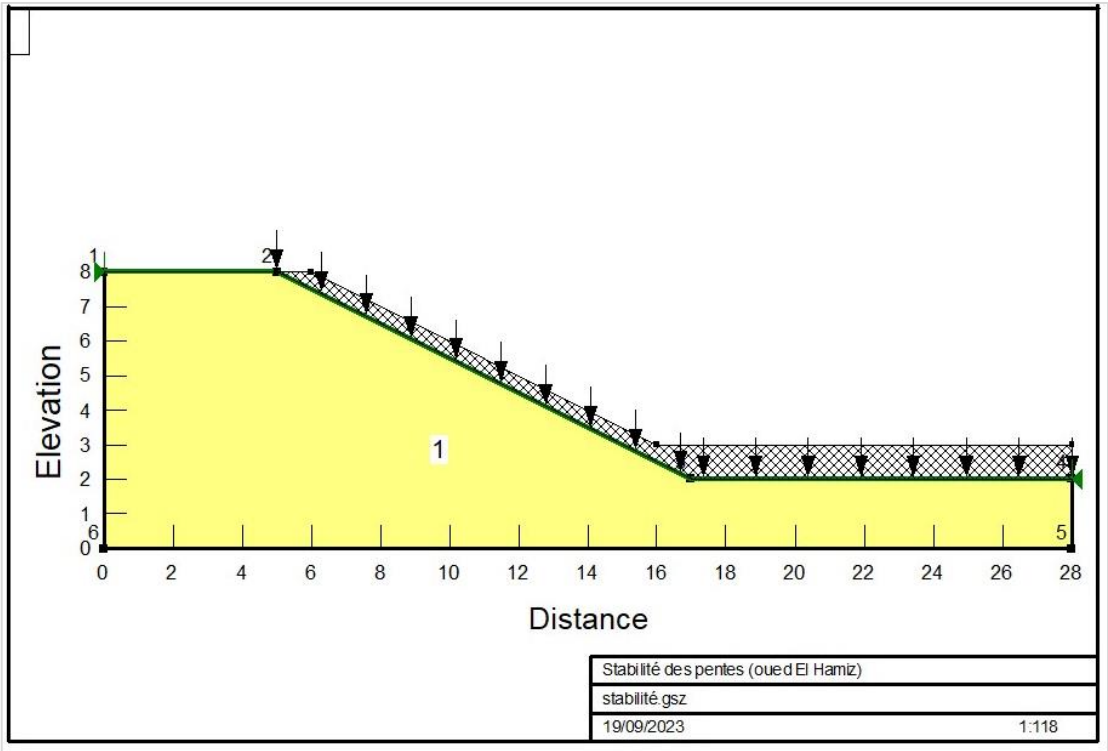


Figure V. 11 : Application des charges des rochers.

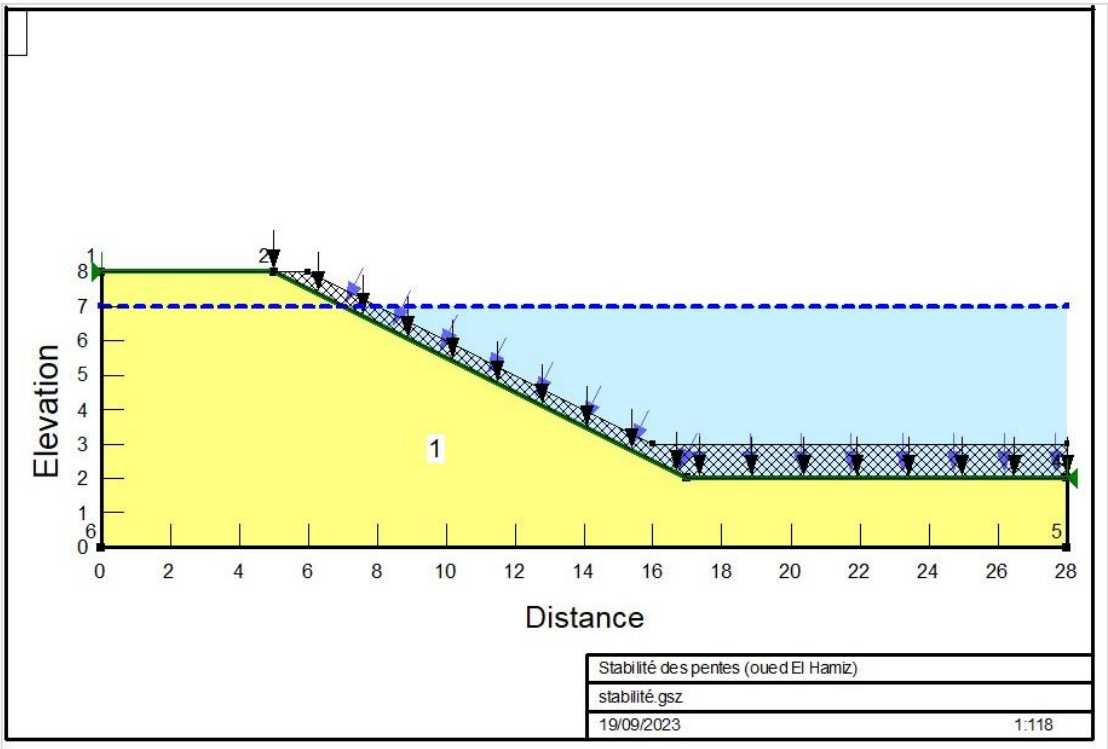


Figure V. 12 : Dessin de la ligne pièzométrique.

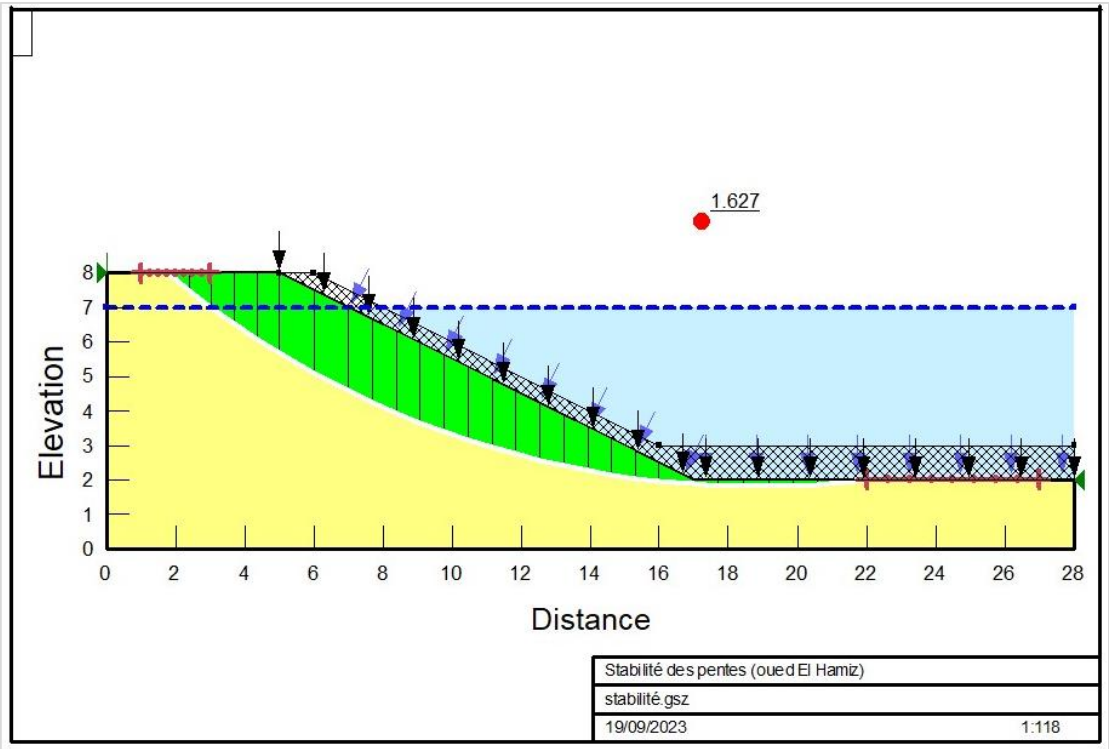


Figure V. 13 : Résultats de calcul (cercle critique du talus).

Tableau V. 11 : Caractéristique du cercle critique du talus amont.

Coefficient de sécurité Fs	Centre en X(m)	Centre en Y (m)	Rayon (m)
1.627	18.872	28.615	26.799

La valeur minimale du facteur de sécurité est de 1.627, ce qui correspond à un centre de cercle critique. Il est essentiel que le coefficient de sécurité soit supérieur au coefficient de sécurité admissible, c'est-à-dire Fs = 1.627 > 1. Cela signifie que le talus analysé a une marge de sécurité satisfaisante par rapport à ses conditions de charge ou d'utilisation, ce qui est un élément crucial pour garantir sa stabilité et sa fiabilité.

V.5 Modélisation hydraulique et simulation

La modélisation et la simulation hydraulique est une étape essentielle de notre étude détaillée de la variante adoptée pour le projet d'aménagement d'oued El Hamiz. L'objectif principal de cette phase était d'évaluer la capacité de notre conception à gérer les crues centennales tout en maintenant la sécurité des habitants des communes de Bordj El Kiffan et Bordj El Bahri.
Nous avons utilisé le logiciel HEC-RAS pour créer un modèle hydraulique représentatif de la zone d'étude. Ce modèle est alimenté par des données topographiques du terrain et d'autres paramètres spécifiques relatifs à notre projet.
Pour la variante adoptée pour le canal dans les deux tronçons amont et aval, nous avons conçu le canal tout le long d'oued El Hamiz à partir du début de projet jusqu'à l'embouchure de mer, après nous avons importé le canal créer sur HEC RAS, ensuite nous introduisons les données et les paramètres liée à notre projet comme le débit aménagé par le canal, et à la fin on lance la simulation et nous optons les résultats suivants :

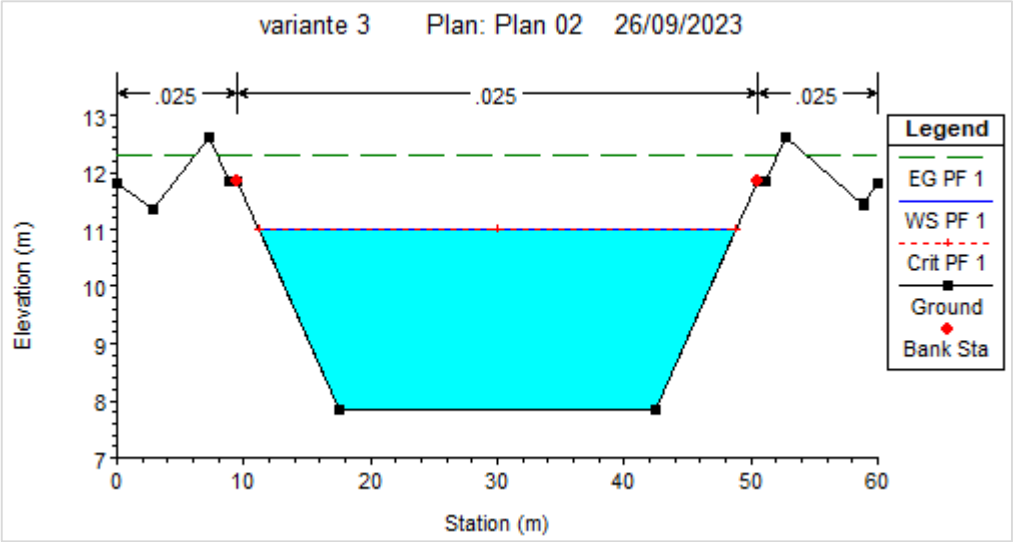


Figure V. 14 : Résultats de la simulation pour la station 4539.52 (amont).

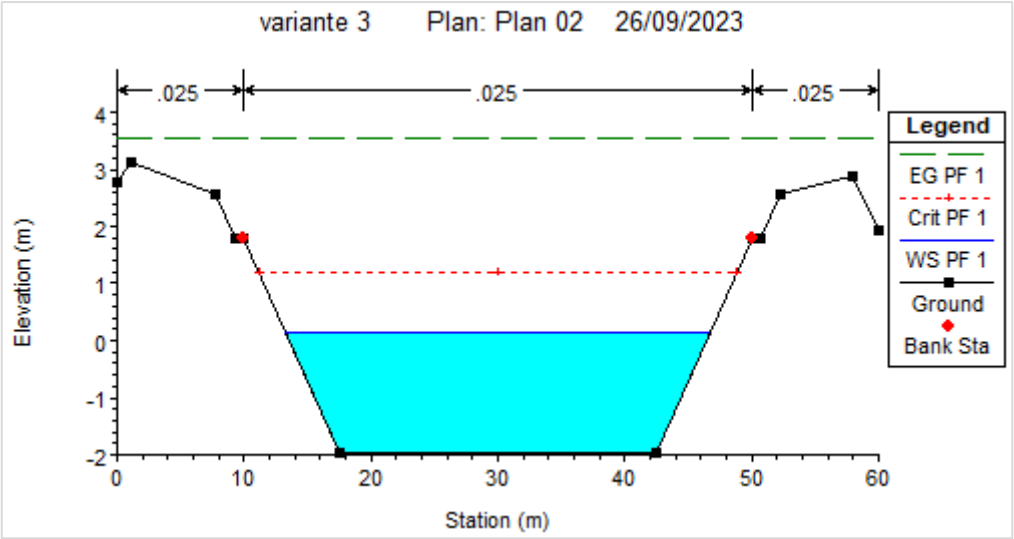


Figure V. 15 : Résultats de la simulation pour la station 25 (aval).



Figure V. 16 : Vue 3D de l'oued El Hamiz (entre les stations 4539.52 et 2000).

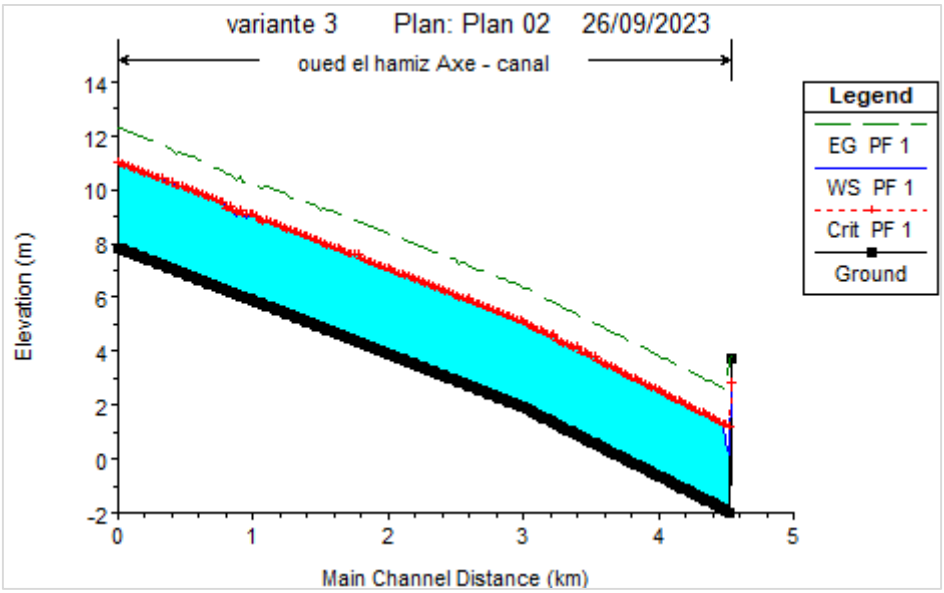


Figure V. 17 : Profil de la surface d'eau et du fond du canal le long d'oued El Hamiz.

Tableau V. 12 : Principaux paramètres hydraulique d'oued El Hamiz après l'aménagement.

River Station	Min Ch El	W.S.Elev	Crit W.S	E.G Elev	E.G Slope	Vel Ch	Flow Area	Top Width	Froude #Chl
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m²)	(m)	/
4539.52	7.85	11	11	12.31	0.004675	5.07	98.78	39.06	1
4525	7.8	10.95	10.95	12.26	0.004701	5.08	98.4	37.58	1
4500	7.75	10.9	10.9	12.21	0.004697	5.08	98.43	37.58	1
4475	7.7	10.85	10.85	12.16	0.004695	5.08	98.44	37.58	1
4100	6.96	10.1	10.1	11.42	0.004712	5.08	98.32	37.57	1
4000	6.77	9.96	9.96	11.22	0.004772	4.96	100.71	40.21	1
3975	6.72	9.89	9.89	11.17	0.004776	5	99.94	39.22	1
3950	6.67	9.81	9.81	11.13	0.00472	5.08	98.31	37.6	1
3925	6.62	9.84	9.84	11.03	0.004882	4.83	103.46	43.62	1
3825	6.42	9.61	9.61	10.79	0.005031	4.81	103.8	44.55	1.01
3800	6.37	9.56	9.56	10.75	0.004992	4.84	103.21	43.78	1.01
3775	6.32	9.52	9.52	10.7	0.004954	4.81	103.9	44.24	1
3650	6.07	9.24	9.24	10.49	0.004987	4.94	101.08	40.79	1
3550	5.88	9.06	9.06	10.3	0.004915	4.95	100.97	40.47	1
3525	5.83	8.99	8.99	10.21	0.004923	4.9	101.94	41.67	1
3100	4.99	8.14	8.14	9.45	0.004694	5.07	98.45	37.58	1
2850	4.5	7.64	7.64	8.96	0.004732	5.09	98.18	37.56	1.01
2825	4.45	7.58	7.58	8.91	0.004733	5.09	98.17	37.56	1.01
1725	2.28	5.42	5.42	6.73	0.004701	5.08	98.4	37.58	1
1700	2.23	5.37	5.37	6.69	0.004701	5.08	98.4	37.58	1
1675	2.18	5.32	5.32	6.64	0.004701	5.08	98.4	37.58	1
1650	2.13	5.27	5.27	6.59	0.004701	5.08	98.4	37.58	1
1625	2.08	5.22	5.22	6.54	0.004701	5.08	98.4	37.58	1
1600	2.03	5.17	5.17	6.49	0.004701	5.08	98.4	37.58	1
1575	1.97	5.12	5.12	6.43	0.004701	5.08	98.4	37.58	1
1500	1.78	4.93	4.93	6.24	0.004701	5.08	98.4	37.58	1
1425	1.59	4.74	4.74	6.05	0.004701	5.08	98.4	37.58	1
1400	1.53	4.67	4.67	5.99	0.004701	5.08	98.4	37.58	1
1225	1.08	4.22	4.22	5.54	0.004729	5.09	98.21	37.56	1
1025	0.58	3.77	3.77	5.01	0.004868	4.93	101.4	41.16	1
850	0.13	3.28	3.28	4.59	0.004701	5.08	98.4	37.58	1
450	-0.88	2.26	2.26	3.58	0.004701	5.08	98.4	37.58	1
425	-0.95	2.2	2.2	3.51	0.004701	5.08	98.4	37.58	1
400	-1.01	2.13	2.13	3.45	0.004701	5.08	98.4	37.58	1
375	-1.08	2.07	2.07	3.38	0.004702	5.08	98.4	37.58	1
350	-1.14	2.01	2.01	3.32	0.004702	5.08	98.4	37.58	1
75	-1.84	1.31	1.31	2.62	0.004704	5.08	98.38	37.58	1
50	-1.9	0.61	1.24	2.85	0.010314	6.62	75.44	35.05	1.44
25	-1.96	0.12	1.18	3.55	0.019543	8.2	60.95	33.36	1.94
0	-0.06	2.83	2.83	3.91	0.005032	4.66	110.59	51.04	0.96

V.5.1 Interprétation

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

Conclusion

Ce chapitre a examiné en détail la variante d'aménagement adoptée pour le projet d'oued El Hamiz, mettant en lumière les détails de la conception, les calculs relatifs aux enrochements, l'étude de stabilité des talus, la conception du bassin de rétention, ainsi que la modélisation hydraulique et les simulations. A travers ce chapitre nous avons dimensionner canal d'approche, déversoir, bassin de dissipation et l'ouvrage de vidange pour l'efficacité de la variante adoptée.

Les résultats de cette étude détaillée confirment que la variante d'aménagement choisie maitrise les crues centennales d'oued El Hamiz aussi elle garde en sécurité les habitants des communes de Bordj El Kiffan et Bordj El Bahri.

Conclusion générale

Conclusion générale

Notre travail se concentre sur l'un des risques les plus dangereux qui touchent les villes de Bordj El Kiffan et Bordj El Bahri, représentée dans les crues et les inondations, qu'ils sont causés par plusieurs paramètres topographiques, géologiques, hydrologiques et météorologiques. La gestion des inondations est le sujet d'actualité le plus important avec les changements climatiques de ces dernières décennies. La gestion des inondations est un ensemble de mesures et de stratégies mises en place pour gérer les risques d'inondation, minimiser les impacts négatifs sur les populations, les biens et l'environnement.

L'étude que nous avons menée est divisé en plusieurs partis. Tout d'abord nous avons réalisé une étude de reconnaissance du site et de la zone d'étude, cette zone est caractérisée par une haute densité de population ce qui implique qu'ils sont vulnérables aux risques des inondations. Ensuite nous avons passé par une étude géologique et géotechnique qu'elle est essentielle pour évaluer les caractéristiques du sol pour la bonne conception.

