



SOMMAIRE

INTRODUCTION	5
A- PRESENTATION DES SITES ETUDIES.....	6
A.1- LA ROUTE NATIONALE N° 10 DEVANT L'ENTREE DE LA FERME EL BOURA	8
A.2- QUARTIER OULED BOUNOUNA	9
A.3- PONT HAY MOHAMMADI.....	10
A.4- LA CITÉ HAY EL MOHAMMADI À LASTAH,	11
B- PROBLEMATIQUE DES INONDATIONS	12
B.1- PROBLEMATIQUE GENERALE DE LA VILLE DE TAROUDANT	12
B.2- RISQUES D'INONDATIONS AU SITE EL BOURA	14
C- HYDROLOGIE DE L'OUED EL WAEER	15
D- ETUDE HYDRAULIQUE	16
D.1- TRAVAUX TOPOGRAPHIQUES.....	16
D.1.1- Construction du MNT et dessin des cutlines	17
D.1.2- Choix du coefficient de Manning	18
D.1.3- Débits simulés	20
D.1.4- Ouvrages hydrauliques existants	20
D.2- RESULTATS DE LA SIMULATION.....	20
D.2.1- Tableaux.....	20
D.2.2- Profils en travers des sections d'écoulement.....	21
D.2.3- Profil en long de l'écoulement	22
D.2.4- Aires inondées.....	22
E- AMENAGEMENTS PROPOSES	24
E.1- CONCEPTION DE LA DIGUE DE PROTECTION.....	24
E.2- IMPLANTATION DE LA DIGUE.....	27
F- STABILITE DE LA DIGUE.....	28
F.1- STABILITE DE LA DIGUE EN CAS DE CRUE	28
F.1.1- Actions sur la digue.....	28
F.1.1.1- Poussée de la terre.....	29
F.1.1.2- Surcharge du terrain	29
F.1.1.3- Poussée de l'eau :	29
F.1.1.4- Sous-pression de l'eau	29
F.1.1.5- Poids propre de la digue	29
F.1.1.6- Poids de l'eau par-dessus de la digue.....	30
F.1.2- Stabilité de au renversement	30
F.1.2.1- Sollicitations de renversement.....	30
F.1.2.2- Sollicitations de stabilité.....	30
F.1.2.3- Vérification de la condition de stabilité.....	30
F.1.3- Stabilité au glissement.....	31



F.1.4- Vérification de la résistance du sol de fondation	31
F.1.4.1- Vérification de l'excentricité	31
F.1.4.2- Vérification de la portance du sol.....	31
F.2- STABILITE DE LA DIGUE QUAND L'OUED EST A SEC	32
F.2.1- Stabilité de au renversement	32
F.2.1.1- Sollicitations de renversement.....	32
F.2.1.2- Sollicitations de stabilité.....	32
F.3- PLANS D'EXECUTION	33
F.4- LES AVANT-METRES ET DETAIL ESTIMATIF	33
F.4.1- Un caisson alvéolaire.....	33
F.4.2- Toute la digue Bounouna.....	33
CONCLUSION	35
BIBLIOGRAPHIE - ETUDES CONSULTEES	36
ANNEXES	37





LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Caractéristiques physiques du bassin versant.....	15
Tableau 2 : Crues de fréquences rares humides de l'oued El Waaer	15
Tableau 3 : Coefficients de Manning adoptés	18
Tableau 4 : Débits de pointes des crues simulés.....	20
Tableau 5: Résultats HEC-RAS : paramètres hydrauliques	21
Tableau 6 : Forces de renversement de la digue, oued en crue.....	30
Tableau 7 : Forces de stabilisation de la digue, oued en crue.....	30
Tableau 8 : Forces de renversement de la digue, oued à sec.....	32
Tableau 9 : Forces de stabilisation de la digue, oued en crue.....	32
Tableau 10: Métré des composants d'un caisson alvéolaire en béton armé	33
Tableau 11: Avant métré et détail estimatif de toute la digue Bounouna, L=800m – H=4m.....	34

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Situation des sites étudiés, par rapport à Taroudant et aux oueds El Waaer et Souss	7
Figure 2 : Image satellite du site El Boura.....	8
Figure 3 : Image satellite du site Ouled Bounouna	9
Figure 4 : Image satellite du pont Hay Mohammadi.....	10
Figure 5 : Image satellite de la cité Hay Mohammadi au Nord de Taroudant.....	11
Figure 6 : cône de déjection de l'oued El Waaer.....	12
Figure 7 : Risque d'inondations par l'oued El Waaer de la ville de Taroudant	13
Figure 8 : Topographie, zone couverte par le plan coté.....	16
Figure 9 : Modèle numérique du terrain du projet et ses alentours	17
Figure 10 : Sections transversales représentatives de l'écoulement 'cutlines'	18
Figure 11 : Zonage du coefficient de Manning	19
Figure 12 : Simulation hydraulique, quelques sections d'écoulement avec indication du niveau d'eau.....	21
Figure 13 : Profil en long de l'oued.....	22
Figure 14 : visualisation de l'aire inondée par la crue centennale	22
Figure 15 : Limites des eaux des crues sur image satellite	23
Figure 16 : Structure de la digue de protection.	24
Figure 17 : Tracé de la digue.....	27
Figure 18 : Forces auxquelles est soumise la digue	28

LISTE DES FORMULES

Formule 1 : Nombre adimensionnel de Froude.....	20
Formule 2 : Poussée de la terre	29
Formule 3 : Poussée de l'eau.....	29
Formule 4 : Sous-pression de l'eau.....	29
Formule 5 : Poids de la digue.....	29
Formule 6 : Condition de stabilité au renversement.....	30
Formule 7 : Coefficient de glissement	31
Formule 8 : Condition de stabilité au glissement.....	31
Formule 9 : Condition de non excentricité.....	31



LISTE DES PHOTOS

Photo 1 : Coude du cours de l'oued El Waeer au site de la RN10.	8
Photo 2 : Habitations en surplomb de la falaise Ouled Bounouna.....	9
Photo 3 : Affouillement à l'aval du pont de Hay Mohammadi (Lastah)	10
Photo 4 : Hay Mohammadi, sol friable et fortement érodé.....	11
Photo 5 : Oued El Waeer comme limite physique aux constructions de la ville de Taroudant.....	12
Photo 6 : sapement de la berge devant ouled Bounouna	14
Photo 7 : illustration du sapement de la berge	14
Photo 8 : Nature du lit de l'oued.....	19
Photo 9 : Traces des crues maximales sur les berges des deux rives	25
Photo 10 : Bonne tenue des berges reboisées : cactus, bambous, plantes grasses rampantes	26





INTRODUCTION

La présente étude a été confiée par l'Agence du Bassin Hydraulique de Souss Massa et Draa à Agadir (ABHSMD Agadir) au bureau d'études d'ingénierie OUGOUG Etudes à Agadir.

Elle concerne l'étude d'exécution et le suivi des travaux de protection contre les inondations de la ville de Taroudant.

Quatre études d'exécution détaillées seront réalisées, au profit de l'ABHSMD ou de ses partenaires, pour les quatre sites suivants :

- Le coude de l'oued El Waaer, menaçant la route nationale 10, devant la ferme El Boura,
- La falaise habitée de la rive gauche de l'oued au droit du quartier Ouled Bounouna, dans la ville de Taroudant,
- Le quartier Hay El Mohammadi à Lastah,
- Le pont reliant la vieille ville de Taroudant au quartier Hay El Mohammadi.

Ces études concernent un diagnostic des lieux, une définition de la problématique des inondations, l'étude hydrologique, l'étude hydraulique et la conception de la protection envisagée.

Les travaux topographiques nécessaires à l'étude : plan coté, ainsi qu'à l'exécution : implantation des ouvrages et la correction des alignements, seront assurés.

Le suivi des travaux des constructions des ouvrages de protection, qui auront été retenus par l'ABHSMD Agadir, sera assuré jusqu'à leur fin. Leur contrôle par un laboratoire agréé sera assuré.

