

N° d'ordre :...../....



UNIVERSITE MOHAMMED PREMIER
ECOLE NATIONALE DES SCIENCES APPLIQUEES
D'AL HOCEIMA



Département: Génie Énergétique & Génie Civil

Mémoire de Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état
en Génie Civil –option Hydraulique-

**Étude de protection de la ville de Marrakech
contre les inondations**

Réalisé Par :

EL HARTI Yassine & AIT ICHOU Ikrame

Effectué à

TEAM MAROC (GROUPE JACOBS ENGINEERING SA) - RABAT

Encadré à l'ENSAH par :
Dr. Abdellatif LAMHAMDI

Encadré au TM(GJESA) par :
Mr. Rachid BENNANI

Soutenu le 21/07/2017 devant le jury composé de :

Pr. LAMHAMDI Abdellatif
Pr. BENGAMRA Saïd
Pr. AIT BENICHOUS Samah

Président (ENSAH)
Examineur (ENSAH)
Examinatrice (ENSAH)

Année Académique: 2016-2017

*Remarques : Encadrant /Membres des
jurys*

(قَالُوا سُبْحَانَكَ لَا عِلْمَ لَنَا إِلَّا مَا
عَلَّمْتَنَا إِنَّكَ أَنْتَ الْعَلِيمُ الْحَكِيمُ)

صدق الله العظيم

« Les batailles de la ville ne sont pas gagnées par les plus forts ni par les rapides mais par ceux qui n'abandonnent jamais » Feu Hassan II

Remerciements

Toute notre gratitude, notre grâce et nos remerciements vont à Dieu le Tout puissant qui nous a donné la force, la patience, le courage et la volonté pour élaborer ce travail.

*Nous tenons à remercier Monsieur **Brahim AIT HADDOU**, chef du département hydraulique, pour nous avoir intégré dans son équipe, pour ses conseils, son support et l'autonomie qu'il nous a laissée pendant notre stage.*

*Nos sincères remerciements à Monsieur **Rachid BENNANI**, ingénieur au sein de Team Maroc (Groupe Jacobs engineering SA), qui nous a fait l'honneur d'encadrer notre travail. Nous tenons à lui exprimer notre profonde reconnaissance pour son accueil, les conseils précieux qu'ils nous a prodigué et son accompagnement tout au long de ce stage professionnel avec beaucoup de patience et de pédagogie.*

*A notre encadrant interne Dr **Abdellatif LAMHAMDI**, nous adressons notre plus sincère reconnaissance pour son encadrement spécial, son disponibilité permanente et les efforts qu'ils a déployés afin de pousser à l'avant notre projet.*

Nous remercions les membres de jury qui nous font l'honneur de présider cette soutenance et d'examiner ce modeste travail.

Toute notre gratitude va à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.

Dédicaces

Louange à Dieu seul,

*Comme preuve de reconnaissance, de gratitude et d'amour, je dédie ce modeste
travail, fruit de plusieurs années d'études,*

À ma chère mère, ma raison de vivre, pour tous ses sacrifices et son amour.

À mon cher papa pour son amour et son dévouement.

*« À vous, mes parents, je dis merci d'avoir fait de moi celui que je suis
aujourd'hui. Aucune dédicace ne pourra exprimer mes respects, mes
considérations et ma grande admiration pour vous. Puisse ce travail vous
témoigner mon affection et mon profond amour ».*

*À ma chère sœur Siham, mon cher frère Zaïd qui je le sais, ma réussite est très
importante à leurs yeux. Que Dieu vous garde pour moi.*

*À Mon binôme Yassine ELHARJI qui a contribué à la réalisation de ce
travail.*

*À mes amis, mes enseignants et pour ceux qui m'ont donné de l'aide un jour, que
Dieu vous paye pour tous vos bienfaits.*

Pour finir, à tous ceux que j'aime et qui m'aiment, je dédie ce mémoire.

Ikrane AIT ICHOU

Dédicaces

Louange à Dieu seul,

*Comme preuve de reconnaissance, de gratitude et d'amour, je dédie ce modeste
travail, fruit de plusieurs années d'études,*

À ma chère mère, qui a été à mes côtés et m'a soutenu durant toute ma vie.

À mon cher père qui a sacrifié toute sa vie afin de me voir devenir ce que je suis.

*« À vous, mes parents, je dis merci de m'avoir guidé durant les moments les plus
pénibles de ce long chemin. Aucune dédicace ne pourra exprimer mes respects, mes
considérations et ma grande admiration pour vous. Puisse ce travail vous
témoigner mon affection et mon profond amour».*

Mes frères, je vous souhaite une bonne chance dans votre parcours.

*À Mon binôme Ikrame AIT ICHOU qui a contribué à la réalisation de ce
travail.*

*À mes amis, mes enseignants et pour ceux qui m'ont donné de l'aide un jour, que
Dieu vous paye pour tous vos bienfaits.*

Pour finir, à tous ceux que j'aime et qui m'aiment, je dédie ce mémoire.

Yassine ELHARTI

Résumé

Le présent projet de fin d'études a pour objectif la protection des populations et ses biens contre les inondations de l'Oued Al Bahja, à l'amont de son embouchure dans l'Oued Tensift. A ce niveau, les crues peuvent engendrer des inondations dont on cherche leur origine et leurs dégâts. La méthodologie de l'étude s'articule autour des trois parties suivantes :

- ✚ La première consiste en la réalisation des études hydrologiques des différents bassins versants entourant Oued Al Bahja.

Pour effectuer une étude détaillée, nous avons délimité les bassins versants concernés par la présente étude grâce au logiciel Autocad, et de générer leurs caractéristiques.

Ensuite il a fallu déterminer les débits de pointe via plusieurs méthodes et enfin choisir les bons débits qui feront l'objet de données d'entrée pour la simulation hydraulique.

- ✚ La deuxième partie consiste en la délimitation des zones inondables, pour cela il a fallu déterminer la capacité d'évacuation du cours d'eau par une étude hydraulique via les outils informatiques Arc-GIS et HEC-RAS, ainsi d'évaluer la capacité de transit des aménagements et des ouvrages existants.

- ✚ La troisième mission qui nous a été confié a pour but de trouver des solutions d'aménagements afin de remédier aux problèmes d'inondations de l'Oued Al Bahja.

Finalement, une étude technique et financière permettra de déduire lequel des schémas est valable pour la dite étude.

Mots-clés : Oued Al Bahja, inondation, étude hydrologique, bassin versant, débit, étude hydraulique, Autocad, ArcGIS, HEC-RAS, aménagements.

Abstract

The aim of this work is to protect the section of the Al Bahja River, Upstream of its mouth in the river Tensift, Where floods can cause flooding while determining the origin of floods and their damage. The methodology of the study is based on the following three parts:

- ✚ The first consists in carrying out hydrological studies of the different watersheds surrounding the Al Bahja River.

To carry out this work, a detailed study was carried out; first of all, we have to delimit the catchments basins concerned by the present study thanks to the Autocad software, before generating their characteristics.

Then it was necessary to determine the peak flows through several methods and finally to choose the good flows which will be the subject of input data for the hydraulic simulation.

- ✚ The second part consists of the delimitation of the flood zones, for this it was necessary to determine the capacity of evacuation of the stream by a hydraulic study through the computer tools Arc GIS and HEC RAS, and to assess the capacity of transit arrangements and existing structures.
- ✚ The third mission entrusted to us is aimed at finding solutions to improve the flooding problems of the Al Bahja River.

Finally, a technical and financial study will make it possible to deduce which of the schemes are valid for the said study.

Keywords: Al Bahja river, flood, hydrological studies, watershed, flow, Hydraulic study, Autocad, ArcGIS, HEC-RAS, arrangements.

Table des matières

INTRODUCTION.....	1
PRESENTATION DE L'ORGANISME D'ACCUEIL.....	2
CHAPITRE 1: SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE	4
1. INTRODUCTION.....	5
1.1. Les différents types d'aménagements	5
1.1.1. Recalibrage du cours d'eau	6
1.1.2. Endiguement du cours d'eau	6
1.1.3. Reboisement.....	7
1.1.4. Recalibrage des ouvrages d'art	7
1.1.5. Recalibrage des systèmes d'évacuation de l'eau.....	8
1.1.6. Barrages.....	8
1.1.7. Réservoirs d'orage.....	8
1.1.8. Correction torrentielle	9
1.1.9. Les épis.....	9
1.1.10. Reprofilage	10
2. CONCLUSION	10
CHAPITRE 2 : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE.....	11
1. INTRODUCTION.....	12
1.1. Données générales sur la zone d'étude	12
1.1.1. Aire de l'étude.....	12
1.1.2. Situation géographique et administrative.....	12
1.2. Milieu physique	13
1.2.1. Climatologie.....	13
1.2.2. Hydrographie.....	13
1.2.3. Géologie et hydrogéologie	14
2. DESCRIPTION ET DIAGNOSTIC DE LA SITUATION EXISTANTE	15

2.1. Position du problème	17
CHAPITRE 3 : ETUDE HYDROLOGIQUE DES BASSINS VERSANTS	19
1. INTRODUCTION.....	20
2. CARACTERISTIQUES DES BASSINS VERSANTS	20
2.1. Définition	20
2.2. La délimitation des BV et calcul de leurs caractéristiques	20
2.2.1. La délimitation des bassins versants	20
2.2.1.1. Caractéristiques morpho métriques des BV.....	21
2.2.1.2. La forme	21
2.2.1.3. La pente moyenne	22
2.2.2. Caractéristiques pluviométriques	26
2.2.2.1. Stations pluviométriques.....	26
2.2.2.2. Pluies journalières maximales annuelles	26
2.2.2.3. Débits instantanés maximums annuels	26
3. L'ESTIMATION DU TEMPS DE CONCENTRATION (TC).....	26
3.1. Temps de concentration Tc	27
3.1.1. La formule de Giandotti	27
3.1.2. La formule de Ventura	27
3.1.3. La formule de Kirplich.....	27
3.1.4. La formule de Turazza	28
3.1.5. La formule d'Espagnole	28
3.1.6. La formule de Californienne	28
3.1.7. La formule d'US Corps	28
3.2. Le calcul du temps de concentration Tc	29
4. L'ESTIMATION DU DEBIT DE POINTE.....	29
4.1. Les outils informatiques utilisés	29
4.1.1. Le logiciel « Hyfran Plus »	29
4.1.2. Le logiciel « ArcGIS »	31

4.2.	La méthodologie adoptée pour l'étude des crues	31
4.2.1.	Méthode de l'ajustement statistique	32
4.2.2.	Transposition de Francou-Rodier	32
4.2.3.	Formules empiriques	33
4.2.3.1.	Formule de Mallet-Gauthier	33
4.2.3.2.	Formule de Fuller II	34
4.2.3.3.	Formule de Hazan et Lazarevic	34
4.2.4.	Méthode du Gradex	35
4.3.	Application de la méthodologie.....	36
4.3.1.	Méthode de l'ajustement statistique et transposition par Francou-Rodier.....	36
4.3.2.	Résultats de calcul par les formules empiriques	37
4.3.3.	Méthode du Gradex	37
4.3.3.1.	Ajustement des pluies maximales journalières	37
4.3.3.2.	La détermination du gradex moyen du bassin étudié.....	38
4.3.3.3.	Détermination du gradex des débits instantanés	40
4.3.3.4.	Choix des débits décennaux	40
4.3.4.	Débits retenus	41
5.	CONCLUSION	42
CHAPITRE 4 : MODELISATION HYDRAULIQUE ET CARTOGRAPHIE DES ZONES INONDABLES		43
1.	INTRODUCTION.....	44
2.	DISPOSITIF ET OUTILS INFORMATIQUES UTILISÉES	44
2.1.	Présentation De HEC-RAS.....	45
2.1.1.	Fonctionnement De HEC-RAS	45
2.1.1.1.	Géométrie des cours d'eau simulés	46
2.1.1.2.	Débits, conditions limites et de calcul	46
2.1.1.3.	Les résultats des calculs	47
2.1.2.	Principes du calcul hydraulique par HEC-RAS	47

2.1.3.	Théorie de base de calcul du modèle HEC-RAS	48
2.1.3.1.	Profil de la surface de l'eau en écoulement permanent	48
2.1.3.2.	Équations de base entre deux sections	48
2.1.3.3.	Subdivision d'une section en travers pour le calcul du débit.....	49
2.1.3.4.	Evaluation de l'énergie cinétique moyenne	50
2.1.3.5.	Evaluation de la pente hydraulique (de frottement	51
2.1.3.6.	Calcul du profil de la surface de l'eau	52
3.	ETUDE DE CAS « OUED AL BAHJA »	52
3.1.	Etude topographique.....	52
3.2.	Création et extraction des données topographiques pour l' HEC-RAS.....	53
3.3.	Montage du modèle	55
3.3.1.	Données hydrométriques.....	56
3.3.2.	Coefficients de rugosité.....	56
3.3.3.	Conditions aux limites.....	56
3.3.4.	Simulation hydraulique	57
3.3.5.	Implantation des ouvrages de franchissement.....	58
3.4.	Résultats et discussion	59
3.5.	Cartographie de l'aléa inondation.....	60
4.	CONCLUSION	61
CHAPITRE 5 : SCHEMAS D'AMENAGEMENTS.....		62
1.	INTRODUCTION.....	63
2.	DEFINITION DES SCHEMAS D'AMENAGEMENTS	63
2.1.	Hypothèse retenue	63
2.2.	Le recalibrage du lit de l'oued	64
2.2.1.	Principe de recalibrage	64
2.2.2.	Choix de la pente de berge d'un canal trapézoïdal	65
2.2.3.	Simulation hydraulique du canal projeté.....	65
2.3.	Dimensionnement des ouvrages de franchissement	66

2.3.1. Choix de l'ouvrage de franchissement	67
2.3.2. Conception des buses et dalots	69
2.4. Digue de protection	69
2.4.1. Calcul de la hauteur de la digue	70
2.4.2. Simulation hydraulique de la digue projetée	71
2.4.3. Les résultats de la modélisation de l'état aménagé de l'oued Al Bahja	72
3. AVANT METRE ET COÛT ESTIMATIF DES TRAVAUX	72
4. CONCLUSION	73
CONCLUSION GENERALE :	74
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	75
WEBOGRAPHIE	76
ANNEXES	77

Liste des figures

Figure 1 : L'organigramme de la société TEAM MAROC(GJESA).....	3
Figure 2 : Recalibrage	6
Figure 3 : Endiguement et Reboisement	7
Figure 4 : Recalibrage des ouvrages d'art (à gauche : avant recalibrage/ à droite : après recalibrage).....	8
Figure 5 : Correction torrentielle.....	9
Figure 6 : Épis	10
Figure 7 : Seuil	10
Figure 8 : Carte générale de la zone étudiée	13
Figure 9 : Illustration du BV	20
Figure 10 : BV sous forme d'éventail	21
Figure 11 : BV en forme allongée.....	22
Figure 12 : Délimitation des bassins versants	25
Figure 13 : Les résultats d'ajustement des différentes lois aux Qmax station Tahanaout	36
Figure 14: Graphique d'ajustement selon la loi Weibull	36
Figure 15 : Polygones de thiessen	39
Figure 16 : Polygones de thiessen sur le bassin actif	39
Figure 17: Extension de liaison entre ArcGIS et HEC-RAS	45
Figure 18 : HEC-RAS 5.0.3	45
Figure 19 : Définition d'une section du cours d'eau dans HEC-RAS	46
Figure 20 : Représentation des limites dans l'équation d'énergie.....	49
Figure 21 : Méthode de subdivision du débit par le modèle HEC-RAS.....	50
Figure 22 : Calcul de l'énergie cinématique dans une section	50
Figure 23 : Diagramme récapitulatif de la méthode de préparation du	54
Figure 24 : Principaux thèmes de RAS créés par HEC GeoRAS (preRAS).....	55
Figure 25 : La Géométrie de l'oued Al Bahja dans le logiciel HEC RAS.....	55

Figure 26 : Fenêtres des données hydrométriques dans le logiciel HEC RAS	56
Figure 27 : Fenêtres des conditions aux limites dans le logiciel HEC RAS	57
Figure 28 : Fenêtres de simulation pour le régime permanent	58
Figure 29 : Les étapes pour implanter un dalot	58
Figure 30 : Implantation des dalots existant à l'amont du Douar Bousetta	59
Figure 31 : Affichage des résultats de simulation sous forme d'un tableau	59
Figure 32 : Carte d'inondation de l'oued Al Bahja	60
Figure 33 : les caractéristiques d'une section trapézoïdale	64
Figure 34 : Ecran du système HEC RAS pour le recalibrage	66
Figure 35 : Avantages et inconvénients des différentes solutions proposées	68
Figure 36 : Coupe en travers type d'un dalot multiple projeté	68
Figure 37 : Coupe en travers type d'une digue	70
Figure 38 : Problème de l'inondation d'une zone avec débordement des berges	72
Figure 39 : Résolution de l'inondation des zones qui se trouvent en dessous du niveau de l'eau par l'installation des digues	72

Liste des tableaux

Tableau 1 : Les cartes topographiques utilisées	21
Tableau 2 : La valeur de l'indice de compacité de Gravélius	22
Tableau 3 : Caractéristiques physiques de l'oued Al Bahja.....	23
Tableau 4 : Caractéristiques du bassin versant total	24
Tableau 5 : Les stations pluviométrique de la zone étudiée.....	26
Tableau 6 : La station pluviométrique de Tahanouat.....	26
Tableau 7 : Temps de concentration (en heures)	29
Tableau 8 : Les valeurs des paramètres K et a	34
Tableau 9 : Les valeurs des paramètres a et b	35
Tableau 10 : Débits de pointes pour les différentes périodes de retour par	37
Tableau 11 : Résultats de débit de pointe des formules empiriques	37
Tableau 12 : Pluies maximales journalières par période de retour	38
Tableau 13 : Calcul du gradex moyen par la méthode de thiessen	40
Tableau 14 : Les débits des crues calculés avec la méthode du Gradex	41
Tableau 15 : Les débits issus des différentes méthodes utilisées.....	41
Tableau 16 : Les débits retenus	42
Tableau 17 : Pré dimensionnement des dalots projetés.....	69
Tableau 18 : Coût des deux variantes étudiées	73

Liste des abréviations

ISO : International Organisation for Standardisation.

SA : Société Anonyme.

AEP : Alimentation en Eau Potable.

WSW : West South West.

ESE : East South East.

n° 1 : numéro 1.

ABHT : Agence du Bassin Hydraulique de Tensift.

TM (GJESA) : TEAM MAROC (GROUPE JACOBS ENGINEERING SA).

A, S, Sbv : Surface du bassin.

BV : Bassin Versant.

M.O : Maître d'Ouvrage.

C : Coefficient de ruissellement du bassin versant.

IC : Ingénieur conseil.

H min : Cote minimale.

H max : Cote maximale.

ΔH : Dénivelée maximale.

INRS - ETE : Institut National de Recherche Scientifique, Eau, Terre, Environnement.

SAD : Système d'Aide à la Décision.

BIC : Bayesian Information Criterion.

AIK : Akaike Information Criterion.

Gmoy : Gradex moyen.

WS: Water Surface.

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

L : Longueur.

ESRI : Environmental Systems Research Institut.

H : Horizontale.

V : Verticale.

OH : Ouvrage hydraulique.

Φ 1000: Diamètre de 1000.

Pjmax : Pluie journalière maximale annuelle.

P : Périmètre du bassin.

Qp : Débit de pointe.

Qimax : Débit instantané maximal.

Q10 : Débit de référence de la fréquence décennale.

T : Période de retour.

Tc : Temps de concentration.

DRCR : Direction des Routes et de la Circulation Routière.

MNT : Modèle Numérique du Terrain.

TIN : Terrain Irregular Network.

SIG : Système d'Information Géographique.

[n] : Référence bibliographique numéro n.

Nbr : Nombre.

TN : Terrain Naturel.

Réf : Références.

Introduction

Depuis toujours, l'Homme a été confronté aux inondations et a tenté de pallier à ce phénomène. Il a élaboré des schémas d'aménagement visant à éliminer ou tout au moins à maîtriser les crues des rivières qui, périodiquement mettaient en péril des vies humaines et freinaient son développement économique.

Le présent travail consiste en la réalisation d'une étude de protection contre les inondations de l'Oued Al Bahja qui est situé dans la région de Marrakech. Cet Oued est menacé par le risque d'inondation à cause de sa topographie et son urbanisation non contrôlée.

La recherche des données a constitué la première démarche de ce projet. Une fois cette base est constituée, nous avons pu commencer l'étude hydrologique, qui nous a permis de comprendre le fonctionnement hydrologique des bassins versants et de calculer les débits mis en jeu pour des fréquences décennale, vingtennale, cinquantennale et centennale. L'estimation des débits a été réalisée à partir de l'ajustement, la méthode du Gradex, et les méthodes empiriques.

Ensuite, une étude hydraulique à partir des logiciels HEC-RAS et Arc GIS a été réalisée pour cibler les lieux de débordement des cours d'eau. Les simulations ont été faites pour les quatre périodes de retour. Ces résultats du diagnostic hydraulique nous ont permis de cartographier les zones inondables.

Enfin, on procède à proposer des solutions d'aménagement pour protéger la ville de Marrakech contre les inondations de l'Oued Al Bahja, avant de terminer par une estimation financière des aménagements retenus.

Présentation de l'organisme d'accueil

Team Maroc (Groupe Jacobs Engineering SA) est une société marocaine d'ingénierie multidisciplinaire, fondé en 1981. Elle est devenu le premier groupe d'ingénierie privé indépendant du Maroc certifié ISO9001. A travers quatre domaines d'intervention : Infrastructures de Transport, Eau et Environnement, Bâtiment, Conseil et études Sectorielles.

Les 200 ingénieurs, planificateurs et consultants de Team Maroc fournissent une large gamme de prestations, études et assistance techniques à des clients institutionnels et privés présents au Maroc et en Afrique de l'Ouest.

L'approche innovante de Team Maroc intègre toutes les spécialités et lui permet d'apporter des solutions originales, pertinentes et rentables, de la conception à la réalisation des projets. Son expertise environnementale lui permet également de contribuer activement au développement durable dans le royaume et à l'étranger.

Principaux secteurs d'activités :

Infrastructures de transport :

- routes et autoroutes
- aménagement urbains et infrastructures urbains

Bâtiments :

- administration, hôtels, industrie
- habitat
- centre de formation
- complexe sportif

Ouvrages d'art :

- ouvrages d'arts ferroviaires
- ouvrages d'art routiers et autoroutiers
- tunnels, ponts, viaducs
- ports

Eau et environnement :

- études d'AEP

- études d'assainissement
- aménagement hydro-agricol
- environnement
- assistance technique

Etudes économiques :

- études de transport et planification urbaine
- études économiques et sectorielles

Ci-dessous l'organigramme de la société (**Figure 1**):

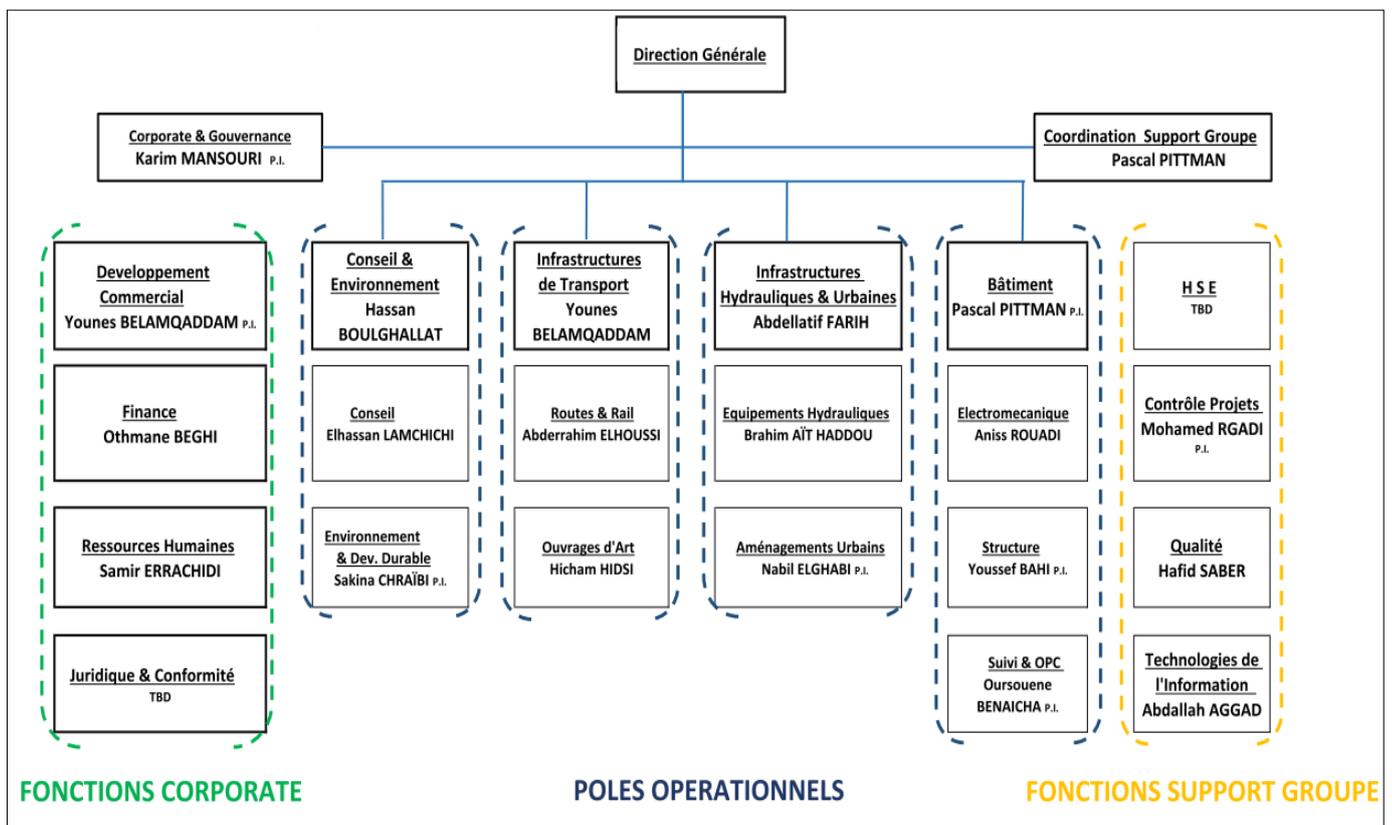


Figure 1 : L'organigramme de la société TEAM MAROC(GJESA)

CHAPITRE 1:

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

1. INTRODUCTION

Depuis toujours, l'Homme a aménagé les cours d'eau pour réduire les risques d'inondation. Cela s'est traduit essentiellement par des endiguements, des recalibrages ou la réalisation des barrages.

1.1. Les différents types d'aménagements [1]

Une fois la situation du risque est décrite, il est possible de faire une prévision d'un large éventail d'aménagements qui pourra a priori participer à la réduction des conséquences des écoulements provoquant les inondations.

Ces aménagements peuvent être prévus au niveau du bassin versant, dans les réseaux primaires et dans le lit majeur des cours d'eau.