Après une étude hydrologique composée d'une étude hydromorphologique du bassin versant révèle qu'il présente une forme allongée, avec un relief prononcé et un temps de concentration relativement court, ce qui aggrave le risque de crues. Pour estimer le débit de crue, nous avons utilisé les données hydrométriques de la station Ouled Ali, que nous avons ajustées à une loi statistique, cela nous a permis de déterminer le débit correspondant à la période de retour souhaitée 100 ans, le débit centennal en appliquant la méthode de GRADEX qui est 631.38 m^3/s.

En outre, une étude hydraulique approfondie a été menée, reposant sur une compréhension approfondie des principes hydrauliques et des écoulements de l'oued El Hamiz. Pour cette étude, nous avons utilisé le logiciel HEC RAS afin d'évaluer les risques d'inondations le long de ce cours d'eau. Les simulations ont montré que le débit centennal entraîne des débordements dans l'Oued, nécessitant ainsi un aménagement. Dans cette phase de l'étude, nous avons proposé trois (03) variantes et nous avons les étudies en détail de point de vue technico-économique, parmi lesquelles nous avons sélectionné celle qui semblait la plus appropriée pour la protection des villes de Bordj El Kiffan et Bordj El Bahri et la plus économique. Cette variante implique la conception d'un canal de profil trapézoïdal en enrochement, associé à un bassin de rétention situé en amont du projet.

A la fin, nous avons mené une étude détaillée de la variante choisie pour l'aménagement représentée dans un canal de forme trapézoïdale en enrochement avec un bassin de rétention, Le bassin de rétention a été conçu dans le but d'atténuer les crues en aval de l'oued El Hamiz. Son rôle principal est de retenir temporairement l'excès d'eau pendant les périodes de fortes précipitations ou de crues, puis de relâcher cette eau progressivement de manière contrôlée. Dans cette phase, nous avons dimensionné avec précision les ouvrages nécessaires pour assurer le bon fonctionnement de la variante retenue. Cela incluait le dimensionnement du canal d'approche, du déversoir, du bassin dissipateur d'énergie et de l'ouvrage de vidange. Nous avons également calculé les dimensions des enrochements, nous avons effectuons une analyse de la stabilité des talus (qui se sont révélés stables), et après la simulation hydraulique du canal de la variante adoptée, on confirme totalement l'absence de débordement tout le long de l'oued.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

DEGOUTTE Gérard, 2002. PETITS BARRAGES : recommandations pour la conception, la réalisation et le suivi. Edition Cemagref, 2002. ISBN 2-85362-551-6.

Disponible à l'adresse : https://www.barrages-cfbr.eu/IMG/pdf/pb2002-fr.pdf

KVOčKA 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

LAHLAH Salah, 2004. Les inondations en Algérie, Des journées techniques : Risques naturels : Inondation, Prévision, Protection, 15/16/décembre 2004. CRESTRA.

Disponible à l'adresse : https://crstra.dz/telechargement/seminaires/les-actes-des journeestechniques-risque-naturels-iniondatio.pdf

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.

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/

U.S. Army Corps of Engineers, 2016b. HEC-RAS River Analysis System –2D Modeling User's Manual, Hydrologic Engineering Center, CPD-68A, Version 5.0. 171p.

Disponible à l'adresse : http://www.hec.usace.army.mil/software/

ZEROUAL, Ayoub, ASSANI, Ali.A., MEDDI, M. et al., 2019. Assessment of climate change in Algeria from 1951 to 2098 using the Köppen–Geiger climate classification scheme. Clim Dyn 52, 227–243 (2019)

Disponible à l'adresse : https://doi.org/10.1007/s00382-018-4128-0

Annexes

Annexe N°01

INTITULE : Adaptation de l'etude d'Amenagement de oued el Hamiz

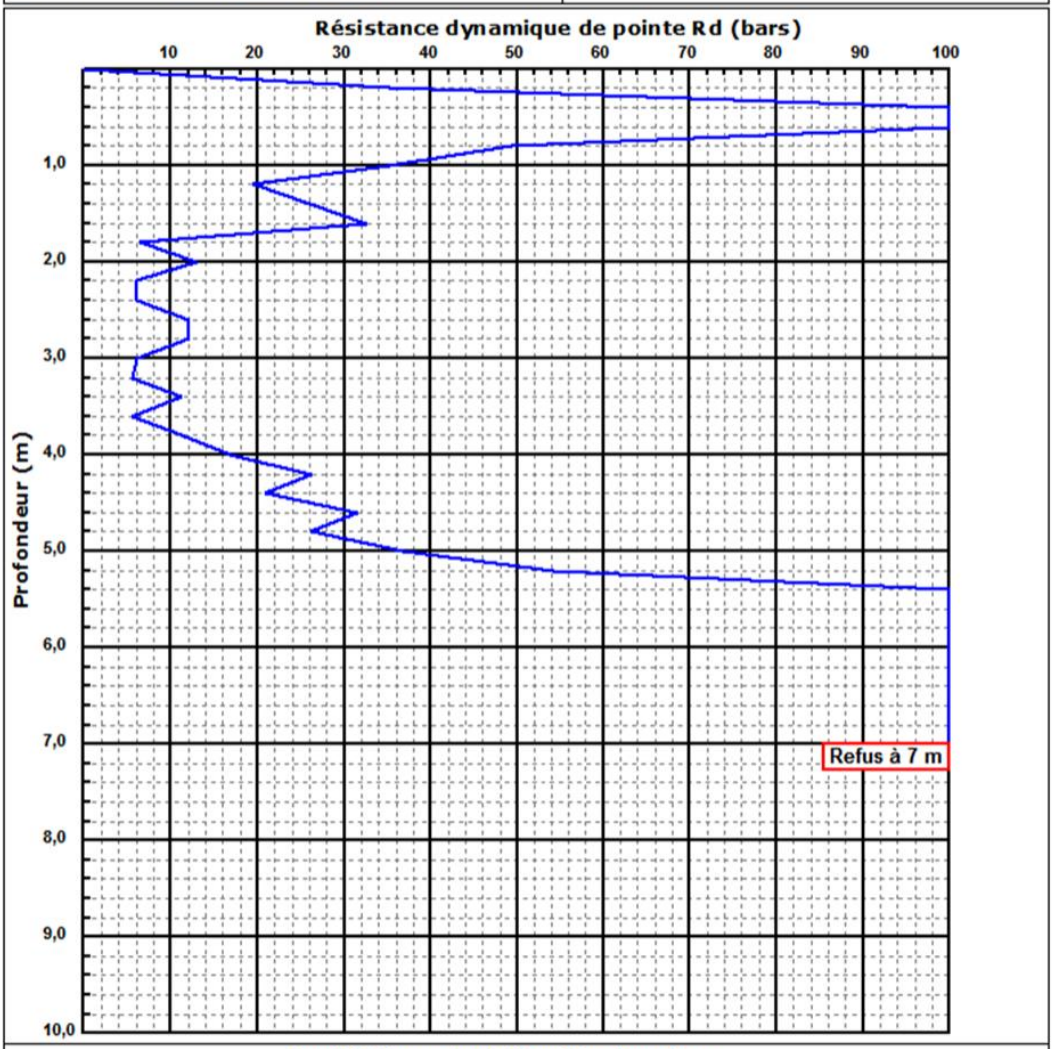
N°DOSSIER : 08/2021

LIEU : PK 0 +00(embouchure) au PK 1 +600 (pont RN24)

DATE ESSAIS : 10.06.2021 au 17.06.2021

PENETROMETRE DYNAMIQUE

Essai N°: P01



Caractéristiques du pénétromètre dynamique

Masse enclume + guidage Mouton (m') : 3,0 kg
Masse du Mouton (m) : 63,5 kg
Hauteur de chute (H) : 50 cm
Aire de la section droite de la pointe (A) : 19 cm²

Longueur des tiges : 1 m
Masse d'une tige (m') : 6,28 kg
Enfoncement (e) : 20 cm

Formule de Battage :

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

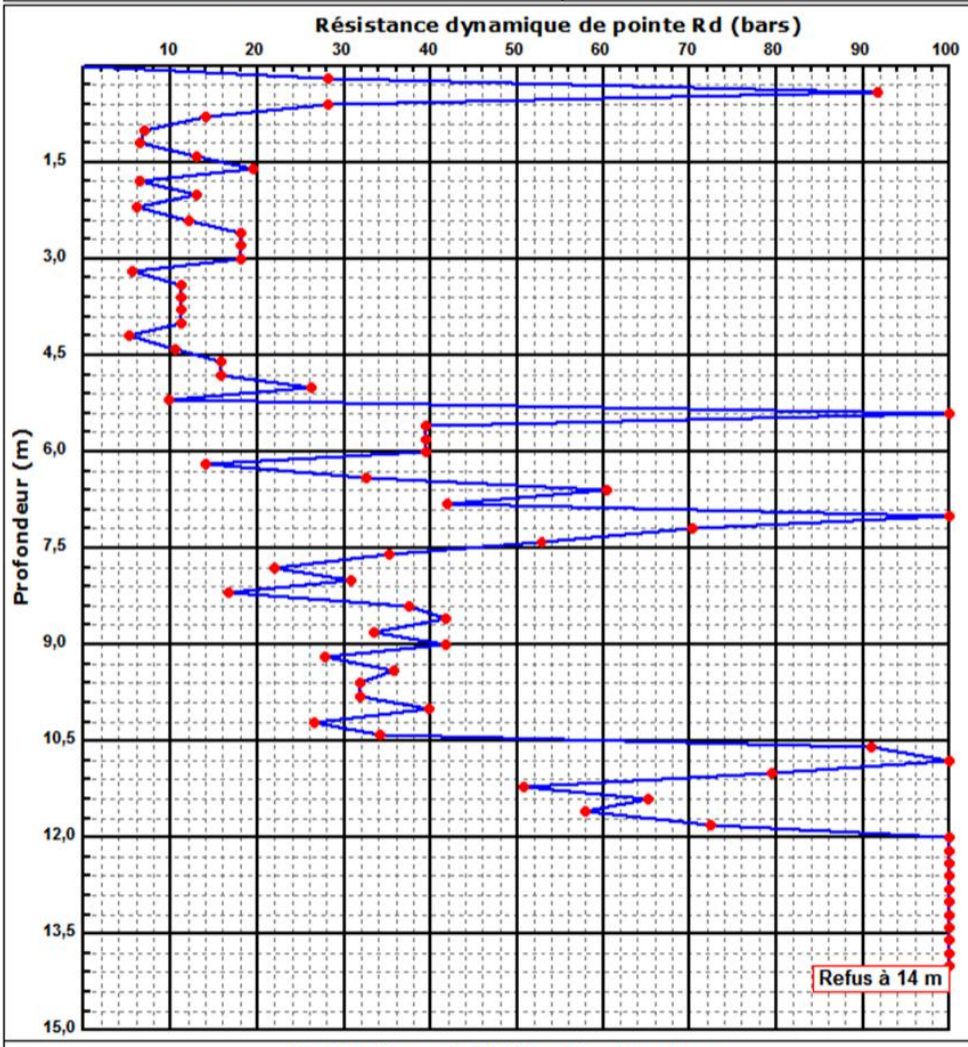
Programme: Solitesis 2007 ©

INTITULE : Adaptation de l'etude d'Amenagement de oued el Hamiz
N°DOSSIER : 08/2021
LIEU : PK 0 +00(embouchure) au PK 1 +600 (pont RN24)

DATE ESSAIS : 10.06.2021 au 17.06.2021

PENETROMETRE DYNAMIQUE

Essai N°: P02



Caractéristiques du pénétromètre dynamique

Masse enclume + guidage Mouton (m') : 3,0 kg
Masse du Mouton (m) : 63,5 kg
Hauteur de chute (H) : 50 cm
Aire de la section droite de la pointe (A) : 19 cm²

Longueur des tiges : 1 m
Masse d'une tige (m') : 6,28 kg
Enfoncement (e) : 20 cm

Formule de Battage :

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

Programme: Solitesis 2007 ©

INTITULE : Adaptation de l'etude d'Amenagement de oued el Hamiz

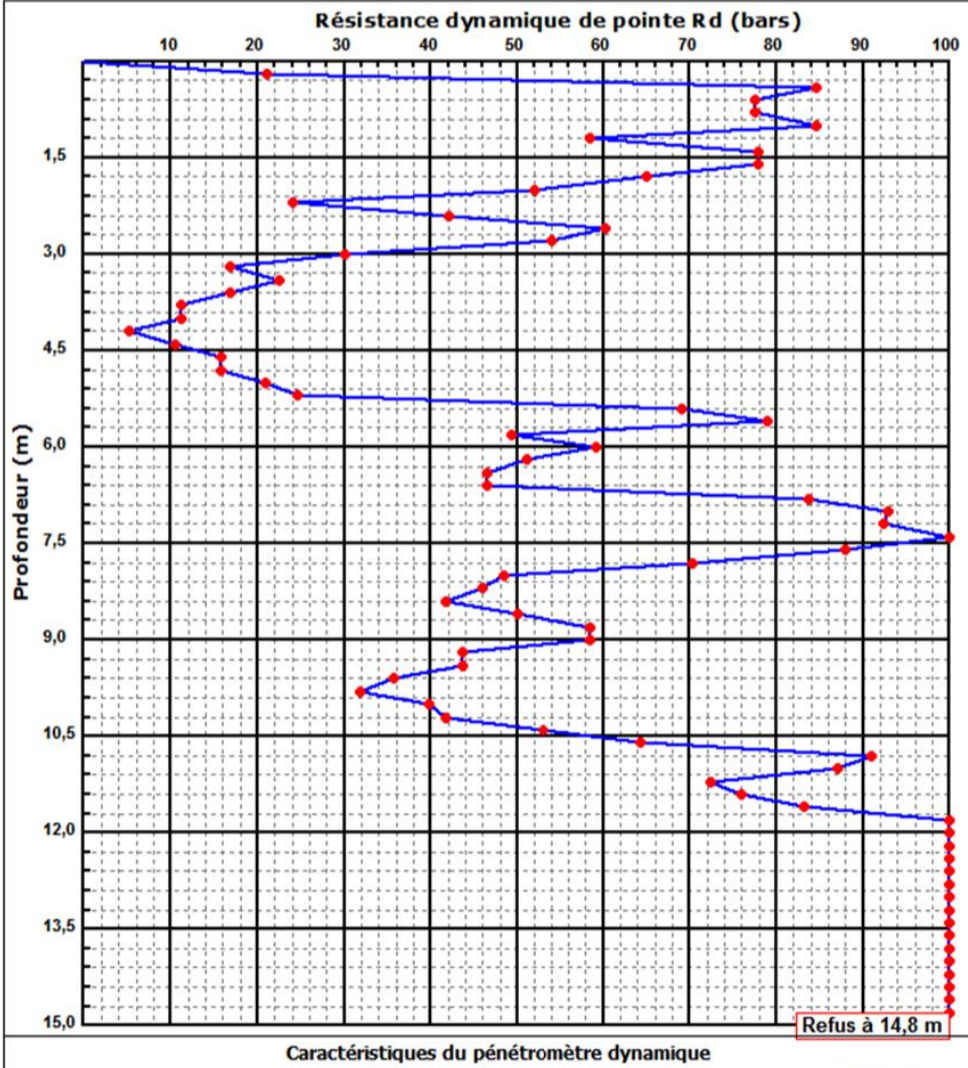
N°DOSSIER : 08/2021

LIEU : PK 0 +00(embouchure) au PK 1 +600 (pont RN24)

DATE ESSAIS : 10.06.2021 au 17.06.2021

PENETROMETRE DYNAMIQUE

Essai N°: P03



Caractéristiques du pénétromètre dynamique

Masse enclume + guidage Mouton (m') : 3,0 kg

Masse du Mouton (m) : 63,5 kg

Hauteur de chute (H) : 50 cm

Aire de la section droite de la pointe (A) : 19 cm²

Longueur des tiges : 1 m

Masse d'une tige (m') : 6,28 kg

Enfoncement (e) : 20 cm

Formule de Battage :

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

Programme: Soltests 2007 ©

INTITULE : Adaptation de l'etude d'Amenagement de oued el Hamiz

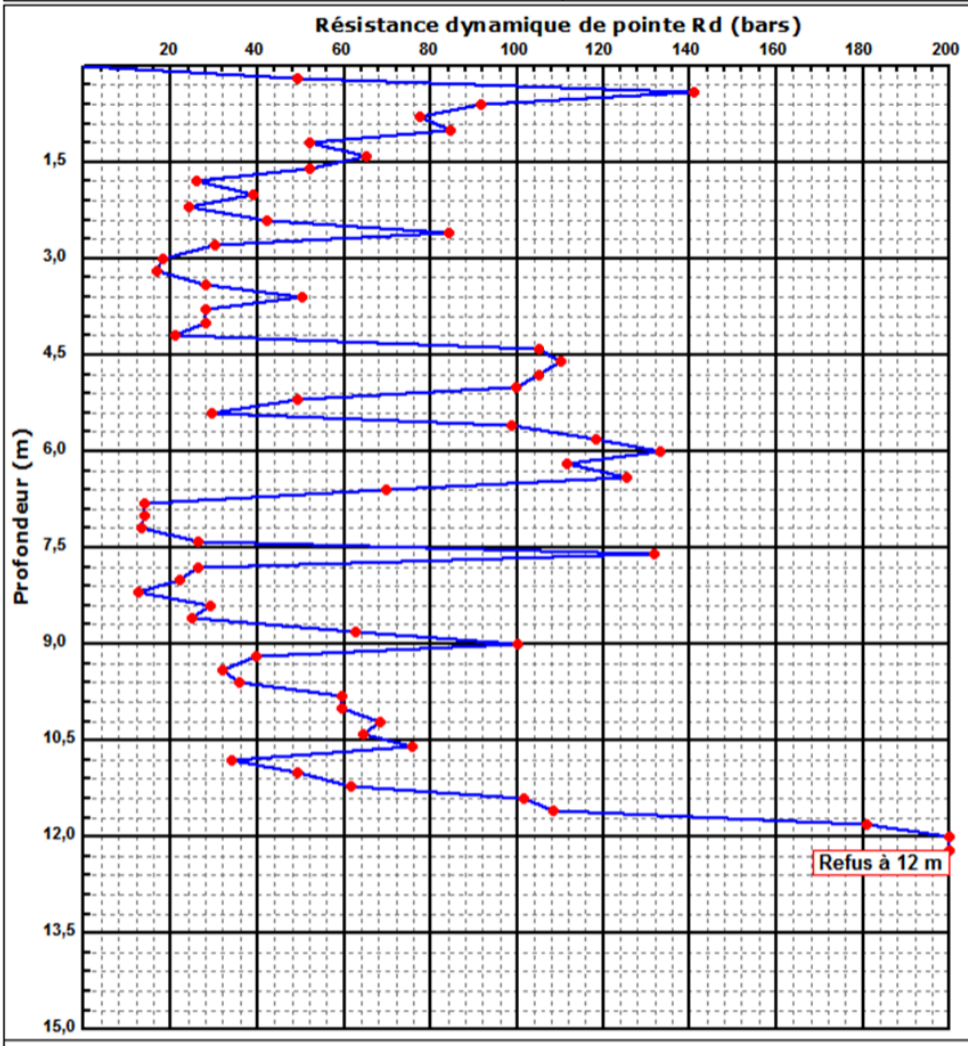
N°DOSSIER : 08/2021

LIEU : PK 0 +00(embouchure) au PK 1 +600 (pont RN24)

DATE ESSAIS : 10.06.2021 au 17.06.2021

PENETROMETRE DYNAMIQUE

Essai N°: P04



Caractéristiques du pénétromètre dynamique

Masse enclume + guidage Mouton (m') : 3,0 kg

Masse du Mouton (m) : 63,5 kg

Hauteur de chute (H) : 50 cm

Aire de la section droite de la pointe (A) : 19 cm²

Longueur des tiges : 1 m

Masse d'une tige (m') : 6,28 kg

Enfoncement (e) : 20 cm

Formule de Battage :

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

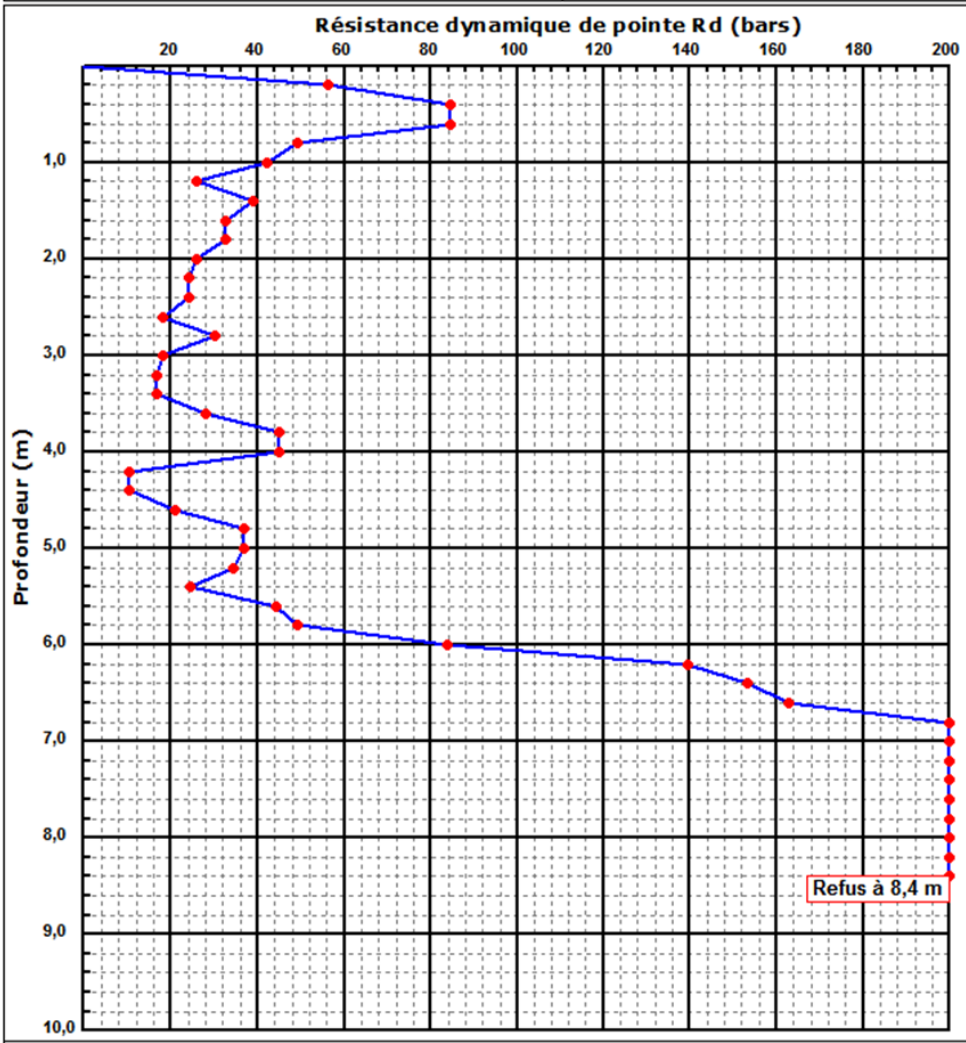
Programme: Soltesis 2007 ©

INTITULE : Adaptation d'etude d'amenagement Oued Hamiz
N°DOSSIER : 08/2021
LIEU : PK0+00 (embouchure) -PK1+600 (PONT RN24)