Il sera produit un rapport par site.

Le présent concerne l'étude d'exécution de la protection du quartier Ouled Bounouna à Taroudant.





A- PRESENTATION DES SITES ETUDIES

Les quatre sites étudiés dans le cadre de la présente étude, illustrés sur les figures des pages suivantes, sont :

- Le coude de l'oued El Waaer, menaçant la route nationale 10 en allant à Ait Yazza, devant l'entrée de la ferme El Boura,
- La falaise habitée en rive gauche de l'oued El Waaer, au droit du quartier Ouled Bounouna, dans la ville de Taroudant,
- Le pont reliant la vieille ville de Taroudant au quartier Hay El Mohammadi au Nord, sur la route de Tamaloukte.
- La cité Hay El Mohammadi au Nord de la ville de Taroudant, au-delà de l'oued El Waaer, à la zone dite Lastah (toit).

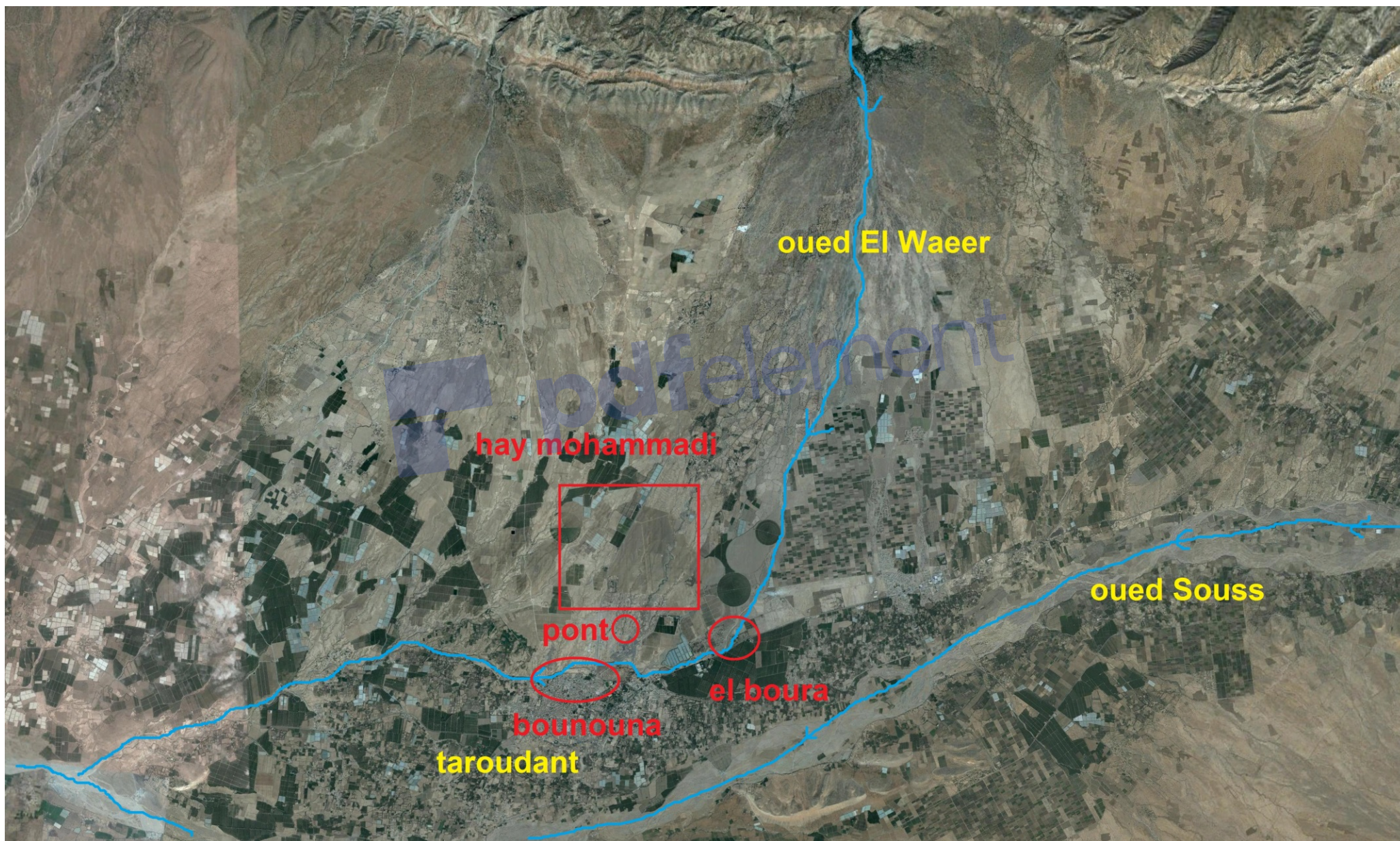
La figure suivante montre l'emplacement de ces sites par rapport :

- A la ville de Taroudant,
- A l'oued El Waaer,
- A l'oued Souss.





Figure 1 : Situation des sites étudiés, par rapport à Taroudant et aux oueds El Waer et Souss



A.1- LA ROUTE NATIONALE N° 10 DEVANT L'ENTREE DE LA FERME EL BOURA

Ce site se trouve près de la RN 10, dans la direction Est, à la sortie vers Ouled Berrehil. L'oued El Waaer y forme un coude, où la berge attenante à la route nationale est sapée par les eaux.

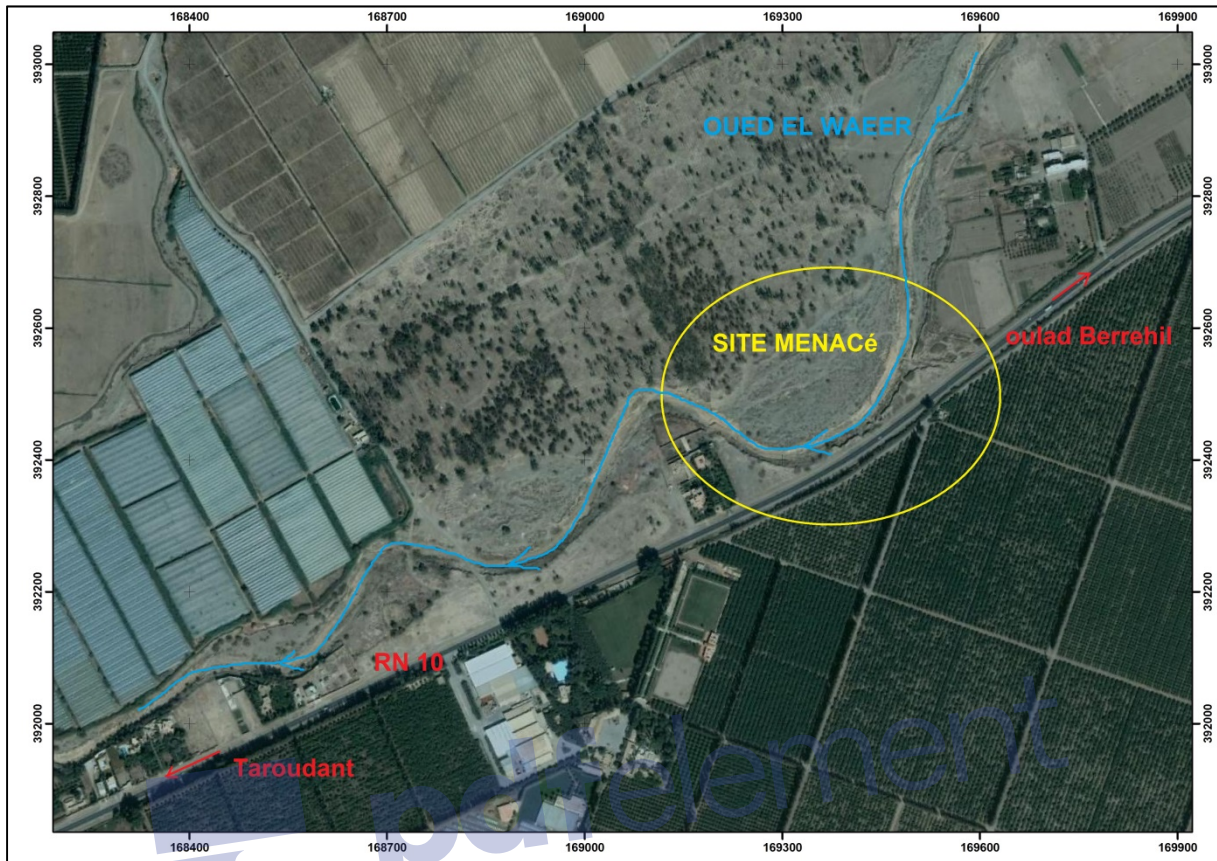


Figure 2 : Image satellite du site El Boura



Photo 1 : Coude du cours de l'oued El Waaer au site de la RN10.