L'atténuation de l'aléa possède trois grands principes :

- a. L'augmentation des capacités d'écoulement qui consiste à modifier le cours d'eau de telle sorte qu'il puisse supporter un débit plus important sans qu'il ait débordement. Les aménagements concernés sont :
 - Recalibrage du cours d'eau;
 - Endiguement du cours d'eau;
 - Reboisement;
 - Recalibrage des ouvrages d'art;
 - Recalibrage des systèmes d'évacuation de l'eau.
- b. L'augmentation des capacités de stockage qui consiste à stocker pendant un certain temps un volume d'eau de telle sorte à laminer le débit de pointe en aval de la zone de stockage. Le débit étant moins fort, le débordement est moins important.
Les aménagements qui permettent ce type de comportement sont:
 - Barrage ou retenue d'eau;
 - Réservoirs d'orage.
- c. Limitation des vitesses d'écoulement, soit au niveau du bassin versant, soit au niveau du cours d'eau. Les travaux dans ce cas ont pour objet la lutte contre le ruissellement et l'érosion des sols et par conséquent la régularisation du débit liquide du cours d'eau et la diminution du débit solide. Parmi ces aménagements citons ici trois exemples :
 - Correction torrentielle,

- Épis,
- Reprofilage.

1.1.1. Recalibrage du cours d'eau

Il s'agit de modifier la géométrie du lit du cours d'eau (abaissement de la ligne de fond, augmentation de la section transversale) pour modifier la valeur de la crue de plein bord. À l'instar de l'endiguement, le recalibrage du cours d'eau a un effet positif mais également des effets potentiellement négatifs à l'aval de son implantation.

Le recalibrage du cours d'eau implique également des modifications à grande échelle de la dynamique géomorphologique du cours d'eau, dont les effets peuvent être négatifs (abaissement de la nappe phréatique, problème de transport solide etc...). C'est pour cela que le but recherché par le recalibrage est de retrouver juste la section que le cours d'eau aurait pu avoir s'il était bien entretenu.

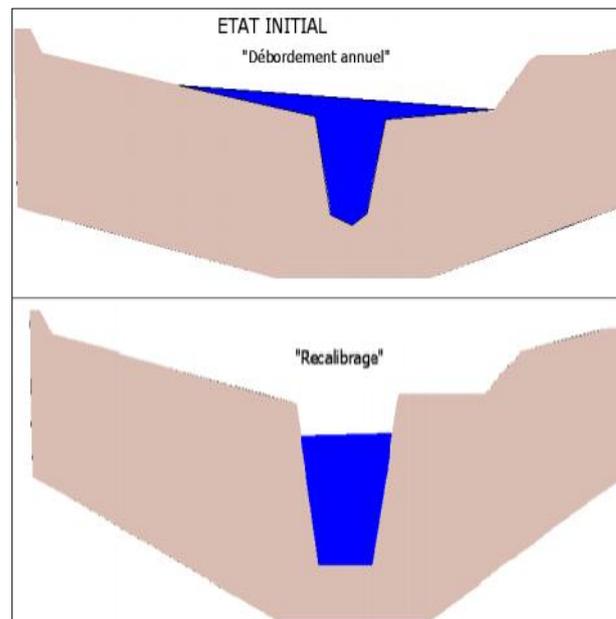


Figure 2 : Recalibrage

1.1.2. Endiguement du cours d'eau

Les digues permettent au cours d'eau d'accepter un débit supérieur à celui de plein bord sans qu'il y ait débordement.

L'effet d'un endiguement est d'empêcher le débordement pour des crues dont les débits sont inférieurs à celui de la crue de projet. Au-delà de ce débit, le débordement aura lieu et ses conséquences sont souvent accrues du fait de vitesses d'écoulement importantes là où se produit la submersion.

L'endiguement a un effet positif, mais également des effets négatifs à l'aval de son implantation vu le rétrécissement du cours d'eau.

La réalisation de digues implique un risque supplémentaire sur le territoire protégé en cas de rupture de la digue, même sans submersion. Ce risque expose très sévèrement sur la vie des riverains.

1.1.3. Reboisement

Le processus de reboisement est basé sur : La nature du sol, la qualité de la plante efficace et le type de climat. La végétation favorise la rétention, ralentit les temps de réponse et atténue les volumes ainsi que les débits de pointe mesurés sur le bassin versant.

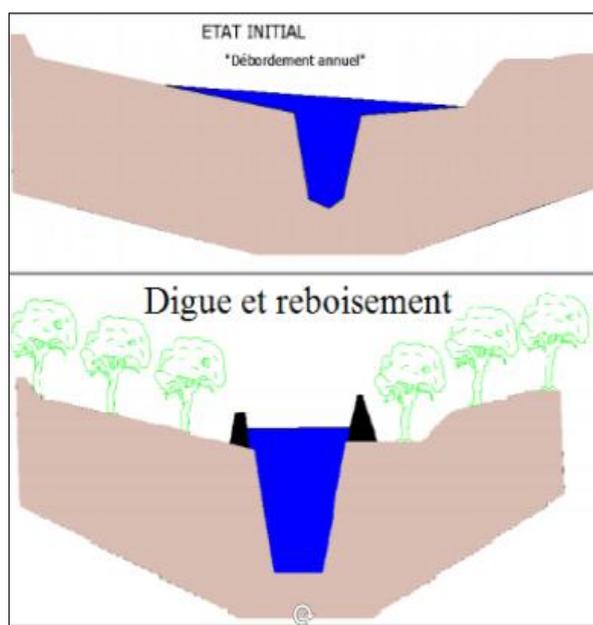


Figure 3 : Endiguement et Reboisement

1.1.4. Recalibrage des ouvrages d'art

Cette opération consiste à modifier l'architecture des ouvrages d'art pour leur permettre de laisser passer un débit plus important en cas de crue et limiter les possibilités d'embâcles.

L'effet est essentiellement en amont de l'ouvrage d'art.



Figure 4 : Recalibrage des ouvrages d'art (à gauche : avant recalibrage/ à droite : après recalibrage)

1.1.5. Recalibrage des systèmes d'évacuation de l'eau

Cette opération consiste à modifier les capacités d'écoulement des systèmes d'évacuation des eaux pluviales pour éviter que leur engorgement ne provoque des inondations dues aux précipitations sur une zone urbanisée. Il peut également s'agir de modifier un défaut des systèmes d'évacuation qui n'empêche pas l'eau du cours en crue de refouler.

1.1.6. Barrages

Les barrages créent un espace de stockage de l'eau de la crue. Ils peuvent être en eau seulement au moment de la crue ou de façon permanente. Dans ce dernier cas, ils ne sont que rarement construits dans un seul but de protection contre les inondations, mais ont également des objectifs de soutien d'étiage, d'alimentation en eau potable, d'irrigation, de production hydro-électrique ...

Les retenues ont un effet d'écrêtement des crues en aval de leur emplacement. Au final, le même volume total circule dans le cours d'eau en aval de la retenue, mais sur une plus longue durée. Le débit maximum par rapport à une situation sans écrêtements est atténué. Les retenues provoquent une inondation d'une portion du territoire en amont de leur construction. Ce type de mesure modifie complètement l'hydrologie du cours d'eau aval, notamment sa nature aléatoire.

1.1.7. Réservoirs d'orage

Ce sont des retenues très spécifiques en milieu urbain qui visent à stocker, même momentanément, l'eau des pluies qui sinon aurait ruisselé, pour limiter le ruissellement sur une petite partie du territoire. Il existe des aménagements réalisés dans les versants et peuvent avoir de nombreux avantages sur les ruissellements des crues et sur l'érosion. Ces aménagements constituent des obstacles linéaires disposés perpendiculairement à la pente favorables au ralentissement dynamique de l'écoulement (diminution de la vitesse des eaux

de ruissellement pendant les averses intenses). Parmi ces ouvrages, citons :

- Les embroussailllements ;
- Les fossés, les haies.

1.1.8. Correction torrentielle

C'est une technique qui a pour objectif de limiter les vitesses des écoulements dans les cours d'eau ayant des régimes torrentiels.

Un torrent est corrigé par la construction d'un nombre de digues successives transversales sur les lits des canaux naturels (**Figure 5**).



Figure 5 : Correction torrentielle

Le nombre de digues est donné par la formule suivante :

$$N = L \frac{P-i}{H}$$

L : Longueur du canal naturel

P : Pente moyenne du lit

H : Hauteur moyenne des digues (entre 1 et 4 m)

i : Pente de compensation (pentes inter-digues elle est inférieure à la pente moyenne du lit).

1.1.9. Les épis

Un épi est une structure enracinée à la berge, établie transversalement par rapport au cours d'eau. Les épis constituent des obstacles à l'écoulement de l'eau et provoquent un régime de vitesse décroissant de la tête vers l'enracinement et entraînent un changement de direction de courant à leur voisinage.

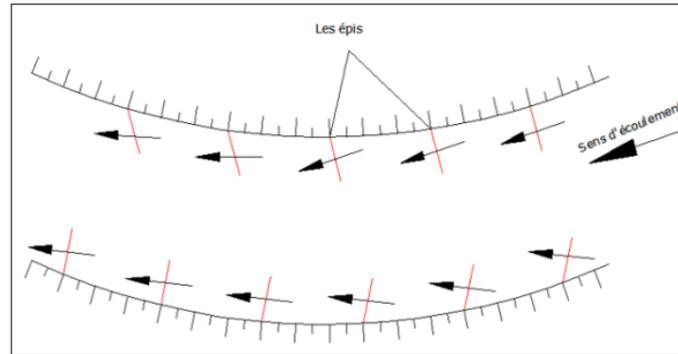


Figure 6 : Épis

L'espacement entre les épis dépend de la largeur de la rivière, de leur longueur et de leur nature. Théoriquement, pour qu'un système d'épis soit efficace, il faut que l'écart entre deux épis successifs soit de l'ordre d'une fois et demie leur longueur moyenne.

1.1.10. Reprofilage

Le reprofilage consiste à la construction des seuils en enrochement ou en gabions transversalement au cours d'eau qui permettent de retenir les particules solides et par la suite d'uniformiser la pente du fond du cours d'eau et de diminuer le transport solide.



Figure 7 : Seuil

2. CONCLUSION

La protection contre les inondations nécessite une connaissance approfondie de la zone étudiée à savoir sa morphologie, les caractéristiques de la rivière et le débit de pointe transité...

Dans le cadre de la protection de la ville de Marrakech contre les inondations, il a été jugé nécessaire par l'ABHT d'aménager l'oued Al Bahja par un recalibrage du cours d'eau, ainsi en cas de besoin par un endiguement.

CHAPITRE 2:

PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

1. INTRODUCTION

L'ABHT (M.O.) a confié à la société "TM (GJESA)" (I.C) les missions relatives à l'étude de protection contre les inondations de Marrakech : Recalibrage de l'oued Al Bahja entre Douar Oulad Yaich et la confluence avec l'oued Tensift. Elle a pour objet la détermination des options techniques et économiques les mieux adaptées pour protéger contre les inondations la zone concernée par l'étude.

Dans ce chapitre, on va présenter la zone d'étude ainsi que ses caractéristiques influant le phénomène d'inondation, diagnostiquer la situation existante et identifier les zones à risque d'inondation à fin de lutter contre ce fléau qui menace le centre.

1.1. Données générales sur la zone d'étude [2]

1.1.1. Aire de l'étude

Selon les termes de référence, le tronçon de l'Oued Al Bahja, objet de la présente étude fait une longueur totale d'environ 8 km. Il est situé entre :

- Douar Oulad Yaich à l'amont et la confluence avec l'oued Tensift à l'aval.

Il traverse le périmètre urbain de la ville de Marrakech et appartient à la zone d'action de l'Agence du Bassin Hydraulique du Tensift.

1.1.2. Situation géographique et administrative

Le tronçon de l'oued Al Bahja à protéger est situé à environ 10 Km à l'Ouest de la ville de Marrakech.

Ce tronçon traverse, de l'amont à l'aval, les douars Bou Setta, Bour As Shab, Al Fallah, Al Bahja et Bouïcha.

La zone d'étude appartient à la rive droite du périmètre irrigué du N'Fis qui s'étend sur une superficie d'environ 21 000 Ha sur les parties planes des bassins des oueds Al Bahja et N'Fis, affluents de l'oued Tensift.

Administrativement, le tronçon de l'oued Al Bahja objet de l'étude dépend de la Commune Urbaine de Marrakech Gueliz relevant de la province de Marrakech.

L'accès à la zone d'étude peut se faire en plusieurs sections à partir des routes qui franchissent l'oued et qui sont matérialisées sur la **figure 8**.

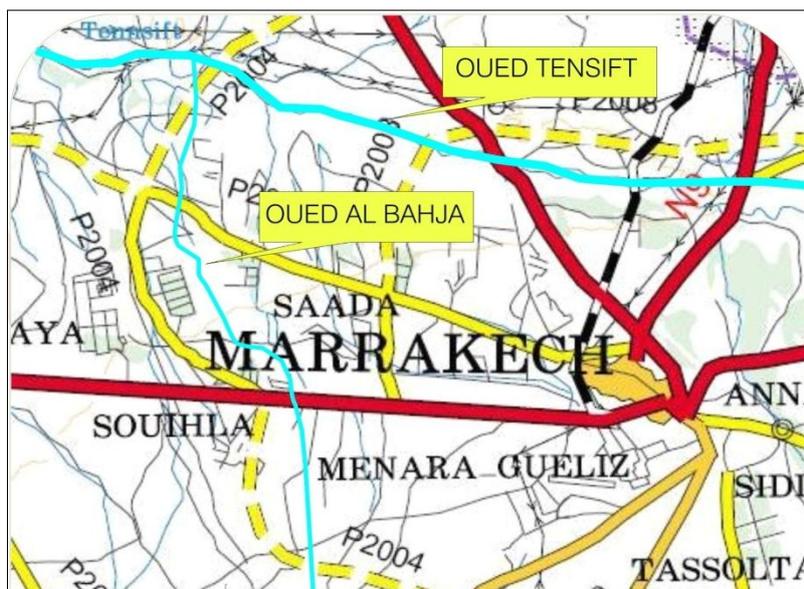


Figure 8 : Carte générale de la zone étudiée

1.2. Milieu physique [1]

1.2.1. Climatologie

La zone de l'étude appartient à la région de Marrakech Tensift El Haouz dont le climat est de type semi-aride.

Les précipitations se caractérisent par une faiblesse et une irrégularité dans le temps et dans l'espace. Les moyennes de précipitations annuelles augmentent du Nord au Sud avec l'augmentation de l'altitude (240 mm en moyenne par an).

Les contrastes des températures sont remarquables avec des variations saisonnières annuelles importantes : des températures estivales très élevées (moyenne maximale 38°C) et hivernales basses (moyenne minimale 5°C).

L'évaporation est intense (2.300 mm/an) et l'hygrométrie de l'air est particulièrement faible (40% en moyenne en été).

1.2.2. Hydrographie

Le climat humide du versant Nord du Haut Atlas a favorisé la constitution de deux réseaux hydrographiques qui ont profondément marqué le Haouz.

- Le bassin de l'oued Tensift : cet oued, collecteur d'Est en Ouest, reçoit les apports des oueds atlasiques, R'dat, Zat, Ourika, Rhéraya, N'fis et Chichaoua et se jette dans l'océan atlantique au niveau de Souira Lakdima au Sud de Safi. Ce système (bassin de Tensift) est dépourvu de bassins montagneux propres. Il est caractérisé d'une part

par de faibles débits (environ 20 m³/s) et d'autre part par des régimes sujets à de fortes variations saisonnières.

- Le bassin de l'oued Tassaout et son affluent l'oued Lakhder à l'Est de la plaine. Ces deux oueds bénéficient à la fois de bassins versants de grandes superficies, des débits importants (25 à 30 m³/s) et des régimes relativement stables dans le temps, du fait d'une forte régularisation naturelle.

L'altitude joue un rôle important non seulement du fait de l'augmentation des précipitations avec l'altitude, mais également par l'enneigement. Sur les altitudes supérieures à 2 800 m, la neige tient jusqu'aux mois de Mai - Juin et influe sur le régime hydrologique des oueds.

1.2.3. Géologie et hydrogéologie

La zone d'étude appartient au massif ancien du Haut Atlas. Dans ce massif s'épanouit la zone axiale de la chaîne atlasique, constituée de roches cristallines et volcaniques mais également de séries sédimentaires d'âge variable (Primaire au Tertiaire).

Sur les bordures nord et sud, les zones préatlasiques les séries sédimentaires secondaires et tertiaires apparaissent sur le socle hercynien. La tectonique hercynienne est prédominante dans le socle avec des directions WSW-ESE.

La chaîne hercynienne a été soumise à une longue érosion et a été partiellement fossilisée sous les produits de démantèlement (grès, schistes et conglomérats) du Stéphanien et du Trias très épais sur le flanc Nord du massif archéen et dans les bassins du N'Fis au centre de la chaîne et de l'Issen en bordure Ouest.

Le massif ancien du Haut Atlas étant essentiellement constitué de roches peu perméables, l'hydrogéologie n'offre de l'intérêt que dans la mesure où l'enneigement prolongé permet de maintenir toute l'année une réserve d'eau en général très limitée, dans des réservoirs souvent peu étendus et de porosité médiocre.

Du fait du climat, ces petites nappes se vidangent donc annuellement par des sources de débits unitaires très modestes, mais qui suffisent à satisfaire les besoins en eau des populations et du cheptel.

Les eaux des sous-écoulements sont de qualité très variable, en fonction de la nature des bassins versants. Ces eaux sont douces lorsque les bassins versants sont constitués par des formations anciennes, métamorphiques ou éruptives ou par des calcaires. Dans les régions où les affleurements de formations continentales et lagunaires sont développés, les eaux des sous

écoulements sont généralement chlorurées sodiques séléniteuses.

2. DESCRIPTION ET DIAGNOSTIC DE LA SITUATION EXISTANTE

[2]

En vue d'assurer une protection intégrale de la ville de Marrakech contre les inondations causées par l'oued Al Bahja, la présente étude vient pour compléter l'étude déjà effectuée par l'Agence du Bassin Hydraulique du Tensift, sur le tronçon compris entre la confluence de l'oued Al Ghourd – l'oued Al Bahja et le douar Oulad Yaïch.

Ainsi, le tronçon, objet de la présente étude, intègre le bief aval de l'oued Al Bahja sur un linéaire de 8Km environ avant sa confluence avec l'oued Tensift.

En premier lieu, l'IC a effectué des enquêtes de terrain, d'une part, pour identifier les zones inondables et déterminer dans la mesure du possible les raisons de leurs inondations, et d'autre part pour inventorier et caractériser les aménagements existants et/ou à réaliser le long de ce cours d'eau.

L'oued Al Bahja est la dénomination du tronçon aval de l'oued Rhéraya avant sa confluence avec oued Tensift. Il s'écoule du Sud vers le Nord, parallèlement à l'oued N'fis, et contourne la ville de Marrakech à environ 10 km à son Ouest.

L'oued Al Bahja draine un bassin versant assez étendu, d'environ 530 Km² de superficie. La longueur du cours d'eau principal est de l'ordre de 90 Km. Néanmoins, le bassin actif se limite au bassin à l'amont du resserrement topographique près de l'ancien terrain d'aviation d'Aghwatim et au niveau du douar Oulad Rahhou et dont la surface est estimée à 323 Km². En effet le bassin intermédiaire à l'aval de ce point est composé essentiellement de terrains plats avec un écoulement qui ne contribue pas aux crues de l'oued. Le tronçon de l'oued Al Bahja, objet de la présente étude, fait partie de ce bassin intermédiaire.

Il ressort de la visite de diagnostic le long du tronçon à étudier, que le dit tronçon traverse par endroit des douars implantés sur ses rives et en alternance des tronçons avec ou sans une abondance de végétation. Les douars longées par ce bief sont, de l'amont à l'aval, comme suit : douar Ali Ben Aïch, douar Bou Setta, douar Bour as Shab, douar Al Bahja et douar Bouïcha.

Sous la pression de l'urbanisation, l'activité de l'homme a progressé, au-delà des limites des rives de l'oued et au détriment de celui-ci. Des rétrécissements et des étranglements des sections d'écoulement naturel des eaux, sont créés ce qui favorise les débordements, pendant les périodes pluvieuses.

Ces derniers provoquent l'inondation des terres limitrophes et des douars précités, causant ainsi des dégâts considérables aux biens des populations.

Les différents débordements tout le long de l'oued fait que le débit des crues sur le bief aval est très limité mis en évidence par des dimensions de l'oued, plus modestes à l'aval, notamment au-delà du douar Bouïcha où la largeur de l'oued ne dépasse guère 3 m (Cf. **annexe n°1**).

Le franchissement de l'oued Al Bahja, le long du tronçon étudié, est assuré par cinq ouvrages qui sont situés soit au niveau des douars pour relier les habitations entre elles, soit au niveau des routes de desserte qui relient la ville de Marrakech aux différents douars et fermes agricoles de la zone (Cf. **annexe n°1**). Ces ouvrages sont disposés comme suit :

- Un dalot simple en béton armé dont la section est de $7 \times 2.7 \text{ m}^2$ relie douar Bni Ich à la ville de Marrakech. Cet ouvrage est caractérisé par la présence à son aval immédiat d'un aqueduc (segua) de 50 cm de largeur environ et qui passe à une hauteur surélevée par rapport au toit du dalot ;
- Un dalot simple de $9 \times 2.7 \text{ m}^2$, à l'amont du douar Bou Setta. Cet ouvrage est associé, à son aval immédiat, à un mur de soutènement sur une longueur de 11 m environ, disposé sur les deux rives de l'oued. A l'amont de cet ouvrage, une conduite suspendue d'AEP traverse l'oued ;
- Une passerelle de 8 m de longueur et de 2 m de hauteur permet de relier les habitations entre eux du douar Bour as Shab. Cet ouvrage est implanté juste avant que l'oued Al Bahja dessine un méandre vers la gauche ;

Au niveau de ce méandre, une construction a été édiflée sur la berge droite de l'oued. Elle génère des rétrécissements de la section de l'écoulement des eaux, provoquant ainsi au passage des crues des remous et l'élévation du niveau des eaux en amont.

Compte tenu de l'importance des apports de l'oued au passage des crues et des dimensions modestes dudit dalot, les débordements des eaux inondent aussi bien la rue de desserte que les constructions implantées sur les rives de l'oued.

- Une batterie de 5 buses $\Phi 1000$, sur la route menant vers Swihla. Cet ouvrage est la seule voie de communication des habitations du douar Al Bahja ;

D'après les informations recueillies sur place auprès des riverains, les débits de crues de cet oued sont largement supérieurs par rapport à la capacité de transit de

l'ouvrage hydraulique précité. Ceci entraîne des débordements systématiques des eaux en période pluvieuse et provoque l'effondrement des berges de l'oued et l'inondation aussi bien de la route que des constructions du douar Al Bahja.

- Un dalot double permettant l'accès aux exploitations agricoles. Cet ouvrage de franchissement, en état dégradé, n'est pas construit dans les règles de l'art.

Il est à signaler que l'ouvrage hydraulique qui assurait la communication entre les habitations du douar Bou Setta implanté de part et d'autre de l'oued Al Bahja, a été intégralement détruit suite aux inondations de ce cours d'eau. Dès lors, l'oued est franchi via une piste d'accès qui présente une dépression sur les deux rives. Les eaux des crues débordent au niveau de cette dépression et se dirigent vers les constructions du douar.

D'autre part, il a été relevé, durant la visite de diagnostic, l'absence de tout ouvrage de franchissement de l'oued au niveau du douar Al Fallah. Ceci amène à la création des dépressions au niveau des rives de l'oued dues aux pistes l'accès traversant l'oued. Ainsi, au passage des crues les eaux empruntent ces points bas et se dirigent vers les habitations du douar.

2.1. Position du problème

D'après les aspects observés lors de la visite de reconnaissance sur le terrain et les témoignages recueillis auprès des riverains, il apparaît que le tronçon aval de l'oued Al Bahja, objet de la présente étude, présente une section d'écoulement et une débitance en réduction continue. Ainsi, les hauteurs d'eau au passage des crues seront plus élevées engendrant par conséquent le débordement sur les rives et donc sur les champs agricoles et les douars qui s'y développent.

La situation sus décrite est le résultat de la concomitance de :

- Le développement des douars sur les rives de l'oued, en plus de quelques constructions sur le lit de l'oued en absence de la préservation des zones non aedificandies ;
- Le dépôt des remblais et la prolifération de la végétation sur les rives de l'oued augmentant les coefficients de frottement (Manning) et rétrécissant ainsi les sections d'écoulement et les capacités d'évacuation ;
- La débitance insuffisante des ouvrages de franchissement hydrauliques existants ;
- L'absence des ouvrages de franchissement de l'oued au niveau des douars Bou Setta et Al Fallah, engendrant la création de dépressions dues aux pistes d'accès, traversant

l'oued pour relier les habitations entre elles ;

- L'aplatissement de la zone favorise le phénomène de l'épandage des eaux. en effet, les caractéristiques topographiques et géomorphologiques des rives de l'oued Al Bahja favorisent le ruissellement vers le large inondant les habitations édifiées au milieu des terres agricoles.

CHAPITRE 3

ETUDE HYDROLOGIQUE DES BASSINS VERSANTS

1. INTRODUCTION

Au début la détermination des caractéristiques morphologique de la zone à étudier semble d'importance cruciale, en fait, elles influent énormément la réponse hydrologique du bassin versant. Ce chapitre est consacré à l'estimation des crues de projet pour des périodes de retour allant de 10 à 100 ans, sous l'aspect des débits de pointe à l'entrée du cours d'eau étudié, et cela en se basant sur les différentes approches de la littérature hydrologique.

2. CARACTERISTIQUES DES BASSINS VERSANTS

2.1. Définition [3]

Le bassin versant (BV) ou le bassin hydrologique représente l'unité géographique sur laquelle se base l'analyse du cycle hydrologique et de ces effets. Il est défini comme la totalité de la surface topographique drainée par un cours d'eau principale (Oued) et ses affluents.

Le BV est une zone de relief dont les eaux de ruissellement de surface s'écoulent et se rassemblent vers un point unique appelé l'exutoire. Ce dernier se définit comme le point à partir duquel nous pouvons tracer le départ et l'arrivée de la ligne de partage des eaux.