DATE ESSAIS : 10.06.2021 au 17.06.2021

PENETROMETRE DYNAMIQUE

Essai N°: P05



Caractéristiques du pénétromètre dynamique

Masse enclume + guidage Mouton (m') : 3,0 kg
Masse du Mouton (m) : 63,5 kg
Hauteur de chute (H) : 50 cm
Aire de la section droite de la pointe (A) : 19 cm²

Longueur des tiges : 1 m
Masse d'une tige (m') : 6,28 kg
Enfoncement (e) : 20 cm

Formule de Battage :

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

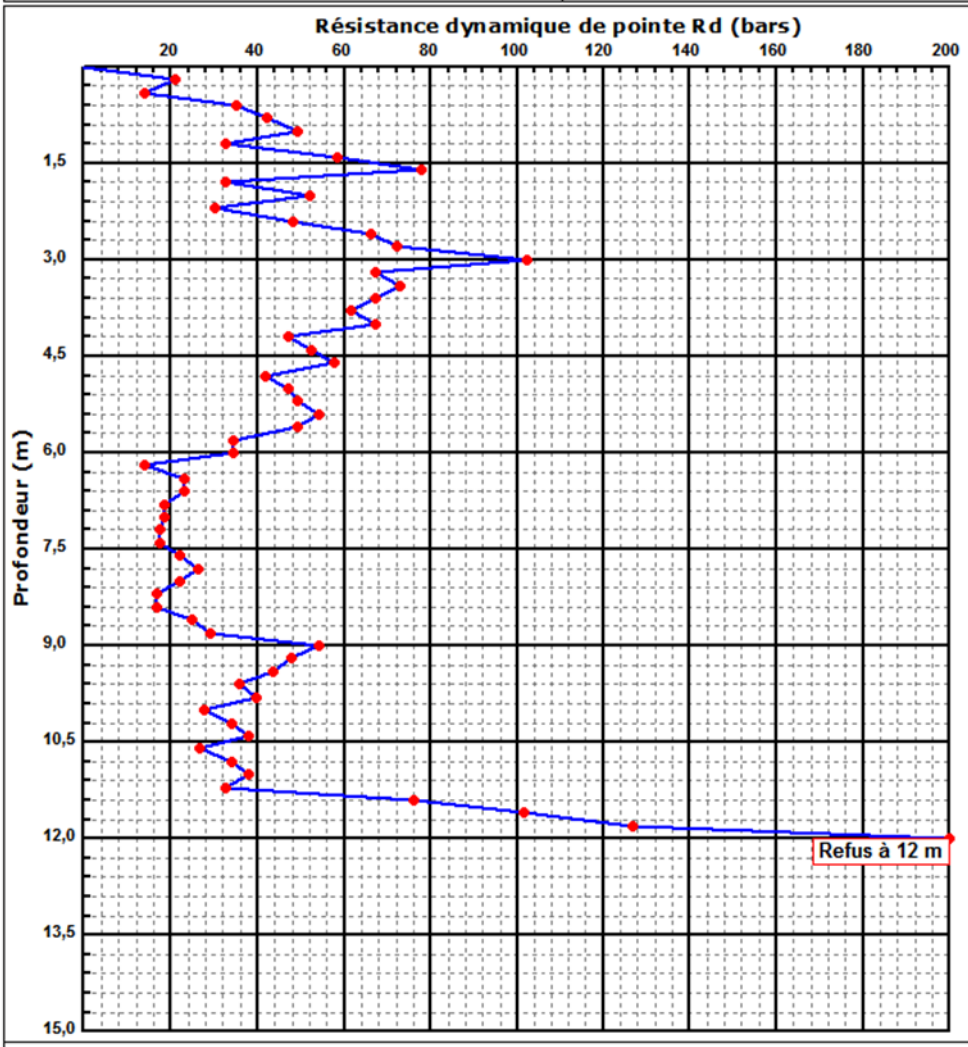
Programme: Soltests 2007 ©

INTITULE : Adaptation d'etude d'amenagement Oued Hamiz
N°DOSSIER : 09/2021
LIEU : Tronçon RN24 - Oued Bakoura

DATE ESSAIS : 10.06.2021 au 17.06.2021

PENETROMETRE DYNAMIQUE

Essai N°: P06



Caractéristiques du pénétromètre dynamique

Masse enclume + guidage Mouton (m') : 3,0 kg
Masse du Mouton (m) : 63,5 kg
Hauteur de chute (H) : 50 cm
Aire de la section droite de la pointe (A) : 19 cm²

Longueur des tiges : 1 m
Masse d'une tige (m') : 6,28 kg
Enfoncement (e) : 20 cm

Formule de Battage :

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

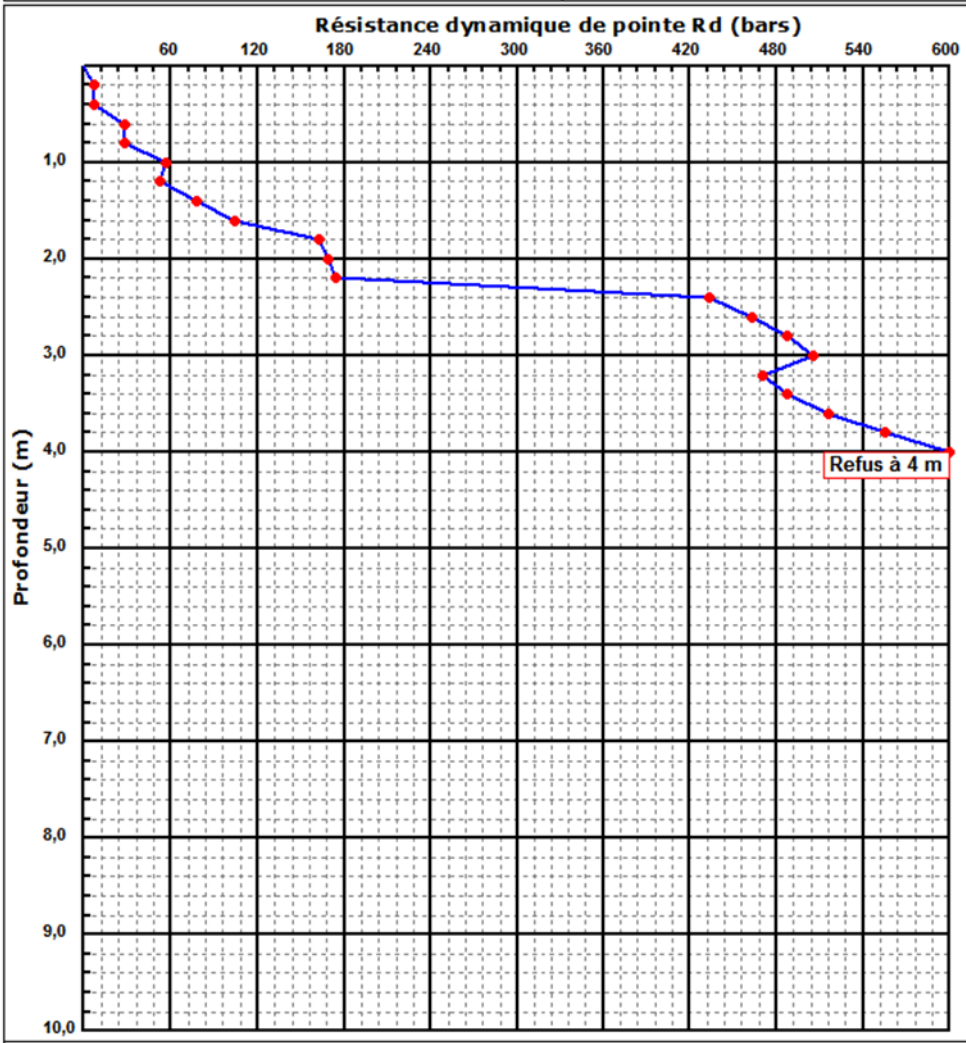
Programme: Soltesis 2007 ©

INTITULE : Adaptation d'etude d'amenagement Oued Hamiz
N°DOSSIER : 09/2021
LIEU : Tronçon RN24 - Oued Bakoura

DATE ESSAIS : 10.06.2021 au 17.06.2021

PENETROMETRE DYNAMIQUE

Essai N°: P07



Caractéristiques du pénétromètre dynamique

Masse enclume + guidage Mouton (m') : 3,0 kg
Masse du Mouton (m) : 63,5 kg
Hauteur de chute (H) : 50 cm
Aire de la section droite de la pointe (A) : 19 cm²

Longueur des tiges : 1 m
Masse d'une tige (m') : 6,28 kg
Enfoncement (e) : 20 cm

Formule de Battage :

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

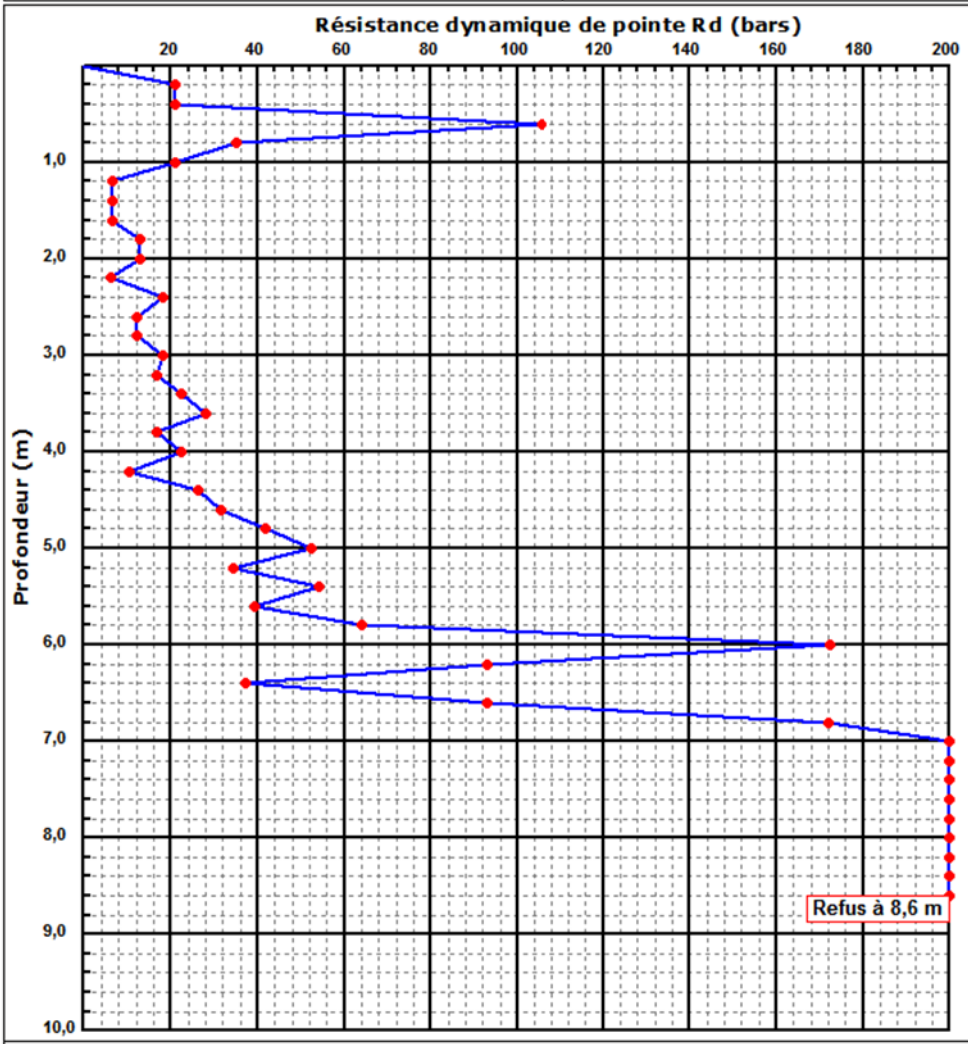
Programme: Soltesis 2007 ©

INTITULE : Adaptation d'etude d'amenagement Oued Hamiz
N°DOSSIER : 09/2021
LIEU : Tronçon RN24 - Oued Bakoura

DATE ESSAIS : 10.06.2021 au 17.06.2021

PENETROMETRE DYNAMIQUE

Essai N°: P08



Caractéristiques du pénétromètre dynamique

Masse enclume + guidage Mouton (m') : 3,0 kg
Masse du Mouton (m) : 63,5 kg
Hauteur de chute (H) : 50 cm
Aire de la section droite de la pointe (A) : 19 cm²

Longueur des tiges : 1 m
Masse d'une tige (m') : 6,28 kg
Enfoncement (e) : 20 cm

Formule de Battage :

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

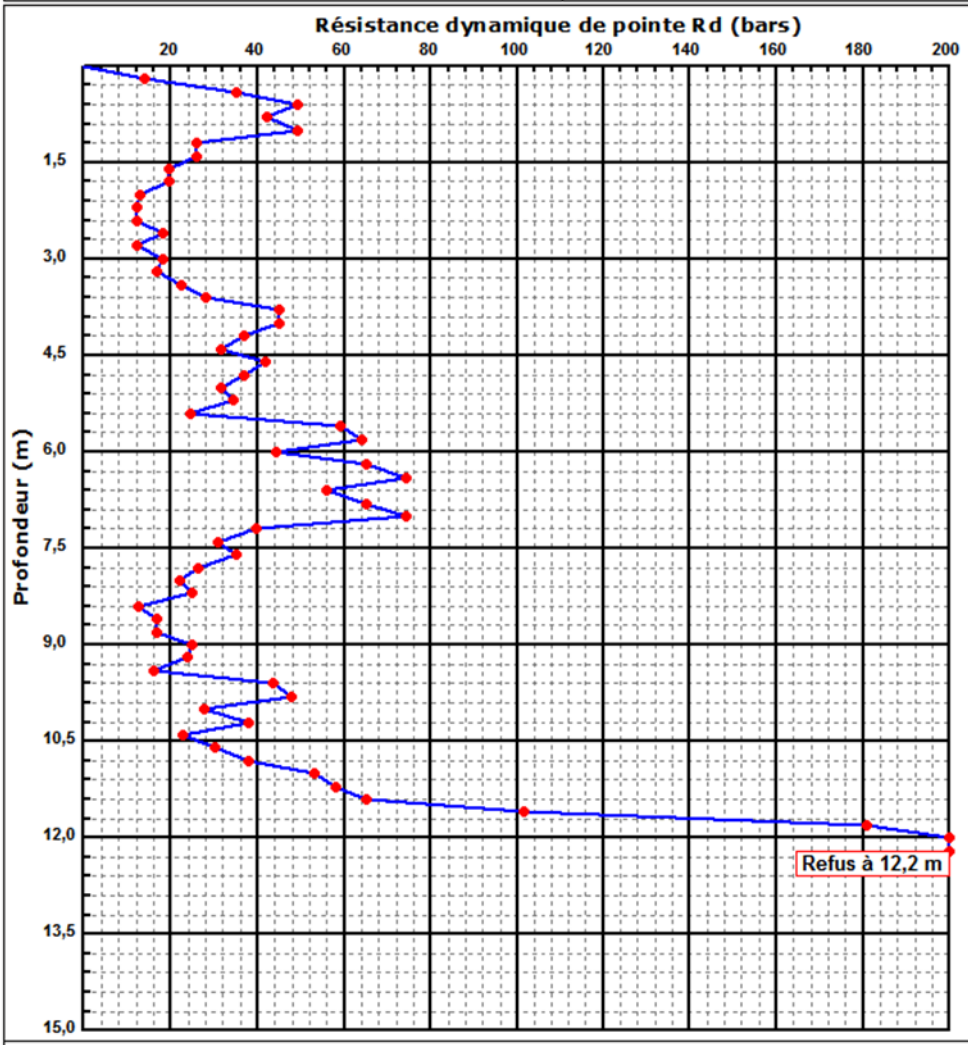
Programme: Soltesis 2007 ©

INTITULE : Adaptation d'etude d'amenagement Oued Hamiz
N°DOSSIER : 09/2021
LIEU : Tronçon RN24 - Oued Bakoura

DATE ESSAIS : 10.06.2021 au 17.06.2021

PENETROMETRE DYNAMIQUE

Essai N°: P09



Caractéristiques du pénétromètre dynamique

Masse enclume + guidage Mouton (m') : 3,0 kg
Masse du Mouton (m) : 63,5 kg
Hauteur de chute (H) : 50 cm
Aire de la section droite de la pointe (A) : 19 cm²

Longueur des tiges : 1 m
Masse d'une tige (m') : 6,28 kg
Enfoncement (e) : 20 cm

Formule de Battage :

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

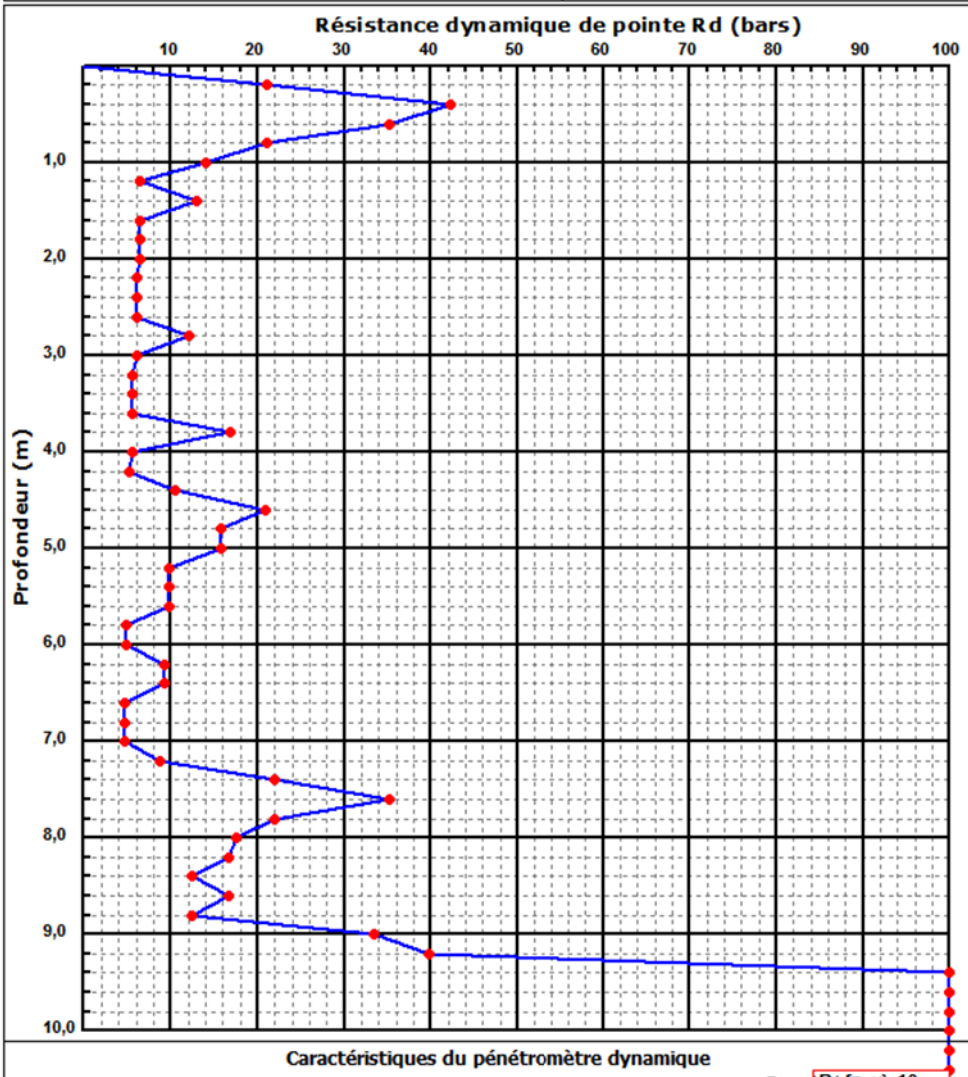
Programme: Soltests 2007 ©

INTITULE : Adaptation d'etude d'amenagement Oued Hamiz
N°DOSSIER : 09/2021
LIEU : Tronçon RN24 - Oued Bakoura