A.2- QUARTIER OULED BOUNOUNA

Le quartier Ouled Bounouna, situé au Nord-Ouest de la ville de Taroudant est bâti sur la berge rive gauche de l'oued El Waeer, qui est une falaise de nature limoneuse, haute d'une dizaine de mètres. Il connaît une urbanisation anarchique qui a produit des habitations osées qui surplombent la falaise.



Figure 3 : Image satellite du site Ouled Bounouna



Photo 2 : Habitations en surplomb de la falaise Ouled Bounouna.

A.3- PONT HAY MOHAMMADI

Ce pont relie la vieille ville de Taroudant à la cité Hay Mohammadi, au Nord. Cette rue, maintenant à l'intérieur de Taroudant, était la route menant à Tamaloukte.

Le pont est mal implanté, car situé dans un double coude, ce qui expose les berges de ses approches amont et aval au sapement.

Le fond du lit de l'oued, sous son tablier a été bétonné. Ceci a faussé la dynamique continue de l'oued pour la recherche de sa pente d'équilibre. D'où la formation d'une chute d'eau à son aval et l'affouillement de son lit en cet endroit.



Figure 4 : Image satellite du pont Hay Mohammadi



Photo 3 : Affouillement à l'aval du pont de Hay Mohammadi (Lastah)

A.4- LA CITÉ HAY EL MOHAMMADI À LASTAH,

La cité Hay Mohammadi, est située à Lastah Taroudant, littéralement Les toits de Taroudant.

C'est une zone d'extension de la ville, où les terrains sont disponibles. Le sol, de nature limoneuse, est très friable et sujet à une érosion par l'eau, physique par entrainement des matériaux et chimique par sa dissolution.

Les eaux de ruissellement des ravins drainant le piémont du Haut Atlas et le débordement des crues de l'oued El Waaer, se dirigent naturellement vers cette cité.



Figure 5 : Image satellite de la cité Hay Mohammadi au Nord de Taroudant



Photo 4 : Hay Mohammadi, sol friable et fortement érodé

B- PROBLEMATIQUE DES INONDATIONS

B.1- PROBLEMATIQUE GENERALE DE LA VILLE DE TAROUDANT

La ville de Taroudant se trouve dans un endroit défavorable vis-à-vis de la protection contre les inondations. Elle est cantonnée entre l'oued Souss au Sud et l'oued El Waer au Nord. Elle a été de surcroît construite sur le cône de déjection de ce dernier. On note sur la figure la forme triangulaire caractéristique de ce type de cône.