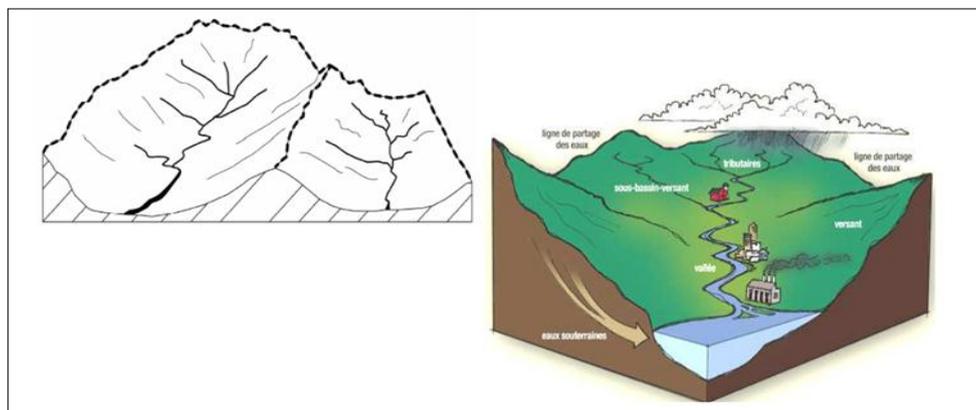


Figure 9 : Illustration du BV

2.2. La délimitation des BV et calcul de leurs caractéristiques

2.2.1. La délimitation des bassins versants

L'ensemble des bassins versant étudiés couvre principalement des zones rurales limitrophes de l'oued Al Bahja. La délimitation des bassins versants est effectuée, en utilisant le logiciel AutoCAD 2015, sur la base de ses exutoires des cours d'eaux, des cartes topographiques à l'échelle 1/50 000ème et des restitutions topographiques du zone étudiée ainsi que des

reconnaisances de terrain.

Nom de la Carte	Echelle
Amez Miz	1/50 000ème
Jbel toubkal	1/50 000ème
MARRAKECH AL MEDINA	1/50 000ème
MARRAKECH GUELIZ	1/50 000ème
TAHANNAWT	1/50 000ème
TAMASLOHT	1/50 000ème
MARRAKECH-EST	1/50 000ème

Tableau 1: Liste des cartes topographiques utilisées

2.2.1.1. Caractéristiques morpho métriques des BV

Les bassins qui font l'objet de la présente étude sont au nombre de trois bassins versants figurés sur la carte en figure n°12.

2.2.1.2. La forme [3]

La forme d'un BV influence l'allure de l'hydrogramme de pluie au niveau de l'exutoire du bassin versant, cette influence est due à la notion de temps de concentration qu'on aura l'occasion de le définir ci-après :

Les bassins en forme d'éventail (BV1) ou circulaire, présentant un temps de concentration plus court (t_{c1}), auront les plus forts débits de pointe.

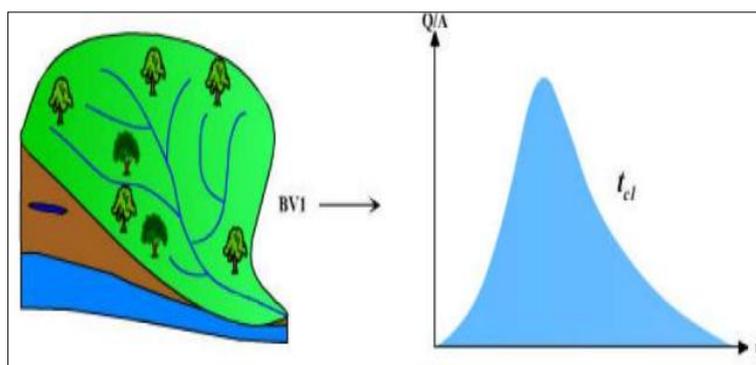


Figure 10 : BV sous forme d'éventail

Par contre, La forme allongée (BV2) favorise les faibles débits de pointe de crue, en raison des temps importants d'acheminement de l'eau à l'exutoire.

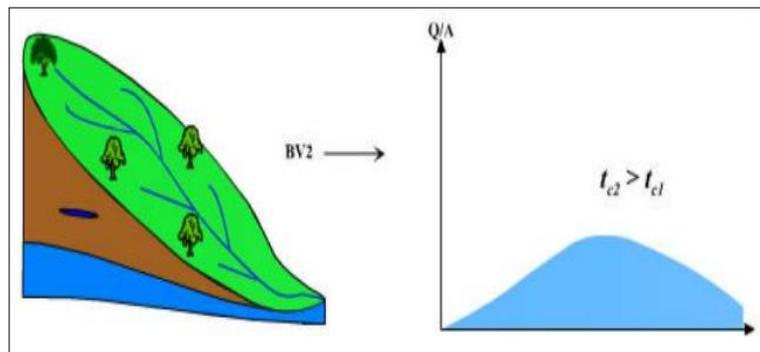


Figure 11: BV en forme allongée

Pour caractériser la forme d'un BV, Il existe différents indices morphologiques. Citons à titre d'exemple l'indice de compacité de Gravelius (1914) K_G :

$$K_G = \frac{P}{2 \times \sqrt{\pi \times S}} = 0.28 \frac{P}{\sqrt{S}}$$

Avec :

P : Périmètre du BV (km)

S : Surface du BV (km²).

Cet indice se détermine à partir de la délimitation adoptée en mesurant la surface et le périmètre de chaque BV à l'aide du logiciel Autocad. Sa valeur est généralement comprise entre 1 et 1.75 ainsi, il est possible d'établir certaine correspondance entre la forme du bassin et les valeurs de K_G qui lui correspondent. Ces correspondances sont illustrées dans le tableau qui suit.

Intervalle de K_G	Forme du bassin
1.00 à 1.25	circulaire à assez allongé
1.25 à 1.50	assez allongé à allongé
1.50 à 1.75	allongé à très allongé

Tableau 2 : La valeur de l'indice de compacité de Gravelius

2.2.1.3. La pente moyenne

La pente moyenne est une caractéristique importante qui renseigne sur plusieurs paramètres déterminants dans la suite de notre étude.

Cette variable influence directement le débit de pointe lors d'une averse car une forte pente favorise et accélère l'écoulement superficiel, tandis qu'une pente douce ou nulle donne à l'eau le temps de s'infiltrer, entièrement ou en partie, dans le sol.

Le calcul des pentes moyennes et partielles du cours d'eau s'effectue à partir du profil longitudinal du cours d'eau principale et de ses affluents.

Plusieurs méthodes ont été développées pour estimer la pente moyenne d'un bassin. Toutes se basent sur une lecture d'une carte topographique réelle ou approximative.

La pente moyenne du cours d'eau a été calculée par la formule suivante [3] :

$$I = \frac{H_{max} - H_{min}}{L}$$

Avec :

I : Pente moyenne du cours d'eau (m/km).

ΔH : Dénivellation de l'oued (m).

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

Les caractéristiques physiques de cet oued au point de confluence avec l'oued Tensift sont consignées dans le tableau suivant :

BV	Surface (Km ²)	Longueur (km)	Hmax (m)	Hmin (m)	DH (m)	Périmètre (m)	Indice-Forme	Pente (m/m)
Oued Bahja	530	90.606	4 167	363	3 804	206.578	2.5	4.20%

Tableau 3 : caractéristiques physiques de l'oued Al Bahja

Le bassin versant de l'oued Al Bahja est très allongé. Cela est traduit par un indice de forme important égal à 2.5.

Cependant, à partir du douar Oulad Rahhou, dont les coordonnées Lambert sont les suivantes :

$$X = 255\ 067$$

$$Y = 98\ 005$$

La pente s'affaiblit, le resserrement topographique qui canalisait l'oued en amont disparaît et l'oued rentre dans une zone plate et l'écoulement devient diffus. A partir de ce point, le bassin versant devient inactif et ne contribue plus à la génération de la crue. Dans le tableau suivant, on présente les caractéristiques du bassin versant de la station de Tahanaout, le bassin versant actif de l'oued Al Bahja et le bassin versant inactif de l'oued Al Bahja.

BV	Surface (Km ²)	Longueur (km)	Hmax (m)	Hmin (m)	DH (m)	Périmètre (m)	Indice de Forme	Pente (m/m)
Tahanouat	225	32.1	4 167	925	3 242	80.7	1.5	10.10%
BV actif Oued Bahja	322.72	52.238	4 167	706	3 461	127.910	1.95	6.63%
BV inactive Oued Bahja	207.28	38.368	706	363	343	79.526	1.58	0.89%

Tableau 4 : Caractéristiques du bassin versant total

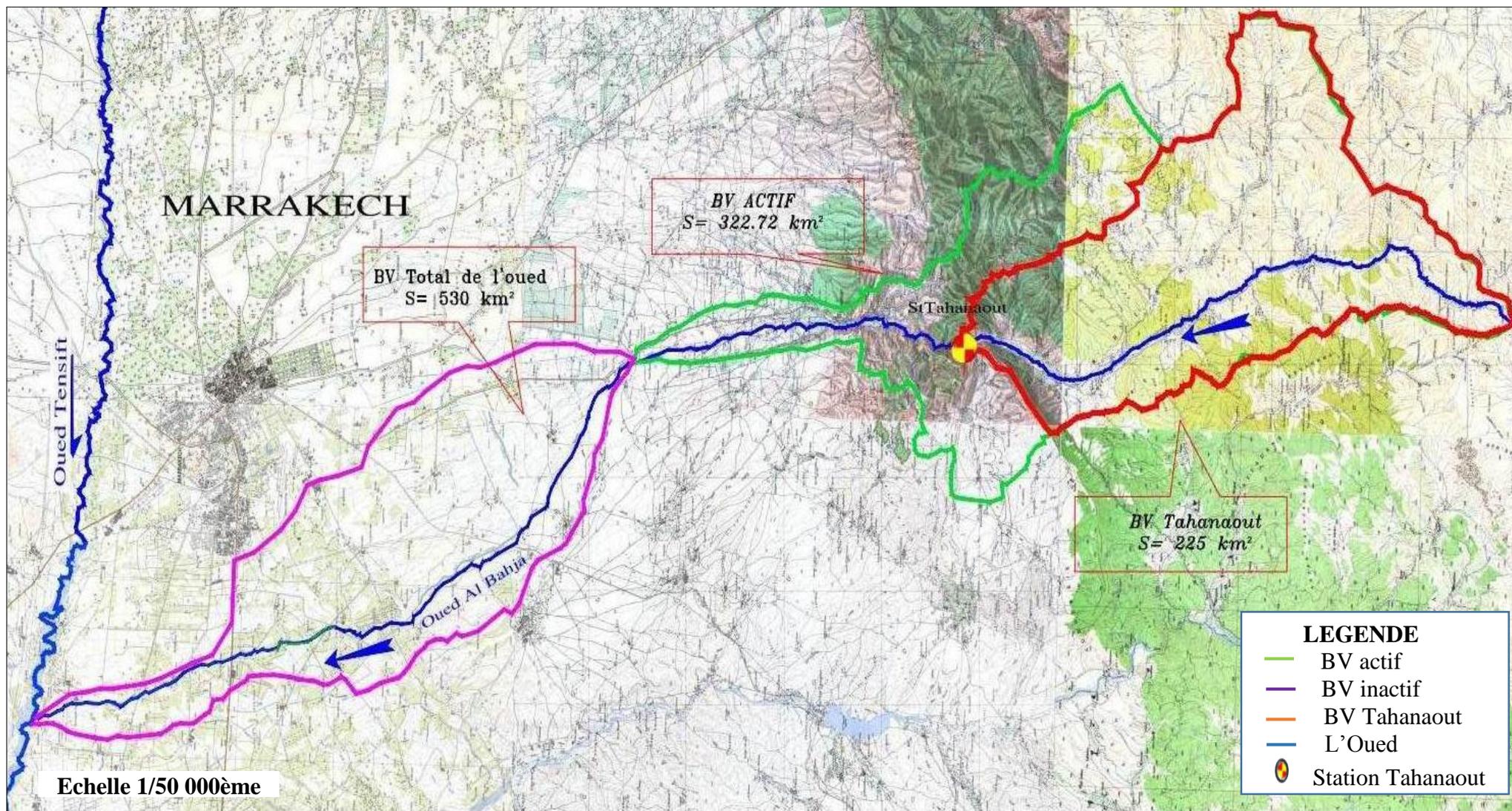


Figure 12 : Délimitation des bassins versants

2.2.2. Caractéristiques pluviométriques

2.2.2.1. Stations pluviométriques

La pluviométrie du secteur d'étude est déterminée à partir de l'analyse des précipitations recueillies au niveau des stations pluviométriques qui encadrent les bassins des cours d'eau concernés par la présente étude.

Les stations pluviométriques de la zone étudiée sont présentées dans le tableau suivant :

Poste	N° de réf	X	Y	Z	Période disponible
Marrakech	5229	250 000	110 000	460	1970 –2010
Tahanaout	7512	255 900	80 400	925	1968 –2010
Imin Lahmam	4432	241 400	72 400	770	1970 –2010
Iguir Nkouris	4299	238 350	55 000	1100	1975 –2010
Aremd	1182	259 300	62 100	1950	1999 –2010
Amenzal	1004	278 220	67 200	2230	1997 –2010
Agounss	902	271 450	69 650	2200	1997 –2010
Tiourdiou	8411	277 200	69 300	1850	1997 –2010

Tableau 5 : Les stations pluviométrique de la zone étudiée

2.2.2.2. Pluies journalières maximales annuelles

Les échantillons des pluies journalières maximales annuelles (P_{jmax}) à l'état brut au niveau des stations de la zone d'étude figurent dans l'annexe n°2.

2.2.2.3. Débits instantanés maximums annuels

On dispose également d'une série des débits instantanés maximums annuels au droit de la station hydrologique suivante :

Station	Oued	N°IRE	X	Y	Période disponible
Tahanouat	Réghaya	1565/53	255.900	80.400	1962–2010

Tableau 6 : La station pluviométrique de Tahanouat

3. L'ESTIMATION DU TEMPS DE CONCENTRATION (TC)

Le calcul des débits des bassins versants, fait intervenir le concept du temps de concentration ou temps de pointe.

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

Dans cette étude, ce paramètre est évalué par des formules empiriques largement utilisés au Maroc et qui sont présentées et expliquées ci-après.

3.1. Temps de concentration T_c [a]

Les formules de calcul du temps de concentration sont présentées ci-après :

3.1.1. La formule de Giandotti

La formule s'écrit :

$$T_c = \frac{4 * \sqrt{S_{bv}} + 1.5 * L}{0.8 * \sqrt{H}}$$

Où :

T_c : Est le temps de concentration en heures,

S_{bv} : Est la surface du BV en km^2 ,

L : Est la longueur du talweg en km,

H : Est la dénivelée maximale du BV en m.

3.1.2. La formule de Ventura

La formule s'écrit :

$$T_c = 7.62 \sqrt{\frac{S_{bv}}{P}}$$

Où :

T_c : Est le temps de concentration en min,

S_{bv} : Est la surface du BV en km^2 ,

P : Est la pente moyenne du talweg en m/m.

3.1.3. La formule de Kirplich

La formule s'écrit :

$$T_c = \frac{1}{52} * \left(\frac{L * 1000}{\sqrt{I} * 100} \right)^{0.77}$$

Où :

T_c : Est le temps de concentration en min,

L : Est la longueur du talweg en m,

I : Est la pente moyenne du talweg en m/m.

3.1.4. La formule de Turazza

La formule s'écrit :

$$T_c = 60 * 0,108 * (L * S)^{0,333} * (I/100)^{-0,5}$$

Où :

T_c : Le temps de concentration en min

S : La surface du BV en km²,

L : Est la longueur du talweg en km,

I : Est la pente en m/m.

3.1.5. La formule d'Espagnole

La formule s'écrit :

$$T_c = 18 * (L / (I/100)^{0,25})^{0,77}$$

Où :

T_c : Le temps de concentration en min,

L : La longueur du talweg en m

I : La pente en m/m

3.1.6. La formule de Californienne

La formule s'écrit :

$$T_c = 60 * 0,1452 * \left(\frac{L}{\sqrt{I * 100}} \right)^{0,77}$$

Où :

T_c : En minute

L : En m

I : En m/m

3.1.7. La formule d'US Corps

La formule s'écrit :

$$T_c = 16,682 * (L / (I/100)^{0,25})^{0,77}$$

Où :

T_c : En minute

L : En m

I : En m/m

3.2. Le calcul du temps de concentration T_c

Le calcul du temps de concentration au niveau du bassin versant actif de l'oued Bahja, en utilisant les différentes formules empiriques citées ci-dessus donne les résultats suivants :

Formule	$T_c(h)$
<i>Giandotti</i>	3.19
<i>Ventura</i>	8.88
<i>Kirplich</i>	3.91
<i>Turazza</i>	10.76
<i>Espagnole</i>	10.64
<i>Californienne</i>	8.68
<i>US Corps</i>	9.86
Valeur adoptée	3.91

Tableau 7 : Temps de concentration (en heures) du bassin versant actif

La valeur adoptée pour le temps de concentration au droit du versant de l'oued Al Bahja correspond à la valeur issue de la formule de Kirplich car c'est la mieux adaptée aux bassins versants de montagne.

4. L'ESTIMATION DU DEBIT DE POINTE

Après avoir délimité les bassins versants de la zone d'étude, déterminer leurs caractéristiques géométriques (superficie, longueur du talweg, dénivelée maximale, pente moyenne ...), sur la base des cartes topographiques de la région d'étude et à l'aide d'Autocad, et calculer le temps de concentration T_c (ou temps de pointe) en utilisant les formules empiriques. On vise dans cette étape à évaluer les débits des crues pour des périodes de retour allant de 10 à 100ans.

4.1. Les outils informatiques utilisés

4.1.1. Le logiciel « Hyfran Plus » [4]

Le logiciel Hyfran Plus est élaboré par l'INRS-ETE (Institut National de Recherche Scientifique, Eau, Terre, Environnement) du Québec .Ce dernier permet de faire la sélection de

la loi de probabilité représentative de l'échantillon étudié en le soumettant à plusieurs étapes dont :

La phase descriptive basée sur le calcul et le tracé des statistiques descriptives (numériques et graphiques) calculées sur l'échantillon.

L'application d'un Système d'Aide à la Décision (SAD), mis au point en s'appuyant sur des critères statistiques, pour définir la classe la plus probable à laquelle appartient la meilleure loi qui représente l'échantillon étudié.

La phase de l'ajustement statistique qui consiste à confronter, sur un papier de probabilité, la distribution empirique calculée sur l'échantillon à la distribution probabiliste théorique choisie sur la base de la suggestion du SAD. Ce graphe permet de visualiser l'écart entre les probabilités expérimentales et probabilités théoriques calculées pour la loi ajustée. Une comparaison entre les lois de la même classe peut être faite sur un même papier pour en sélectionner la plus adéquate.

La qualité de l'ajustement est aussi confirmée par l'application d'un test d'adéquation à l'échantillon étudié.

a. Système d'aide à la décision SAD (Hyfran)

Hyfran-Plus permet d'ajuster une vingtaine de distributions statistiques à une série de données qui vérifie les hypothèses d'indépendance, d'homogénéité et de stationnarité.

b. Test d'indépendance des observations (absence d'auto-corrélation)

Le choix de la loi qui s'ajuste le mieux à la série des données se base sur des tests d'adéquations qui jugent la validité de la loi. Ces critères de choix se présentent comme suit :

- ✓ Critère d'information Bayésien(BIC) ;
- ✓ Critère d'information d'Akaike(AIK) ;
- ✓ Probabilité à posteriori (Méthode de Schwarz) (Schwarz ,1975).
 - Critère d'information Bayésien (BIC) et d'Akaike (AIK) :
 - Critère d'information Bayésien (BIC) est calculé par la formule suivant :

$$BIC = -2\log L + 2K \log (N)$$

- Critère d'information d'Akaike (AIK) :

$$AIC = -2\log L + 2k$$

Où :

L (MV) : Est la vraisemblance ;

k : Le nombre de paramètres ;

N : La taille de l'échantillon.

Ces deux critères (BIC et AIC) permettent de construire un classement de modèles statistiques.

- Probabilité à posteriori (Méthode de Schwarz) :

Les probabilités à priori reflètent l'information sur la pertinence de la loi pour ajuster une variable d'intérêt. L'information peut être basée également sur une étude régionale. Lorsqu'on ne dispose d'aucune information à priori bien structurée, il est suggéré de diviser la probabilité également entre les lois à deux paramètres et celles à trois paramètres. En effet, on hésite généralement beaucoup plus entre choisir une loi à deux ou trois paramètres qu'entre différentes lois ayant le même nombre de paramètres. (Schwarz, 1975).

Le choix de la loi qui s'ajuste le mieux doit répondre aux critères suivants :

- Les coefficients BIC et AIC les plus faibles ;
- La probabilité à posteriori la plus grande.

4.1.2. Le logiciel « ArcGIS » [5]

Le logiciel **ArcGIS 10.3** est un système d'information géographique développé par la société **ESRI**. C'est un outil pour gérer, visualiser, cartographier, interroger et analyser toutes les données disposant d'une composante spatiale.

ArcGIS comprend une suite d'applications intégrées :

- **ArcMap** : Est utilisé pour toutes les tâches de cartographie et de mise à jour ainsi que pour les analyses associées aux cartes.
- **ArcCatalog** : Permet de gérer les fichiers de données et l'organisation des bases de données ainsi que d'enregistrer et de visualiser les métadonnées.
- **ArcToolbox** : Est une boîte à outils permettant d'effectuer des conversions et de transferts de format et aussi de projection.

4.2. La méthodologie adoptée pour l'étude des crues

Pour la réalisation de l'étude des crues, on propose de suivre les étapes suivantes :

- Délimitation du bassin versant sur une carte topographique au 1/500000ième et détermination des caractéristiques géométriques de ce dernier (superficie, longueur

du talweg, dénivelée maximale, périmètre,...) ;

- Calcul du temps de concentration T_c (ou temps de pointe) en utilisant les formules empiriques les plus utilisées au Maroc ;
- Les débits de pointe ont été calculés pour les fréquences rares (1/20, 1/50 et 1/100) en utilisant la méthode du Gradex ;
- Le pivot du gradex ($Q(T=10\text{ans})$) a été calculé par les méthodes suivantes :
 - a. L'ajustement statistique des débits de pointe enregistrés au droit de la station de Tahanaout puis la transposition par la formule de Francou-Rodier vers l'exutoire du bassin actif de l'oued Al Bahja,
 - b. Les formules empiriques de Mallet Gauthier, Fuller II et Hazen-Lazaravic. Ces méthodes sont présentées dans les paragraphes suivants.

4.2.1. Méthode de l'ajustement statistique

Cette méthode consiste à soumettre les échantillons des débits maximaux instantanés annuels $Q_p(Q_{\text{imax}})$, à l'outil informatique « Hyfran Plus » qui permet de déterminer, la loi qui s'ajuste le mieux à l'échantillon et les valeurs des Q_p pour différentes périodes de retour.

Les lois de probabilités testées par l'outil d'ajustement statistique sont les suivantes :

- La loi exponentielle ;
- La loi Gamma ;
- La loi de Gumbel ;
- La loi de Weibull.

Ces lois sont bien adaptées aux phénomènes extrêmes, car en effet, les pointes correspondent à des événements rares.

Des tests d'adéquation ont été utilisés pour juger de la validité de la loi ajustée.

Cette méthode d'ajustement statistique ne permet pas d'estimer les débits de crue d'une fréquence au-delà de la centennale, et ceci à cause de la taille des échantillons des débits de pointes qui est limitée.

4.2.2. Transposition de Francou-Rodier

Le principe de cette méthode consiste à transposer les débits de pointe pour différentes périodes de retour connus au niveau d'un bassin versant jaugé vers un bassin versant non jaugé à condition que ce dernier soit limitrophe et possédant des caractéristiques géomorphologiques

et hydrologiques similaires au premier.

Le coefficient de Francou Rodier K_p est donné par la formule suivante :

$$K_p = 10 \left(1 - \left(\frac{\ln(Q1/10^6)}{\ln(Sbv1 / 10^8)} \right) \right)$$

Où : $Q1$ et $Sbv1$ sont respectivement le débit de pointe et la surface du bassin versant jaugé.

Le débit de pointe pour chaque fréquence au niveau du site auquel on souhaite transposer les débits se calcule par la formule suivante :

$$Q_p(T) = 10^6 * (Sbv2 / 10^8)^{(1 - 0.1 K_p)}$$

Où : $Sbv2$ est la superficie du bassin versant du site considéré.

4.2.3. Formules empiriques

Il existe par ailleurs des formules empiriques, pour le calcul des débits de pointe pour différentes fréquences. Ces formules sont présentées ci-après :

4.2.3.1. Formule de Mallet-Gauthier

Cette formule s'écrit sous la forme suivante :

$$Q(T) = 2k \log(1 + a \times P_a) A \sqrt{(1 + 4 \log T - \log A)} / \sqrt{L}$$

Avec :

$Q(T)$: Débit de pointe pour la période de retour T (m³/s).

L : Longueur du drain principal en km.

T : Période de retour (en ans).

A : Superficie du BV en km².

P_a : Pluviométrie annuelle moyenne du bassin en m.

a : Coefficient égal à 15 pour le Maroc.

K : Coefficient égal à 1.5 pour le Maroc.

Le choix des paramètres a et K est dicté par le tableau suivant :

Valeur de "K"	Varie de 0.5 pour les grands bassins versants à 6 pour les petits bassins versants. Généralement on adopte 1.5 pour le Maroc
Valeur de "a"	Varie de 15 à 30. Généralement, pour le Maroc, on adopte 15

Tableau 8 : Les valeurs des paramètres K et a [6]

4.2.3.2. Formule de Fuller II

L'expression de cette équation se présente sous la forme suivante :

$$Q_T = (1 + a * \log T) \left(A^{0.8} + \frac{8}{3} A^{0.5} \right) 4/3 * N/100$$

Avec :

Q(T) : Débit de pointe de période de retour T en m³/s.

T : Est la période de retour (en ans).

a : 0.8 (Région moyennement arrosée) et N= 70 (Région moyennement accidentée).

A : Surface du bassin versant (en km²).

4.2.3.3. Formule de Hazan et Lazarevic

L'expression de cette formule est la suivante :

$$Q(T) = a * S^b * \frac{1 + k * \log T}{1 + k * \log 1000}$$

Avec :

S : Surface en km².

a et b : Paramètres pris égal à 13.470 et 0.587 respectivement.

T : Période de retour en ans.

k : Coefficient régional variant de 0,8 à 3 au Maroc, on prend k=2.

Le choix des paramètres a et b est dicté par le tableau suivant :

	Province du Nord			Moyen Atlas			Haut Atlas
	Rif central	Rif occidental	Rif oriental				
a	15,55	9,78	7,58	14,94	13,51	13,47	9,38
b	0,776	0,793	0,808	0,636	0,613	0,587	0,742
Pluie (mm)	1000 - 1300	800 - 1000	600 - 800	700 - 900	500 - 700	400 - 500	200 - 400

Tableau 9 : Les valeurs des paramètres a et b [6]

4.2.4. Méthode du Gradex [a]

Cette méthode est basée sur le principe, selon lequel l'extrapolation de la courbe des débits vers les fortes valeurs correspondant aux faibles probabilités ne peut se faire raisonnablement que de façon parallèle à la courbe des précipitations, puisqu'il ne peut pas ruisseler plus d'eau qu'il n'en tombe et que la rétention du sol est limitée. Cette méthode admet les principes suivants :

- Les précipitations journalières s'ajustent par des lois à comportement exponentiel simple. Donc, les valeurs maximales mensuelles ou annuelles des précipitations s'ajustent au moins dans les valeurs fortes par la loi de Gumbel.
- Au-delà de la crue charnière, l'extrapolation de la loi des débits la plus raisonnable consiste à porter une parallèle à la loi des précipitations.
- La loi des débits instantanés est obtenue par une affinité faite sur la loi des débits journaliers.