DATE ESSAIS : 10.06.2021 au 17.06.2021

PENETROMETRE DYNAMIQUE

Essai N°: P10



Caractéristiques du pénétromètre dynamique

Masse enclume + guidage Mouton (m') : 3,0 kg
Masse du Mouton (m) : 63,5 kg
Hauteur de chute (H) : 50 cm
Aire de la section droite de la pointe (A) : 19 cm²

Longueur des tiges : 1 m
Masse d'une tige (m') : 6,28 kg
Enfoncement (e) : 20 cm

Refus à 10 m

Formule de battage

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

Programme: Soltests 2007 ©

Projet : Adaptation de l'etude d'amenagement oued Hamiz

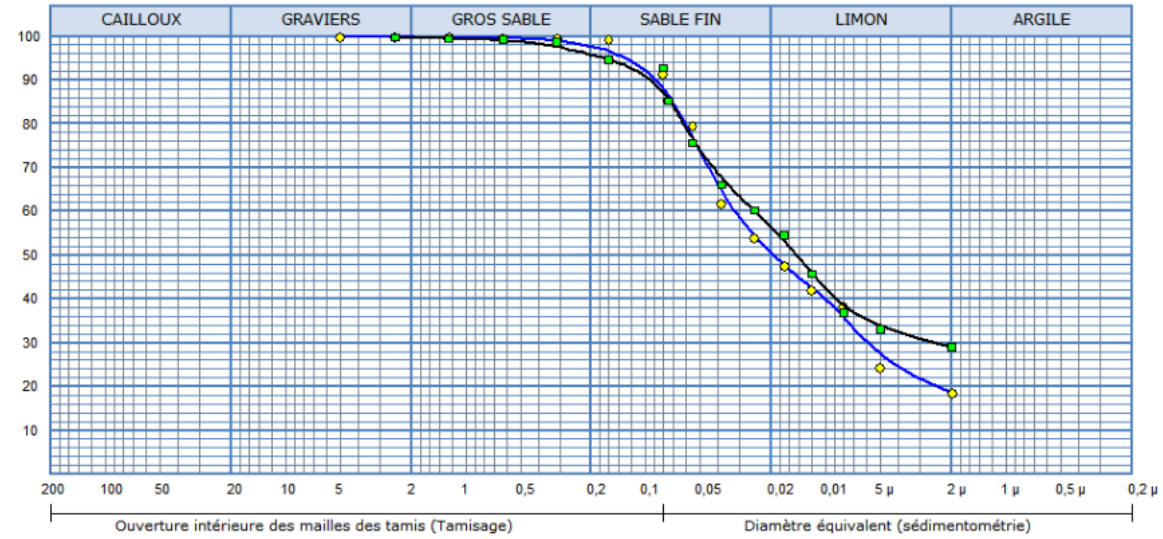
Localisation : pk0+000 (embouchure) au pk 1+600 (pont RN24)

Date essai : 22.06.2021 au 26.06.2021

ANALYSE GRANULOMETRIQUE Selon NFP 94-056

SR1: 3.00 à 3.50 m

SR 01: 8.00 à 5.50 m



Projet : Adaptation de l'etude d'amenagement oued Hamiz

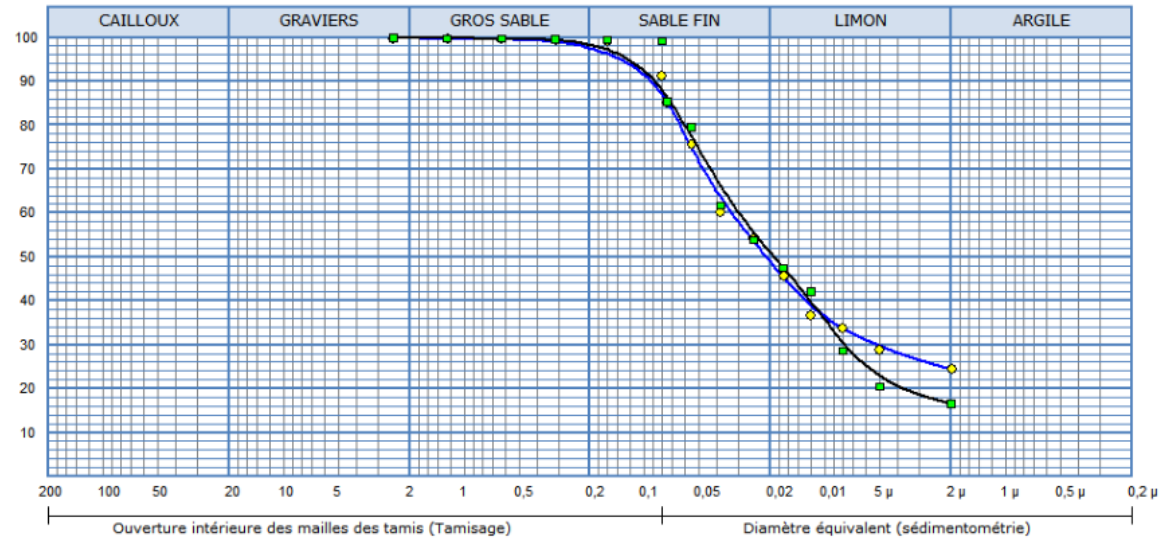
Localisation : pk0+000 (embouchure) au pk 1+600 (pont RN24)

Date essai : 22.06.2021 au 26.06.2021

ANALYSE GRANULOMETRIQUE Selon NFP 94-056

SR2: 3.50 à 4.0m

SR2: 7.0 à 7.50m

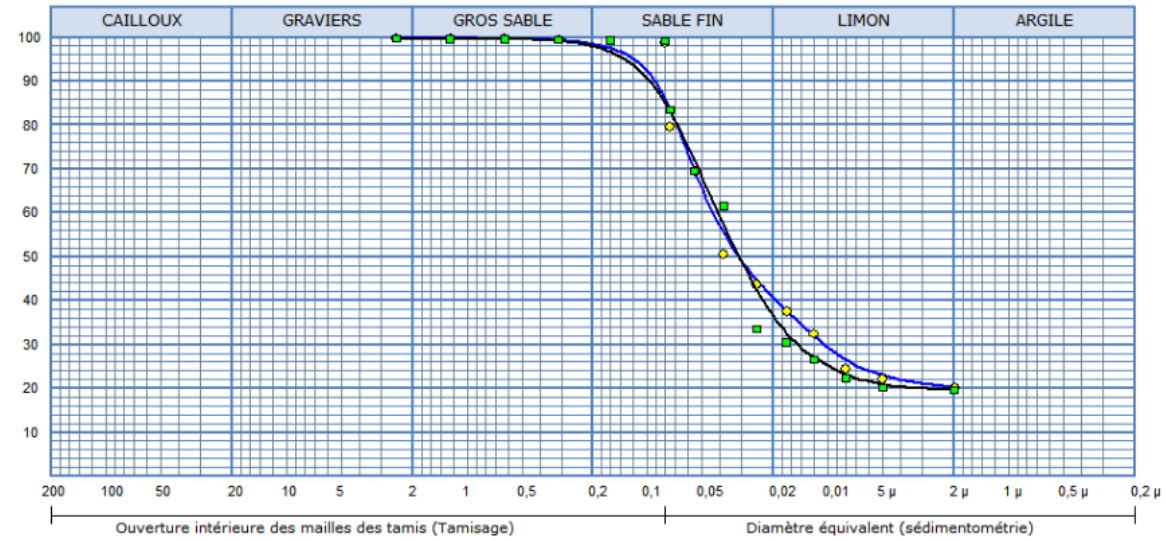


Projet : Adaptation de l'etude d'amenagement oued Hamiz

Localisation : pk0+000 (embouchure) au pk 1+600 (pont RN24)
Date essai : 22.06.2021 au 26.06.2021

ANALYSE GRANULOMETRIQUE Selon NFP 94-056

SR3: 2.50 à 3.0m
SR3: 5.0 à 5.50m

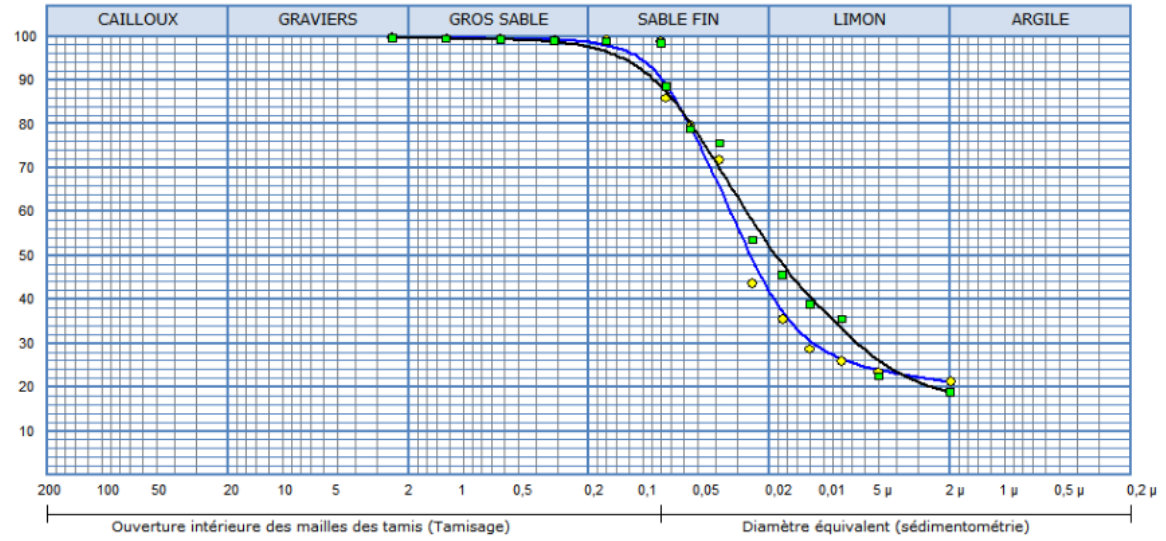


Projet : Adaptation de l'etude d'amenagement oued Hamiz

Localisation : pk0+000 (embouchure) au pk 1+600 (pont RN24)
Date essai : 22.06.2021 au 26.06.2021

ANALYSE GRANULOMETRIQUE Selon NFP 94-056

SR04: 2.0 à 2.50m
SR4: 6.0 à 6.50m

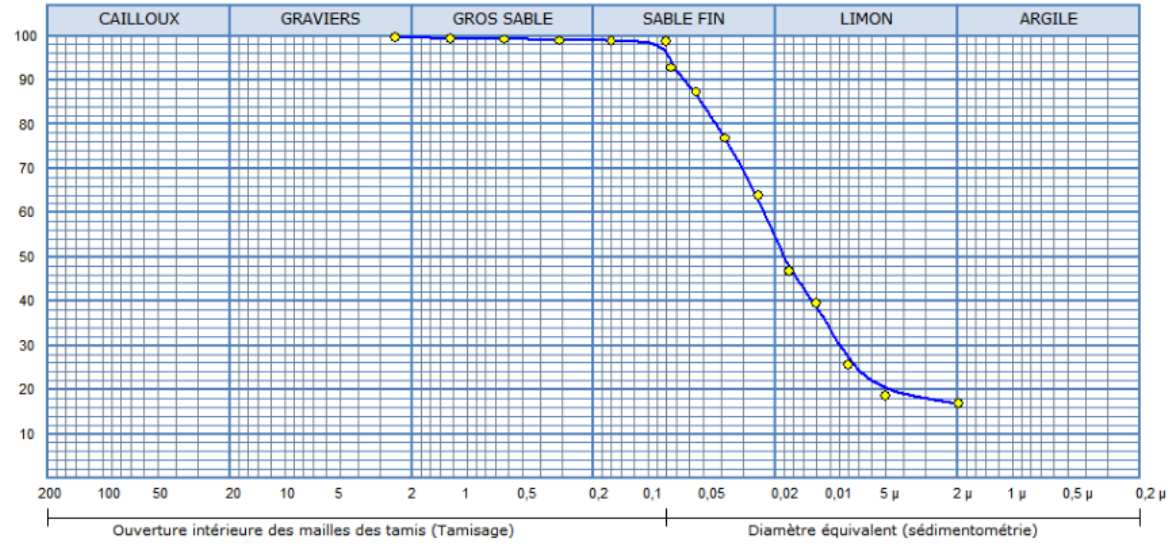


Projet : Adaptation de l'etude d'amenagement oued Hamiz

Localisation : pk0+000 (embouchure) au pk 1+600 (pont RN24)
Date essai : 22.06.2021 au 26.06.2021

ANALYSE GRANULOMETRIQUE Selon NFP 94-056

SR5: 2.50 à 3.0m

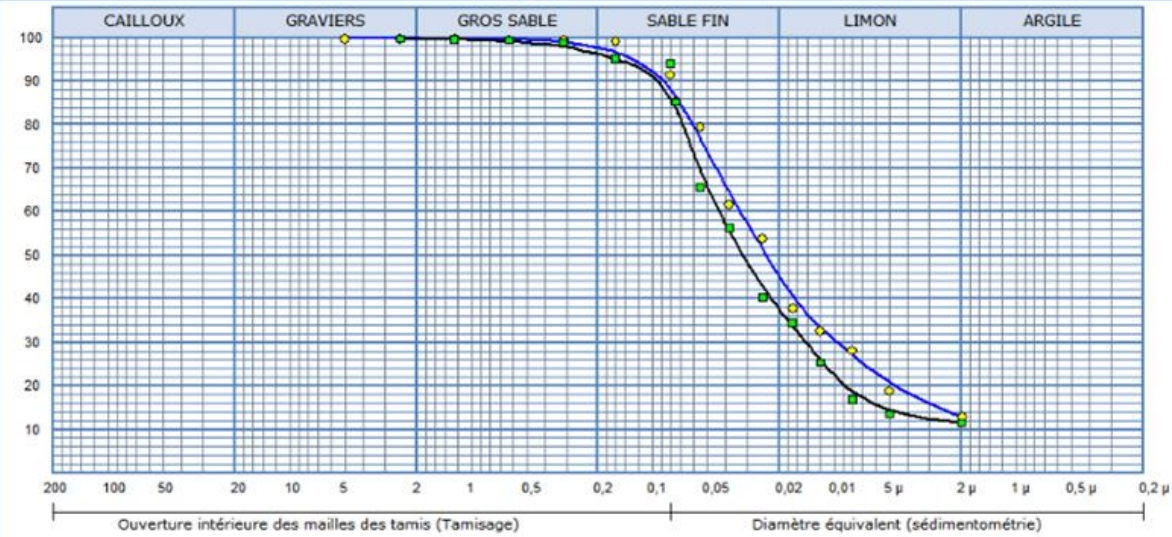


Projet : Adaptation de l'etude d'amenagement oued Hamiz

Localisation : Tronçon pont RN24 à la passerelle o. bacora
Date essai : 27.06.2021 au 30.06.2021

ANALYSE GRANULOMETRIQUE Selon NFP 94-056

SR07: 2.50 à 3.00 m
SR 07: 5.00 à 5.50 m

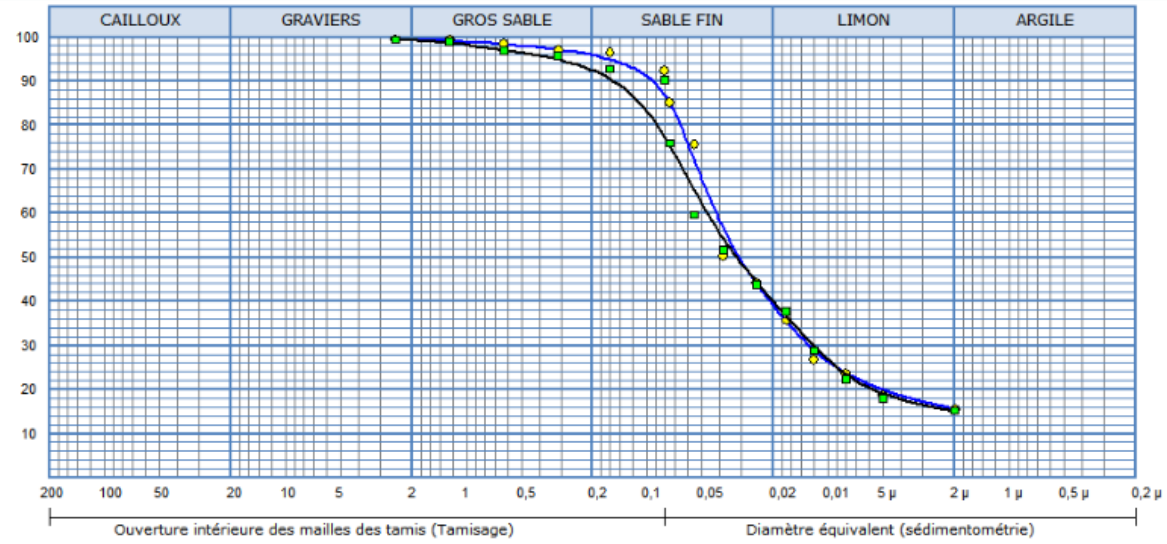


Projet : Adaptation de l'etude d'amenagement oued Hamiz

Localisation : Tronçon pont RN24 à la passerelle o. bacora
Date essai : 27.06.2021 au 30.06.2021

ANALYSE GRANULOMETRIQUE Selon NFP 94-056

SR 08: 3.00 à 3.50m
SR 08: 6.0 à 6.50m

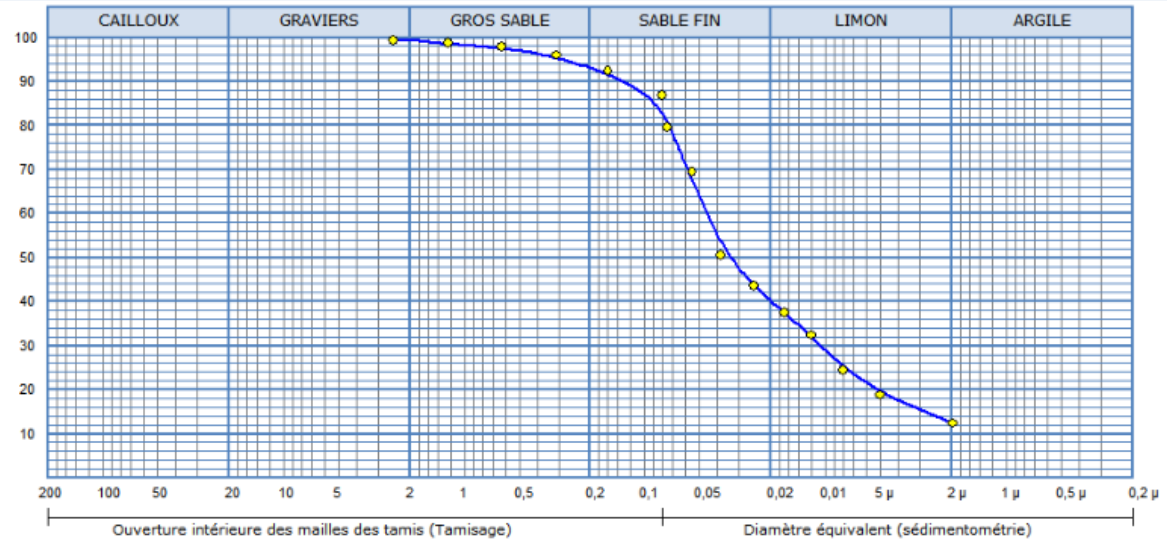


Projet : Adaptation de l'etude d'amenagement oued Hamiz

Localisation : Tronçon pont RN24 à la passerelle o. bacora
Date essai : 27.06.2021 au 30.06.2021

ANALYSE GRANULOMETRIQUE Selon NFP 94-056

SR09: 3.50 à 4.0m

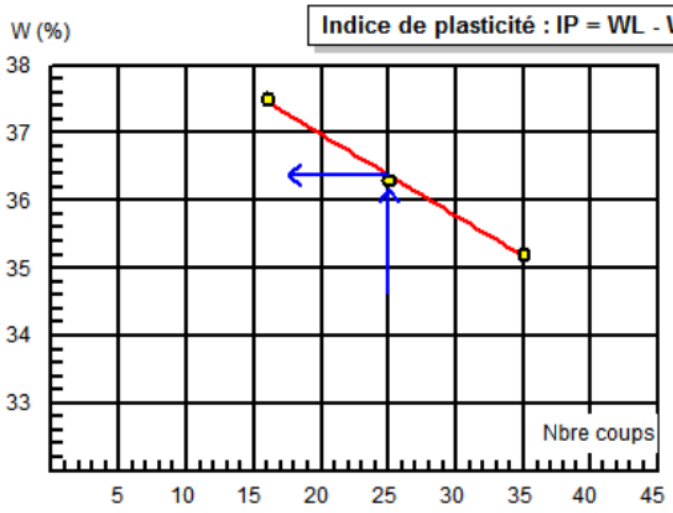


RAPPORT D'ESSAI

LIMITES D'ATTERBERG: NF P 94 - 51

Etude : Adaptation de l'etude d'amenagement oued el Hamiz	Réf : SR. 01
N° Dossier : 08/2021	Profondeur : 3.00 à 3.50 m
Lieu : pk0+000 (embouchure) au pk 1+600 (pont RN24)	Nature : Sable vasard
	Date essais : 22.06.2021 au 26.06.2021