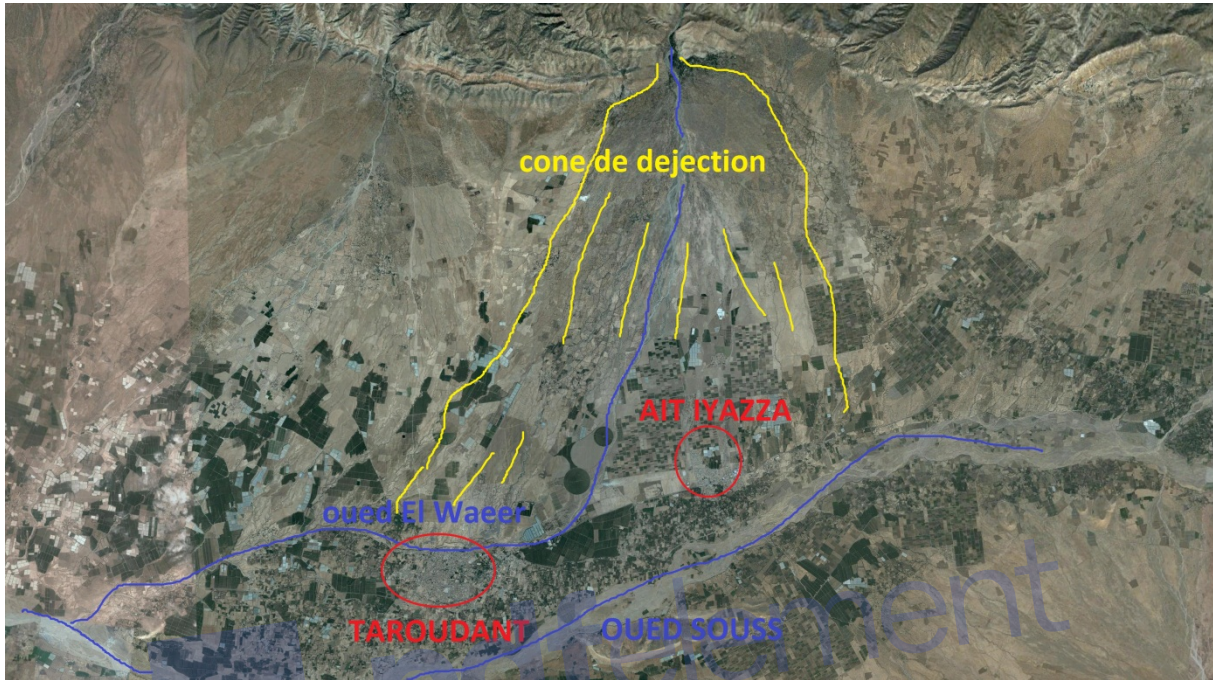


Figure 6 : cône de déjection de l'oued El Waer

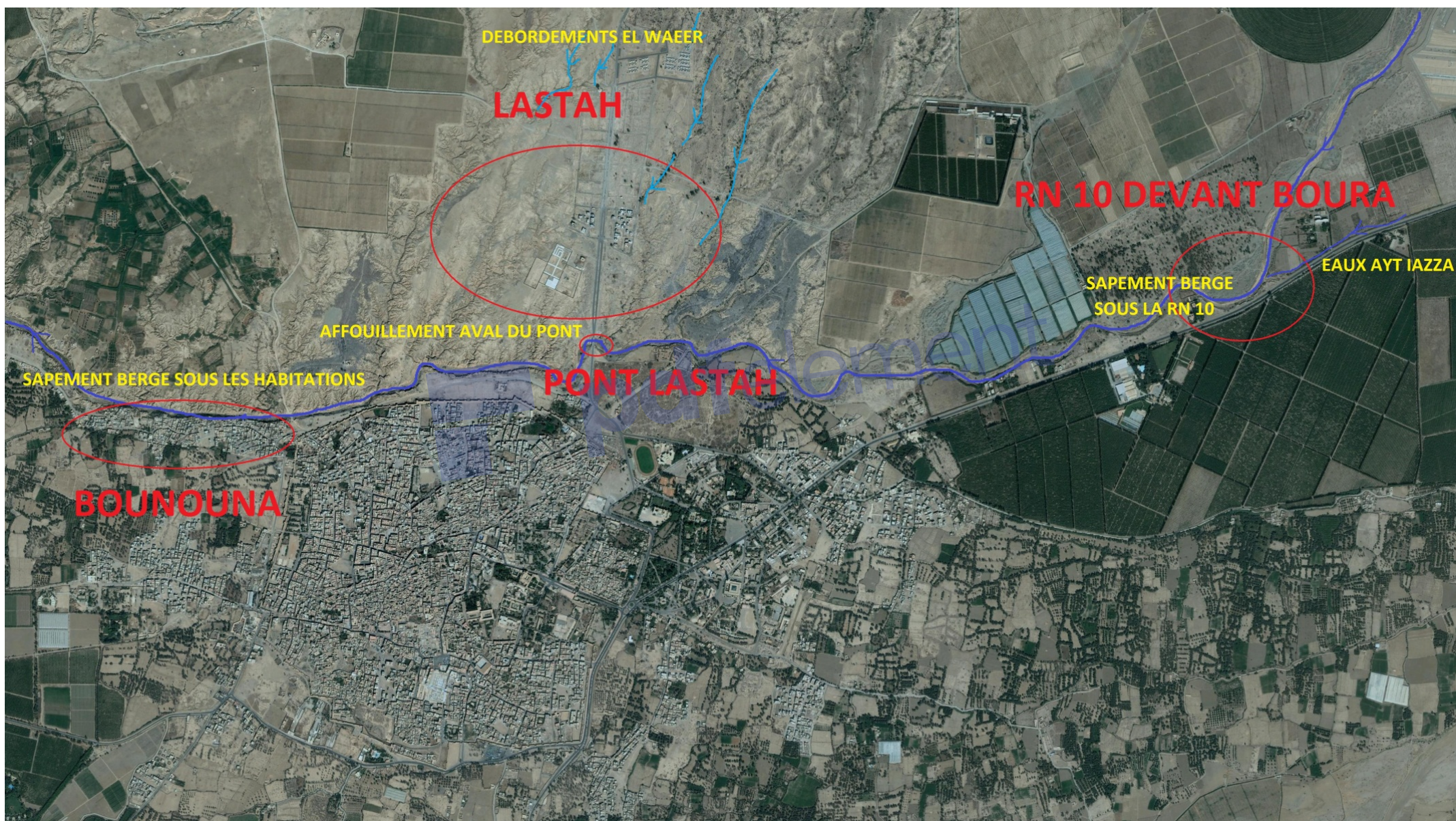
L'oued El Waer a constitué dans le passé une limite physique au développement de la ville vers le Nord, d'abord par la difficulté de le franchir, mais aussi par l'inaptitude des terrains de Lastah, au-delà de celle-ci, à être construits car fortement érodés et ravinés.



Photo 5 : Oued El Waer comme limite physique aux constructions de la ville de Taroudant



Figure 7 : Risque d'inondations par l'oued El Waeer de la ville de Taroudant





B.2- RISQUES D'INONDATIONS AU SITE EL BOURA

Les crues de l'oued El Waaer sapent par une conjugaison d'effets hydrauliques et mécaniques, la berge rive gauche sur laquelle sont construites des habitations vraisemblablement anarchiques, au vu de leur type et qualité.



Photo 6 : sapement de la berge devant oued Bounouna



Photo 7 : illustration du sapement de la berge



C- HYDROLOGIE DE L'OUED EL WAEER

Le bassin versant de l'oued El Waaer se situe sur le versant Sud du Haut Atlas central, au Nord de Taroudant. Il s'étend, dans l'ordre d'importance de la superficie occupée, sur les communes d'Imoulass, Talekjounte, Tafraouten, Imilmaiss, Talmakante, Ait Haddou Youssef et Sidi Abdellah Ou Said.

Les caractéristiques physiques de ce bassin versant sont les suivantes :

Tableau 1 : Caractéristiques physiques du bassin versant

Paramètre	Sa valeur
Superficie (Km ²)	231,75
Périmètre (Km)	74,00
Altitude max m	3600
Altitude min m	483
Dénivelée (m)	3117
Pente moy oued (m/m)	0,108
H 5%	2940
H 95%	830
Indice pente global	0,073
Dénivelée spécifique (m)	1109
Longueur rectangle équivalent Km	28,974
Largeur rectangle équivalent Km	7,999
Indice Gravelius	1,36

Il reçoit une pluie moyenne annuelle de 246 mm/an, variant de 200 mm au Sud jusqu'à 320 mm au Nord sur les cimes du Haut Atlas, qui connaissent des précipitations neigeuses.

Les débits de l'oued, tel que définis par l'étude du barrage en construction Sidi Abdellah, sont les suivants :

Tableau 2 : Crues de fréquences rares humides de l'oued El Waaer

Période de retour (ans)	10	50	100	1000	5 000	10 000
Débit (m ³ /s)	275	480	600	900	1 100	1 300
Volume de la crue (Mm ³)	2.5	4.3	5.4	8.1	10	11.7

En adoptant la dégradation spécifique moyenne observée aux barrages du bassin du Souss, l'apport solide annuel du bassin versant est de 116464 m³ correspondant à 174696 tonnes.



D- ETUDE HYDRAULIQUE

Ce paragraphe est consacré à l'étude hydraulique de l'oued au niveau du tronçon étudié, dans son état actuel.

Elle consiste à simuler l'écoulement, par modèle mathématique, pour :

- se prononcer sur le niveau maximum atteint par l'eau et dimensionner les ouvrages de protection en conséquence,
- vérifier la capacité des ouvrages hydrauliques existants, pour s'assurer qu'ils sont correctement dimensionnés,
- Définir les limites des plus hautes eaux pour repérer les éventuelles zones inondables ou délimiter le domaine public hydraulique.

Le modèle mathématique de l'écoulement est le logiciel HEC-RAS de l'US Army.

On trouvera en annexes 1 sa note de présentation.

D.1- TRAVAUX TOPOGRAPHIQUES

La simulation de l'écoulement nécessite une connaissance précise de la géométrie du cours d'eau et de ses alentours.

On a utilisé le levé topographique fait pour les besoins de la présente étude. La zone qu'il couvre est indiquée sur la figure suivante.