Autrement dit, le passage du débit journalier se fera via un coefficient de pointe. Le choix de ce coefficient dépendra de l'analyse des débits maximums instantanés et les débits journaliers maximums.

La conduite de la méthode du Gradex est comme suit :

Etudier la variable aléatoire "pluie reçue par les bassins versants en 24 heures", l'ajuster selon la loi de Gumbel et calculer son Gradex moyen ;

- Considérer le débit décennal pour le bassin ;
- Extrapoler la fonction de répartition débits au-delà de 10 ans par une droite de pente égale au Gradex de pluie converti en valeur de débit en utilisant les surfaces des bassins versants ;
- Considérer un coefficient de pointe pour transformer les débits moyens en débits de

pointe.

4.3. Application de la méthodologie

4.3.1. Méthode de l'ajustement statistique et transposition par Francou-Rodier

Le tableau en **annexe n°3** présente les débits pluviaux instantanés maximums annuels enregistrés au droit de la station hydrologique de Tahanaout.

Cet échantillon des Qimax a été soumis à une analyse fréquentielle. Les résultats de cette analyse fréquentielle sont présentés dans la figure ci-après :

Model	Nb param.	XT	P(Mi)	P(Mi x)	BIC	AIC
Weibull (Maximum Likelihood)	2	312.186	25.00	70.61	487.424	483.682
Exponential (Maximum Likelihood)	2	259.015	25.00	16.89	490.286	486.543
Gamma (Maximum Likelihood)	2	284.202	25.00	12.51	490.886	487.143
Gumbel (Method of moments)	2	405.857	25.00	0.00	561.202	557.460

P(Mi) : A priori probability P(Mi | x) : A posteriori probability (Method of Schwarz) BIC : Bayesian information criterion AIC : Akaike information criterion

Figure 13 : Les résultats d'ajustement des différentes lois aux Qmax station Tahanaout

La loi qui s'ajuste le mieux à l'échantillon des Qimax à la station de Tahanaout, d'après les tests d'adéquation, est la loi Weibull.

Le graphique d'ajustement est présenté ci-après :

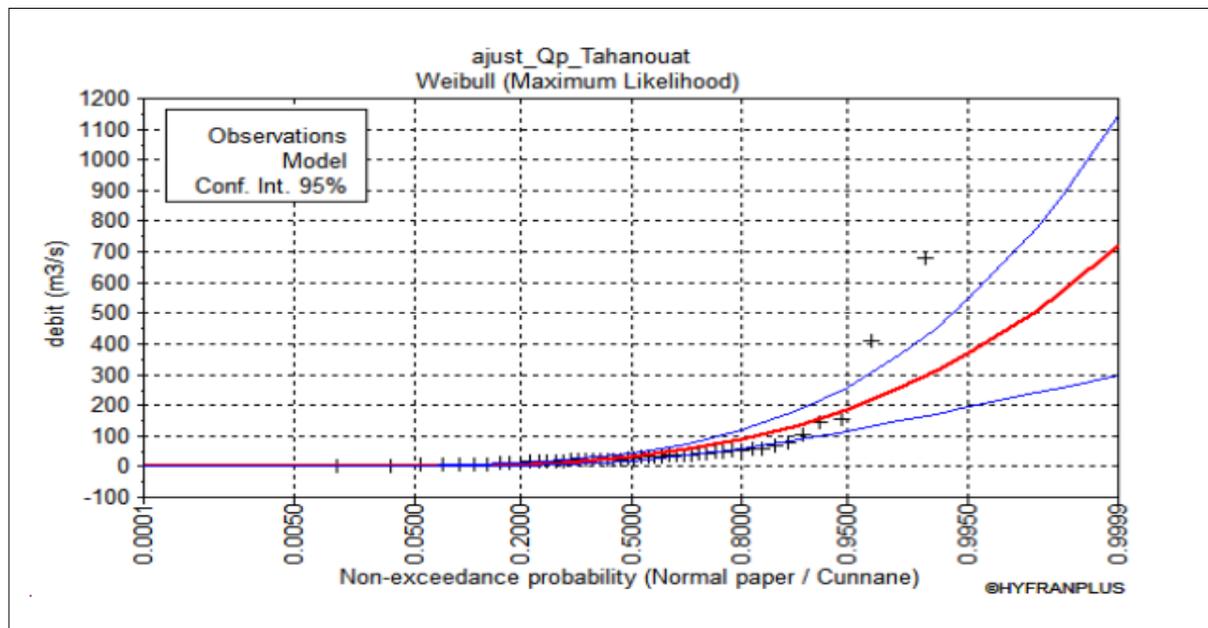


Figure 14: Graphique d'ajustement selon la loi Weibull

La transposition des résultats de l'ajustement statistique des débits de pointe enregistrés au droit de la station hydrologique de Tahanaout vers l'exutoire du bassin actif de l'oued Al Bahja

donne les résultats suivants :

Période de retour T_r [années]	Oued Al Bahja		
	Station Tahanaout Sbv1=225 Km ²		BV actif Al Bahja Sbv2= 323 Km ²
	Q1	Kp	
10	135.47	3,15	174
20	185.99	3,39	236
50	256.50	3,64	323
100	312.19	4,79	391

Tableau 10 : Débits de pointes pour les différentes périodes de retour par la méthode de francou-rodier.

4.3.2. Résultats de calcul par les formules empiriques

Le calcul des débits de pointe en appliquant les formules empiriques présentées dans le paragraphe 4.2.3, donne les résultats suivants en (m³/s) :

Période de retour	Mallet Gauthier	Fuller II	Hazan Lazarevic
10	261	287	172
20	317	326	206
50	380	377	251
100	421	415	286

Tableau 11 : Résultats de débit de pointe des formules empiriques pour différents périodes.

4.3.3. Méthode du Gradex

4.3.3.1. Ajustement des pluies maximales journalières

L'ajustement statistique des échantillons des pluies journalières maximales annuelles pour les postes pluviométriques utilisés pour cette étude à la loi de Gumbel permet d'aboutir au tableau de résultats suivant, dans lequel sont regroupés le gradex et les pluies maximales journalières pour différentes périodes de retour.

Station	GRADEX	P10	P20	P50	P100
Tahanaout	8.06	52.3	58.1	65.6	71.3
Marrakech	25.6	82.2	100.6	124.5	142.4
Imin Lahmam	13.3	65.3	74.9	87.3	96.6
Iguir N Kouris	11.8	54.6	63.1	74.0	82.2
Aremd	24.0	93.2	110.0	133.0	150.0
Agounss	15.2	63.2	74.2	88.3	98.9
Amenzal	26.2	101.0	120.0	145.0	163.0
Tiourdiou	14.1	59.0	69.1	82.2	92.0

Tableau 12 : Pluies maximales journalières par période de retour

NB : Le gradex correspond à la pente de la droite d'ajustement.

D'un autre côté, ces valeurs correspondent à des valeurs journalières. Le passage aux pluies en 24 heures, se fera en multipliant les valeurs journalières par un coefficient égal à 1.15 pour tenir compte de la coulissance de la pluie.

Etant données que les échantillons dans les postes de Aremd, Agounss, Amenzal et Tiourdiou, Imin Lahmam et Iguir N Kouris sont très réduits. Ces postes ne seront pas utilisés dans le calcul des crues par la méthode du gradex.

Seules les postes de Tahanaout et Marrakech seront utilisés car ils représentent bien le régime pluviométrique du bassin versant étudié.

4.3.3.2. La détermination du gradex moyen du bassin étudié

Le gradex moyen sur le bassin de l'oued Al Bahja (bassin actif) a été calculée par la méthode de Thiessen, qui permet de définir le coefficient d'influence de chaque station sur chaque bassin, appliquée au Gradex relatif aux postes de Marrakech et de Tahanaout.

La méthode des polygones de Thiessen, qui se base sur la triangulation de Delaunay utilisant la méthode des médiatrices entre deux stations. Pour cela, nous avons utilisé une fonctionnalité d'Arc GIS. Nous avons utilisé le fichier Excel contenant les coordonnées en Lambert des 2 postes de pluviométrie. Voici alors les polygones de Thiessen que nous obtenons

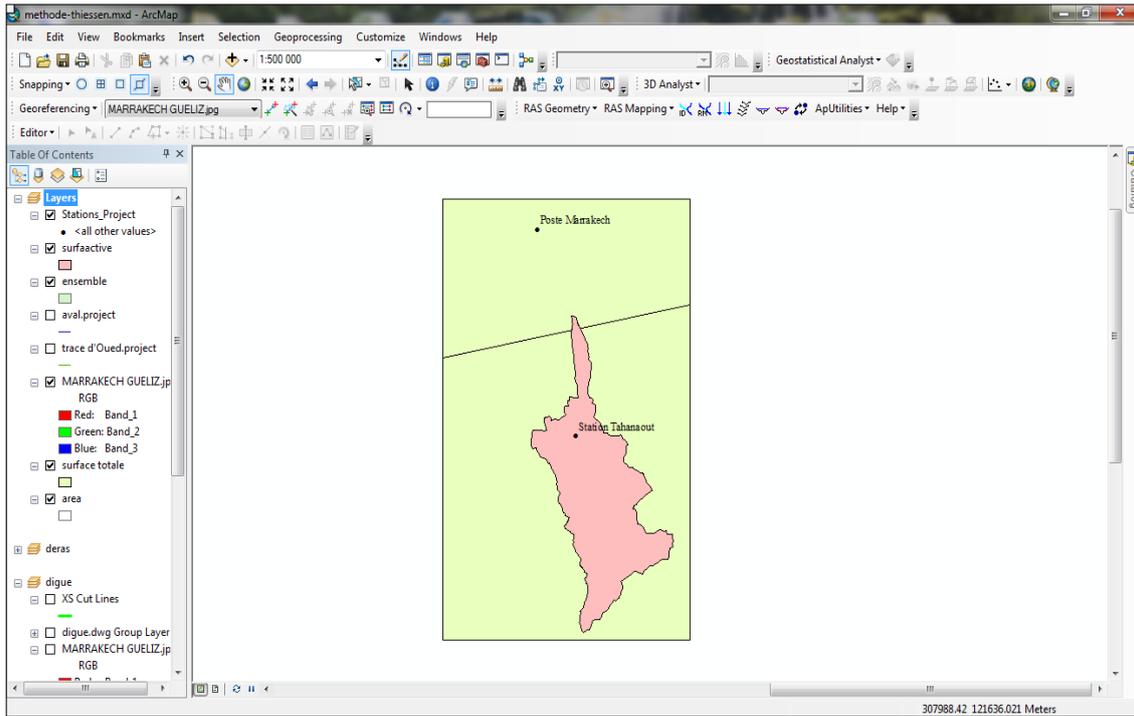


Figure 15 : Polygones de thiessen

Nous avons ensuite intersecté la couche de notre sous bassin versant avec celle des polygones de Thiessen afin d'obtenir les tracés des polygones sur notre sous bassin versant.

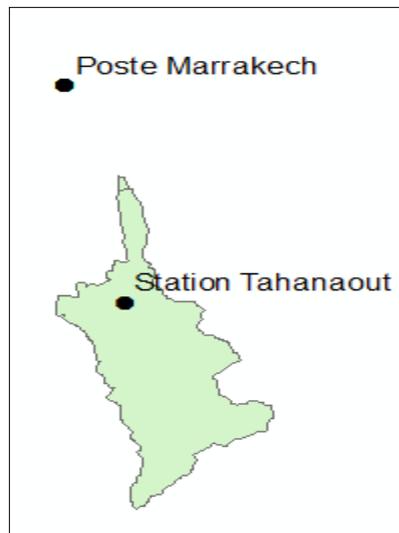


Figure 16 : Polygones de thiessen sur le bassin actif

Nous utilisons ensuite la fonctionnalité d'ArcGIS permettant de calculer la surface de chaque polygone. Il suffit ensuite de calculer le gradex moyen sur le bassin en utilisant la formule suivante :

$$G_{moy} = \frac{(S1 \times Gradex_{Marrakech}) + (S2 \times Gradex_{Tahanouat})}{S1 + S2}$$

Avec :

S1 : Surface d'influence du poste de Marrakech.

S2 : Surface d'influence du poste de Tahanouat.

Voici alors le résultat que nous obtenons :

Poste de pluviométrie	Gradex de pluie (mm/j)	Surface d'influence : Si (m ²)	Gradex*Si	Gradex moyen (mm/j)
Marrakech	25.6	151627.34	3886208.78	<u>8.07</u>
Tahanouat	8.06	322848372.66	2602157884	
Somme		323000000	2606044092	

Tableau 13 : Calcul du gradex moyen par la méthode de Thiessen

4.3.3.3. Détermination du gradex des débits instantanés

Le Gradex des débits instantanés est déduit par l'application d'un coefficient de pointe. Ce coefficient est défini comme étant le rapport du débit de pointe (Qp) au débit maximum journalier (Qjmax). Certes, l'estimation de ce coefficient est délicate, néanmoins on peut approcher une relation liant Qp et Qjmax.

En se basant sur les données mesurées à la station de Tahanouat, (Cf. **annexe 4**), il en ressort un coefficient de pointe de 3,6.

Le calcul des débits de faibles fréquences est obtenu par la formule suivante :

$$Q_T = Q_{(T10)} + G_{moy} \left[L_n \left(-L_n \left(1 - \frac{1}{T_{10}} \right) \right) - L_n \left(-L_n \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right) \right]$$

4.3.3.4. Choix des débits décennaux

Afin de calculer les débits des crues pour différentes fréquences de retours, par la méthode du Gradex, il est nécessaire au préalable de figer le débit décennal (pivot de la méthode du Gradex). Dans la présente étude, il a été retenu comme débit décennal celui déterminé par transposition à partir de la station de Tahanouat.

Ainsi, les résultats de débits retenus pour la crue décennale et ceux déterminés par la méthode du Gradex pour les crues de fréquences plus faibles, sont synthétisés dans le tableau suivant :

Bassins versants	Calcul par la méthode du Gradex [m ³ /s]						
	Gradex des pluies	Gradex des débits de 24 h	Gradex des débits instantanés	Q 10	Q 20	Q 50	Q 100
Al Bahja Actif	8.07	30.169	108.609	174.0	252.2	353.4	429.2

Tableau 14 : Les débits des crues calculés avec la méthode du Gradex

4.3.4. Débits retenus

La méthode que nous avons adoptée pour estimer les débits de pointe est la méthode du Gradex. Ce choix trouve sa justification dans le fait qu'elle se présente comme étant une méthode qui, non seulement, tient compte de plusieurs paramètres locaux, comme le prouve sa formulation, mais aussi parce qu'elle présente un intérêt particulier de tenir compte de l'information "pluie" pour compléter l'information "débit", qui est en général plus courte de point de vue taille de l'échantillon de ce dernier. La méthode du Gradex est connue aussi pour ses larges limites d'applicabilité, puisqu'elle s'applique à des bassins versants d'une superficie pouvant aller jusqu'à 5000 km² et dont le temps de concentration est compris entre 1 heure et 4 jours.

L'ensemble des résultats obtenus est synthétisé dans le tableau suivant :

Méthode	10ans	20ans	50ans	100ans
Ajustement statistique + Transposition à partir de Tahanaout	174	236	323	391
Mallet Gauthier	261	317	380	421
Fuller II	287	326	377	415
Hazen Lazaravic	346	415	507	577
Gradex	174	252.2	353.4	429.2
Valeur adoptée en m³/s	174	252.2	353.4	429.2

Tableau 15 : Les débits issus des différentes méthodes utilisées

Par ailleurs, notons que lors de la première étude du tronçon amont, les débits de dimensionnement retenus en commun accord avec l'agence du bassin hydraulique du Tensift ont été diminués de 40%, tenant compte de la réalisation des seuils d'épandage et au recalibrage

du tronçon amont (cf. tableau ci-dessous). Ainsi, et par continuité, au cours de cette étude du tronçon aval, on réalisera des simulations hydrauliques avec les débits résultants de l'étude hydrologique ci-dessous :

Tronçon	Débits réduits de 40%			
	Q ₁₀	Q ₂₀	Q ₅₀	Q ₁₀₀
Oued Al Bahja à partir de Douar Yaich à la confluence avec Oued de Tensift	104.4	151.32	212.04	258

Tableau 16 : Les débits retenus

5. CONCLUSION

Le calcul des débits de pointe des différentes périodes de retour nécessite un ensemble d'étapes enchaînées qu'il faut suivre, en utilisant les différentes méthodes et formules de l'hydrologie.

Ces débits de pointe seront introduits en amont du cours d'eau étudié pour la modélisation hydraulique et l'identification des zones inondables.

CHAPITRE 4 :

**MODELISATION HYDRAULIQUE ET
CARTOGRAPHIE DES ZONES
INONDABLES**

1. INTRODUCTION

La modélisation hydraulique a pour but le calcul des hauteurs d'eau pour la cartographie de l'aléa. Il s'agit d'une étape importante dans l'évaluation des risques liés aux inondations, car les aménagements et les réglementations ultérieures se référeront aux côtes et aux enveloppes de crues issues de la modélisation hydraulique.

Le choix du type de modèle hydraulique et du logiciel qui permet de le mettre en œuvre ainsi l'acquisition et la valorisation des données topographiques sont des étapes très importantes dans l'objectif de cartographie et de délimitation des zones inondables.

2. DISPOSITIF ET OUTILS INFORMATIQUES UTILISÉES

Dans le but de réaliser cette étude, nous avons utilisé les outils informatiques suivants:

- ArcGIS ;
- HEC-GeoRAS ;
- HEC-RAS.

La construction du modèle hydraulique a suivi naturellement les règles, les normes et les principes du fonctionnement du RAS (River Analysis System).

L'outil HEC-GeoRas joue le rôle du pont entre ArcGIS et HEC-RAS, permettant ainsi d'exporter et d'importer les données géométriques.

GeoRAS est un ensemble de procédures, d'outils et d'utilitaires pour le traitement des données géo-spatiales dans ArcGIS en utilisant une interface utilisateur graphique. Il permet d'une part, la préparation des données géométriques à exporter vers HEC-RAS, et la récupération des résultats de simulation effectuée par HEC-RAS. L'élaboration du fichier de la géométrie à exporter, est basée sur un modèle numérique de terrain qui doit être de préférence sous forme de TIN (Triangular Irregular Network).

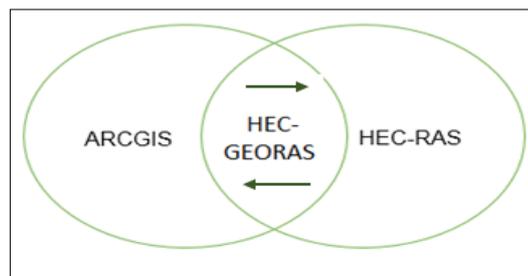


Figure 17: Extension de liaison entre ArcGIS et HEC-RAS

Les données résultantes de la simulation par HEC-RAS, peuvent être exploitées par HEC-GeoRAS sous ArcGIS pour analyser et cartographier les zones inondables.

2.1. Présentation De HEC-RAS

Le choix du logiciel qui permet de cartographier l'aléa inondation est une étape très importante. Pour cela et afin de maîtriser un outil informatique pour modéliser l'écoulement, on a utilisé un modèle mathématique nommé "HEC-RAS 5.0.3" élaboré par le centre d'Ingénierie hydraulique des corps des ingénieurs de l'armée Américaine pour la modélisation d'un réseau fluvial. HEC-RAS est un progiciel d'analyses hydrauliques désigné à modéliser les écoulements à surface libre dans les canaux naturels et artificiels avec la prise en compte des ouvrages de franchissement. Il permet de simuler les écoulements graduellement variés en régime transitoire et d'effectuer les calculs de lignes d'eau en régime dynamique en simulant les différents obstacles le long du cours d'eau.

La modélisation des oueds se base sur les profils en travers, tient compte de tous les ouvrages de franchissement existant, et permet de définir différents coefficients de rugosité pour chaque section.

Chaque ouvrage de franchissement est matérialisé par un profil à l'amont et un autre à l'aval, intégrant les dimensions des ouvertures ainsi que leurs différentes côtes.

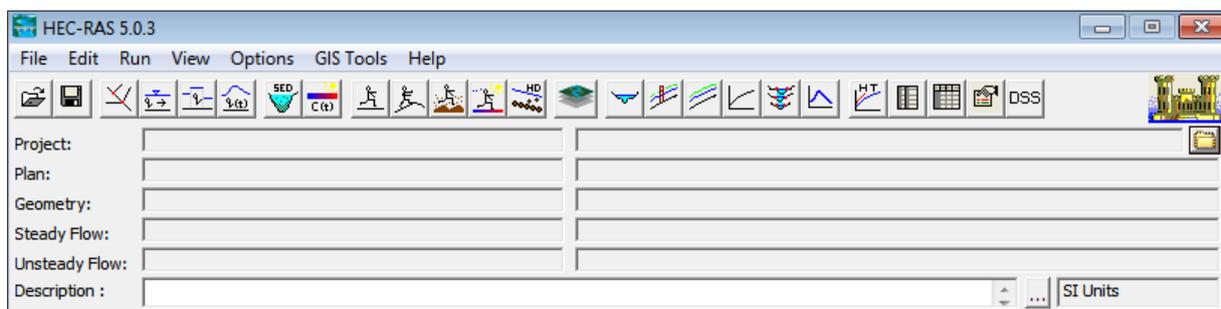


Figure 18 : HEC-RAS 5.0.3

2.1.1. Fonctionnement De HEC-RAS

HEC-RAS est capable de modéliser avec une grande finesse un large éventail de conditions d'écoulement. Le centre de contrôle, pièce maîtresse d'HEC-RAS permet de gérer et de combiner les différents types de données:

- Géométrie;
- Débits et conditions aux limites;
- Conditions de calcul;
- Résultats.

2.1.1.1. Géométrie des cours d'eau simulés

Les profils en travers définissant la géométrie des cours d'eau sont classés selon leur position kilométrique.

Les données relatives à chaque section sont :

- La topographie des profils en travers du cours d'eau ;
- Les distances entre les profils ;
- Le coefficient de Manning par zone homogène ;
- Une description hydraulique des ouvrages (Ponts, dalots, etc.) ;
- Les conditions limites (amont et aval).

Une série d'options permet de placer des obstacles et des zones d'eau morte. D'autres éléments, tels que ponts, ponceaux, épis, glace, transport de sédiments peuvent également être simulés par HEC-RAS.

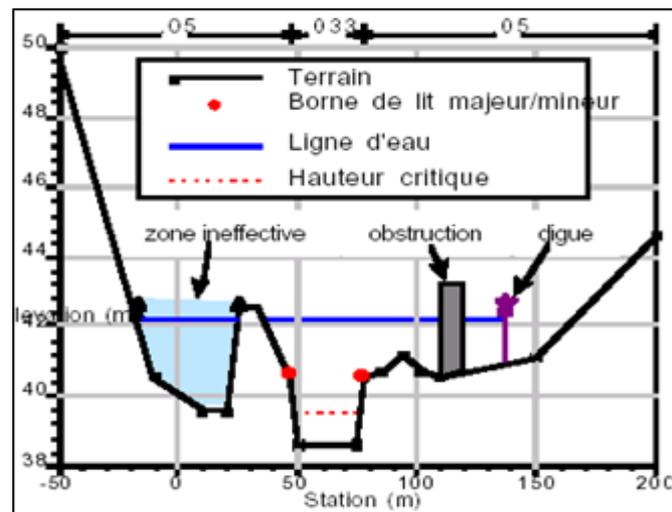


Figure 19 : Définition d'une section du cours d'eau dans HEC-RAS [1]

2.1.1.2. Débits, conditions limites et de calcul

Les données de conditions, qui sont de deux types :

- 1/- Les conditions initiales : les débits entrants dans le cours d'eau modélisée ;
- 2/- Les conditions aux limites. Selon le type d'écoulement, ces conditions ne sont pas les mêmes :

- Pour un écoulement fluvial, les conditions aux limites nécessaires se situent à l'aval (la hauteur normal ou bien une hauteur d'eau connue).
- Pour un écoulement torrentiel, nous avons besoin de conditions aux limites à l'amont des thalwegs (hauteur critique ou hauteur d'eau connue).

2.1.1.3. Les résultats des calculs

Tous les résultats obtenus peuvent être consultés sous forme graphique (profil en long, sections, courbes hauteur-débit, vue (3D) ainsi que sous forme de tableaux, exportables, via les procédures standard de copier-coller, vers tout tableur ou logiciel de traitement de texte.

Les résultats que fournit HEC-RAS 5.0.3 sont :

- Le débit maximum dans la section de calcul ;
- La côte minimale de la section qui renseigne sur la pente naturelle du lit de l'oued ;
- La côte maximale atteinte par l'eau au passage de la crue. Ces côtes permettent de cartographier les zones inondées et d'identifier les sections qui présentent des débordements ;
- La pente moyenne de la ligne d'eau ;
- La vitesse maximale de l'écoulement ;
- La section mouillée et la largeur au miroir ;
- Le nombre de Froude.

2.1.2. Principes du calcul hydraulique par HEC-RAS

C'est un système de modélisation mathématique hydraulique unidimensionnel ayant quatre fonctions principales :

- La modélisation de l'écoulement en régime permanent,
- La modélisation de l'écoulement en régime transitoire,
- Le calcul du transport solide,
- L'analyse des processus de pollution et de la qualité de l'eau.

Pour le moment, en ce qui concerne notre étude, nous allons nous limiter à la première fonctionnalité.

Le choix de modélisation en régime permanent et pas en transitoire est dû à la raison suivante:

- Une modélisation en régime permanent est considérée pessimiste car on considère qu'on a le débit de pointe de crue sur tout le linéaire de nos rivières ce qui ne correspond pas à la réalité mais offre une bonne marge de sécurité.

2.1.3. Théorie de base de calcul du modèle HEC-RAS [7]

2.1.3.1. Profil de la surface de l'eau en écoulement permanent

Le modèle HEC-RAS est capable d'exécuter des calculs unidimensionnels de profil de la surface de l'eau pour l'écoulement permanent graduellement varié dans des canaux naturels et artificiels. Les profils de la surface de l'eau en régime d'écoulement sous critiques (fluvial), supercritiques, et mixtes peuvent être calculés.