Indice de plasticité : IP = WL - WP = 11,01%

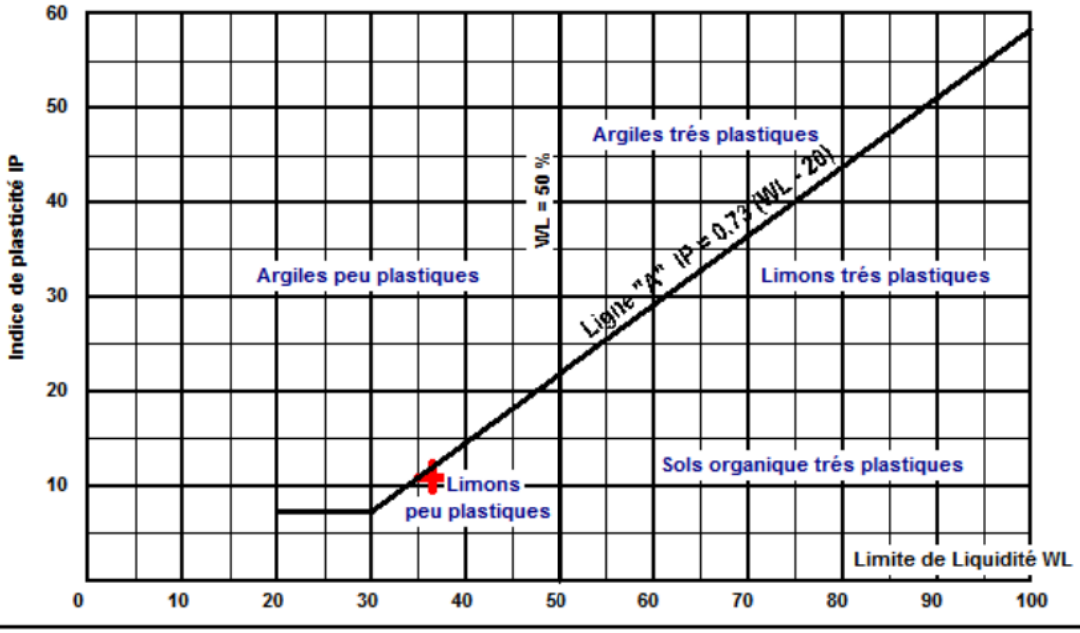


Essai N°	W (%)
1	25,6
2	25,11
3	25,4

Limite de Liquidité (WL) = 36,38 %

Limite de Plasticité WP = 25,37 %

ABAQUE DE CASAGRANDE

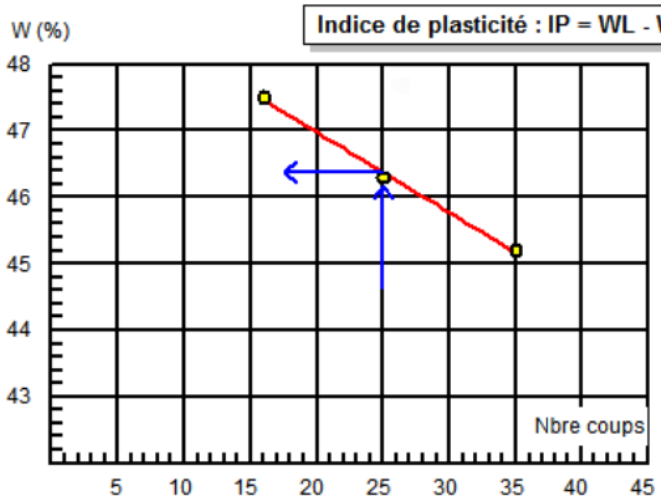


RAPPORT D'ESSAI

LIMITES D'ATTERBERG: NF P 94 - 51

Etude : Adaptation de l'etude d'amenagement oued el Hamiz	Réf : SR. 01
N° Dossier : 08/2021	Profondeur : 8.00 à 8.50 m
Lieu : pk0+000 (embouchure) au pk 1+600 (pont RN24)	Nature : Argile Sableuse
	Date essais : 22.06.2021 au 26.06.2021

Indice de plasticité : IP = WL - WP = 20,0%

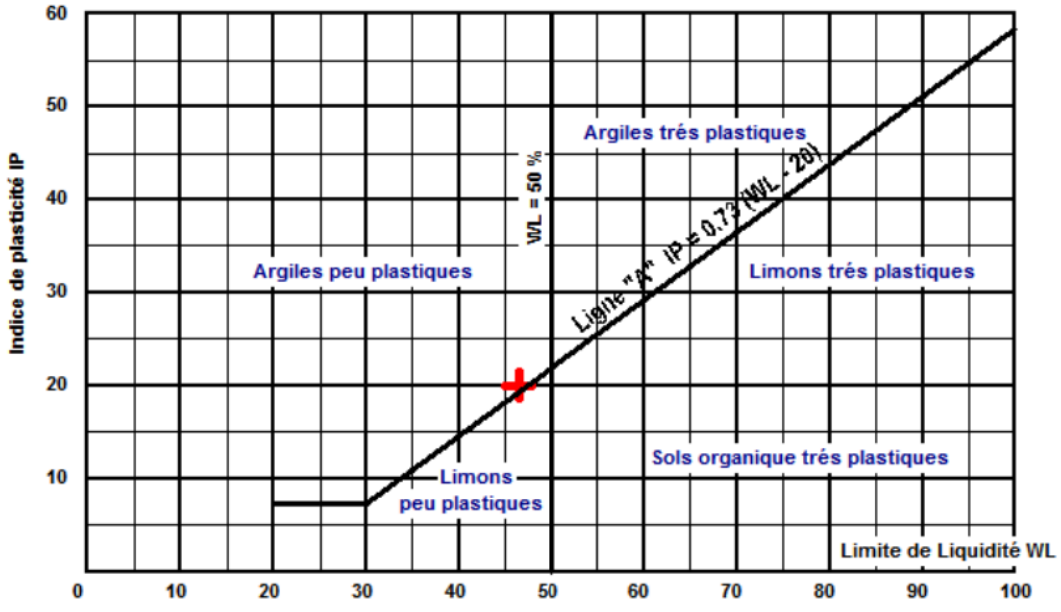


Essai N°	W (%)
1	26,6
2	26,1
3	26,4

Limite de Liquidité (WL) = 46,37 %

Limite de Plasticité WP = 26,37 %

ABAQUE DE CASAGRANDE

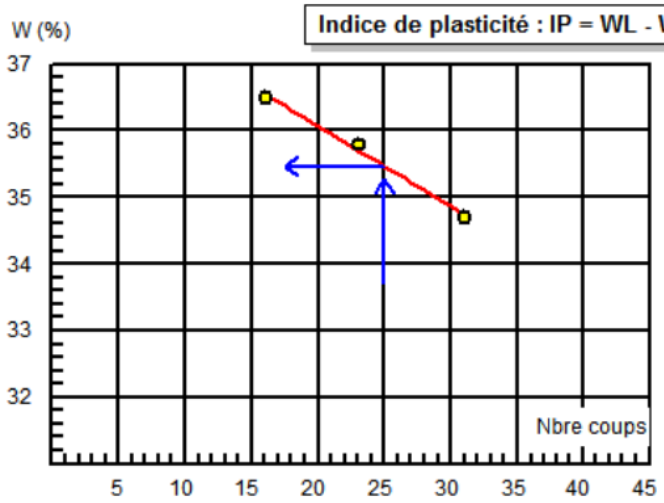


RAPPORT D'ESSAI

LIMITES D'ATTERBERG: NF P 94 - 51

Etude : Adaptation de l'etude d'amenagement oued el Hamiz	Réf : SR. 02
N° Dossier : 08/2021	Profondeur : 3.50 à 4.0m
Lieu : pk0+000 (embouchure) au pk 1+600 (pont RN24)	Nature : Sables vasards
	Date essais : 22.06.2021 au 26.06.2021

Indice de plasticité : IP = WL - WP = 13,33%

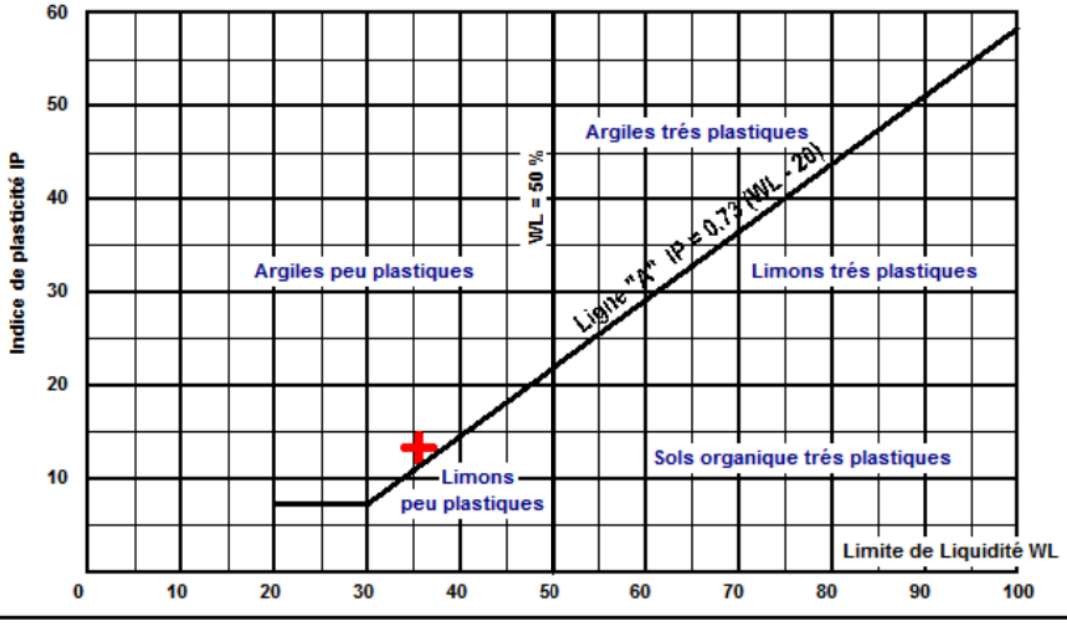


Essai N°	W (%)
1	22
2	22,09
3	22,33

Limite de Liquidité (WL) = 35,47 %

Limite de Plasticité WP = 22,14 %

ABAQUE DE CASAGRANDE

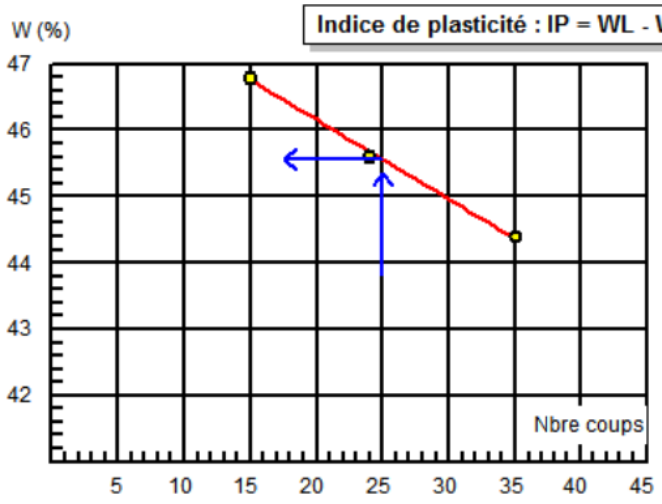


RAPPORT D'ESSAI

LIMITES D'ATTERBERG: NF P 94 - 51

Etude : Adaptation de l'etude d'amenagement oued el Hamiz	Réf : SR. 02
N° Dossier : 08/2021	Profondeur : 7.0 à 7.50 m
Lieu : pk0+000 (embouchure) au pk 1+600 (pont RN24)	Nature : Argile sableuse
	Date essais : 22.06.2021 au 26.06.2021

Indice de plasticité : IP = WL - WP = 25,15%

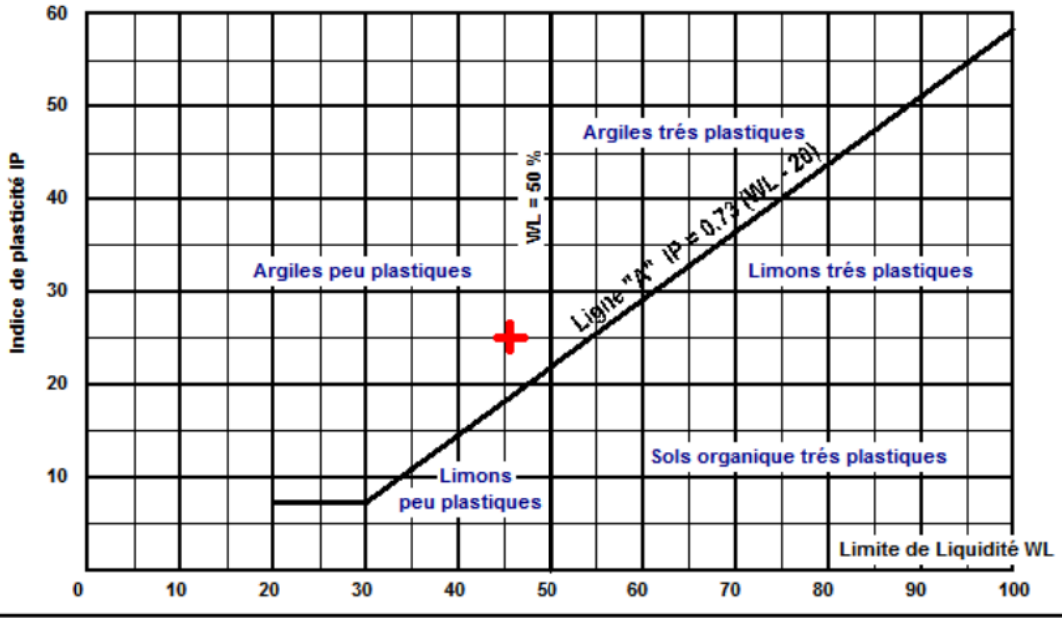


Essai N°	W (%)
1	20,33
2	20,4
3	20,5

Limite de Liquidité (WL) = 45,56 %

Limite de Plasticité WP = 20,41 %

ABAQUE DE CASAGRANDE

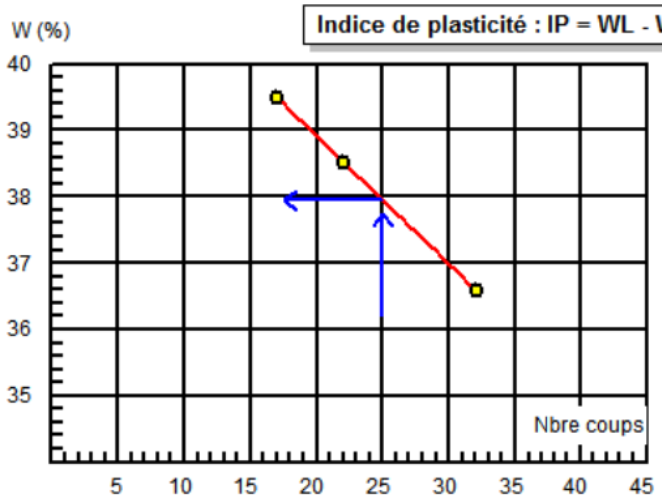


RAPPORT D'ESSAI

LIMITES D'ATTERBERG: NF P 94 - 51

Etude : Adaptation de l'etude d'amenagement oued el Hamiz	Réf : SR. 03
N° Dossier : 08/2021	Profondeur : 2.50 à 3.0 m
Lieu : pk0+000 (embouchure) au pk 1+600 (pont RN24)	Nature : Limon sableux
	Date essais : 22.06.2021 au 26.06.2021

Indice de plasticité : IP = WL - WP = 17,44%

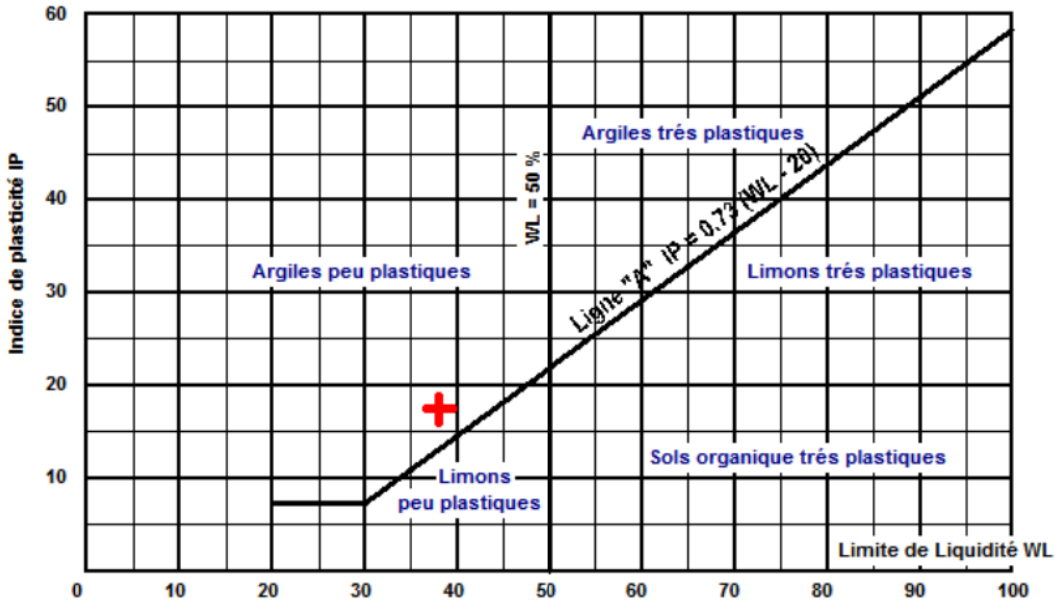


Essai N°	W (%)
1	20,33
2	20,8
3	20,4

Limite de Liquidité (WL) = 37,95 %

Limite de Plasticité WP = 20,51 %

ABAQUE DE CASAGRANDE

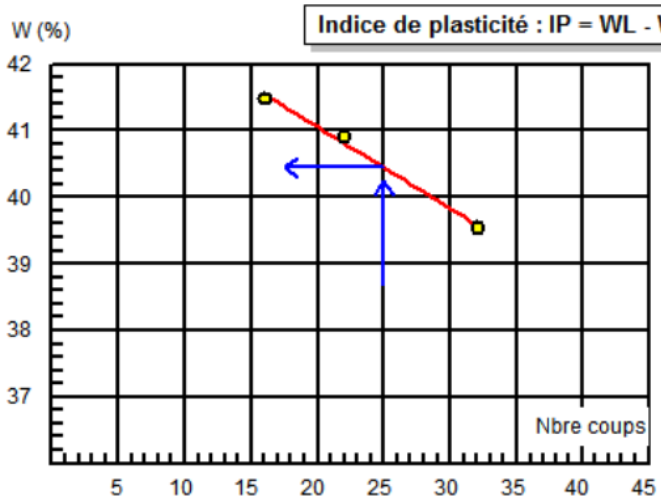


RAPPORT D'ESSAI

LIMITES D'ATTERBERG: NF P 94 - 51

Etude : Adaptation de l'etude d'amenagement oued el Hamiz	Réf : SR. 03
N° Dossier : 08/2021	Profondeur : 5.0 à 5.50 m
Lieu : pk0+000 (embouchure) au pk 1+600 (pont RN24)	Nature : Sables vasards
	Date essais : 22.06.2021 au 26.06.2021

Indice de plasticité : IP = WL - WP = 18,0%

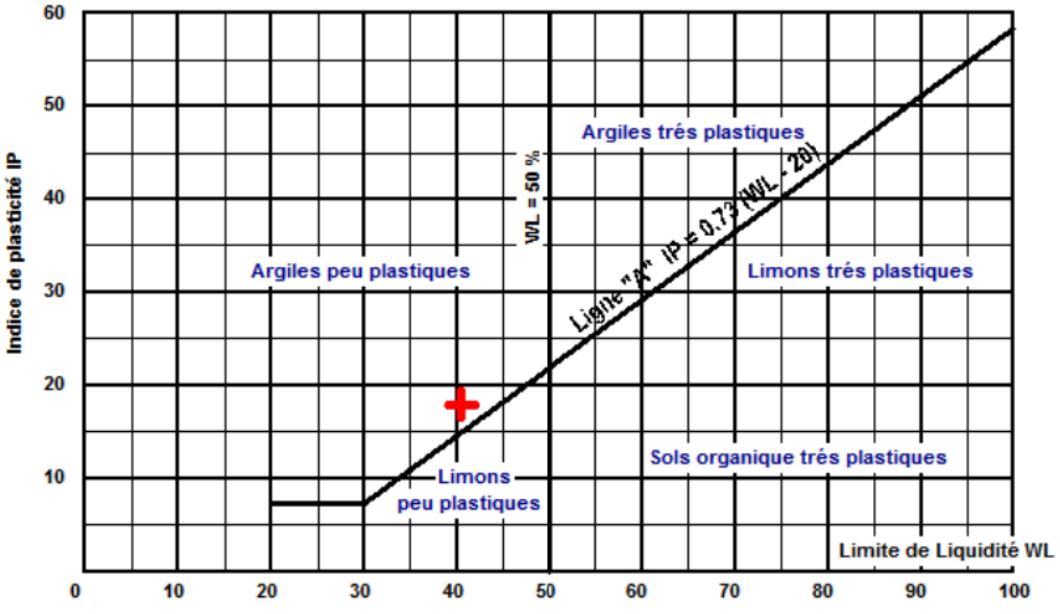


Essai N°	W (%)
1	22,68
2	22,54
3	22,14

Limite de Liquidité (WL) = 40,45 %

Limite de Plasticité WP = 22,45 %

ABAQUE DE CASAGRANDE

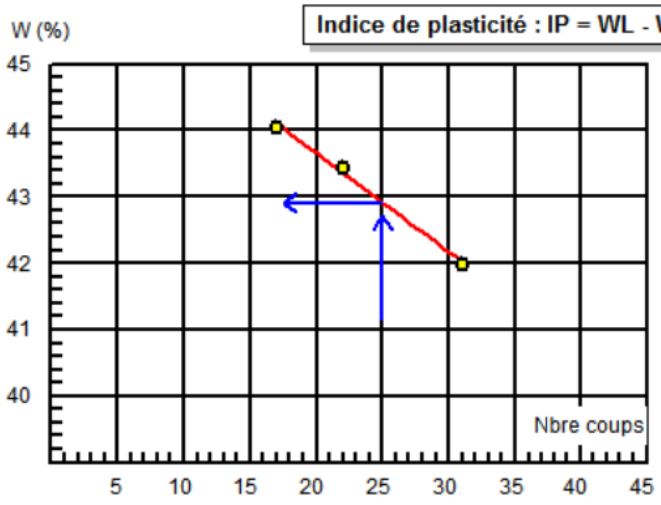


RAPPORT D'ESSAI

LIMITES D'ATTERBERG: NF P 94 - 51

Etude : Adaptation de l'etude d'amenagement oued el Hamiz	Réf : SR. 04
N° Dossier : 08/2021	Profondeur : 2.00 à 2.50
Lieu : pk0+000 (embouchure) au pk 1+600 (pont RN24)	Nature : Limon sableux
	Date essais : 22.06.2021 au 26.06.2021