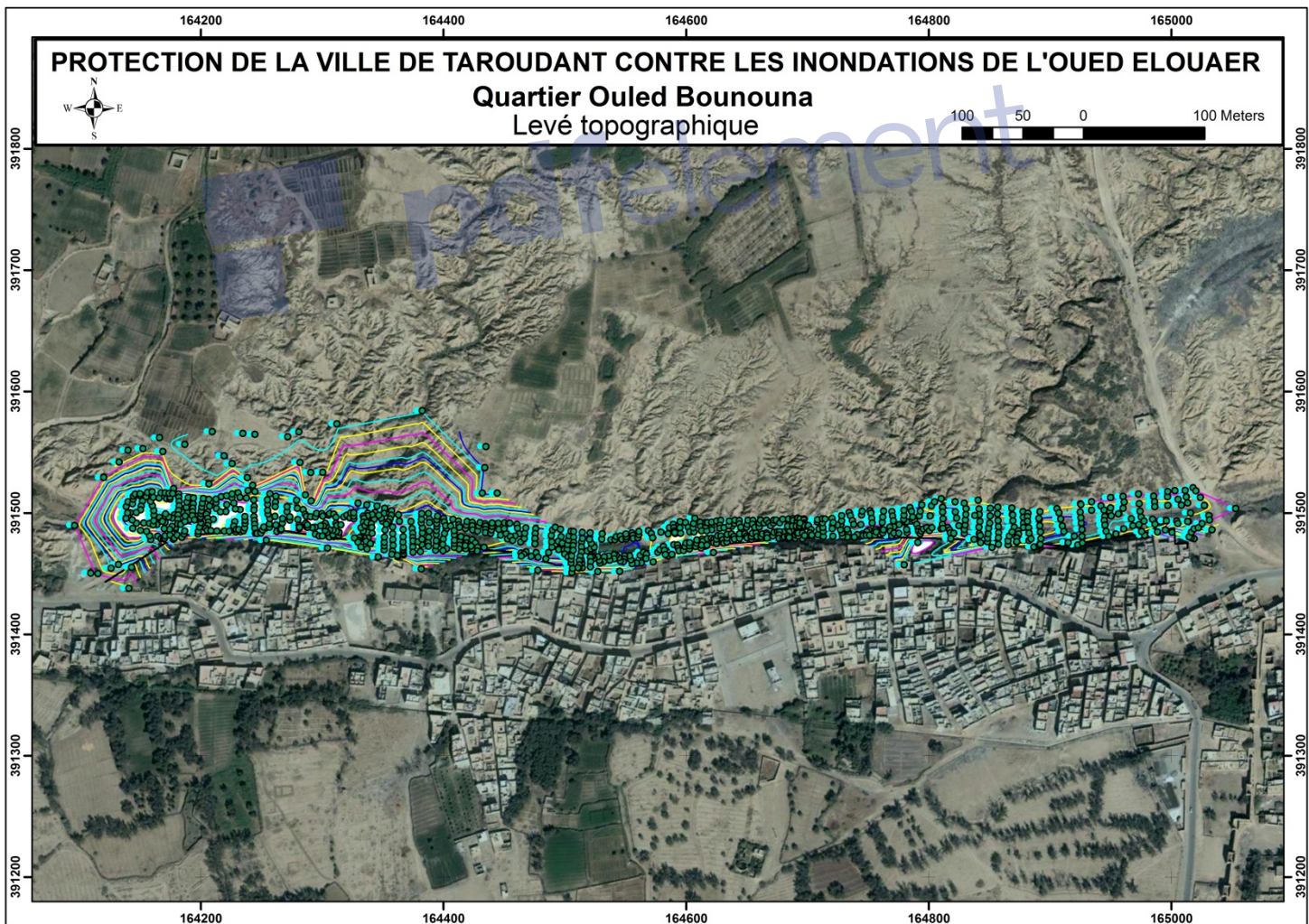


Figure 8 : Topographie, zone couverte par le plan coté



D.1.1- Construction du MNT et dessin des cutlines

Le plan coté a été traité en MNT et des cutlines ont été tracés dessus. Les cutlines sont des sections représentatives de l'écoulement sur le tronçon étudié, judicieusement placées pour représenter fidèlement le comportement hydraulique de l'oued. Ainsi un total de 107 cutlines a été tracées sur l'oued. Les figures suivantes illustrent ces étapes :