2.1.3.2. Équations de base entre deux sections

Les profils de la surface d'eau sont calculés entre deux sections comme il est montré à la **figure 20** en résolvant l'équation d'énergie. L'équation d'énergie est écrite comme suit :

$$y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (1)$$

Où :

Y 1, Y 2 : Profondeur de l'eau au niveau des sections

Z 1, Z 2 : Côte du canal principal

V 1, V 2 : Vitesses moyennes (débit total /surface totale d'écoulement)

α 1, α 2 : Coefficients de pondération de vitesse

g : Accélération de la gravité

h_e : Perte d'énergie principale (perte de charge)

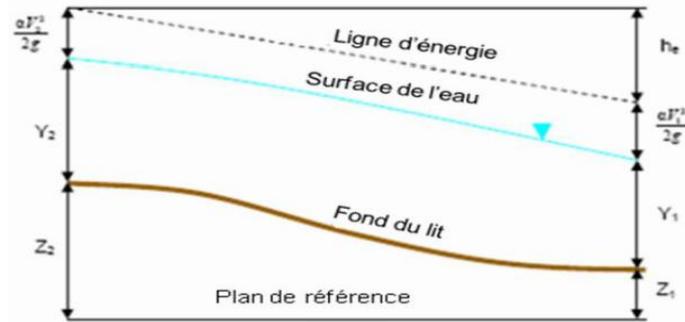


Figure 20 : Représentation des limites dans l'équation d'énergie

La perte totale d'énergie (h_e) entre deux sections est composée des pertes par frottement et des pertes de contraction ou d'expansion. L'équation pour la perte totale d'énergie est comme suit :

$$h_e = L * \bar{S}_f + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right| \quad (2)$$

Où :

L : Distance pondérée entre les deux sections

\bar{S}_f : Pente des pertes de charge par frottement entre les deux sections

C : Coefficient de perte due à l'expansion ou à la contraction

La longueur de la distance mesurée entre deux sections, L , est calculée comme suit :

$$L = \frac{L_{lob} \bar{Q}_{lob} + L_{ch} \bar{Q}_{ch} + L_{rob} \bar{Q}_{rob}}{\bar{Q}_{lob} + \bar{Q}_{ch} + \bar{Q}_{rob}}$$

Où :

L_{lob} , L_{ch} , L_{rob} : Longueurs des distances entre deux sections de calcul indiquées pour l'écoulement dans la berge gauche, le canal principal, et la berge droite.

Q_{lob} , Q_{ch} , Q_{rob} : Moyenne arithmétique des débits entre deux sections pour la berge gauche, le canal principal, et la berge droite.

2.1.3.3. Subdivision d'une section en travers pour le calcul du débit

La détermination du transport total et du coefficient de vitesse pour une section de calcul exige que l'écoulement soit subdivisé en unités pour lesquelles la vitesse est

uniformément distribuée. L'approche utilisée dans HEC-RAS est de subdiviser l'écoulement dans les surfaces des rives en utilisant les points d'arrêt des valeurs de la rugosité n comme base de la subdivision (endroits où est observé le changement des valeurs du coefficient de rugosité n) comme le montre la **figure 21**.

Le flux est calculé dans chaque subdivision sous la forme suivante en fonction de n (Equation de Manning) :

$$Q = K S_f^{1/2}$$

Avec :

$$Q = \frac{1}{n} A R^{2/3}$$

Où :

K : Flux pour la subdivision

n : Coefficient de rugosité de Manning pour une subdivision

A : Surface d'écoulement pour une subdivision

R : Rayon hydraulique pour une subdivision (surface/périmètre mouillé)

Le programme cumule tous les débits dans les rives pour obtenir un flux pour la rive gauche et la rive droite. Le débit total d'une section de calcul est obtenu en additionnant les trois débits des trois subdivisions (gauche, canal, droite).

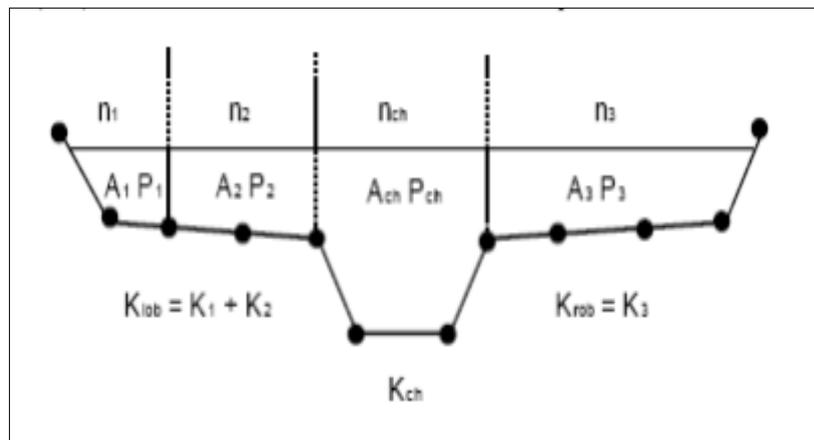


Figure 21 : Méthode de subdivision du débit par le modèle HEC-RAS

2.1.3.4. Evaluation de l'énergie cinétique moyenne

Puisque le logiciel de HEC-RAS est un programme de calcul unidimensionnel des profils de la surface de l'eau, seule une surface de l'eau et donc une énergie moyenne sont calculées en chaque section. Pour un niveau donné de la surface de l'eau, l'énergie moyenne est obtenue

en considérant les énergies correspondantes aux trois sous-sections d'une section de calcul (rive gauche, canal principal, et rive droite). La **figure 22** ci-dessous montre comment l'énergie moyenne est obtenue pour une section de calcul.

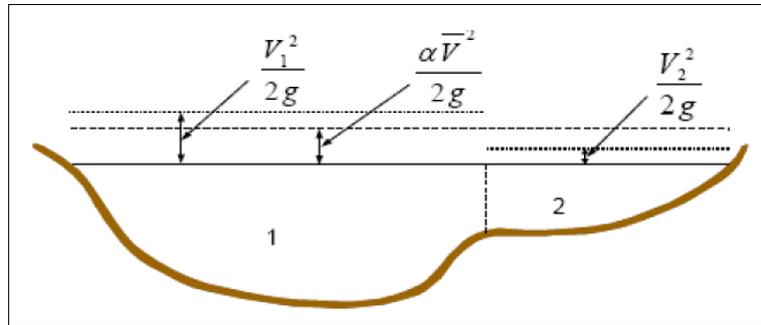


Figure 22 : Calcul de l'énergie cinématique dans une section

Avec :

V1 : Vitesse moyenne de la surface 1

V2 : Vitesse moyenne de la surface 2

Pour calculer l'énergie cinétique moyenne il est nécessaire d'obtenir le coefficient de pondération α de la vitesse. Le coefficient de vitesse α , est calculé en se basant sur le flux dans les trois éléments d'écoulement : la rive gauche, la rive droite, et le canal. Il peut également être écrit en termes de transport et surface comme dans l'équation suivante :

$$\alpha = \frac{(A_t)^2 \left[\frac{K_{lob}^3}{A_{lob}^2} + \frac{K_{ch}^3}{A_{ch}^2} + \frac{K_{rob}^3}{A_{rob}^2} \right]}{K_t^3}$$

Où :

At : Surface totale d'écoulement de la section totale de calcul (m²)

A lob, Ach, Arob : Surface d'écoulement de la rive gauche, de canal principal et de la rive droite respectivement (m²)

Kt: Flux total (m³/s)

Klob, K ch, Krob : Débit de la rive gauche, du canal principal et de la rive droite (m³/s)

α : Coefficient de pondération de la vitesse.

2.1.3.5. Evaluation de la pente hydraulique (de frottement)

La pente de frottement (pente du gradient d'énergie) en chaque section est calculée

à partir de l'équation de Manning comme suit :

$$S_f^{1/2} = Q/K \Rightarrow S_f = (Q/K)^2$$

L'expression pour le calcul de la pente hydraulique moyenne S_f dans HEC-RAS est l'équation du débit moyen entre deux sections de calcul :

$$\overline{S_f} = \left(\frac{Q_1 + Q_2}{K_1 + K_2} \right)^2$$

Avec :

Q : Est le débit d'eau ; $Q = A \times V$ (Equation de continuité) d'où $V = Q/A$

K : Coefficient de débit calculé comme suite : $K = \frac{1.486}{n} AR^{2/3}$

2.1.3.6. Calcul du profil de la surface de l'eau

La hauteur inconnue de surface de l'eau en une section donnée est déterminée par une solution itérative des équations (1) et (2).

$$WS_2 = WS_1 + \frac{1}{2g} (\alpha_1 V_1^2 - \alpha_2 V_2^2) + h_e$$

WS : Niveau (Profil) de la surface de l'eau (m)

3. ETUDE DE CAS « OUED AL BAHJA »

3.1. Etude topographique

La qualité de modélisation hydraulique dépend étroitement de la qualité des données topographiques, la résolution et la précision sont les deux facteurs qui régissent la qualité des données topographiques ; la résolution présente la finesse de maillage des levés sur le terrain tandis que la précision correspond à l'erreur absolue sur ces mesures.

Lorsqu'on utilise un modèle monodimensionnel pour une étude hydraulique à grande échelle, on doit fournir des données topographiques très étendues, de résolution fine et de bonne précision. Le modèle numérique de terrain MNT TIN (Terrain Irregular Network) est le meilleur fond topographique pour les modèles hydrauliques afin de bien représenter le terrain à grande échelle. Il exige un nombre beaucoup plus petit de points, représente le terrain

extérieur avec exactitude et peut être aisément adapté à la complexité variable du terrain. Néanmoins, Il a une taille beaucoup plus volumineuse que le fichier raster.

Afin de créer un MNT TIN, on a adopté une méthode qui intègre les données topographiques de provenances différentes à savoir :

- ✓ Des courbes de niveau ;
- ✓ Des points topographiques au lit mineur d'oued Al Bahja.

3.2. Création et extraction des données topographiques pour l' HEC-RAS

Une fois le MNT TIN est créé, on peut facilement former la géométrie pour l' HEC-RAS et cela se fera grâce à l'interface HEC-Géo RAS spécifiquement conçue afin de traiter des données géo spatiales pour l'usage avec le système HEC RAS. Et du fait que l'HEC-GeoRAS exige un MNT représenté par (TIN), l'ArcView, la prolongation de l'analyste 3D et l'analyse spatial sont imposées pour employer HEC-GeoRAS.

Avec la prolongation preRAS, HEC GeoRAS utilise le MNT TIN pour préparer un dossier des données géométriques évitant ainsi une étape fastidieuse de saisie manuelle. Le dossier d'importation est créé à partir d'une série des thèmes de Ras qui sont les shapefiles d'ArcView extraites du modèle numérique de terrain. Ces thèmes de Ras sont : la ligne centrale de jet (Stream Centerline), les lignes centrales de chemin d'écoulement (Main Channel Banks), les lignes de berges (Flow Path Centerlines), les profils en travers (Cross-Sections/Cut Lines), le modèle de rugosité (Land Use), le levée d'alignement (Levee Alignment), les régions inefficaces d'écoulement (Ineffective Flow Areas) et les zones de stockage (Storage Areas).

La figure suivante représente la démarche exigée par HEC GeoRas afin de former le dossier de la géométrie pour HEC RAS.

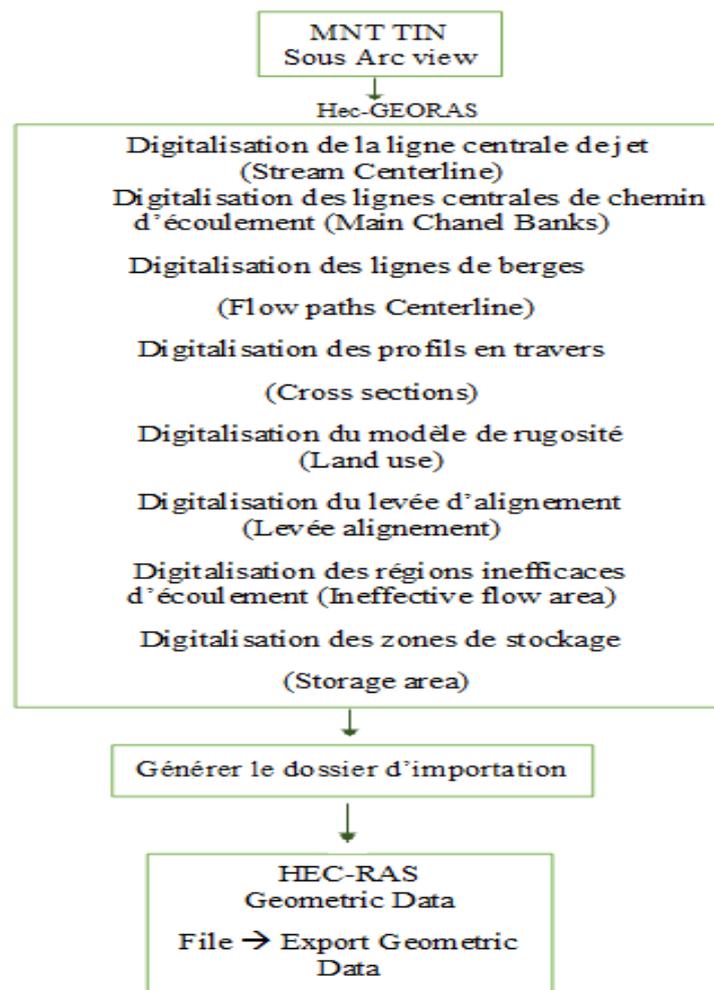


Figure 23 : Diagramme récapitulant de la méthode de préparation du dossier de données [8]

Dans cette démarche, le profil en travers est l'élément géométrique primordial. Il est tracé sur le MNT et doit respecter certaines règles pour qu'il soit représentatif :

- ✓ Ils doivent être perpendiculaires à la direction de l'écoulement, et ils ne doivent pas se croiser ;
- ✓ Ils doivent être plus larges que l'étendue de l'inondation (à savoir plus larges que les flow paths), toujours digitalisées de la gauche vers la droite (en regardant vers l'aval) et à un intervalle le plus régulier possible ;
- ✓ Ils doivent encadrer les ouvrages structurants du cours d'eau (ponts, seuils...).

La figure suivante représente les principaux thèmes de RAS créés par l'HEC-GeoRAS :

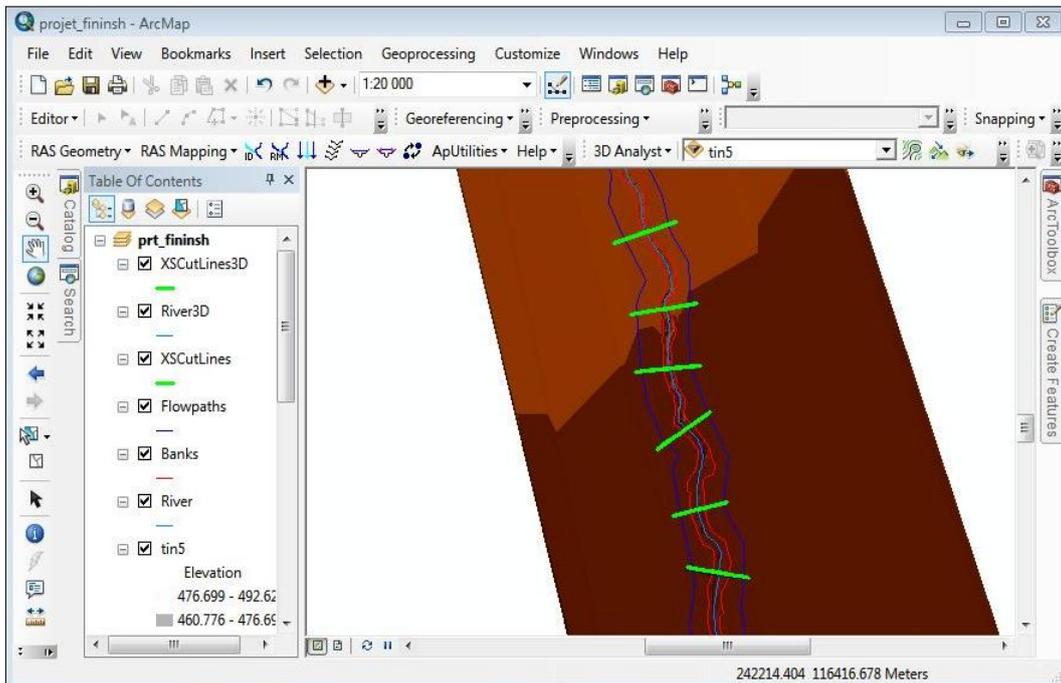


Figure 24 : Principaux thèmes de RAS créés par HEC GeoRAS (preRAS)

Une fois le dossier d'importation est prés, l'HEC RAS l'exporte grâce à la commande « Geometric Data » et fait apparaître la fenêtre de la figure suivante :

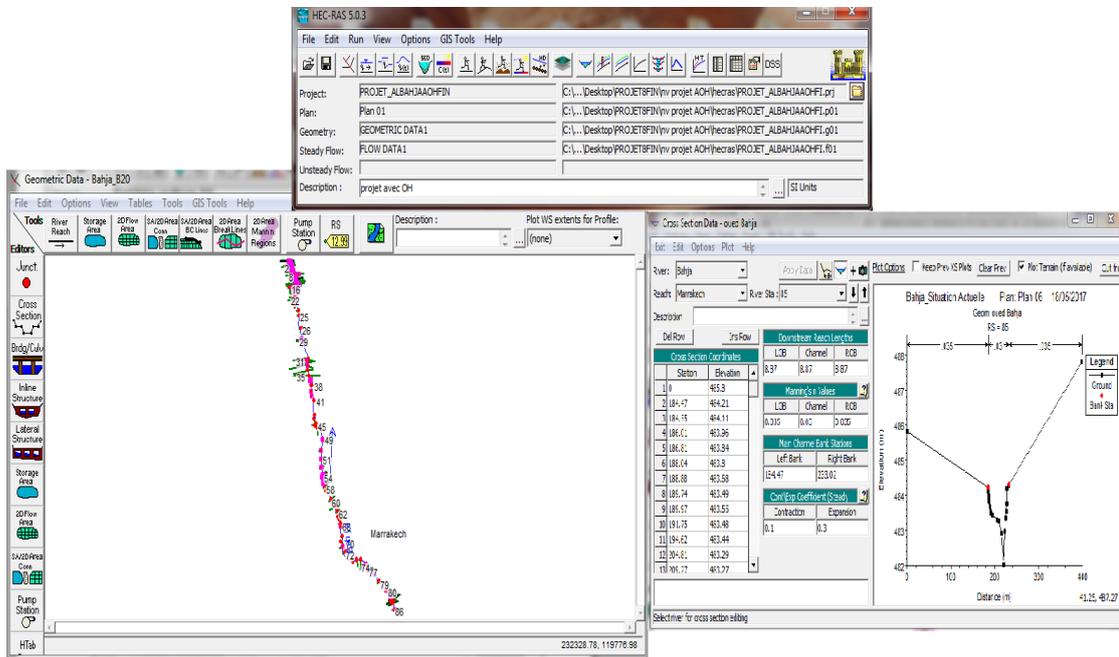


Figure 25 : La Géométrie de l'oued Al Bahja dans le logiciel HEC RAS

3.3. Montage du modèle

La construction du modèle sous HEC-RAS, passe par les étapes suivantes :

3.3.1. Données hydrométriques

Après avoir introduit la géométrie du cours d'eau, l'étape suivante est de spécifier les débits utilisés pour calculer les profils d'écoulement. Pour cela, on a engagé la simulation hydraulique en régime permanent avec les quatre valeurs des débits qui sont obtenus dans la partie hydrologique et qui correspondents aux périodes de retours 10, 20, 50 et 100 ans.

De ce fait, dans la fenêtre principale, cliquez sur le bouton « Steady Flow » Data et utilisez les débits issus de l'étude hydrologique pour calculer les profils d'écoulement correspondants. Pour entrer ces valeurs de débits, indiquez d'abord « Number of Profiles ». Par la suite, dans le menu Options, allez à « Edit Profile Names » et indiquez les noms de profils appropriés (Q10, Q 20, Q 50 et Q 100).

Les valeurs des débits qui sont entrées aux cases correspondantes sont représentatives de la section amont et sont considérés valides sur tout le tronçon de la rivière. La **figure 26** montre l'édition de ces données.

3.3.2. Coefficients de rugosité

Le choix des coefficients de rugosité s'est effectué sur la base des observations de la mission du terrain. Pour notre étude, les coefficients de Manning ont été pris égaux à 0.030 sur le lit mineur et à 0.035 sur les berges en raison de leur état et couvert végétal.

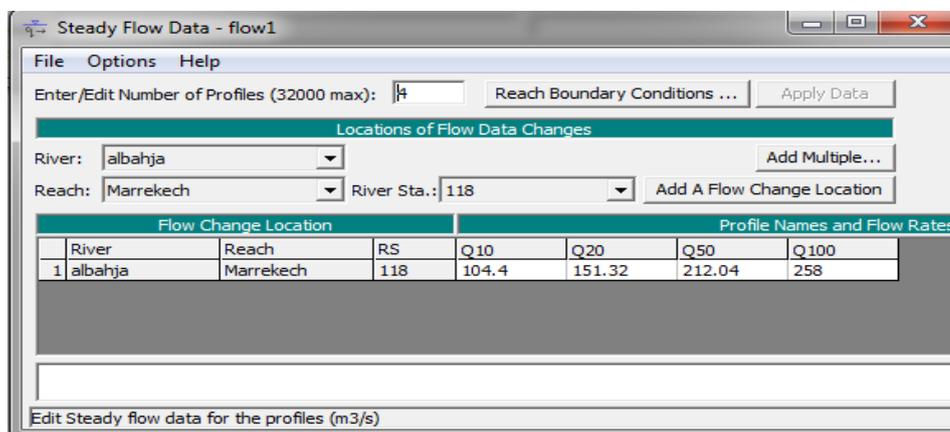


Figure 26 : Fenêtres des données hydrométriques dans le logiciel HEC RAS

3.3.3. Conditions aux limites

Les conditions aux limites donnent une valeur de départ de la ligne d'eau aux extrémités de la zone d'étude pour que le programme puisse commencer la simulation.

Dans un régime d'écoulement fluvial, une condition aval est suffisante, pour un régime d'écoulement torrentiel, une condition amont est suffisante. Pour des régimes

mixtes, une condition amont et une condition aval sont nécessaires.

Le HEC-RAS offre la possibilité de faire entrer comme conditions aux limites, une hauteur d'eau connue, une profondeur critique, une pente normale du point en amont ou en aval selon le régime d'écoulement.

Pour notre cas, on a introduit la valeur de 0.0065 m/m comme une pente normale évaluée à la tête de l'oued Al Bahja . La **figure 27** indique ces conditions aux limites.

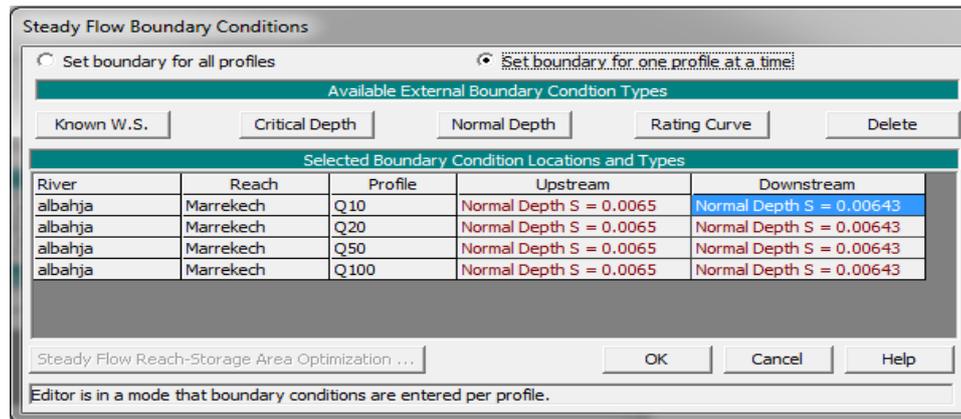


Figure 27 : Fenêtres des conditions aux limites dans le logiciel HEC RAS

3.3.4. Simulation hydraulique

Après avoir défini la géométrie, les données hydrométriques et les conditions aux limites nécessaires à la simulation et après avoir enregistré les fichiers correspondants, la dernière étape nécessaire à la modélisation avec HEC-RAS est de définir le « Plan » utilisé pour lancer la simulation, en cliquant sur le bouton « Steady Flow Analysis » on obtient la fenêtre présentée plus bas. Dans cette fenêtre on spécifie les fichiers contenant la géométrie du cours d'eau et les débits créés précédemment. Ainsi on choisit le régime de simulation.

Puis on clique sur la barre « compute » (calculez) ; si l'opération se déroule normalement, la simulation s'enregistrera automatiquement, dans le cas échéant vous aurez des erreurs relatives généralement aux mauvaises manipulations ou au un choix erroné des

conditions aux limites, corrigez les erreurs et refaites le calcul.

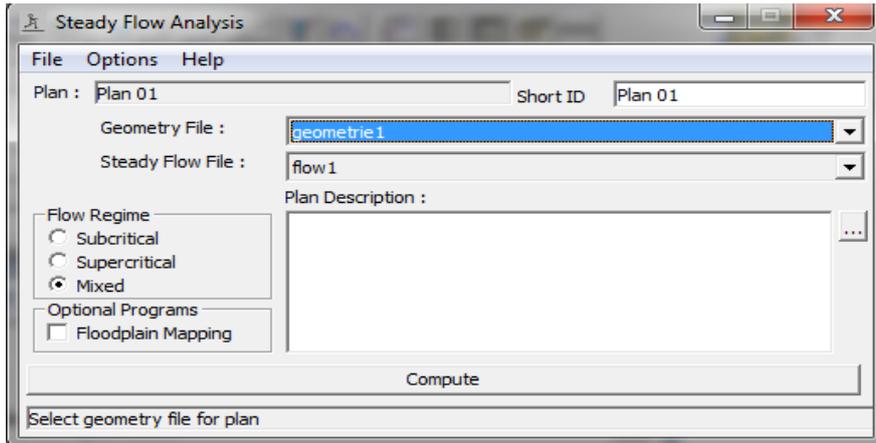


Figure 28 : Fenêtres de simulation pour le régime permanent

3.3.5. Implantation des ouvrages de franchissement

Les ouvrages de franchissement sont les principaux points singuliers à considérer dans les calculs et les simulations hydrauliques.

Ces ouvrages ont été encadrés par deux profils amont et aval de manière à modéliser au mieux le comportement de la ligne d'eau à leur proximité.

Toutes les composantes de ces ouvrages de franchissement ont été introduites au modèle à savoir les tabliers, les piles, les culées et également les digues de raccordement dont les cotes supérieures ont été également levées sur le terrain.