Indice de plasticité : IP = WL - WP = 20,51%

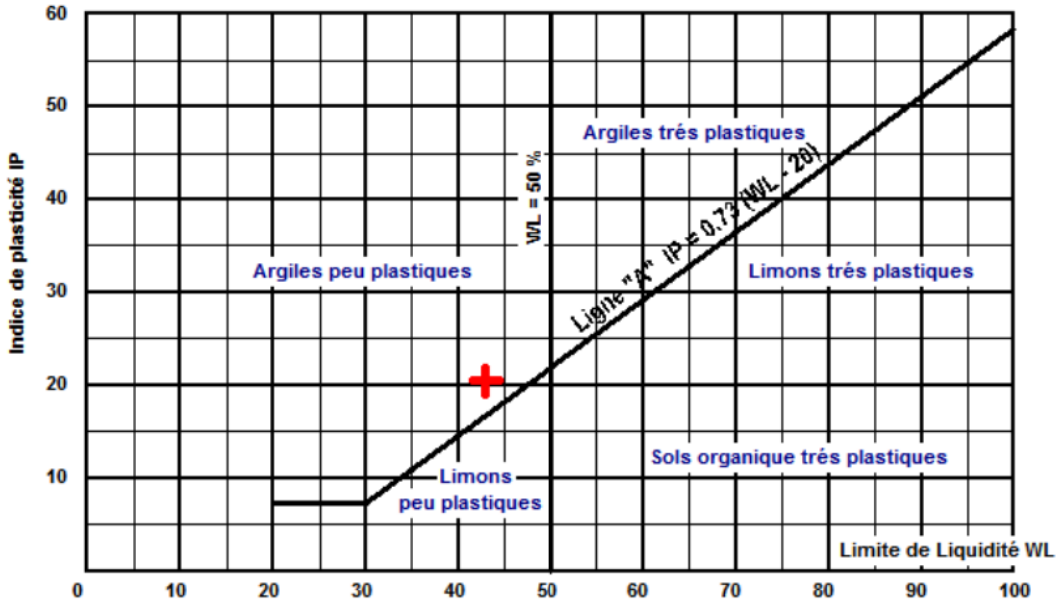


Limite de Liquidité (WL) = 42,92 %

Essai N°	W (%)
1	22,44
2	22,81
3	21,98

Limite de Plasticité WP = 22,41 %

ABAQUE DE CASAGRANDE

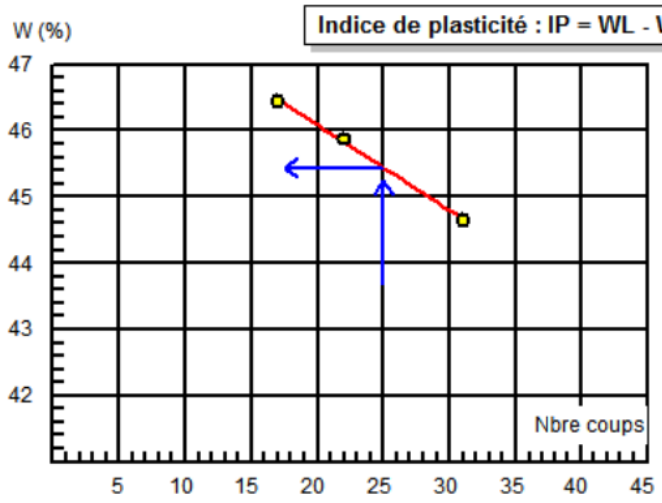


RAPPORT D'ESSAI

LIMITES D'ATTERBERG: NF P 94 - 51

Etude : Adaptation de l'etude d'amenagement oued el Hamiz	Réf : SR. 04
N° Dossier : 08/2021	Profondeur : 6.00 à 6.50
Lieu : pk0+000 (embouchure) au pk 1+600 (pont RN24)	Nature : Limon argileux
	Date essais : 22.06.2021 au 26.06.2021

Indice de plasticité : IP = WL - WP = 23,03%

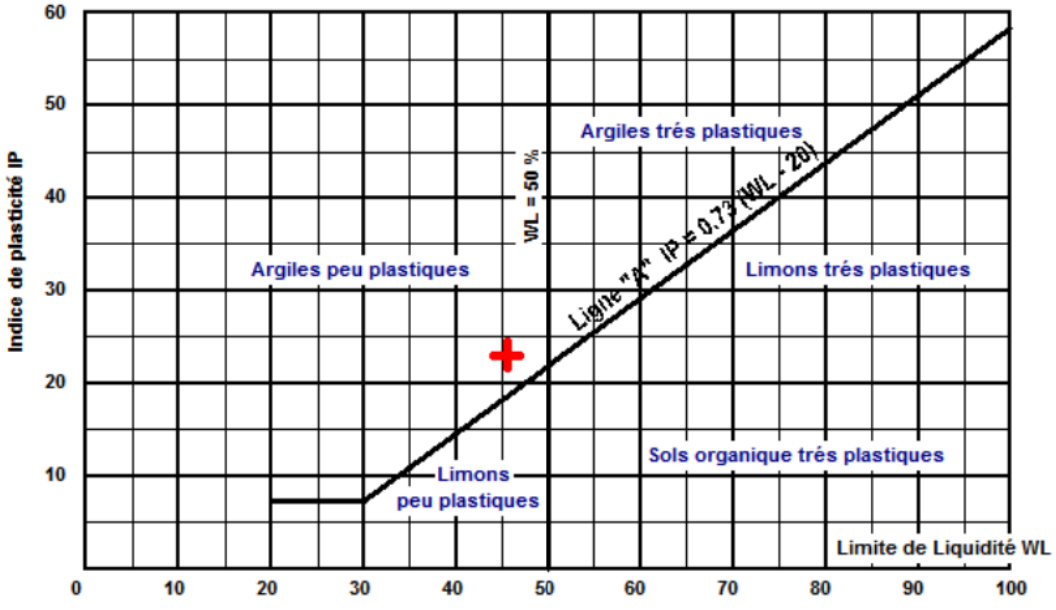


Essai N°	W (%)
1	22,44
2	22,81
3	21,98

Limite de Liquidité (WL) = 45,44 %

Limite de Plasticité WP = 22,41 %

ABAQUE DE CASAGRANDE

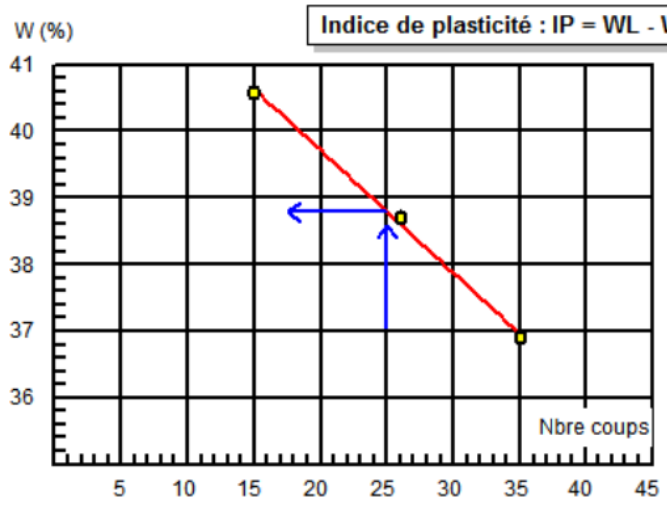


RAPPORT D'ESSAI

LIMITES D'ATTERBERG: NF P 94 - 51

Etude : Adaptation de l'etude d'amenagement oued el Hamiz	Réf : SR. 05
N° Dossier : 08/2021	Profondeur : 2.50 à 3.00m
Lieu : pk0+000 (embouchure) au pk 1+600 (pont RN24)	Nature : Limon sableux
	Date essais : 22.06.2021 au 26.06.2021

Indice de plasticité : IP = WL - WP = 15,99%

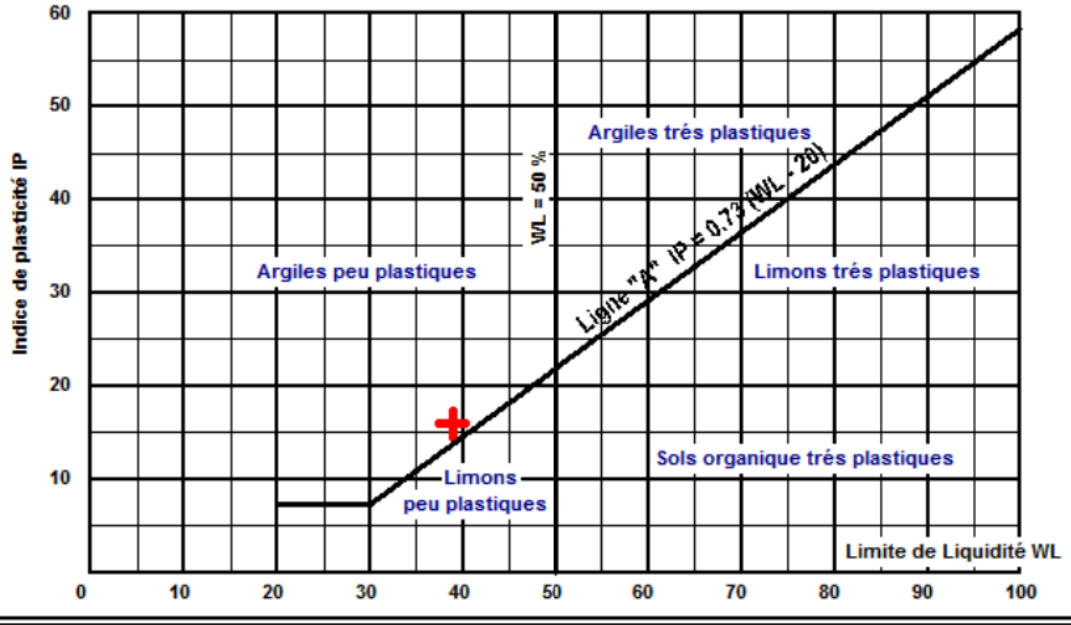


Essai N°	W (%)
1	22,95
2	22,89
3	22,55

Limite de Plasticité WP = 22,8 %

Limite de Liquidité (WL) = 38,79 %

ABAQUE DE CASAGRANDE

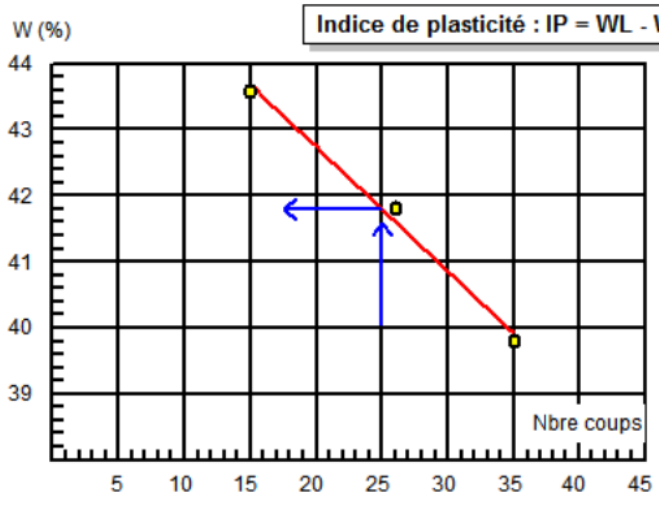


RAPPORT D'ESSAI

LIMITES D'ATTERBERG: NF P 94 - 51

Etude : Adaptation de l'etude d'amenagement oued el Hamiz	Réf : SR. 05
N° Dossier : 08/2021	Profondeur : 6.50 à 7.00m
Lieu : pk0+000 (embouchure) au pk 1+600 (pont RN24)	Nature : Limon argilo- sableux
	Date essais : 22.06.2021 au 26.06.2021

Indice de plasticité : IP = WL - WP = 21,16%

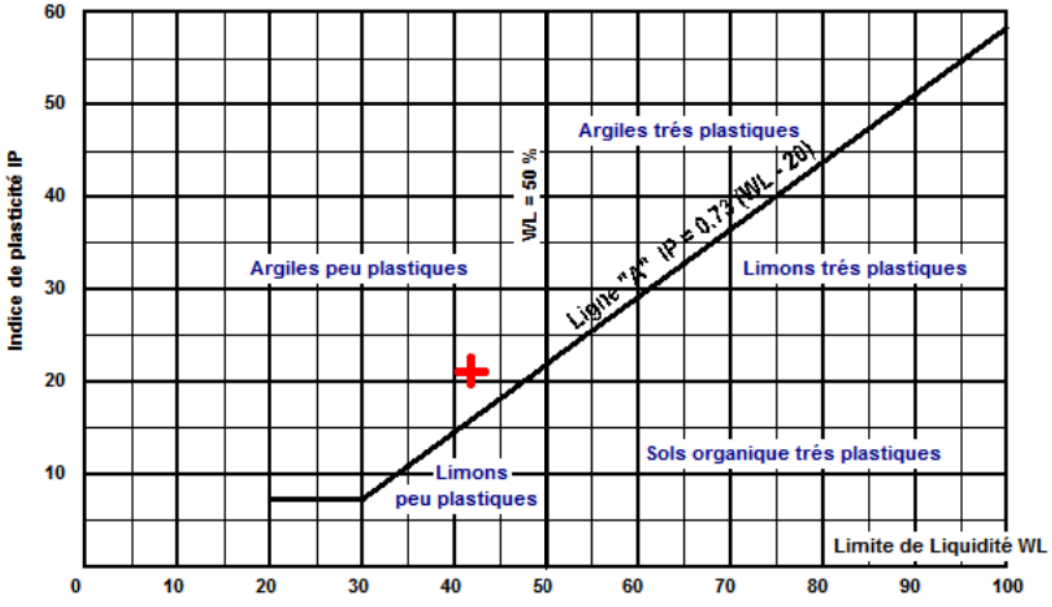


Essai N°	W (%)
1	20,6
2	20,8
3	20,5

Limite de Liquidité (WL) = 41,79 %

Limite de Plasticité WP = 20,63 %

ABAQUE DE CASAGRANDE

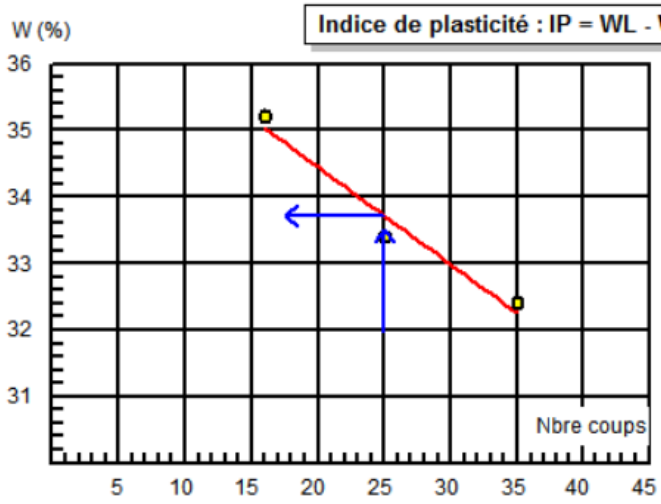


RAPPORT D'ESSAI

LIMITES D'ATTERBERG: NF P 94 - 51

Etude : Adaptation de l'etude d'amenagement oued Hamiz	Réf : SR : 07
N° Dossier : 09/2021	Profondeur : 2.50 à 3.00 m
Lieu : Tronçon pont RN24 à la passerelle o.Bacora	Nature :
	Date essais : 27.06.2021 au 30.06.2021

Indice de plasticité : IP = WL - WP = 13,9%

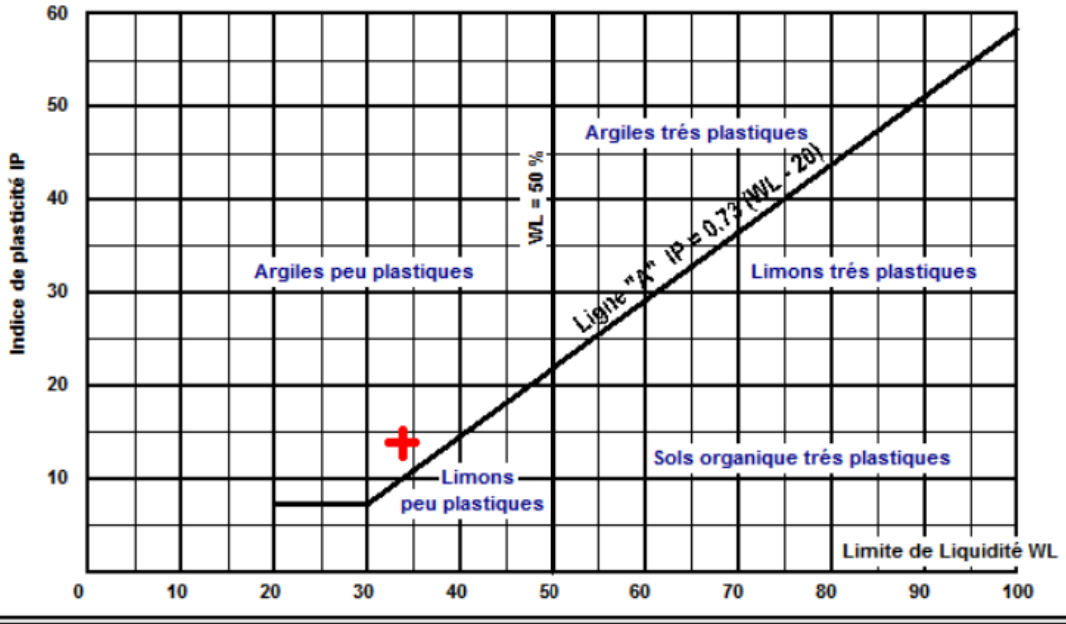


Essai N°	W (%)
1	19,5
2	19,85
3	20,1

Limite de Liquidité (WL) = 33,72 %

Limite de Plasticité WP = 19,82 %

ABAQUE DE CASAGRANDE

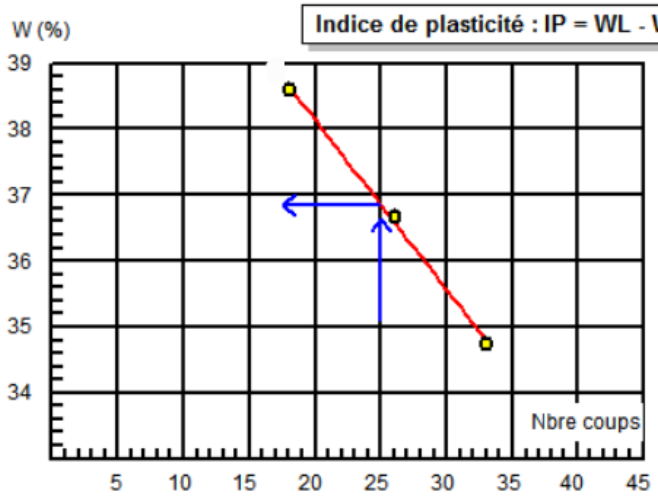


RAPPORT D'ESSAI

LIMITES D'ATTERBERG: NF P 94 - 51

Etude : Adaptation de l'etude d'amenagement oued Hamiz	Réf : SR : 07
N° Dossier : 09/2021	Profondeur : 5.0 à 5.0 m
Lieu : Tronçon pont RN24 à la passerelle o.Bacora	Nature : IIMON SABLEUX
	Date essais : 27.06.2021 au 30.06.2021