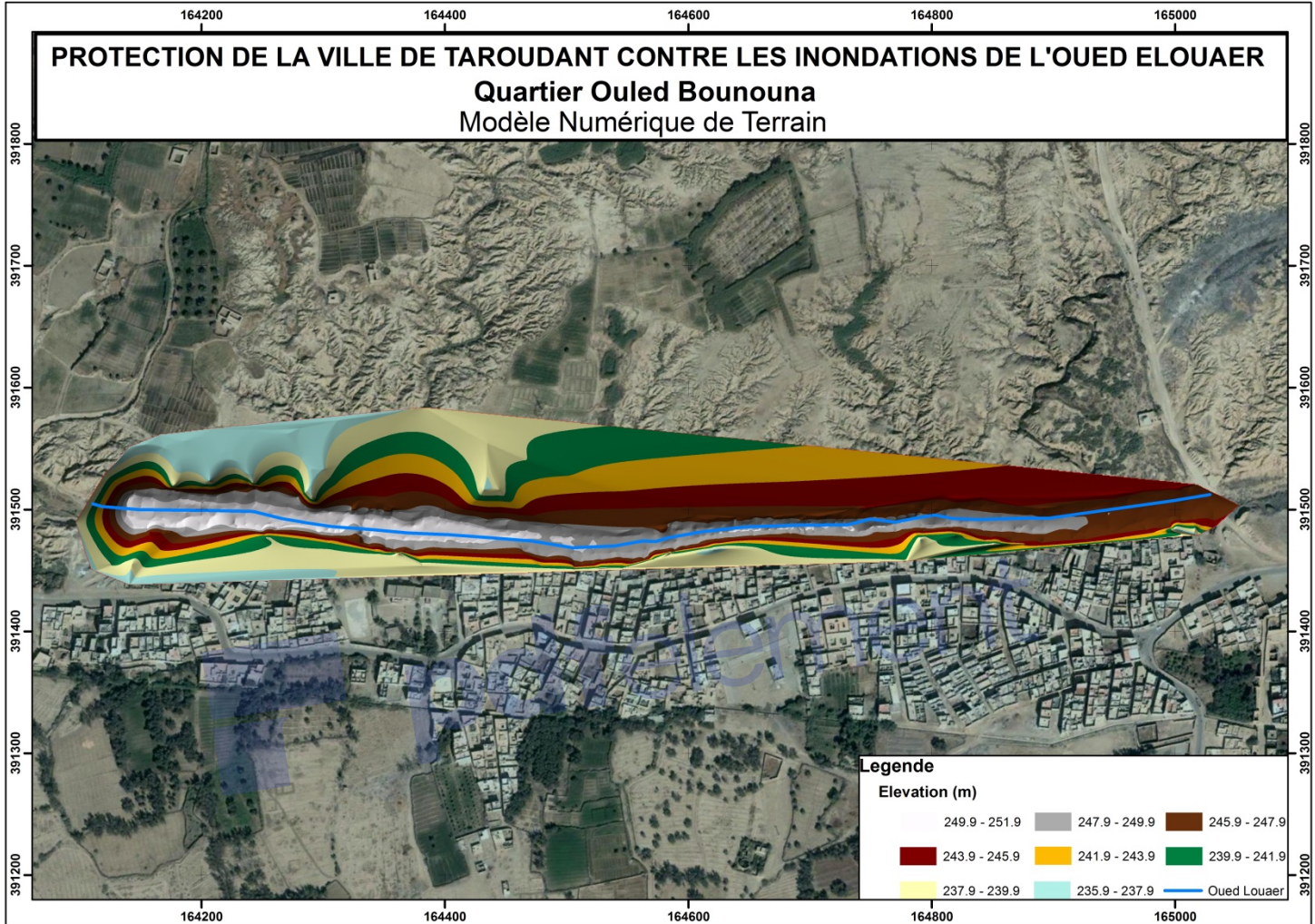


Figure 9 : Modèle numérique du terrain du projet et ses alentours

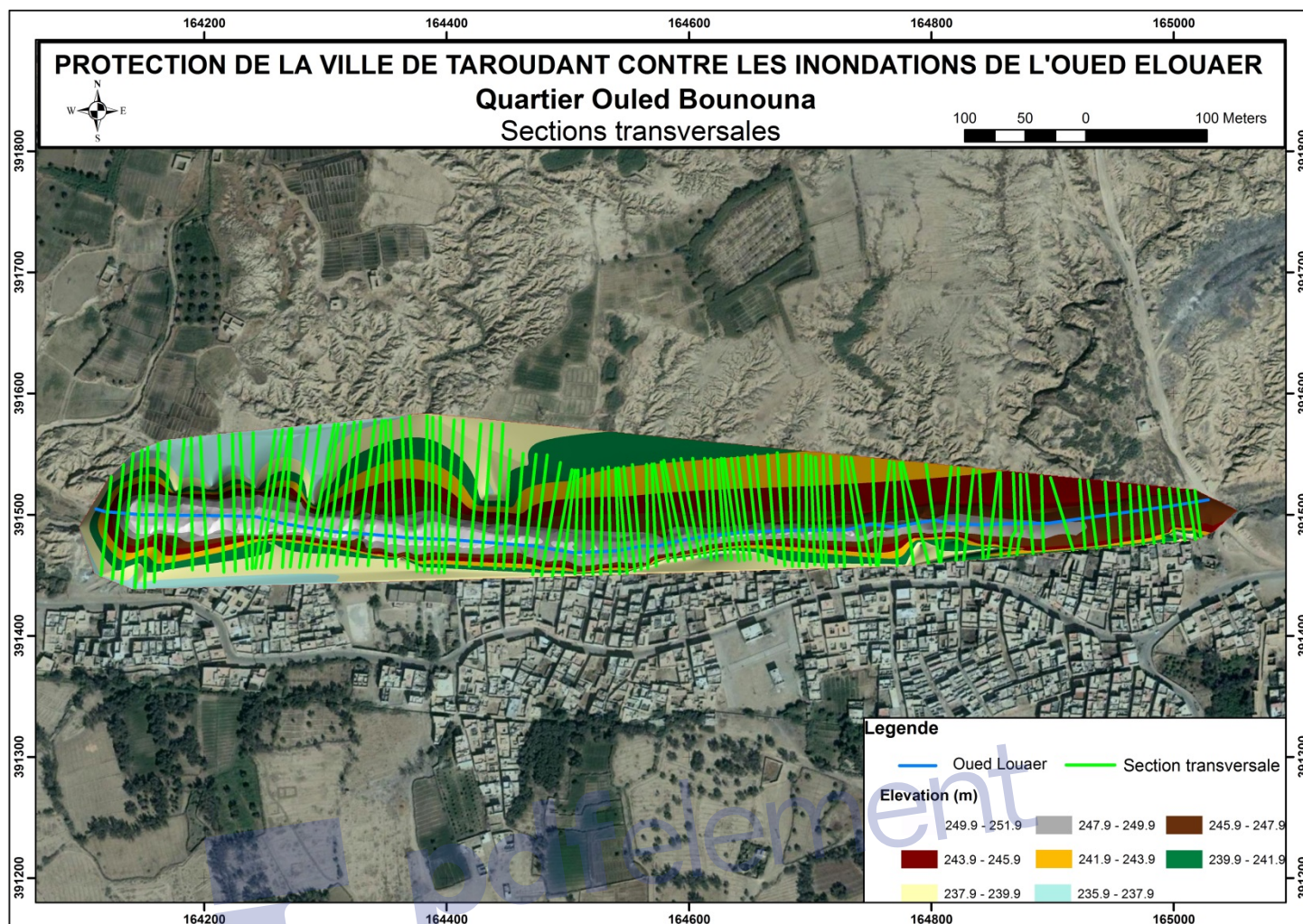


Figure 10 : Sections transversales représentatives de l'écoulement 'cutlines'

D.1.2- Choix du coefficient de Manning

L'enquête de terrain a permis de fixer les valeurs des coefficients de Manning à partir de la nature géologique et pédologique du lit et des berges de l'oued, du couvert végétal des bordures de l'oued.

Voir photo ci-après.

Tableau 3 : Coefficients de Manning adoptés

Zone	Coefficient n de Manning adopté
Lit mineur : Fond de l'oued constitué de grès et sables	0,025
Lit majeur : limons et arbustes	0,028
Terrains au-delà des berges de l'oued Sol limoneux, arbustes et arbres	0,033
Au-delà des berges : habitats	0,1



Photo 8 : Nature du lit de l'oued

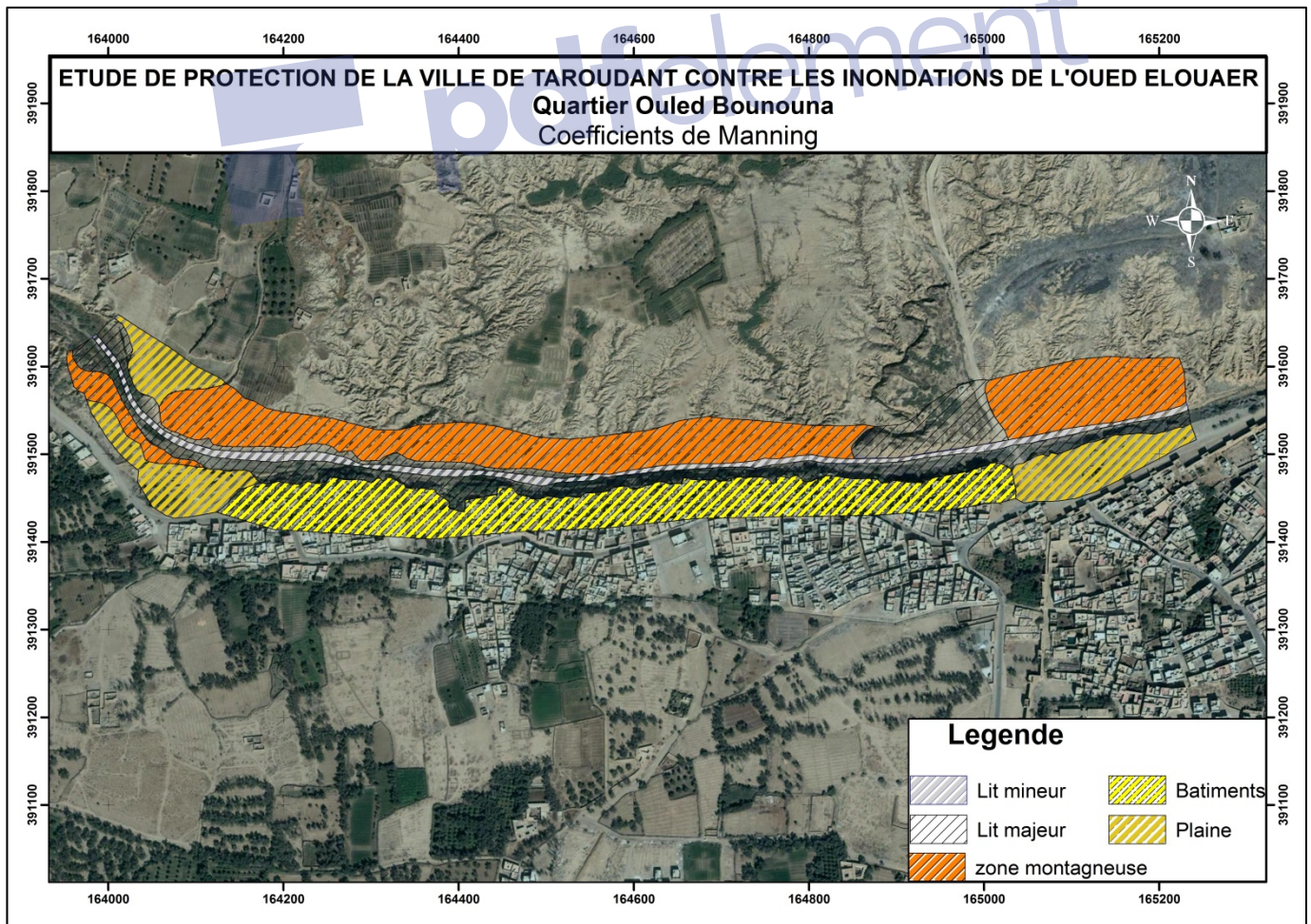


Figure 11 : Zonage du coefficient de Manning



D.1.3- Débits simulés

L'ABHSMO Agadir, préconise de protéger tout projet étudié contre la crue centennale.

Les débits simulés sont ceux définis auparavant, lors de l'étude hydrologique, pour les périodes de retour 10, 20, 50 et 100 ans.

Tableau 4 : Débits de pointes des crues simulés.

Période de retour (ans)	10	50	100
Débit (m ³ /s)	275	480	600

D.1.4- Ouvrages hydrauliques existants

On ne note aucun ouvrage hydraulique sur le tronçon de l'oued objet de l'étude.

D.2- RESULTATS DE LA SIMULATION

Les résultats obtenus sont sous forme de :

- Tableaux des paramètres hydrauliques usuels pour apprécier l'écoulement et le comportement hydraulique.
- Profils topographiques en travers des sections d'écoulement et profil en long de la ligne d'eau.
- Aires inondables pour se prononcer sur les zones à protéger contre les crues ;
- Limites des eaux en coordonnées XY pour l'implantation des ouvrages de protection éventuels : calage vertical et positionnement horizontal.