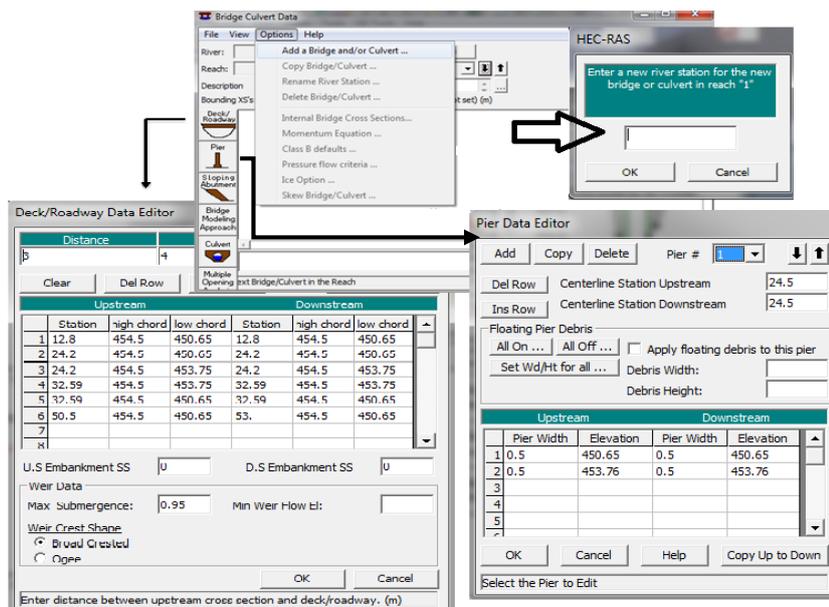


Figure 29 : Les étapes pour implanter un dalot

La figure ci-dessous illustre un exemple du dalot simple existant à l'amont du Douar Bousetta :

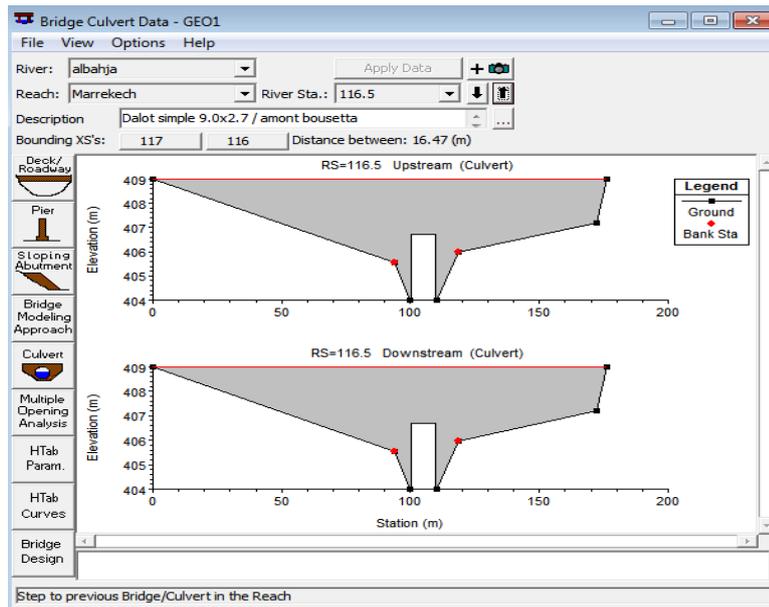
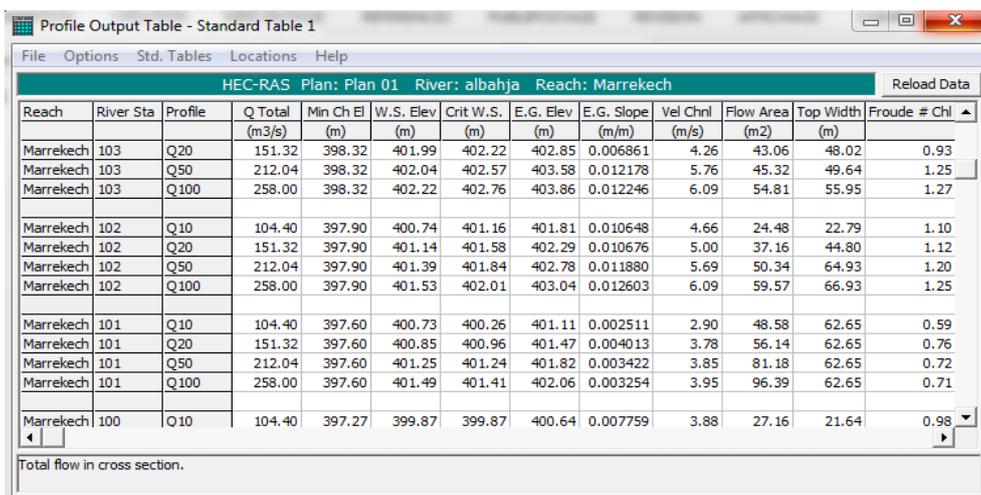


Figure 30 : Implantation des dalots existant à l'amont du Douar Bousetta

Après avoir élaboré les deux fichiers de géométrie et d'écoulement, HEC-RAS procède à un test du modèle pour vérifier s'il existe des erreurs qui l'affectent, que ça soit au niveau du modèle géométrique ou des données d'écoulement, et indique l'emplacement de ces erreurs.

3.4. Résultats et discussion

Après la simulation, HEC-RAS donne plusieurs résultats sous forme de tableaux et de représentations graphiques. La figure ci-dessous illustre le détail de ces résultats.



HEC-RAS Plan: Plan 01 River: albahja Reach: Marrekech												
Reach	River Sta	Profile	Q Total (m ³ /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Chl
Marrekech	103	Q20	151.32	398.32	401.99	402.22	402.85	0.006861	4.26	43.06	48.02	0.93
Marrekech	103	Q50	212.04	398.32	402.04	402.57	403.58	0.012178	5.76	45.32	49.64	1.25
Marrekech	103	Q100	258.00	398.32	402.22	402.76	403.86	0.012246	6.09	54.81	55.95	1.27
Marrekech	102	Q10	104.40	397.90	400.74	401.16	401.81	0.010648	4.66	24.48	22.79	1.10
Marrekech	102	Q20	151.32	397.90	401.14	401.58	402.29	0.010676	5.00	37.16	44.80	1.12
Marrekech	102	Q50	212.04	397.90	401.39	401.84	402.78	0.011880	5.69	50.34	64.93	1.20
Marrekech	102	Q100	258.00	397.90	401.53	402.01	403.04	0.012603	6.09	59.57	66.93	1.25
Marrekech	101	Q10	104.40	397.60	400.73	400.26	401.11	0.002511	2.90	48.58	62.65	0.59
Marrekech	101	Q20	151.32	397.60	400.85	400.96	401.47	0.004013	3.78	56.14	62.65	0.76
Marrekech	101	Q50	212.04	397.60	401.25	401.24	401.82	0.003422	3.85	81.18	62.65	0.72
Marrekech	101	Q100	258.00	397.60	401.49	401.41	402.06	0.003254	3.95	96.39	62.65	0.71
Marrekech	100	Q10	104.40	397.27	399.87	399.87	400.64	0.007759	3.88	27.16	21.64	0.98

Figure 31 : Affichage des résultats de simulation sous forme d'un tableau

N.B : Les résultats de simulations (tableaux et graphiques) de la crue 1/100 pour l'oued Al Bahja sont représentés en **annexe n°5**.

L'analyse de ces résultats fait ressortir les constatations suivantes :

- Les vitesses d'écoulement sont généralement inférieures à 6m/s sauf en quelques points particuliers.
- A l'amont des ouvrages hydrauliques les vitesses d'écoulement et les nombres de Froude diminuent, tandis qu'ils augmentent en aval de ces ouvrages, ceux-ci jouent le rôle donc des petits barrages vis-à-vis de l'écoulement de l'oued. Cette situation comprend des risques d'effondrement de berges ;
- Les zones inondées sont importantes, la largeur du plan d'eau atteint par endroits jusqu'à 200m ;
- L'écoulement est de type mixte, le nombre de Froude reste inférieur à l'unité sauf en aval des ouvrages de franchissement et au niveau de points singuliers (fortes pentes).

3.5. Cartographie de l'aléa inondation

Quand la simulation est effectuée, on peut, grâce à l'HEC GeoRAS, exporter les résultats de simulation vers l'ArcView afin de délimiter les zones inondables.

Une fois les taches inondables sont identifiées pour les différents débits prévus, l'ArcGIS permet de superposer ce résultat avec une carte topographique géoréférencée pour faire extraire à la fin la carte d'aléa inondation. La figure suivante représente cette carte d'aléa.

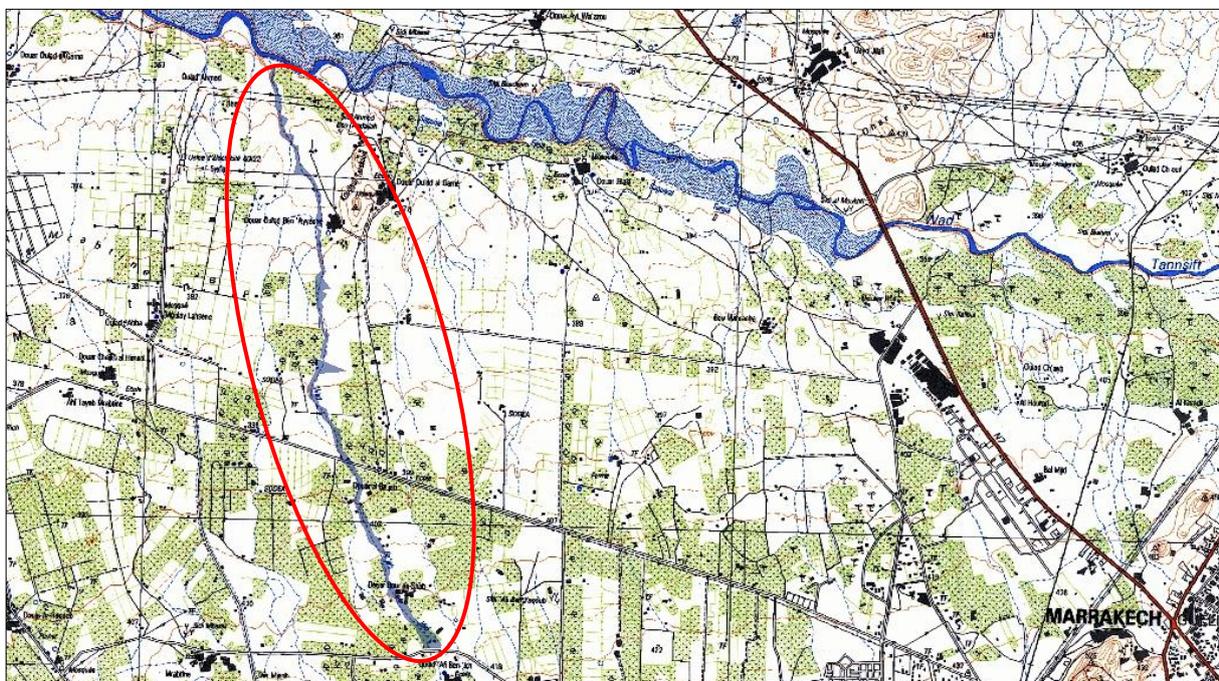


Figure 32 : Carte d'inondation de l'oued Al Bahja

D'après cette image, on remarque que lors d'une crue centennale, il y aura des débordements sur les deux rives sur sa quasi-totalité, notamment en amont des ouvrages

hydrauliques, même pour des crues à faible période de retour. Ceci présente un risque d'inondation pour les terrains agricoles et les constructions situés le long de l'oued, à proximité des berges.

Les risques encourus lors de cette crue centennale ainsi que les dégâts humains et matériels qu'elle engendre laissent à réfléchir des solutions intégrées afin de remédier à ce fléau.

4. CONCLUSION

Dans cette partie du présent travail, on a pu ressortir les caractéristiques de chaque crue calculée et de reporter ses limites sur un fond topographique, pour pouvoir matérialiser son incidence, cerner ses limites et par la suite proposer des solutions qui puissent atténuer son impact sur les zones inondées.

CHAPITRE 5 :

SCHEMAS D'AMENAGEMENTS

1. INTRODUCTION

Le choix d'aménagement d'une zone est basé sur le risque d'inondation, mais aussi sur l'importance socio-économique de cette zone. Ainsi, à travers la cartographie des zones inondables au niveau de oued Al Bahja, on peut se rendre compte la nécessité de mettre en place des aménagements de protection contre les inondations.

2. DEFINITION DES SCHEMAS D'AMENAGEMENTS

La définition des schémas d'aménagements possibles permettra d'apporter la meilleure solution aux problèmes des inondations. Pour plus de sécurité ces schémas seront dimensionnés pour une crue centennale.

Pour la protection de la zone étudiée contre les inondations, et en plus du redimensionnement des ouvrages de franchissements, on propose deux variantes comme aménagement :

- Variante 1 : B=20m :

Le recalibrage du lit de l'oued avec une largeur de base 20 m, et la réalisation des digues de protection le long des zones inondées.

- Variante 2 : B=25m :

Le recalibrage du lit de l'oued avec une largeur de base 25 m, et la réalisation des digues de protection le long des zones inondées.

Notons que dans la présente étude, on a pris en considération les résultats du tronçon amont avec la solution de recalibrage de 20m qui a été retenue, afin de prendre en considération l'influence de celle-ci sur l'écoulement dans le tronçon aval objet de notre étude et pouvoir étudier le prolongement des solutions déjà proposées pour le tronçon amont.

En effet, ces largeurs de base ont été choisies pour être en cohérence avec celui du tronçon amont et doivent être uniformisées sur tout le tronçon, même pour les endroits très serrés, donc où l'expropriation sera exigée.

2.1. Hypothèse retenue

Revanche de dimensionnement :

Il est pris en compte une revanche dans les petits ouvrages hydraulique de 50 cm pour tenir compte des turbulences en surface (remous et vagues) et des objets flottants susceptibles de

dégrader la génératrice supérieure de l'ouvrage.

2.2. Le recalibrage du lit de l'oued

2.2.1. Principe de recalibrage

Le recalibrage est une opération qui consiste à augmenter la capacité des sections d'un cours d'eau, afin de permettre le passage de la crue (centennale), et donc un redimensionnement des sections de l'oued.

Pour le recalibrage du lit de l'oued Al Bahja, on a choisi la section trapézoïdale vue sa stabilité par rapport à la section rectangulaire.

Les paramètres de la nouvelle section permettant le passage du débit centennal sont déterminés à l'aide de l'équation de Manning Strickler.

$$Q = A \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} \sqrt{S_0}$$

Avec :

Q : Débit à transiter en m³/s;

A : Section mouillée (m²) ;

n : Coefficient de Manning ;

R : Rayon hydraulique défini comme étant le rapport de la section mouillée « A » (m²) au périmètre mouillé « P » (m) ;

S₀ : Pente longitudinale du canal.

Pour une section trapézoïdale :

$$A = bY + mY^2$$

$$P = b + 2Y(1 + m^2)^{1/2}$$

$$T = b + 2mY$$

Avec :

b : Largeur au radier (m) ;

Y : Profondeur ou hauteur maximale d'eau dans l'oued (m) ;

m : Pente des berges ;

T : Largeur au miroir ou largeur superficielle (m).

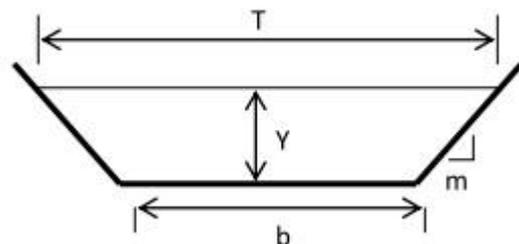


Figure 33 : les caractéristiques d'une section trapézoïdale

Le pré-dimensionnement du canal rectangulaire avec la formule de Manning Strickler est présenté dans l'**annexe n°7**.

2.2.2. Choix de la pente de berge d'un canal trapézoïdal

La valeur qu'il convient de choisir pour la pente de berge d'un canal de terre de section trapézoïdale dépend du type de sol sur lequel il est installé. La pente du canal peut être d'autant plus forte que le matériau du sol est plus stable. Pour plus de détail ; voir **annexe n°6**.

Dans le cas de cette étude, m sera prise égale à 1.5 (1.5H/1V).

2.2.3. Simulation hydraulique du canal projeté

Ces résultats seront ajustés en introduisant le canal dans le logiciel HEC-RAS et sans introduire des modifications notables de la pente de l'oued, afin d'optimiser au maximum la quantité des terrassements.

L'analyse de la topographie du lit de l'oued ressort sept tronçons relativement uniformes comme suit :

- Tronçon 1 : Entre PT118 et PT107 (1012m) avec une pente de l'ordre de 0.73%;
- Tronçon 2 : Entre PT107 et PT90 (1440 m) avec une pente de l'ordre de 0.54%;
- Tronçon 3 : Entre PT90 et PT41 (3048 m) avec une pente de l'ordre de 0.55%;
- Tronçon 4 : Entre PT41 et PT25 (1254 m) avec une pente de l'ordre de 0.5%;
- Tronçon 5 : Entre PT25 et PT22 (306 m) avec une pente de l'ordre de 1.42% ;
- Tronçon 6 : Entre PT22 et PT13 (585 m) avec une pente de l'ordre de 0.76% ;
- Tronçon 7 : Entre PT13 et PT1 (980 m) avec une pente de l'ordre de 0.70%.

Le recalibrage est effectué directement sur HEC-RAS. Le principe est le suivant :

- Déterminer la largeur que peut prendre le lit de l'oued pour chaque section sans toucher les terrains urbanisés. On divise le tronçon de l'oued étudié en sous tronçons qui ont presque la même pente, tout en gardant la même pente du terrain, car l'oued Al Bahja est un affluent d'oued Tensift ;
- Concernant la profondeur du lit de l'oued, elle reste la même parce que l'approfondissement de l'oued peut causer l'apparition d'une zone de stagnation d'eau au niveau de ce tronçon ;

Avant de commencer la modification, on doit d'abord enlever les ouvrages de franchissement et les redimensionner après le recalibrage.

La figure ci-dessous présente la boîte de dialogue du système HEC RAS pour entrer les caractéristiques du recalibrage.

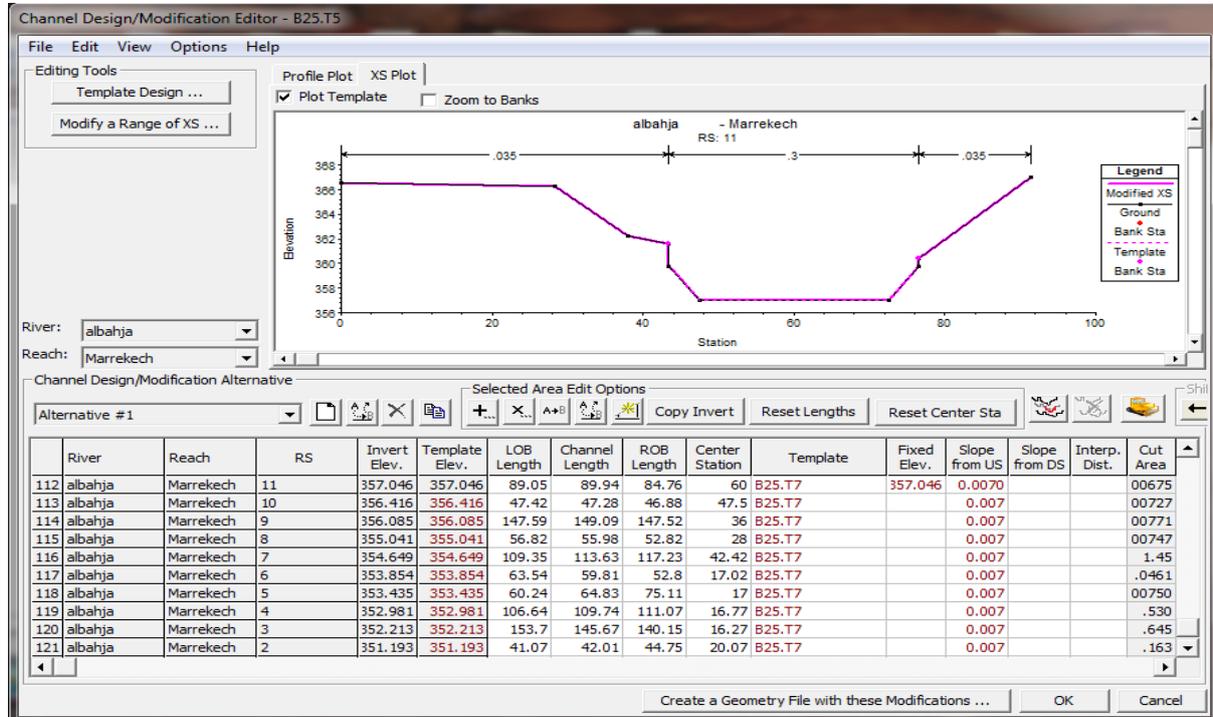


Figure 34 : Ecran du système HEC RAS pour le recalibrage

Après une série de simulations, on arrive aux caractéristiques des sections pouvant évacuer la crue centennale sans débordement.

Après le recalibrage du lit de l'oued, les vitesses d'écoulement augmentent alors que les largeurs, les hauteurs d'eau, les surfaces et les périmètres mouillés diminuent.

2.3. Dimensionnement des ouvrages de franchissement

La route peut constituer un obstacle préjudiciable à l'écoulement naturel et réciproquement, celui-ci peut générer des dommages à la route.

Les ouvrages hydrauliques de rétablissement des écoulements naturels devront donc être correctement dimensionnés pour limiter les risques :

- d'inondation et de submersion ou de dégradation de la route dans des seuils admissibles ;
- de rupture de l'ouvrage routier.

On distingue généralement deux familles d'ouvrages :

- les buses (circulaires, Ovale) ;
- les dalots.

Les ouvrages de franchissement actuellement existants et concernés par la présente étude sont au total quatre ouvrages et ils sont situés au croisement de l'oued avec les voiries et des douars.

Après le recalibrage du lit de l'oued Al Bahja, on redimensionne les ouvrages de franchissement de telle façon que ces caractéristiques sont prises pour permettre le passage de la crue centennale. On définit sur HEC RAS des caractéristiques des ouvrages de franchissement permettant le passage de la nouvelle hauteur d'eau.

La vérification de la capacité des ouvrages a été effectuée selon les formules de Delorme (utilisés par la DRCR pour le dimensionnement hydraulique des ouvrages de franchissement) lesquelles s'écrivent comme suit :

$$Q_{CR} = 1.5 \times L \times H^{\left(\frac{3}{2}\right)} \quad \text{Pour les dalots}$$

$$Q_{CR} = 2.8 \times R \times H^{\left(\frac{3}{2}\right)} \times 0.88 \quad \text{Pour les buses}$$

Où :

L : Ouverture du dalot en (m)

R : Rayon de la buse en (m)

H : Hauteur sous dalles pour les dalots ou le diamètre intérieur pour les buses en (m)

Le logiciel HEC RAS présenté ci-dessus permet également de vérifier la capacité des ouvrages hydrauliques.

2.3.1. Choix de l'ouvrage de franchissement

Le choix des ouvrages sera guidé par le souci du débit passant dans l'ouvrage hydraulique, des charges statiques et dynamiques qui sollicitent l'ouvrage, du coût d'investissement et de la durée de construction.

Type	Buses		Dalots
	Rigides	Souples	
Forme	Circulaire	Ovale	Rectangulaire
Mise en oeuvre	Préfabriquées	Tôles préfabriquées et assemblés	Coulé sur place ou éléments préfabriqués
Emploi	Préfabriquées	Sous Remblais important	Les plus employés
Avantages	Economique	Supporte des charges importantes	Supporte directement les charges.
			A section égale et pente égale, un dalot est capable d'écouler un débit supérieur à celui d'une buse.
Inconvénient	Petit débit (<10 m ³)	Corrosion	Plus de durée de construction.
	Remblais important (>80 cm)	L'assemblage réalisé par soudure est cher	
		Remblais important (>80 cm)	

Figure 35 : Avantages et inconvénients des différentes solutions proposées

Puisque les débits qui doivent passer par les ouvrages de franchissement sont supérieurs à 15 m³/s, on a choisi les dalots comme solutions.

Les principales caractéristiques sont illustrées dans le tableau et la figure suivante :

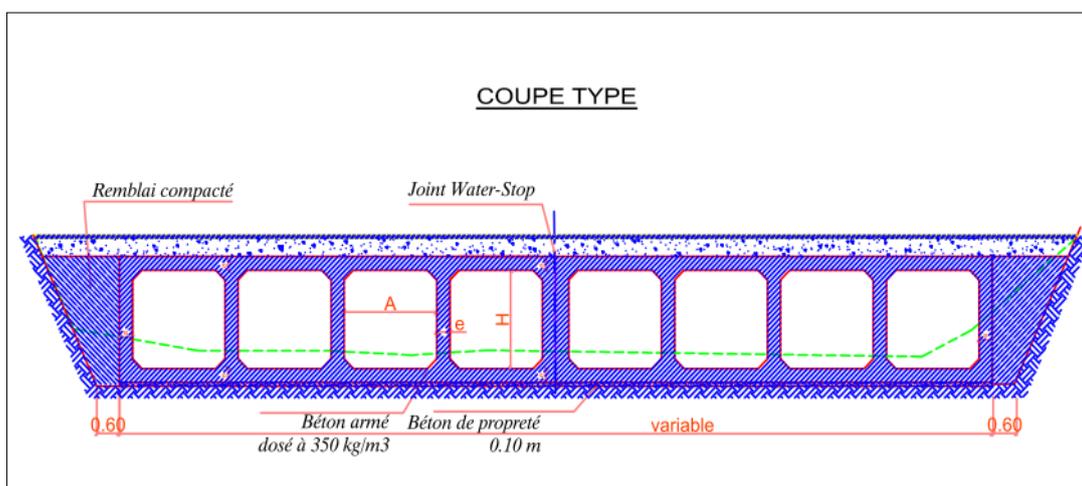


Figure 36 : Coupe en travers type d'un dalot multiple projeté

Redimensionnement des ouvrages existants pour $Q_{100}=258 \text{ m}^3/\text{s}$							
Variantes I et II							
Localisation	Intervention	Caractéristiques de l'ouvrage complémentaire projeté					Q100
		Ouverture (A)	Hauteur (H)	Nbr d'ouvertures	Epaisseur e (m)	Capacité [m ³ /s]	
		[m]	[m]				[m ³ /s]
L'amont de douar Bou setta	Reconstruction	3.5	3.5	8	0.37	275	258
Douar Bou as Shab	Reconstruction	3.5	3.5	8	0.37	275	258
L'intérieur de douar Al Bahja	Reconstruction	4	4	6	0.37	288	258
Accès aux exploitations agricoles	Reconstruction	3.5	3.5	8	0.37	275	258

Tableau 17 : Pré dimensionnement des dalots projetés

2.3.2. Conception des buses et dalots

La formule de Manning donne une équation sous forme implicite où l'on fixe la valeur de la largeur au radier b du dalot et l'on calcule le tirant d'eau y par itérations successives en respectant :

- la vitesse moyenne de 3 m/s sans dépasser 5 m/s ;
- la condition $H/A < 1,25$ pour assurer un écoulement dénoyé (H et A sont respectivement la hauteur et la largeur du dalot).

2.4. Digue de protection

En plus de recalibrage, nous proposons la réalisation de la diguette éloignée de 3mètres du cours d'eau dans les zones inondable.

Les digues projetées présentent en crête une largeur de 3 m et à la base une largeur variable selon les hauteurs obtenues pour la digue. Les pentes des talus de celle-ci sont déterminées suite à une analyse de stabilité.

Le talus amont sera protégé par une couche d'enrochement de 50 cm d'épaisseur posé sur une couche de tout venant jouant le rôle de filtre et de transition vis-à-vis des matériaux de la digue. Dans le cas de grandes vitesses d'écoulement, un masque en béton ou en maçonnerie

pourra remplacer les enrochements.