Indice de plasticité : IP = WL - WP = 13,15%

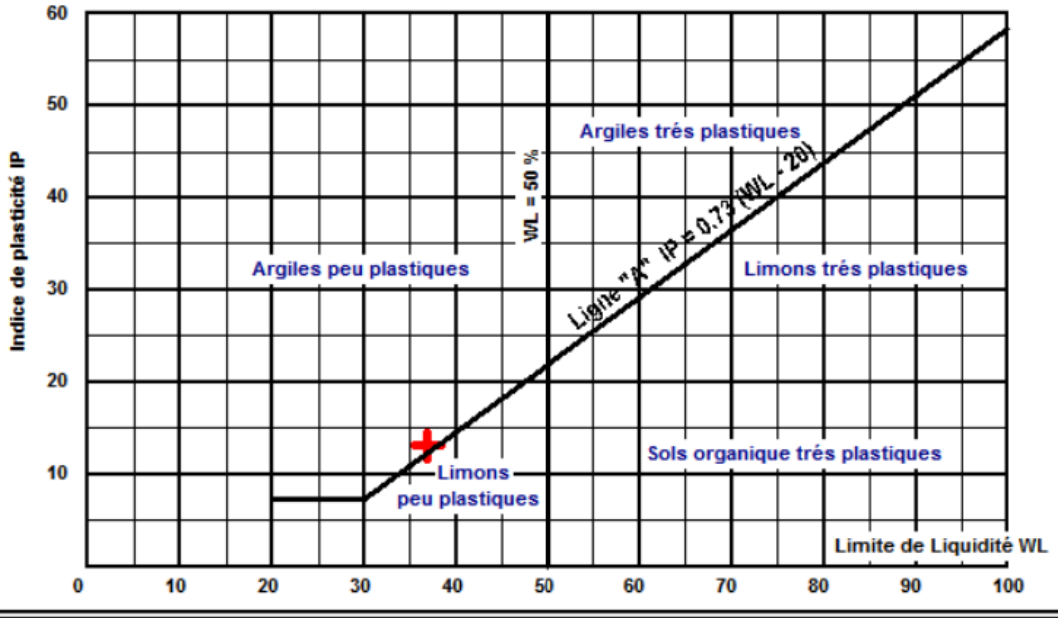


Essai N°	W (%)
1	23,5
2	24,5
3	23,1

Limite de Liquidité (WL) = 36,85 %

Limite de Plasticité WP = 23,7 %

ABAQUE DE CASAGRANDE

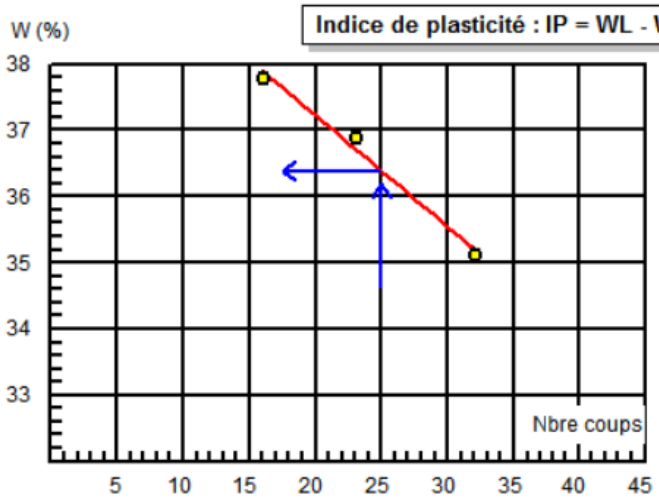


RAPPORT D'ESSAI

LIMITES D'ATTERBERG: NF P 94 - 51

Etude : Adaptation de l'etude d'amenagement oued Hamiz	Réf : SR : 08
N° Dossier : 09/2021	Profondeur : 3.00 à 3.50 m
Lieu : Tronçon pont RN24 à la passerelle o.Bacora	Nature :
	Date essais : 27.06.2021 au 30.06.2021

Indice de plasticité : IP = WL - WP = 14,26%

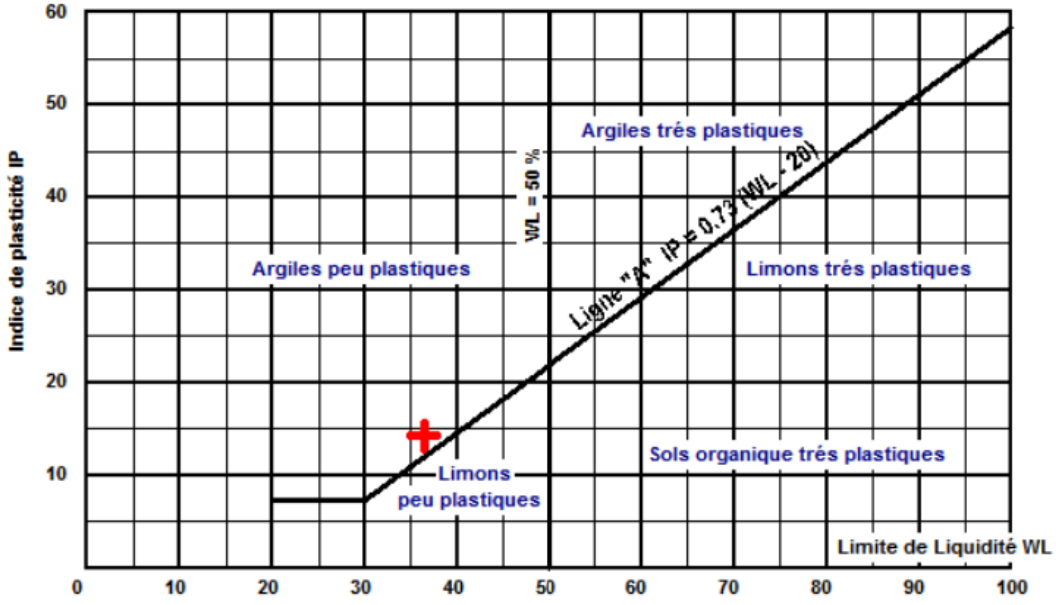


Essai N°	W (%)
1	21,87
2	22,34
3	22,17

Limite de Liquidité (WL) = 36,39 %

Limite de Plasticité WP = 22,13 %

ABAQUE DE CASAGRANDE

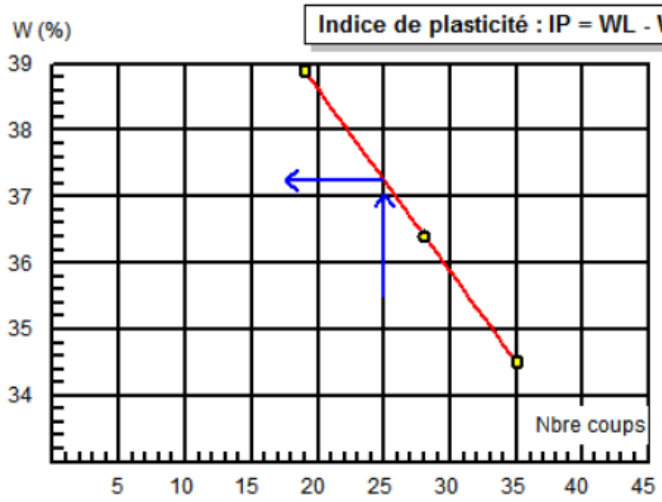


RAPPORT D'ESSAI

LIMITES D'ATTERBERG: NF P 94 - 51

Etude : Adaptation de l'etude d'amenagement oued Hamiz	Réf : SR : 08
N° Dossier : 09/2021	Profondeur : 6.0 à 6500m
Lieu : Tronçon pont RN24 à la passerelle o.Bacora	Nature :
	Date essais : 27.06.2021 au 30.06.2021

Indice de plasticité : IP = WL - WP = 12,84%

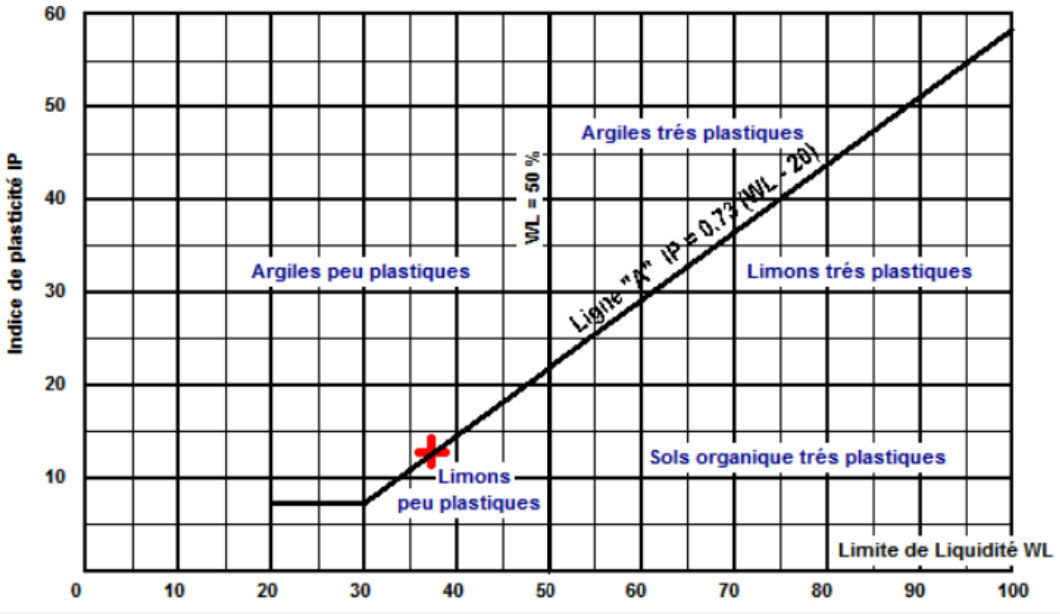


Essai N°	W (%)
1	24,5
2	24,4
3	24,3

Limite de Liquidité (WL) = 37,24 %

Limite de Plasticité WP = 24,4 %

ABAQUE DE CASAGRANDE

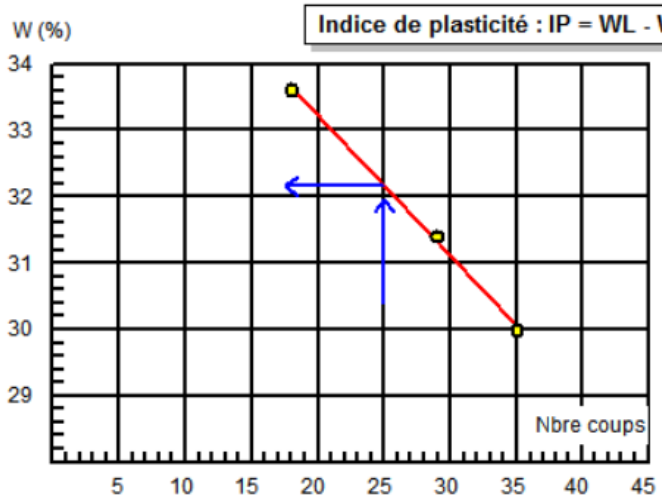


RAPPORT D'ESSAI

LIMITES D'ATTERBERG: NF P 94 - 51

Etude : Adaptation de l'etude d'amenagement oued Hamiz	Réf : SR : 09
N° Dossier : 09/2021	Profondeur : 4.5 à 4.0 m
Lieu : Tronçon pont RN24 à la passerelle o.Bacora	Nature :
	Date essais : 27.06.2021 au 30.06.2021

Indice de plasticité : IP = WL - WP = 10,75%

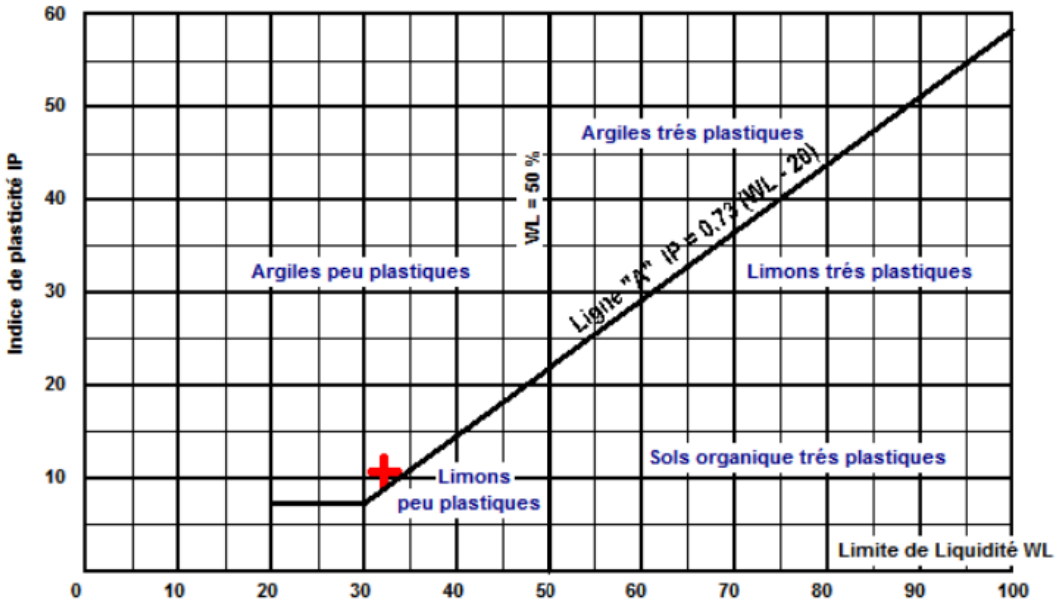


Essai N°	W (%)
1	21,3
2	21,54
3	21,4

Limite de Liquidité (WL) = 32,16 %

Limite de Plasticité WP = 21,41 %

ABAQUE DE CASAGRANDE

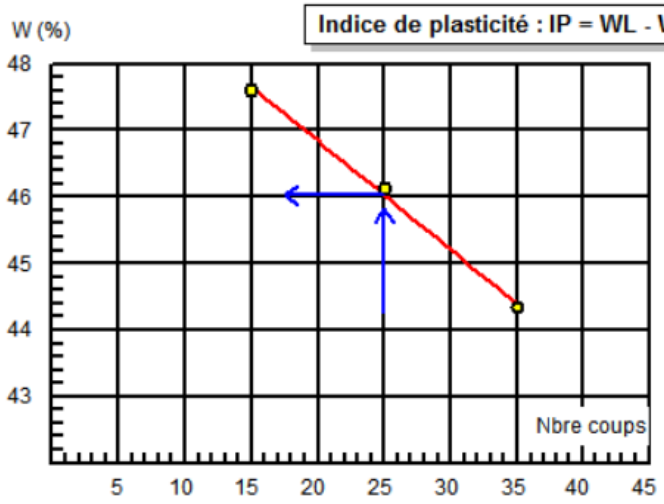


RAPPORT D'ESSAI

LIMITES D'ATTERBERG: NF P 94 - 51

Etude : Adaptation de l'etude d'amenagement oued Hamiz	Réf : SR : 09
N° Dossier : 09/2021	Profondeur : 5.50 à 6.0 m
Lieu : Tronçon pont RN24 à la passerelle o.Bacora	Nature :
	Date essais : 27.06.2021 au 30.06.2021

Indice de plasticité : IP = WL - WP = 21,34%

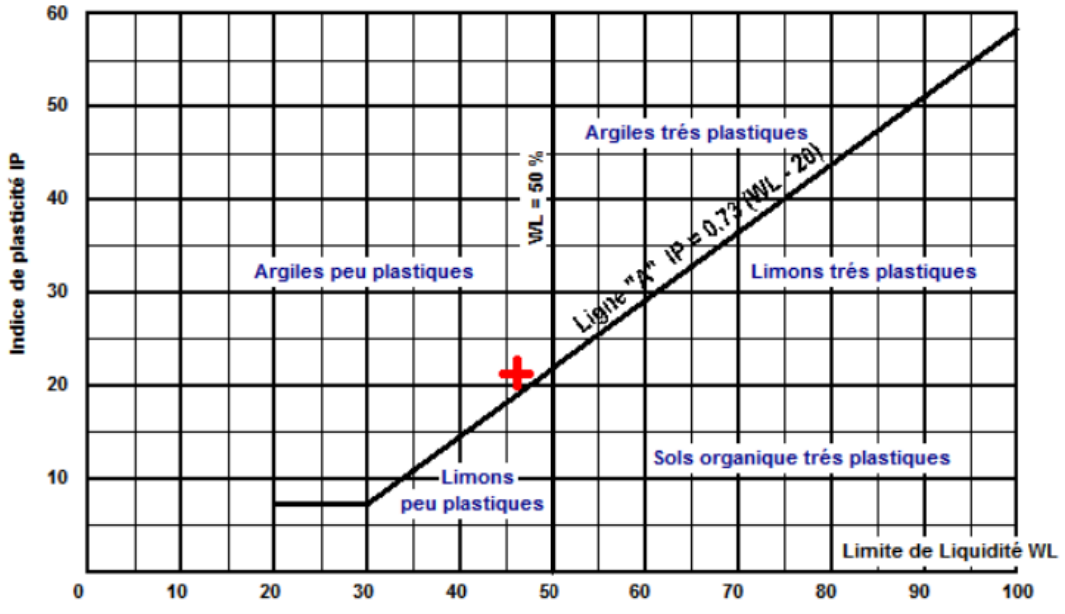


Essai N°	W (%)
1	24,34
2	24,8
3	24,9

Limite de Liquidité (WL) = 46,02 %

Limite de Plasticité WP = 24,68 %

ABAQUE DE CASAGRANDE

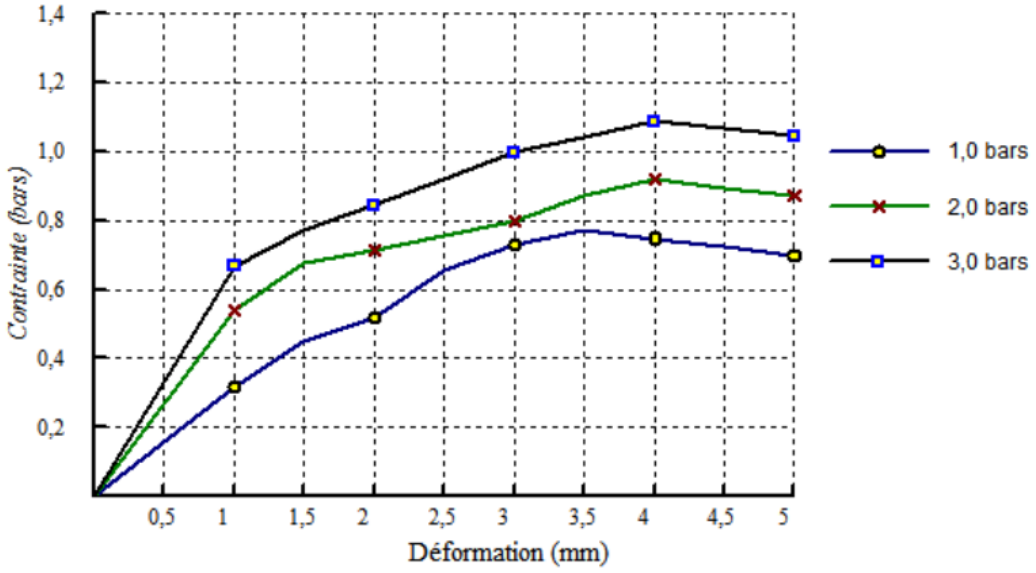


RAPPORT D'ESSAI

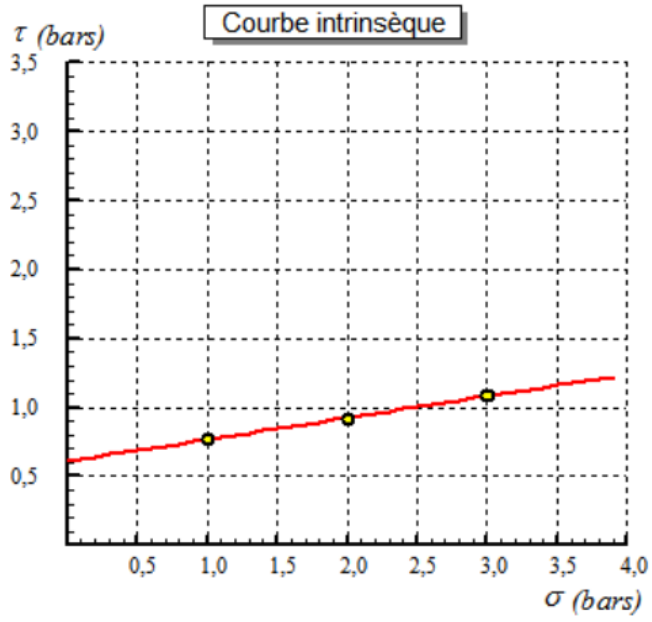
ESSAI DE CISAILLEMENT RECTILIGNE: NF P94-071-1 Août 1994

Etude : Adaptation de l'etude d'amenegement o.hamiz	Type d'essai : UU
Dossier N° : 08/2021	Vitesse de cisaillement : 1 mm/mn
N° Sond : SR01	Date début essais : 22.06.2021
Prof : 3.00 - 3.50m	Date fin essais : 26.06.2021
Nature sol : Sable vasard (aspect vaseux)	