D.2.1- Tableaux

Les paramètres que nous avons retenus comme sorties du logiciel HEC-RAS sont les suivants :

- La cote du fond du lit de l'oued à la section considérée (Elévation minimale);
- La cote atteinte par l'eau sur les berges aux deux rives (Elévation maximale) ;
- La pente de la ligne d'eau (charge) ;
- La vitesse moyenne dans la section d'écoulement ;
- La section mouillée par l'eau ;
- La largeur au miroir ;
- Le nombre de Froude pour apprécier le type d'écoulement. Le nombre de Froude est adimensionnel. Il représente le rapport des forces d'inertie aux forces de pesanteur et s'exprime par :

Formule 1 : Nombre adimensionnel de Froude

$$F = \frac{V}{\sqrt{g \cdot h_m}}$$

Avec :

- V : Vitesse moyenne de l'eau dans la section d'écoulement
- g : accélération de la pesanteur
- h_m : Hauteur moyenne de l'eau dans la section d'écoulement, qui vaut le rapport de la section d'écoulement à la largeur au miroir.

Si F=1, l'écoulement est critique, si F<1 l'écoulement est fluvial, si F>1 l'écoulement est torrentiel.

Les tableaux de ces paramètres pour l'ensemble des profils du tronçon étudié, pour les différentes crues 10, 20, 50 et 100 ans sont donnés en annexes 2.

Tableau 5: Résultats HEC-RAS : paramètres hydrauliques

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl
Oued BOUNOUNA	915,0385	100 ANS	600	240,3	246,32		246,94	0,001102	4,3	177,27	37,12	0,57
Oued BOUNOUNA	909,3164	100 ANS	600	240,16	246,29		246,94	0,001107	4,27	173,51	34,57	0,57
Oued BOUNOUNA	901,4177	100 ANS	600	240,16	246,3		246,92	0,001044	4,13	177,68	35,09	0,55
Oued BOUNOUNA	894,0093	100 ANS	600	240,16	246,29		246,91	0,001131	4,34	177,39	34,9	0,57
Oued BOUNOUNA	885,0821	100 ANS	600	240,17	246,4		246,85	0,000783	3,68	207,1	41,74	0,48
Oued BOUNOUNA	876,4407	100 ANS	600	240,19	246,45		246,82	0,000636	3,34	228,35	45,73	0,43
Oued BOUNOUNA	868,6551	100 ANS	600	240,13	246,46		246,81	0,000583	3,23	237,91	46,75	0,42

L'analyse des données de ce tableau fait ressortir des vitesses normales et indique que l'écoulement est fluvial en tout endroit. Il n'y a pas de pas de changement du régime d'écoulement.

D.2.2- Profils en travers des sections d'écoulement

Le modèle offre la possibilité de visualiser le niveau d'eau sur les sections d'écoulement prédéfinies : cutlines.

On présente ci-après des exemples de comportement de l'écoulement dans quelques sections transversales caractéristiques de l'oued.

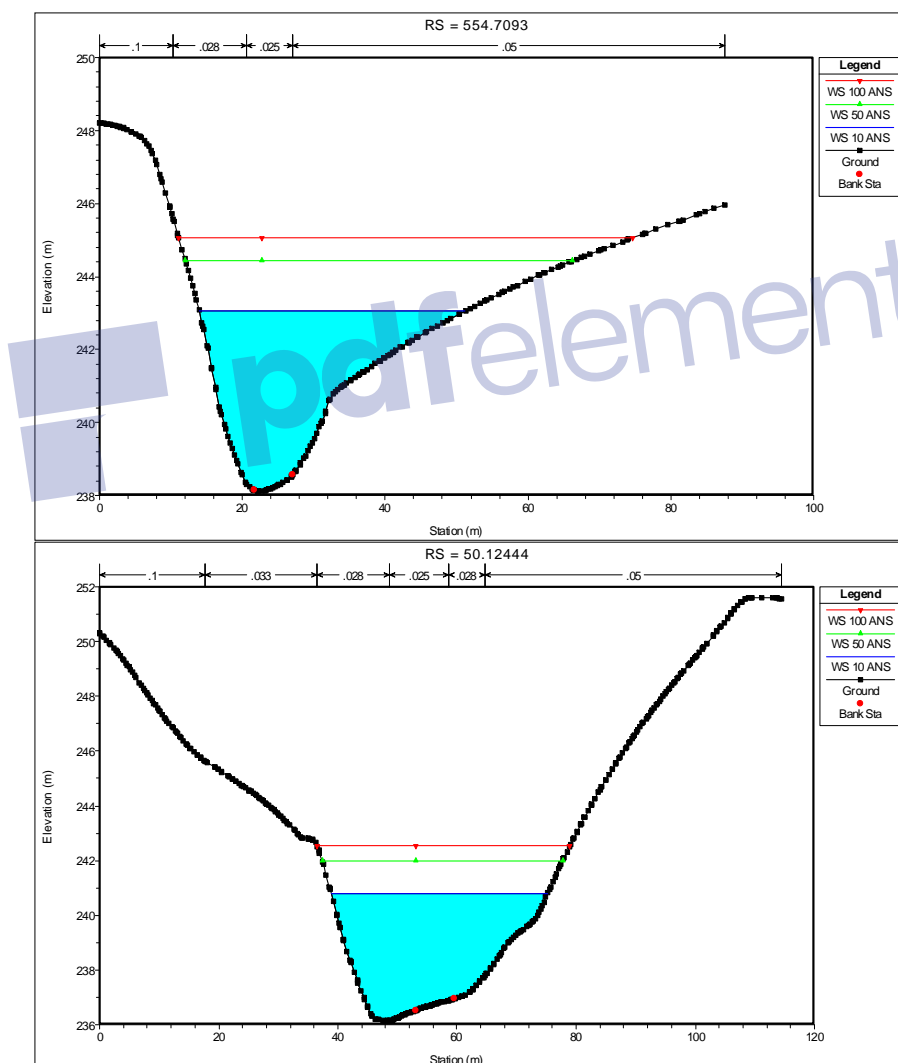


Figure 12 : Simulation hydraulique, quelques sections d'écoulement avec indication du niveau d'eau



D.2.3- Profil en long de l'écoulement

Le modèle donne aussi comme sortie le profil en long de l'écoulement :

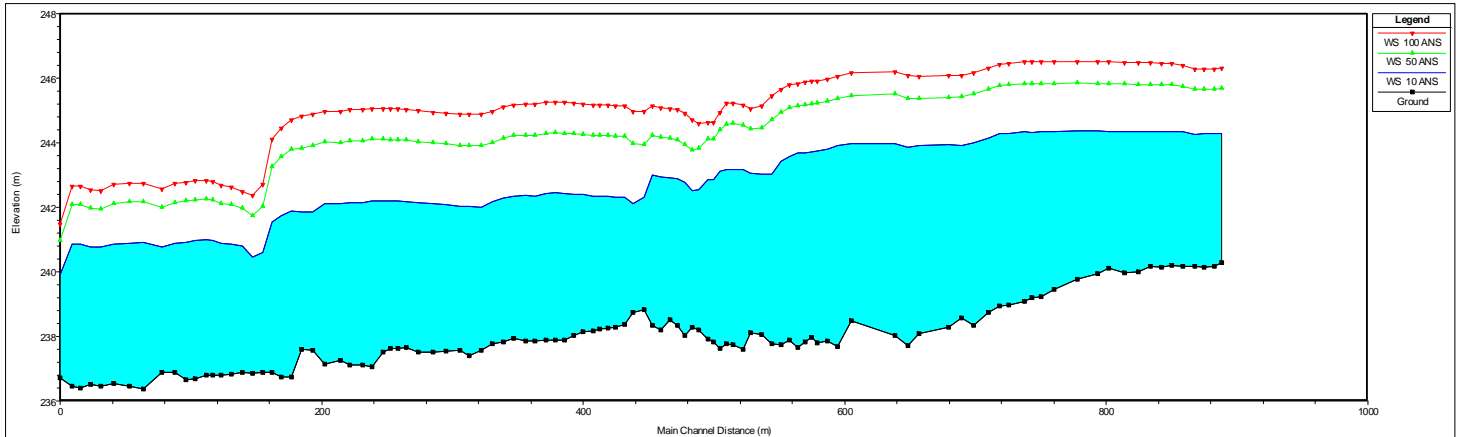


Figure 13 : Profil en long de l'oued

D.2.4- Aires inondées

Le modèle offre la possibilité de visualisation des aires inondées par les diverses crues et de la définition géographique de leurs étendues. Ici l'aire inondée comme elle est restituée par le modèle.