Le talus aval recevra une couche de protection en tout-venant de 30cm d'épaisseur.

Les caractéristiques de l'endiguement sont présentées successivement ci-dessous :

- Calage de la côte de la crête : Par rapport à la crue centennale
- Revanche adoptée : 0.50m
- Largeur de la crête de la digue : 3.00 m
- Fruit du talus amont : 1.5H/1V
- Fruit du talus aval : 1.5H/1V

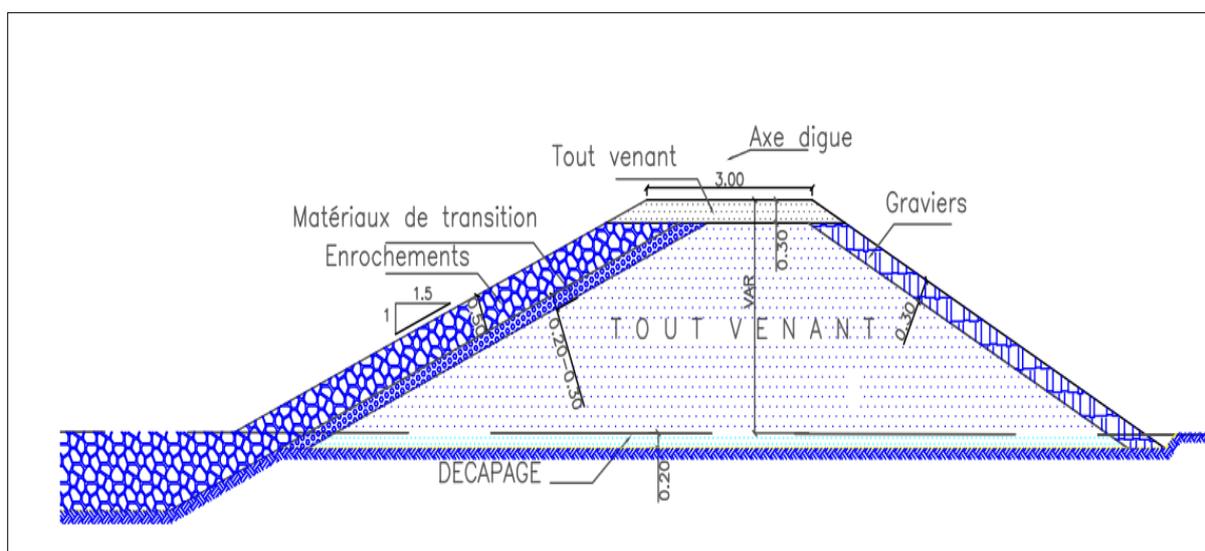


Figure 37 : Coupe en travers type d'une digue

Afin de mieux préserver le talus, une couche de terre végétale avec plantation peut être prévue à l'aval de la digue.

2.4.1. Calcul de la hauteur de la digue

La hauteur de la digue est déterminée à partir de la ligne d'eau pour l'événement hydrologique de référence pris en compte dans l'aménagement, à laquelle on rajoute une revanche d'environ cinquante centimètres (effet des vagues). La ligne d'eau ou le profil de la surface de l'eau est obtenue de la simulation hydrauliques par HEC-RAS pour un débit $Q = 258 \text{ m}^3/\text{s}$ qui correspond à une période de retour de 100 ans.

D'abord on va calculer la côte de la diguette pour chaque section par la formule suivante :

$$\text{Côte_digue} = \text{WS} + \frac{V^2}{2g} + R$$

Avec :

Côte_digue : Côte de la diguette à une section donnée (m)

WS : Côte de la ligne d'eau de la même section (m)

V : Vitesse moyenne de l'eau de la même section (m/s)

R : Revanche des hautes eaux égale à 0.5 m

Ensuite, on va déterminer la hauteur de la diguette via la formule ci-dessous :

$$H_{\text{digue}} = \text{Côte_digue} - \text{Côte_TN}$$

Avec :

Côte_digue : Côte de la diguette à une section donnée (m)

Côte_TN : Côte du TN correspond à la position de la diguette (m)

Le tableau en **annexe n° 8** donne la hauteur de la diguette de quelques sections.

2.4.2. Simulation hydraulique de la digue projetée

Les digues sont construites sur les berges du cours d'eau, généralement ils ne doivent pas dépasser 3m de hauteur. Leur réalisation contre les inondations se fait directement dans le système du HEC RAS.

Dans les zones inondables, et pour chaque section on implante une digue dans les deux rives ou dans une seule rive afin de canaliser les eaux des crues sans toucher les zones urbanisées. Or, on ne peut pas implanter à chaque section une digue à une hauteur différente.

On essaye de diviser le tronçon en de sous tronçons dont la hauteur est égale.

Après une série de simulation, on arrive aux hauteurs des digues pouvant évacuer la crue centennale sans débordement.

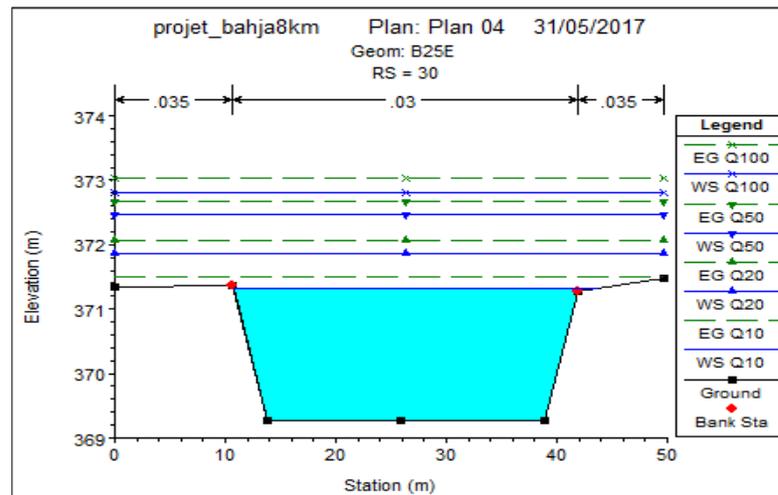


Figure 38 : Problème de l'inondation d'une zone avec débordement des berges

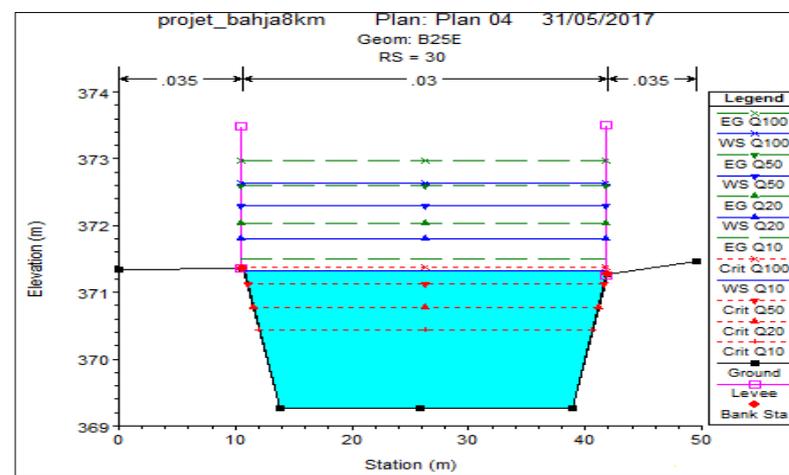


Figure 39 : Résolution de l'inondation des zones qui se trouvent en dessous du niveau de l'eau par l'installation des digues

2.4.3. Les résultats de la modélisation de l'état aménagé de l'oued Al Bahja

Après l'implantation des digues aux bords des sections de l'oued, la modélisation de l'écoulement montre que la crue centennale passe sans débordement sur les terrains urbanisés et donc sans risque d'inondation.

Après la simulation, il apparaît que la première variante avec recalibrage de 20m nécessite un endiguement de grande longueur et hauteur par rapport à la deuxième variante.

- Longueur de la digue : Différent selon les variantes :
 - variante I 5600 m
 - variante II 2900m

3. AVANT METRE ET COÛT ESTIMATIF DES TRAVAUX

L'étude financière consiste à donner une approximation du montant global des aménagements retenus. Les propositions d'aménagement de l'oued Al Bahja ont été estimées financièrement dont le chiffrage est présenté dans l'**annexe n°9**.

Le tableau suivant résume le coût des aménagements des deux variantes étudiées :

Désignation	Coût en Dhs TTC
Variante I – recalibrage B=20m et endiguement	92 359 259
Variante II – recalibrage B=25m et endiguement	50 615 147

Tableau 18 : Coût des deux variantes étudiées

4. CONCLUSION

La solution de recalibrage B=25m est plus économique que la solution B=20m, puisque cette dernière nécessite la réalisation des digues sur des longueurs plus importantes. Ainsi, la variante de recalibrage de l'oued avec une section trapézoïdale à une largeur de base de B=25m est la plus intéressante comme solution d'un point de vue économique malgré l'impact sur le foncier qu'elle peut engendrer. Cependant, et tenant en compte que le recalibrage du tronçon amont de l'oued Al Bahja traité précédemment a été choisi pour une base de B=20m, la variante I paraît la plus adéquate pour une raison d'homogénéité de l'aménagement sur l'oued.

La vue en plan des aménagements retenus est représentée en **annexe n°10**.

Conclusion générale

De nos jours avec les changements climatiques que connaît le globe terrestre, l'un des problèmes considérés comme des plus alarmants est celui du risque éventuel qui peut survenir d'une crue violente et dévastatrice. En effet, les crues sont plus redoutées que souhaitées provoquant ainsi des dégâts considérables avec perte des vies humaines.

Les ménagements de protection contre les inondations, souvent sous-dimensionnées et mal entretenues, ont montré leurs faiblesses à plusieurs reprises et leurs ruptures augmentent la violence des inondations.

Le présent travail consiste en la délimitation des zones inondables dans la région de Marrakech. Cette opération s'est effectuée en trois phases :

La phase Hydrologique qui se résume par le calcul des temps de concentration, des débits par plusieurs formules pour l'étude de la protection contre les inondations de l'Oued Al Bahja.

La phase Hydraulique qui se présente par la réalisation et l'étude de la modélisation hydraulique du cours d'eau concerné. Elle consiste à déterminer les zones de débordement en utilisant le système d'information géographique (SIG) et le logiciel de modélisation hydraulique de rivière (HEC-RAS) qui permettent de reproduire l'état de la zone naturelle sous forme numérique.

La dernière phase s'est étalée sur le choix du schéma d'aménagement convenable à notre projet. Deux schémas d'aménagements, pour la protection de la ville de Marrakech contre les inondations, ont fait l'objet d'étude, notamment, et en plus de l'endiguement, le recalibrage du lit de l'oued avec 20m et 25m de largeur de base. Une étude des coûts a été effectuée pour les deux variantes. Le recalibrage avec 25m présente le coût le plus économique. Or, pour une raison d'homogénéité de l'aménagement sur l'oued. Le choix est donc porté sur le recalibrage avec 20m de base et l'implantation des digues.

Après une concertation avec le Maître d'Ouvrage (ABHT), des améliorations et des modifications peuvent être apportées au projet en phase d'avant-projet détaillé.

Enfin, durant ce projet de fin d'études, on a eu l'opportunité de travailler sur un projet réel de grande envergure qui nous a permis d'approfondir nos connaissances académiques au niveau hydrologique et hydraulique et acquérir de nouvelles notions techniques enrichissantes dans le domaine.

Références bibliographiques

- [1] : NAIR A.H. «Protection du Centre Sidi Yahia Zaer Contre les Inondations »PFE, 2011, EHTP.
- [2] : Rapport de la mission I, Diagnostic de la situation actuelle réalisé par les cadres de Team Maroc (Groupe Jacobs Engineering SA).
- [3] : BENGAMRA S. cours hydrologie générale, Ecole Nationale des Sciences Appliquées d'Al-Hoceima, 2015, ENSAH.
- [4] : GOURY M. et CHELHAOUI Y. « Evaluation des scénarios des changements climatiques locaux via le modèle SDSM pour une zone de montagne et une zone de plaine » PFE, 2013, EHTP.
- [5] : BENGAMRA S. cours d'initiation au système d'information géographique (SIG), 2016, ENSAH.
- [6] : Guide hydrologique et hydraulique pour le dimensionnement des franchissements routiers, DRCR 1997.
- [7] : John C. Warner, Gary W. Brunner, Brent C. Wolfe and Steven S.Piper, 2002.River Analysis System HEC-RAS vs.5.0.3: Hydraulic Reference. Hydrologic Engineering Center (HEC) .US Army Corps of Engineers.
- [8] : BACHI M. « Problématique du risque inondation en milieu urbain ; cas de l'agglomération de SIDI BEL ABBES » MEMOIRE DE FIN D'ETUDES, 2010, Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen –. Faculté de Technologie.
- [9]: L'hydraulique au pluriel : Cours et exercices résolus dans différentes disciplines de l'eau- Abdeljalil Gouzrou, édition 2013.
- [10]: US Army Corps of Engineers Center, Hydrologic Engineering Center « HEC-RAS User's Manual, Version 5.0.3 ».
- [11] : BENHADDOUCH S. « Etude de protection du centre de Bir Jdid contre les inondations » PFE, 2015, ENSAH.
- [12] : « Etude de protection du centre de Midelt contre les inondations », 2011, a.d.i.
- [13] : MAKHOUKHI A.B. « Protection contre les inondations du Centre Zaida dans la province de Midelt » PFE, 2015, ENSAH.

Webographie

[a] : <https://fr.slideshare.net/mohamed19705/hydrologie-des-bassins>

[b] : <http://www.lthe.fr/PagePerso/hingray/PAGES/Pages/HA08.htm>

[c] : http://www.fao.org/fishery/static/FAO_Training/FAO_Training/General/x6708f/x6708f08.htm

[d] : <http://www.institut-numerique.org/41-methodologie-et-resultats-521b11acdd216>.

[e] : <http://hmf.enseiht.fr/travaux/bei/beiere/content/methode-des-polygones-de-thiessen>

Annexes

Annexe n°1

1-REPERAGE DES PRINCIPAUX DOUARS ET OUVRAGES DE FRANCHISSEMENT
DANS LA ZONE D'ETUDE



2-ALBUM PHOTO DU TROCON DE L'OUED AL BAHJA



Dalot simple au niveau du douar Beni Igh suivi d'une saquia surélevée



Rive gauche longée par des murs de clôture des fermes, protégée par endroit par gabionage



Construction édifée sur la berge droite de l'oued



Protection de la rive droite par gabionage sur une longueur de 30m environ



Pont permettant l'accès aux fermes, protégé par un mur sur les deux rives



Détérioration de l'ouvrage de franchissement reliant les habitations entre eux du douar Bou Setta



Passerelle permettant l'accès au douar Bour Shab



Empiètement d'une construction sur le lit de l'oued au niveau du douar Bour Shab



Développement du douar Al Fallah sur la rive gauche de l'oued



Batterie de cinq buses sur la route menant vers Swiha



Empiètement des constructions du douar Al Bahja sur les deux rives du



OH en état dégradé permettant l'accès aux fermes situées à l'amont de l'embou-



Installation de plusieurs prises d'eau le long du tronçon étudié



Rétrécissement de la section de l'écoulement des eaux de l'oued à l'amont de sa confluence avec l'oued Tensift



Annexe n°2

PLUIES JOURNALIERES MAXIMALES ANNUELLES :

année	Marrakech	Tahanaout	Imin Lahamam	Iguir N Kouris	Agouns	Amenzal	Aremed	Tiourdiou
1968		46.8						
1969		40.3						
1970	60.0	36.1	38.1					
1971	61.0	28.6	23.0					
1972	0.0	32.1	40.5					
1973	66.0	39.9	41.1					
1974	36.2	49.4	49.6					
1975	30.9	39.4	26.8	15.0				
1976	20.0	25.0	23.2	31.0				
1977	30.0	38.6	35.1	36.0				
1978	28.0	31.3	18.5	39.0				
1979	27.7	22.5	36.8	27.0				
1980	16.2	35.0	28.4	22.0				
1981	44.1	37.7	65.6	24.0				
1982	9.6	27.2	32.5	24.0				
1983	38.9	33.1	32.3	38.0				
1984	30.0	37.3	30.0	24.0				
1985	38.6	37.3	35.8	30.0				
1986	39.9	45.5	26.7	35.0				
1987	34.0	23.7	50.0	35.0				
1988	42.1	64.8	53.5	76.0				
1989	23.4	36.2	44.6	59.0				
1990	66.9	56.7	32.9	16.0				
1991	26.7	39.6	31.0	49.0				
1992	22.2	29.6	26.0	17.0				
1993	25.8	46.6	46.4	42.0				
1994	78.9	36.8	51.0	38.0				
1995	32.8	42.4	37.7	51.0				
1996	46.9	57.0	66.5	46.0				
1997	32.3	31.5	36.6	48.0		90.4		76.7
1998	29.8	36.4	93.2	19.0	55.2	78.0	22.5	35.8
1999	21.7	27.5	42.6	53.0	22.2	103.8	112.0	49.0
2000	17.4	28.6	28.6	10.0	10.0	13.6	13.2	22.0
2001	22.2	31.3	74.8	36.0	26.3	29.7	31.3	23.0
2002	31.7	39.8	17.0	27.0	43.4	34.3	31.6	25.8
2003	33.3	49.4	70.8	37.0	36.4	32.8	50.7	31.9
2004	21.2	23.3	33.8	25.0	28.0	41.9	26.0	61.2
2005	35.8	66.2	38.9	26.0	70.5	45.9	95.6	61.2
2006	20.9	44.1	51.8	33.0	69.0	175.3	77.1	74.6
2007	29.2	39.1	31.8	22.0	38.2	30.1	33.7	22.6
2008	210.0	40.3	30.9	35.0	33.2	47.2	54.9	50.6
2009	95.0	44.1	39.6	41.0	27.3	37.6	53.4	39.2
2010	32.9	51.8	73.0	29.0	37.1	40.0	39.5	13.6
n	41	43	41	36	13	14	13	14
M	39.3	38.8	41.1	33.8	38.2	57.2	49.3	41.9
S	32.9	10.3	16.6	13.6	17.7	42.3	29.5	20.5
Cv	0.8	0.3	0.4	0.4	0.5	0.7	0.6	0.5
Max	210.0	66.2	93.2	76.0	70.5	175.3	112.0	76.7
Min	0.0	22.5	17.0	10.0	10.0	13.6	13.2	13.6
Me	31.7	37.7	36.8	34.0	36.4	41.0	39.5	37.5

Annexe n°3

DEBITS PLUVIAUX INSTANTANES MAXIMUMS ANNUELS (Qimax) :

année	Tahanaout
1960	
1961	
1962	13.0
1963	34.0
1964	13.0
1965	35.0
1966	37.0
1967	54.0
1968	56.0
1969	9.0
1970	8.0
1971	24.0
1972	15.0
1973	42.0
1974	47.0
1975	12.0
1976	16.0
1977	9.0
1978	21.0
1979	9.0
1980	39.0
1981	36.0
1982	33.0
1983	22.0
1984	30.0
1985	23.0
1986	54.0
1987	155.0
1988	146.0
1989	58.0
1990	103.0
1991	26.0
1992	77.0
1993	24.0
1994	45.0
1995	680.0
1996	68.0
1997	15.0
1998	31.0
1999	46.0
2000	412.0
2001	0.0
2002	15.0
2003	22.0
2004	18.0
2005	9.0
2006	24.0
2007	2.0
2008	2.0
2009	24.0
2010	38.0

n	49
M	55.7
S	110.4
Cv	2.0
Max	680.0
Min	0.0
Me	26.0

Annexe n°4

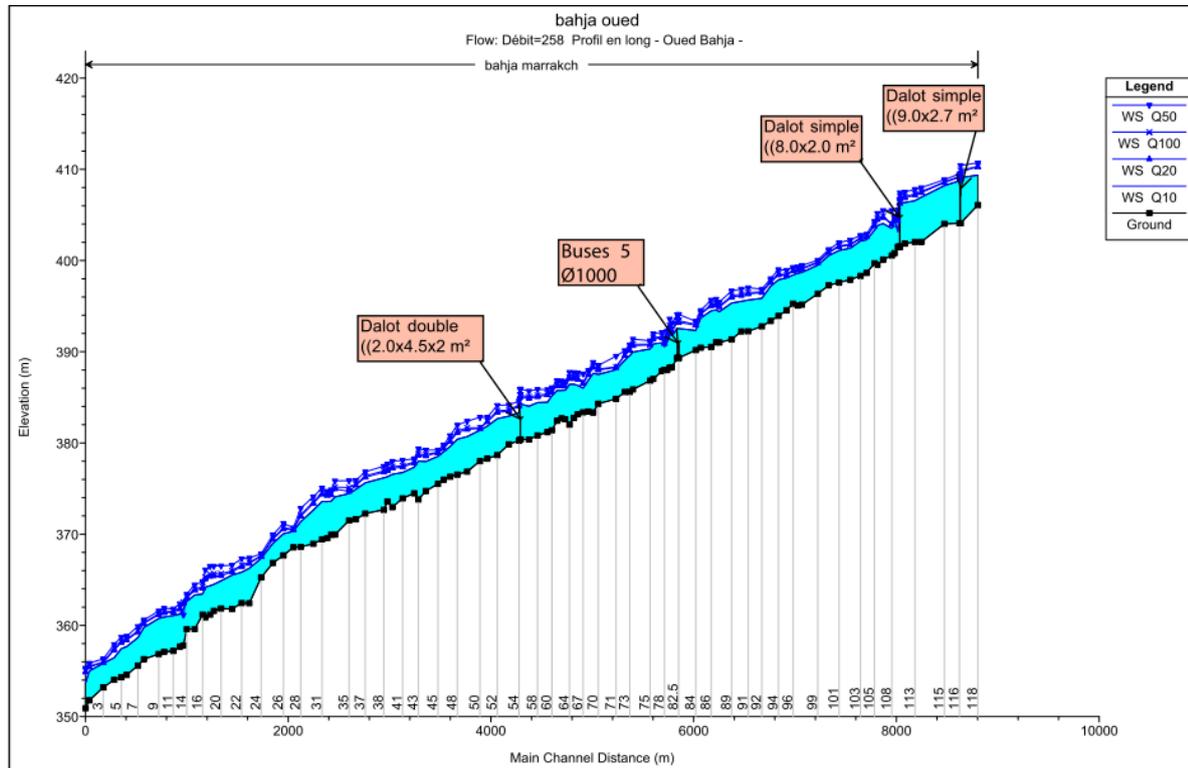
COEFFICIENTS DE POINTE (CP) :

Ecart type	1.05
moyenne	3.6

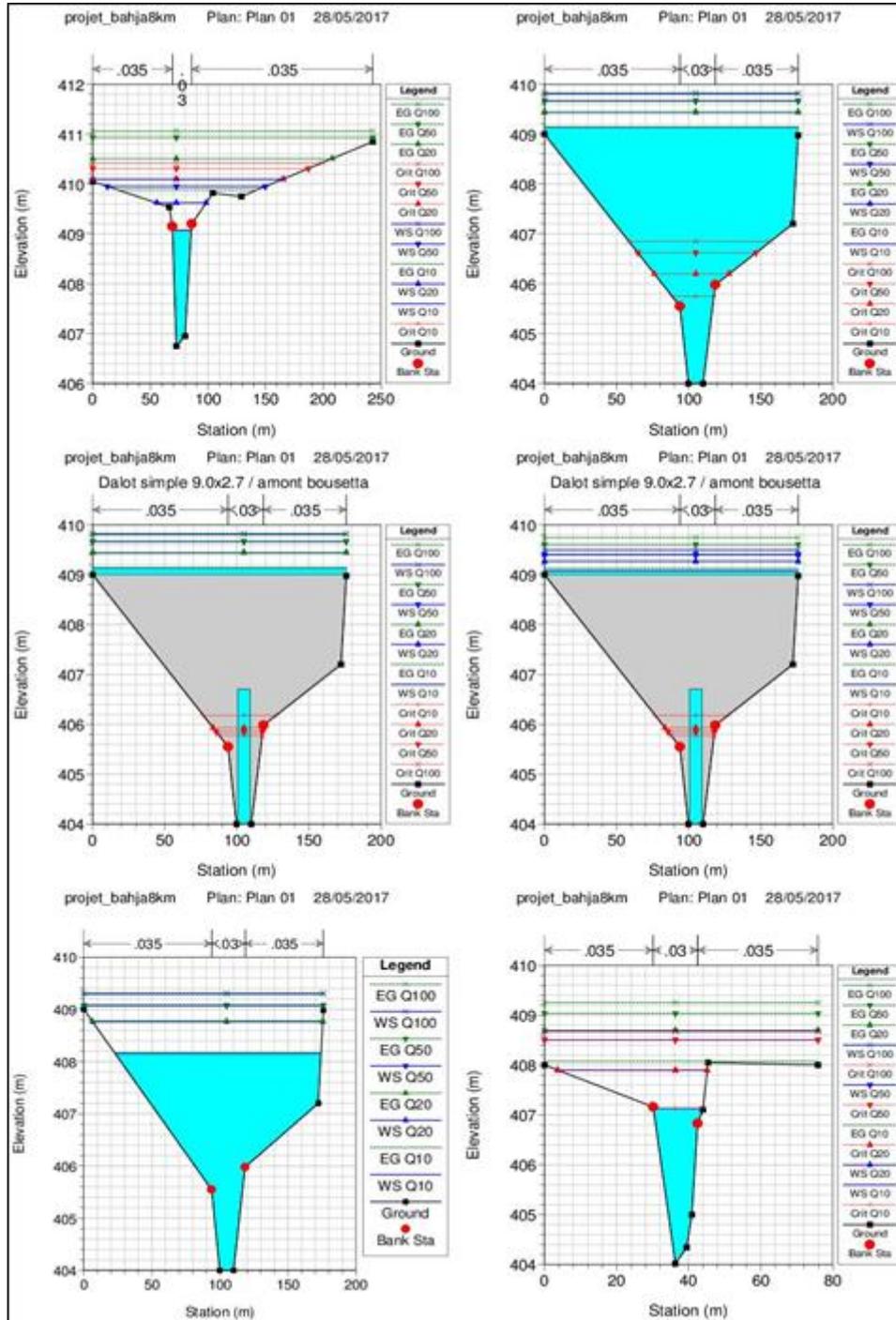
Années	Qp	Qmax moy	Cp
	m ³ /s	m ³ /s	
1962	34.500	22.561	1.5
1963	13.000	2.490	5.2
1964	35.700	14.045	2.5
1965	37.300	10.196	3.7
1966	54.300	22.337	2.4
1967	56.400	15.335	3.7
1968	9.260	1.843	5.0
1969	8.690	2.845	3.1
1970	24.200	7.653	3.2
1971	15.600	4.332	3.6
1972	42.300	17.437	2.4
1973	48.000	6.040	7.9
1974	12.000	3.421	3.5
1975	16.200	5.452	3.0
1976	9.420	2.017	4.7
1977	21.600	9.590	2.3
1978	9.940	3.358	3.0
1979	39.000	9.521	4.1
1980	36.300	11.243	3.2
1981	33.730	9.830	3.4
1982	22.500	7.687	2.9
1983	30.900	7.541	4.1
1984	23.400	6.715	3.5
1985	54.000	20.743	2.6
1986	154.900	37.136	4.2
1987	145.800	63.161	2.3
1988	59.000	20.002	2.9
1989	103.000	36.657	2.8
1990	26.200	3.473	7.5
1991	77.600	25.017	3.1
1992	24.600	11.569	2.1
1993	45.700	18.072	2.5
1994	680.000	264.013	2.6
1995	68.200	11.562	5.9
1996	15.600	3.707	4.2
1997	31.550	4.462	7.1
1998	46.000	15.600	2.9
1999	413.000	136.627	3.0
2000	0.649	0.182	3.6
2001	15.000	5.676	2.6
2002	22.250	4.250	5.2
2003	18.518	7.474	2.5
2004	18.00	-	-
2005	9.00	-	-
2006	24.00	-	-
2007	2.00	-	-
2008	2.00	-	-
2009	24.00	-	-
2010	38.00	-	-