Contrainte / Déformation



Courbe intrinsèque



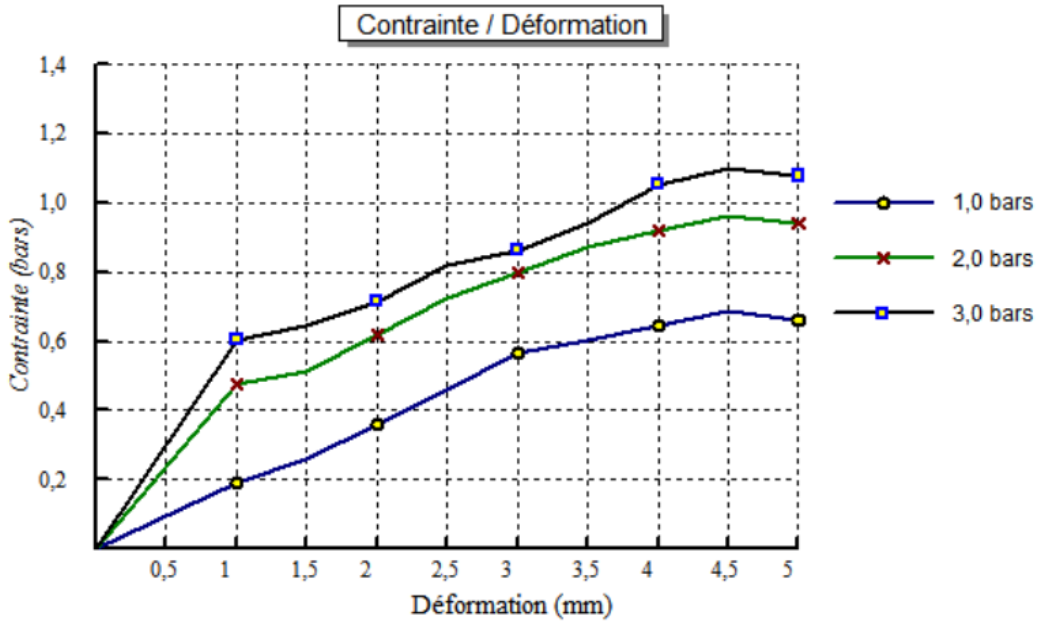
Cohésion = 0,61 bars
Frottement = 8,95 degrès

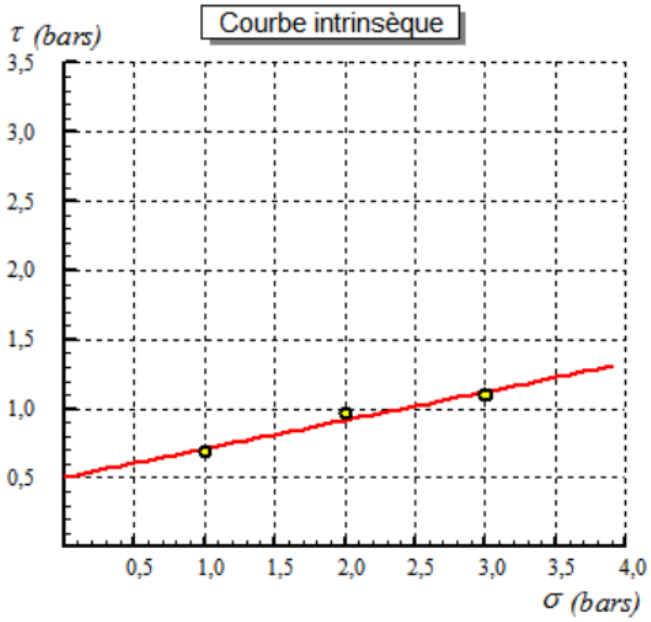
σ_1 = 1,0 bars ---> τ_1 = 0,77
σ_2 = 2,0 bars ---> τ_2 = 0,92
σ_3 = 3,0 bars ---> τ_3 = 1,09

RAPPORT D'ESSAI

ESSAI DE CISAILLEMENT RECTILIGNE: NF P94-071-1 Août 1994

Etude : Adaptation de l'etude d'amenegement o.hamiz	Type d'essai : UU
Dossier N° : 08/2021	Vitesse de cisaillement : 1 mm/mn
N° Sond : SR : 02	Date début essais : 22.06.2021
Prof : 3.50 - 4.00m	Date fin essais : 26.06.2021
Nature sol : Sable vasard grisatre (aspect vaseux)	





Cohésion = 0,5 bars
Frottement = 11,67 degrès

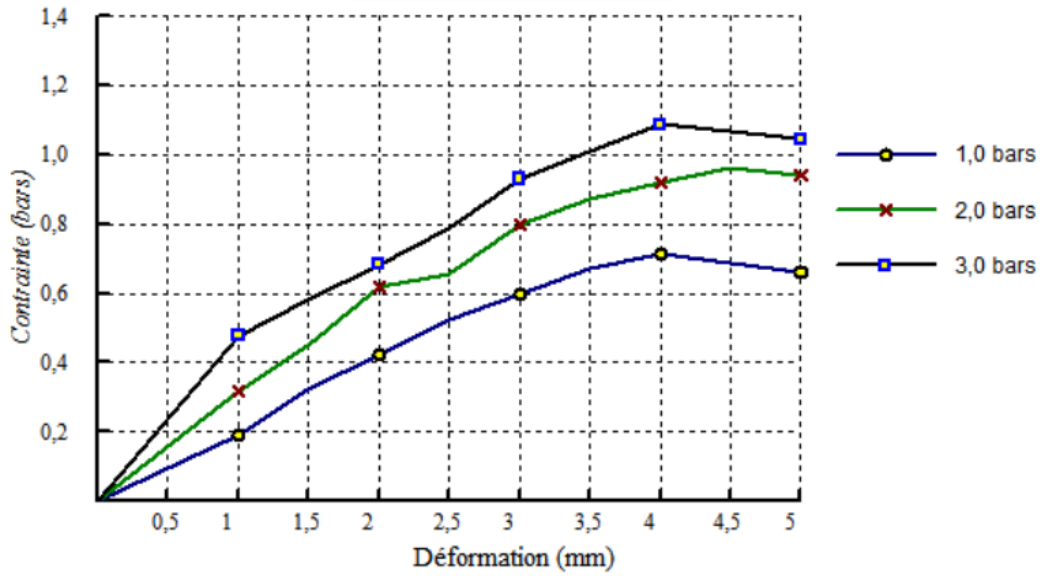
σ_1 = 1,0 bars ---> τ_1 = 0,69
σ_2 = 2,0 bars ---> τ_2 = 0,96
σ_3 = 3,0 bars ---> τ_3 = 1,10

RAPPORT D'ESSAI

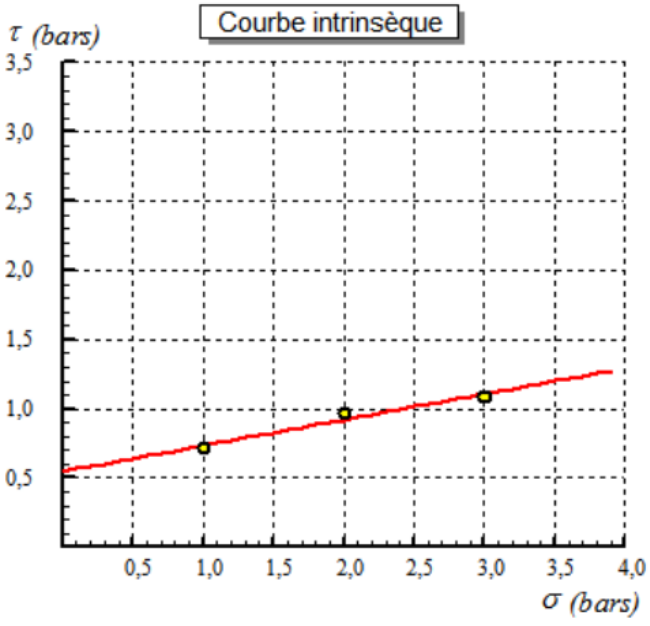
ESSAI DE CISAILLEMENT RECTILIGNE: NF P94-071-1 Août 1994

Etude : Adaptation de l'etude d'amenegement o.hamiz	Type d'essai : UU
Dossier N° : 08/2021	Vitesse de cisaillement : 1 mm/mn
N° Sond : SR : 03	Date début essais : 22.06.2021
Prof : 5.0 - 5.50m	Date fin essais : 26.06.2021
Nature sol : Sable vasard grisatre (aspect vaseux)	

Contrainte / Déformation



Courbe intrinsèque



Cohésion = 0,55 bars
Frottement = 10,59 degrès

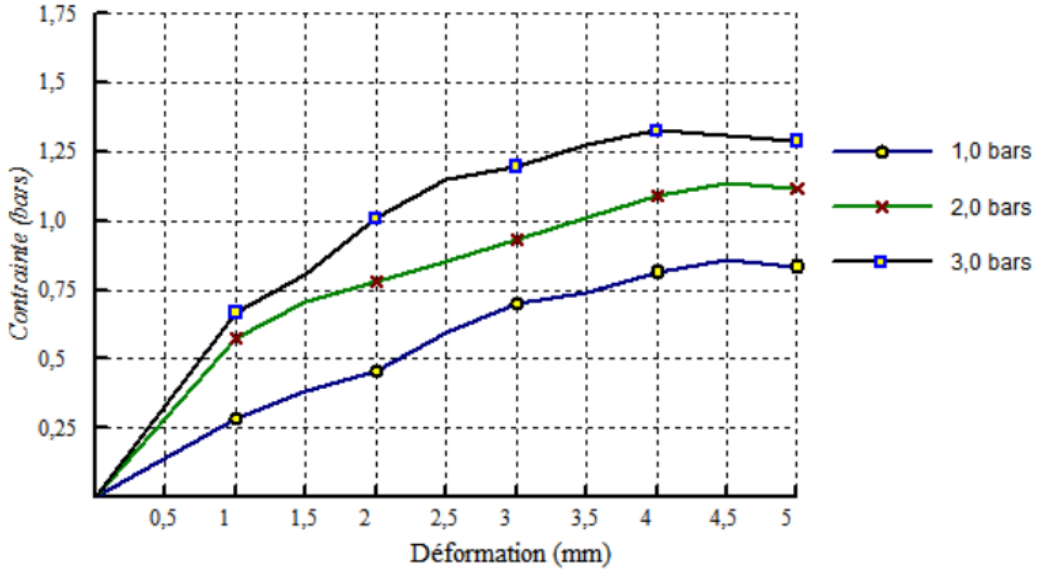
σ_1 = 1,0 bars ---> τ_1 = 0,71
σ_2 = 2,0 bars ---> τ_2 = 0,96
σ_3 = 3,0 bars ---> τ_3 = 1,09

RAPPORT D'ESSAI

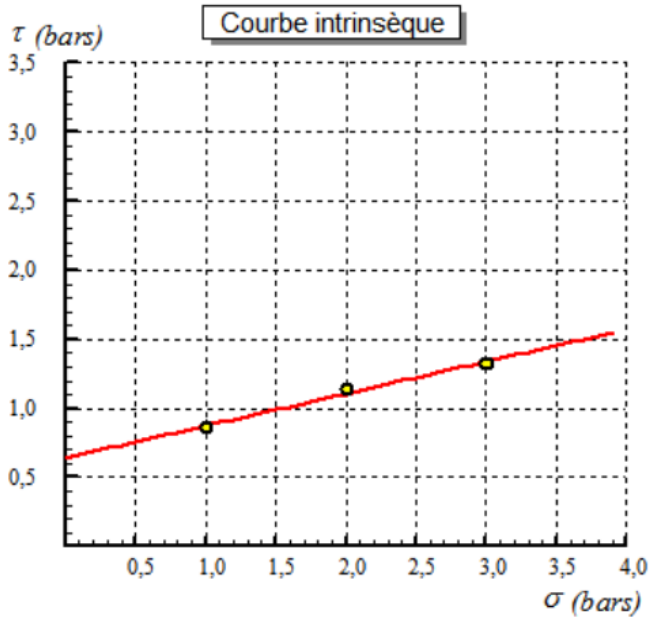
ESSAI DE CISAILLEMENT RECTILIGNE: NF P94-071-1 Août 1994

Etude : Adaptation de l'etude d'amenegement o.hamiz	Type d'essai : UU
Dossier N° : 08/2021	Vitesse de cisaillement : 1 mm/mn
N° Sond : SR 4	Date début essais : 22.06.2021
Prof : 6.0 - 6.5m	Date fin essais : 26.06.2021
Nature sol : Limon argileux peu plastique	

Contrainte / Déformation



Courbe intrinsèque



Cohésion = 0,64 bars
Frottement = 13,12 degrès

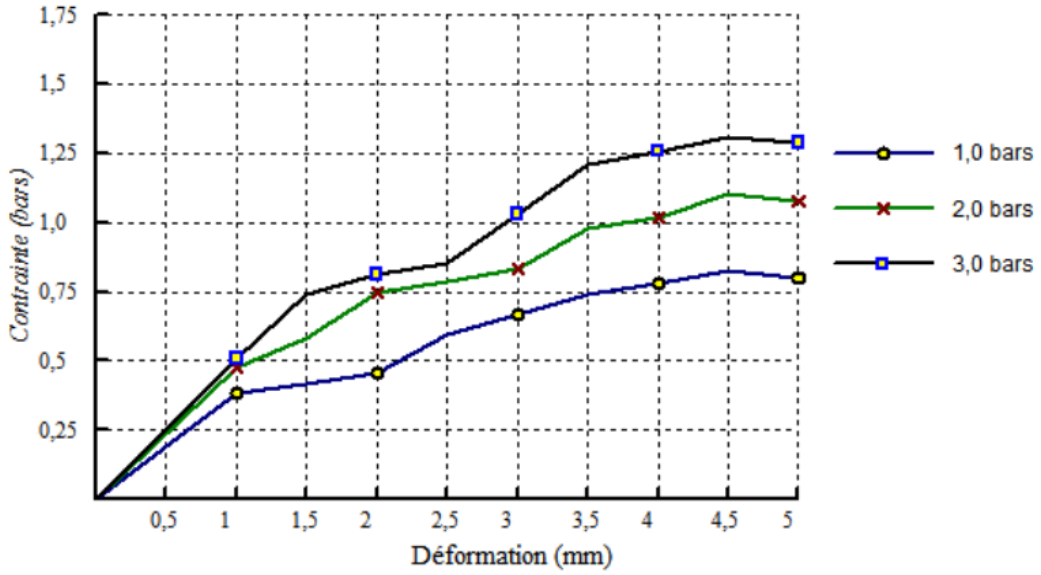
σ_1 = 1,0 bars ---> τ_1 = 0,86
σ_2 = 2,0 bars ---> τ_2 = 1,14
σ_3 = 3,0 bars ---> τ_3 = 1,33

RAPPORT D'ESSAI

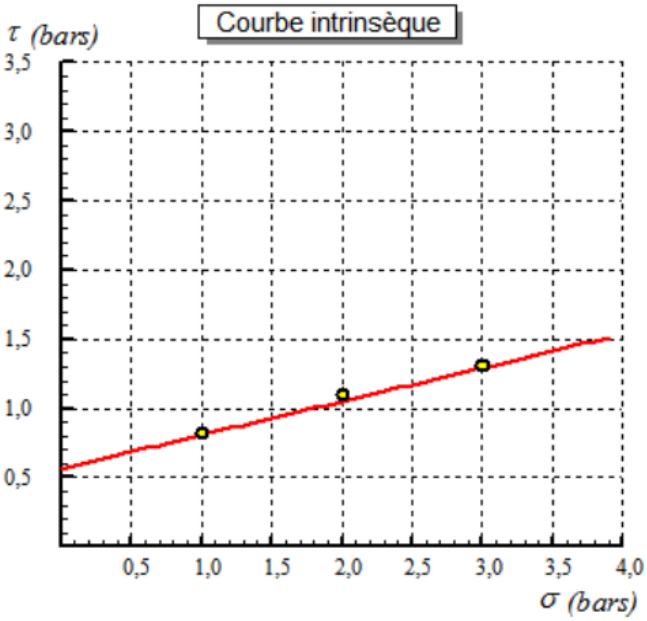
ESSAI DE CISAILLEMENT RECTILIGNE: NF P94-071-1 Août 1994

Etude : Adaptation de l'etude d'amenegement o.hamiz	Type d'essai : UU
Dossier N° : 08/2021	Vitesse de cisaillement : 1 mm/mn
N° Sond : SR : 05	Date début essais : 22.06.2021
Prof : 6.50 à 7.00 m	Date fin essais : 26.06.2021
Nature sol : Limon argilo-sableux	

Contrainte / Déformation



Courbe intrinsèque

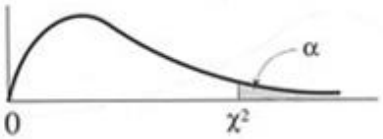


Cohésion = 0,57 bars
Frottement = 13,66 degrès

σ_1 = 1,0 bars ---> τ_1 = 0,83
σ_2 = 2,0 bars ---> τ_2 = 1,10
σ_3 = 3,0 bars ---> τ_3 = 1,31

Annexe N°02

Table χ^2 : points de pourcentage supérieurs de la distribution χ^2



dl	.995	.990	.975	.950	.900	.750	.500	.250	.100	.050	.025	.010	.005
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.10	0.45	1.32	2.71	3.84	5.02	6.63	7.88
2	0.01	0.02	0.05	0.10	0.21	0.58	1.39	2.77	4.61	5.99	7.38	9.21	10.60
3	0.07	0.11	0.22	0.35	0.58	1.21	2.37	4.11	6.25	7.82	9.35	11.35	12.84
4	0.21	0.30	0.48	0.71	1.06	1.92	3.36	5.39	7.78	9.49	11.14	13.28	14.86
5	0.41	0.55	0.83	1.15	1.61	2.67	4.35	6.63	9.24	11.07	12.83	15.09	16.75
6	0.68	0.87	1.24	1.64	2.20	3.45	5.35	7.84	10.64	12.59	14.45	16.81	18.55
7	0.99	1.24	1.69	2.17	2.83	4.25	6.35	9.04	12.02	14.07	16.01	18.48	20.28
8	1.34	1.65	2.18	2.73	3.49	5.07	7.34	10.22	13.36	15.51	17.54	20.09	21.96
9	1.73	2.09	2.70	3.33	4.17	5.90	8.34	11.39	14.68	16.92	19.02	21.66	23.59
10	2.15	2.56	3.25	3.94	4.87	6.74	9.34	12.55	15.99	18.31	20.48	23.21	25.19
11	2.60	3.05	3.82	4.57	5.58	7.58	10.34	13.70	17.28	19.68	21.92	24.72	26.75
12	3.07	3.57	4.40	5.23	6.30	8.44	11.34	14.85	18.55	21.03	23.34	26.21	28.30
13	3.56	4.11	5.01	5.89	7.04	9.30	12.34	15.98	19.81	22.36	24.74	27.69	29.82
14	4.07	4.66	5.63	6.57	7.79	10.17	13.34	17.12	21.06	23.69	26.12	29.14	31.31
15	4.60	5.23	6.26	7.26	8.55	11.04	14.34	18.25	22.31	25.00	27.49	30.58	32.80
16	5.14	5.81	6.91	7.96	9.31	11.91	15.34	19.37	23.54	26.30	28.85	32.00	34.27
17	5.70	6.41	7.56	8.67	10.09	12.79	16.34	20.49	24.77	27.59	30.19	33.41	35.72
18	6.26	7.01	8.23	9.39	10.86	13.68	17.34	21.60	25.99	28.87	31.53	34.81	37.15
19	6.84	7.63	8.91	10.12	11.65	14.56	18.34	22.72	27.20	30.14	32.85	36.19	38.58
20	7.43	8.26	9.59	10.85	12.44	15.45	19.34	23.83	28.41	31.41	34.17	37.56	40.00
21	8.03	8.90	10.28	11.59	13.24	16.34	20.34	24.93	29.62	32.67	35.48	38.93	41.40
22	8.64	9.54	10.98	12.34	14.04	17.24	21.34	26.04	30.81	33.93	36.78	40.29	42.80
23	9.26	10.19	11.69	13.09	14.85	18.14	22.34	27.14	32.01	35.17	38.08	41.64	44.18
24	9.88	10.86	12.40	13.85	15.66	19.04	23.34	28.24	33.20	36.42	39.37	42.98	45.56
25	10.52	11.52	13.12	14.61	16.47	19.94	24.34	29.34	34.38	37.65	40.65	44.32	46.93
26	11.16	12.20	13.84	15.38	17.29	20.84	25.34	30.43	35.56	38.89	41.92	45.64	48.29
27	11.80	12.88	14.57	16.15	18.11	21.75	26.34	31.53	36.74	40.11	43.20	46.96	49.64
28	12.46	13.56	15.31	16.93	18.94	22.66	27.34	32.62	37.92	41.34	44.46	48.28	50.99
29	13.12	14.26	16.05	17.71	19.77	23.57	28.34	33.71	39.09	42.56	45.72	49.59	52.34
30	13.78	14.95	16.79	18.49	20.60	24.48	29.34	34.80	40.26	43.77	46.98	50.89	53.67
40	20.67	22.14	24.42	26.51	29.06	33.67	39.34	45.61	51.80	55.75	59.34	63.71	66.80
50	27.96	29.68	32.35	34.76	37.69	42.95	49.34	56.33	63.16	67.50	71.42	76.17	79.52
60	35.50	37.46	40.47	43.19	46.46	52.30	59.34	66.98	74.39	79.08	83.30	88.40	91.98
70	43.25	45.42	48.75	51.74	55.33	61.70	69.34	77.57	85.52	90.53	95.03	100.44	104.24
80	51.14	53.52	57.15	60.39	64.28	71.15	79.34	88.13	96.57	101.88	106.63	112.34	116.35
90	59.17	61.74	65.64	69.13	73.29	80.63	89.33	98.65	107.56	113.14	118.14	124.13	128.32
100	67.30	70.05	74.22	77.93	82.36	90.14	99.33	109.14	118.49	124.34	129.56	135.82	140.19