Annexe n°5

1-PROFIL EN LONG DE L'OUED AL BAHJA



2-LES PROFILS EN TRAVERS DE QUELQUES SECTIONS AU PASSAGE DE LA CRUE CENTENNALE



3-RESULTATS DE LA SIMULATION HYDRAULIQUE DE Q100

Profils	La crue	Q Total [m ³ /s]	Cote min du profil [m]	Niveau d'eau [m]	Pente hydraulique [m/m]	Vitesse moyenne [m/s]	Surface mouillée [m ²]	Largeur au miroir [m]	Nb de Froude
118	Q100	258	406.75	410.1	0.006407	4.81	90.16	164.9	0.95
117	Q100	258	404	409.81	0.00005	0.71	547.71	175.97	0.1
116.5	Ouvrage hydraulique								
116	Q100	258	404	409.29	0.000088	0.87	456.09	175.97	0.13
115	Q100	258	404.02	408.68	0.003172	3.97	100.36	75.9	0.68
114	Q100	258	402.04	407.92	0.000833	2.35	171.5	86.25	0.36
113	Q100	258	402.03	407.06	0.003895	4.27	96.85	76.9	0.7
112	Q100	258	401.86	406.41	0.00572	5.14	74.16	49.33	0.86
111	Q100	258	401.51	406.34	0.001561	2.68	117.4	43.86	0.44
110.5	Ouvrage hydraulique								
110	Q100	258	401.51	405.35	0.00589	4.27	73.99	43.86	0.81
109	Q100	258	400.45	404.88	0.00552	5.51	69.89	44.4	0.91
108	Q100	258	400.55	405.16	0.00177	3.04	138.44	77.3	0.5
107	Q100	258	400.1	405.18	0.000674	2.12	191.62	138.09	0.33
106	Q100	258	399.53	404.86	0.001456	3.39	114.38	42.61	0.5
105	Q100	258	399.7	404.06	0.004657	5.19	70.43	32.46	0.86
104	Q100	258	398.64	403.08	0.010375	7.84	59.01	38.19	1.24
103	Q100	258	398.32	402.22	0.012246	6.09	54.81	55.95	1.27
102	Q100	258	397.9	401.53	0.012603	6.09	59.57	66.93	1.25
101	Q100	258	397.6	401.49	0.003254	3.95	96.39	62.65	0.71
100	Q100	258	397.27	401.01	0.004259	4.03	87.38	63.37	0.79
99	Q100	258	396.36	399.82	0.009777	5.52	70.07	71.27	1.12
98	Q100	258	395.15	399.64	0.001427	2.67	137.1	88.04	0.47
97	Q100	258	395.07	398.95	0.003295	4.02	95.67	69.39	0.71
96	Q100	258	395.26	398.63	0.005639	4.36	88.59	85.74	0.89
95	Q100	258	394.56	398.52	0.004243	4.07	93.22	70.25	0.77
94	Q100	258	393.92	398.69	0.000868	2.15	173.63	85.89	0.37
93	Q100	258	393.37	397.83	0.004413	4.76	77.99	41.85	0.79
92	Q100	258	392.78	396.48	0.0089	5.88	57.2	49.98	1.13
91	Q100	258	392.23	396.53	0.001648	2.93	113.04	51.52	0.51
90	Q100	258	392.22	396.13	0.002242	3.28	96.34	50.27	0.59
89	Q100	258	391.36	395.95	0.002202	3.55	96.38	40.45	0.6
88	Q100	258	391.02	395.08	0.005298	4.79	65.55	33.11	0.88
87	Q100	258	391.03	395.17	0.001684	2.99	114.88	48.75	0.51
86	Q100	258	390.53	395	0.002741	3.49	101.04	50.03	0.58
85	Q100	258	390.44	394.3	0.006605	4.59	68.79	37.57	0.93
84	Q100	258	390.17	393.25	0.006902	5.21	61.93	37.54	1.01
83	Q100	258	390.53	393.89	0.000127	0.8	413.78	164.01	0.14
82	Q100	258	388.31	393.34	0.002259	3.74	92.57	30.88	0.57
81.5	Ouvrage hydraulique								
81	Q100	258	388.31	392.62	0.005055	4.97	70.54	30.88	0.83
80	Q100	258	388.25	393.06	0.000542	1.7	162.78	54.21	0.29
79	Q100	258	387.98	391.95	0.005298	5.36	62.09	25.99	0.93
78	Q100	258	388.01	390.88	0.015486	6.52	49.11	42.23	1.43

77	Q100	258	387.88	391.82	0.001343	2.64	132.96	62.6	0.46
76	Q100	258	387.01	391.78	0.00107	2.56	132.16	56.5	0.42
75	Q100	258	386.83	390.95	0.004894	4.57	74.4	44.38	0.84
74	Q100	258	385.87	391.02	0.000426	1.72	230.84	105.56	0.27
73	Q100	258	385.59	390.18	0.00356	4.29	80.88	39.72	0.72
72	Q100	258	385.59	389.8	0.005374	4.97	69.86	36.72	0.84
71	Q100	258	384.83	388.25	0.015509	6.77	53.25	59.21	1.43
70	Q100	258	384.3	388.56	0.002358	3.51	98.76	44.3	0.59
69	Q100	258	383.33	388.67	0.000544	1.83	207.65	88.75	0.29
68	Q100	258	383.45	387.83	0.003288	4.7	85.49	49.16	0.75
67	Q100	258	383.36	386.49	0.011266	6.22	50.47	37.9	1.25
66	Q100	258	383.15	387.27	0.002044	3.16	107.51	52.72	0.55
65	Q100	258	382.75	387.31	0.000985	2.47	136.54	51.83	0.41
64	Q100	258	382	387.33	0.000679	2	172	67.25	0.33
63	Q100	258	382.6	386.4	0.005534	4.74	68.54	35	0.9
62	Q100	258	382.69	386.41	0.003146	3.89	94.73	47.97	0.7
61	Q100	258	382.43	386.47	0.001536	2.86	122.82	54.36	0.5
60	Q100	258	381.39	385.78	0.005175	4.59	75.29	44.6	0.86
59	Q100	258	381.18	385.09	0.007743	5.59	64.48	39.1	1
58	Q100	258	380.83	385.32	0.002164	3.23	110.89	67.04	0.57
57	Q100	258	380.37	385.15	0.001837	2.98	112.46	50.9	0.52
56	Q100	258	380.38	385.37	0.000075	0.43	686.09	404.24	0.1
55.5	Ouvrage hydraulique								
55	Q100	258	380.38	385.36	0.000076	0.43	683.12	404.24	0.1
54	Q100	258	380.26	384.22	0.004832	5.36	67.4	30.68	0.9
53	Q100	258	379.85	382.31	0.024505	7.67	40.55	39.35	1.78
52	Q100	258	378.66	383.74	0.001016	2.48	155.9	71.27	0.39
51	Q100	258	378.27	382.64	0.007626	5.29	64.33	30.61	0.91
50	Q100	258	378.01	382.4	0.002801	3.76	104.42	57.82	0.64
49	Q100	258	376.85	381.75	0.004913	4.46	66.97	22.04	0.69
48	Q100	258	376.53	381.53	0.002245	3.72	88.11	27.21	0.58
47	Q100	258	376.3	380.42	0.005931	5.43	59.3	23.49	0.91
46	Q100	258	375.98	379.52	0.010333	6.08	53.45	29.93	1.21
45	Q100	258	375.51	378.96	0.009417	6.13	60.07	48.13	1.16
44	Q100	258	374.74	377.79	0.015236	6.4	50.11	46.88	1.41
43	Q100	258	373.8	378.97	0.00043	1.71	234.34	127.02	0.27
42	Q100	258	374.48	378.04	0.005092	4.58	70.56	38.33	0.87
41	Q100	258	373.93	377.58	0.001369	2.42	171.9	129.38	0.46
40	Q100	258	372.96	377.48	0.000816	2.04	180.57	92.71	0.36
39	Q100	258	373.57	377.1	0.002311	3.29	105.76	48.61	0.59
38	Q100	258	372.67	376.81	0.002904	3.77	89.6	38.81	0.66
37	Q100	258	372.26	376.82	0.001744	3.36	102.86	35.35	0.54
36	Q100	258	371.63	375.59	0.006881	5.2	65.91	34.89	0.98
35	Q100	258	371.49	374.98	0.006942	5.16	70.7	42.14	1
34	Q100	258	369.94	375.31	0.000677	2.32	138.32	37.42	0.35
33	Q100	258	369.93	374.22	0.005808	5.48	62.59	22.39	0.92
32	Q100	258	369.56	374.36	0.002088	3.8	79.08	21.45	0.6
31	Q100	258	369.42	374.6	0.00101	2.71	135.55	51.25	0.41
30	Q100	258	369.26	374.64	0.000522	1.91	175.6	49.61	0.29
29	Q100	258	368.94	373.54	0.005593	5.03	64.91	35.78	0.89
28	Q100	258	368.6	372.22	0.00779	6.05	53.27	23.23	1.09
27	Q100	258	368.55	370.56	0.024228	7.14	46.28	43.36	1.78
26	Q100	258	367.68	370.64	0.00424	3.89	86.31	49.11	0.8
25	Q100	258	366.85	369.63	0.008455	5.45	64.36	33.86	1.11

24	Q100	258	365.25	367.66	0.017415	6.47	54.64	46.76	1.53
23	Q100	258	362.43	366.9	0.001282	2.68	129.57	63.64	0.45
22	Q100	258	362.44	366.7	0.001995	3.33	137.75	113.05	0.56
21	Q100	258	361.78	365.95	0.00509	5.12	75.09	35.34	0.85
20	Q100	258	361.85	365.58	0.004138	4.17	86.53	47.67	0.79
19	Q100	258	361.58	365.6	0.001642	3	117.83	47.56	0.52
18	Q100	258	361.17	365.57	0.001474	3.13	126.22	51.39	0.5
17	Q100	258	360.89	365.18	0.002437	4.2	87.21	27.56	0.66
16	Q100	258	361.17	364.22	0.008129	5.03	51.32	19.77	1
15	Q100	258	359.59	364.1	0.001355	2.58	155.37	84.63	0.43
14	Q100	258	359.58	363.24	0.005837	4.86	74.73	42.51	0.92
13	Q100	258	357.8	362.74	0.001881	3.69	107.75	45.3	0.56
12	Q100	258	357.68	362.03	0.006045	5.36	68.62	40.04	0.91
11	Q100	258	357.19	361.7	0.002371	3.54	87.29	36.95	0.61
10	Q100	258	357.1	361.71	0.001413	2.82	137.8	87.62	0.48
9	Q100	258	356.86	361.04	0.005033	4.71	76.09	43.04	0.85
8	Q100	258	356.29	360.47	0.004374	4.21	91.89	68.73	0.78
7	Q100	258	355.59	359.51	0.001078	2.33	146.91	68.1	0.41
6	Q100	258	354.56	358.58	0.004618	4.79	76.19	41.7	0.85
5	Q100	258	354.31	357.49	0.01129	6.01	55.74	39.94	1.27
4	Q100	258	354.04	357.43	0.005384	4.42	65.11	38.29	0.85
3	Q100	258	353.2	356.07	0.012808	7.11	55.57	34.33	1.4
2	Q100	258	351.78	355.73	0.002424	3.43	95.17	46.8	0.62
1	Q100	258	350.91	354.53	0.007245	6.01	57.17	30.37	1.08

Annexe n°6

PENTE DU CANAL EN FONCTION DU TYPE DE SOL

Type de sol ou de revêtement	Pente de berge inférieure ou égale à
Sable léger, argile humide	03:01
Terre meuble, limon, sable limoneux, limon sableux	02:01
Terre ordinaire, argile molle, limon, limon graveleux, limon argileux, Gravier.	1,5:1
Terre ou argile raide	01:01
Hardpan. sol alluvial, gravier ferme, terre compactée dure.	0,5:1
Revêtement de pierre, béton coulé sur place, blocs en béton	01:01
Film plastique enterré	2,5:1

Annexe n°7

PREDIMENSIONNEMENT DU CANAL TRAPEZOIDAL

Nom du canal	Tronçon n°	Longueur (m)	Pente (m/m)	Q dim (m³/s)	Caractéristiques du canal					Section trapézoïdale calculé						Section adoptée		
					K	b (m)	H (m)	Talut xH/1V	B (m)	Sm (m²)	Pm (m)	Rh (m)	S (m²)	Qc (m³/s)	V (m/s)	B (m)	b (m)	H (m)
Oued bahja	7	980	0.0070	258.00	33	20.00	2.50	1.5	27.5	59.38	29.01	2.05	59.38	266.71	4.49	29.0	20.00	3.00
	6	585	0.0076	258.00	33	20.00	2.40	1.5	27.2	56.64	28.65	1.98	56.64	259.04	4.57	28.7	20.00	2.90
	5	306	0.0142	258.00	33	20.00	2.00	1.5	26.0	46.00	27.21	1.69	46.00	259.08	5.63	27.5	20.00	2.50
	4	1254	0.0050	258.00	33	20.00	2.80	1.5	28.4	67.76	30.10	2.25	67.76	274.16	4.05	29.9	20.00	3.30
	3	3048	0.0055	258.00	33	20.00	2.70	1.5	28.1	64.94	29.73	2.18	64.94	270.00	4.16	29.6	20.00	3.20
	2	1440	0.0054	258.00	33	20.00	2.70	1.5	28.1	64.94	29.73	2.18	64.94	267.53	4.12	29.6	20.00	3.20
	1	1012	0.0073	258.00	33	20.00	2.50	1.5	27.5	59.38	29.01	2.05	59.38	272.36	4.59	29.0	20.00	3.00
Oued bahja	7	980	0.0070	258.00	33	25.00	2.20	1.5	31.6	62.26	32.93	1.89	62.26	265.27	4.26	33.1	25.00	2.70
	6	585	0.0076	258.00	33	25.00	2.20	1.5	31.6	62.26	32.93	1.89	62.26	276.40	4.44	33.1	25.00	2.70
	5	306	0.0142	258.00	33	25.00	1.80	1.5	30.4	49.86	31.49	1.58	49.86	268.82	5.39	31.9	25.00	2.30
	4	1254	0.0050	258.00	33	25.00	2.40	1.5	32.2	68.64	33.65	2.04	68.64	260.00	3.79	33.7	25.00	2.90
	3	3048	0.0055	258.00	33	25.00	2.40	1.5	32.2	68.64	33.65	2.04	68.64	272.69	3.97	33.7	25.00	2.90
	2	1440	0.0054	258.00	33	25.00	2.40	1.5	32.2	68.64	33.65	2.04	68.64	270.20	3.94	33.7	25.00	2.90
	1	1012	0.0073	258.00	33	25.00	2.20	1.5	31.6	62.26	32.93	1.89	62.26	270.89	4.35	33.1	25.0	2.70

Annexe n°8

HAUTEUR DE LA DIGUE POUR LE RECALIBRAGE DE 25m DE BASE

	Section (PT)	Q (m ³ /s)	Ws(m)	Vitesse (m/s)	Cote-digue(m)	Hdigue (m)
Tronçon 2	66	258	385.53	3.79	386.76	1.28
	65	258	385.42	3.33	386.49	1.28
	64	258	385.52	2.40	386.31	1.28
	63	258	384.93	3.73	386.14	1.28
	62	258	384.67	3.72	385.88	1.28
	61	258	384.18	4.32	385.63	1.28
	60	258	384.00	3.42	385.10	1.28
	59	258	383.80	3.40	384.89	1.28
	58	258	383.75	3.00	384.71	1.28
	57	258	383.60	2.67	384.46	1.28
	56	258	383.72	1.45	384.33	1.28

HAUTEUR DE LA DIGUE POUR LE RECALIBRAGE DE 20m DE BASE

	Section (PT)	Q (m ³ /s)	Ws(m)	Vitesse (m/s)	Cote-digue(m)	Hdigue (m)
Tronçon 2	66	258	385.53	3.79	386.76	1.69
	65	258	385.42	3.33	386.49	1.69
	64	258	385.52	2.40	386.31	1.69
	63	258	384.93	3.73	386.14	1.69
	62	258	384.67	3.72	385.88	1.69
	61	258	384.18	4.32	385.63	1.69
	60	258	384.00	3.42	385.10	1.69
	59	258	383.80	3.40	384.89	1.69
	58	258	383.75	3.00	384.71	1.69
	57	258	383.60	2.67	384.46	1.69
	56	258	383.72	1.45	384.33	1.69

Annexe n°9

ESTIMATION FINANCIERE

Reconstruction de l'ouvrage PT110.5 passerelle du douar Bou as Shab8x(3.5x3.5m)				
DÉSIGNATION DES OUVRAGES	UNITÉ	QUANTITÉ	P.U	MONTANT
			DHS	(DHS)
Deviation de la route	Ft	1.0	30 000	30 000
Déblais	m ³	320.0	40	12 800
Remblai pour ouvrages	m ³	110.0	60	6 600
Béton de propreté	m ³	12.00	800	9 600
Béton dosé à 350 kg/m ³ (corps dalot + têtes)	m ³	183.00	1 200	219 600
Ferrailage	kg	20 130.0	12	241 560
Démolition et réfection de la chaussée	m ²	124.0	200	24 800
Plot de protection	U	80.0	150	12 000
Gravettes GNA	m ³	50.0	220	11 000
Perré maçonné	m ³	140.0	550	77 000
Imprévues		15%		96 744
Total H.T				741 704.00 Dhs
TVA 20%				103 838.56 Dh
Total TTC				845 542.56 Dhs

Reconstruction de l'ouvrage PT116.5 à l'amont du douar Bou setta6x(4x4m)				
DÉSIGNATION DES OUVRAGES	UNITÉ	QUANTITÉ	P.U	MONTANT
			DHS	(DHS)
Démolition de l'existant	Ft	1.0	30 000	30 000
Déblais	m ³	720.0	40	28 800
Remblai pour ouvrages	m ³	100.0	60	6 000
Béton de propreté	m ³	26.00	800	20 800
Béton dosé à 350 kg/m ³ (corps dalot + têtes)	m ³	388.00	1 200	465 600
Ferrailage	kg	42 680.0	12	512 160
Démolition et réfection de la chaussée	m ²	260.0	200	52 000
Plot de protection	U	60.0	150	9 000
Gravettes GNA	m ³	105.0	220	23 100
Perré maçonné	m ³	140.0	550	77 000
Imprévues		15%		183 669
Total H.T				1 408 129.00
TVA 20%				197 138.06
Total TTC				1 605 267.06 Dhs

**Reconstruction de l'ouvrage PT82.5 à l'intérieur de douar Al Bahja : Dalot multiple
8x(3.5x3.5m)**

DÉSIGNATION DES OUVRAGES	UNITÉ	QUANTITÉ	P.U	MONTANT
			DHS	(DHS)
Démolition de l'existant	Ft	1.0	40 000	40 000
Déblais	m ³	1 536.0	40	61 440
Remblai pour ouvrages	m ³	300.0	60	18 000
Béton de propreté	m ³	45.00	800	36 000
Béton dosé à 350 kg/m ³ (corps dalot + têtes)	m ³	733.00	1 200	879 600
Ferraillage	Kg	80 630.0	12	967 560
Démolition et réfection de la chaussée	m ²	500.0	200	100 000
Plot de protection	U	90.0	150	13 500
Gravettes GNA	m ³	198.0	220	43 560
Perré maçonné	m ³	140.0	550	77 000
Imprévues		15%		335 499
Total H.T				2 572 159.00
TVA 20%				360 102.26
Total TTC				2 932 261.26 Dhs

**Reconstruction de l'ouvrage PT55.5 accès aux exploitations agricoles : Dalot multiple
8x(3.5x3.5m)**

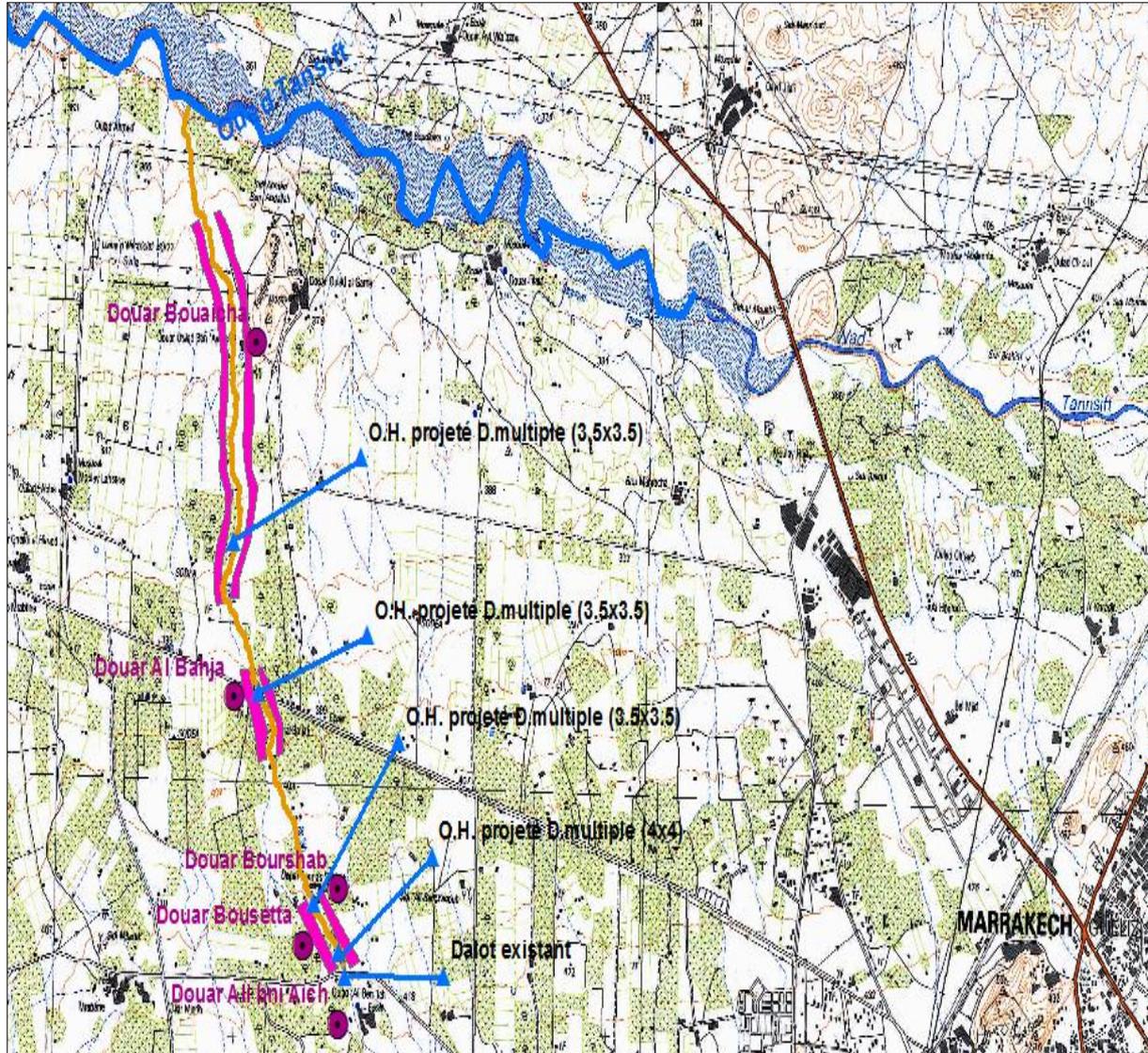
DÉSIGNATION DES OUVRAGES	UNITÉ	QUANTITÉ	P.U	MONTANT
			DHS	(DHS)
Démolition de l'existant	Ft	1.0	30 000	30 000
Déblais	m ³	308.0	40	12 320
Remblai pour ouvrages	m ³	120.0	60	7 200
Béton de propreté	m ³	12.0	800	9 600
Béton dosé à 350 kg/m ³ (corps dalot + têtes)	m ³	183.0	1 200	219 600
Ferraillage	kg	20 130.0	12	241 560
Démolition et réfection de la chaussée	m ²	120.0	120	14 400
Plot de protection	U	90.0	150	13 500
Gravettes GNA	m ³	80.0	120	9 600
Perré maçonné	m ³	140.0	550	77 000
Imprévues		15%		95 217
Total H.T				729 997.00
TVA 20%				102 199.58
Total TTC				832 196.58 Dhs

Variante I.2: Section trapézoïdale (B=25; talus:1.5/1 et endiguement) sur une longueur de 2900 ml				
DÉSIGNATION DES OUVRAGES	UNITÉ	QUANTITÉ	P.U	MONTANT
			DHS	(DHS)
Décapage(pour l'endiguement)	m ²	332 566	20	6 651 320
Déblais(Reprofilage+digue)	m ³	353 677	40	14 147 080
Matériaux Agrico-limoneux	m ³	124 262	50	6 213 100
Tout venant 0/40	m ³	45 356	100	4 535 600
Enrochement	m ³	36 352	150	5 452 800
Total				36 999 900.00 Dhs
TVA (20%)				7 399 980.00 Dhs
TOTAL TTC				44399880

Variante I.1: Section trapézoïdale (B=20; talus:1.5/1 et endiguement) sur une longueur de 5600 ml				
DÉSIGNATION DES OUVRAGES	UNITÉ	QUANTITÉ	P.U	MONTANT
			DHS	(DHS)
Décapage(pour l'endiguement)	m ²	555 386	20	11107720.00
Déblais(Reprofilage+digue)	m ³	573 031	40	22921240.00
Matériaux Agrico-limoneux	m ³	282 458	50	14122900.00
Tout venant 0/40	m ³	108 836	100	10883600.00
Enrochement	m ³	85 008	150	12751200.00
Total				71 786 660.00 Dhs
TVA (20%)				14 357 332.00 Dhs
TOTAL TTC				86143992

Annexe n°10

VUE EN PLAN DES AMENAGEMENTS A PROJETER



Légende

- ▲ OH_projetés
- Les Douars
- Oued Tansift
- Recalibrage B20
- Endigement B20