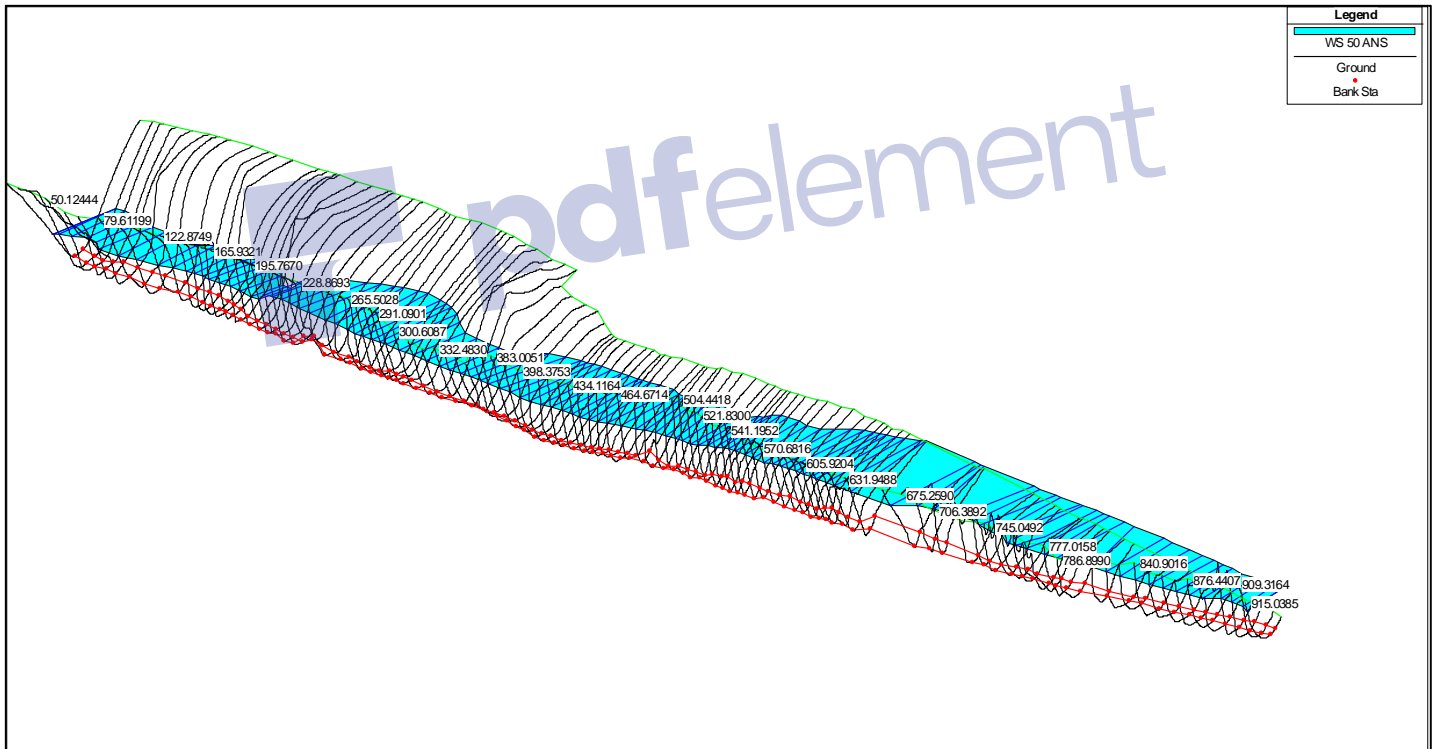


Figure 14 : visualisation de l'aire inondée par la crue centennale



Les aires inondées des diverses crues sont ensuite projetées sur l'image satellite de la zone, pour visualiser les limites des eaux des crues à la zone étudiée.

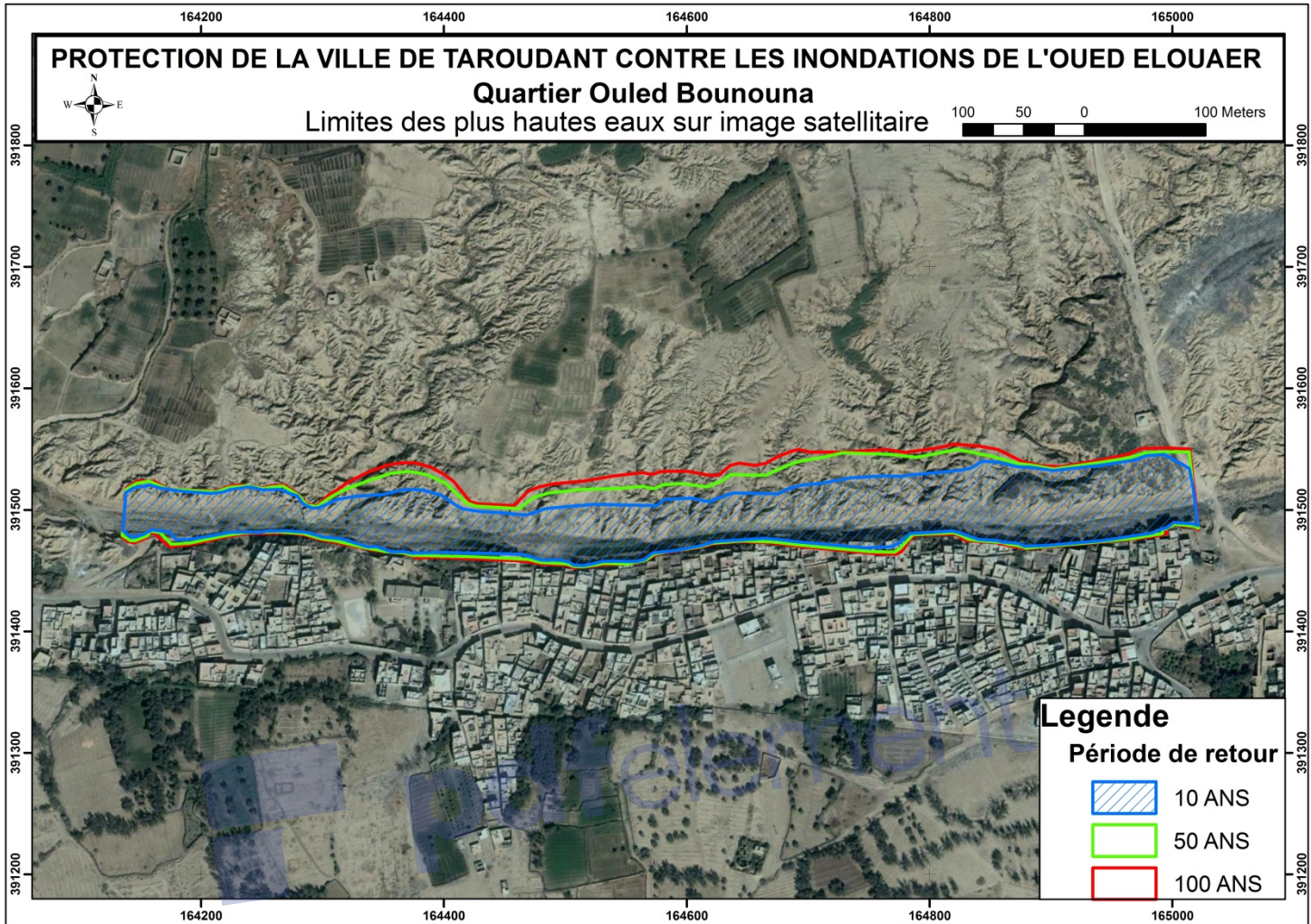


Figure 15 : Limites des eaux des crues sur image satellite

E- AMENAGEMENTS PROPOSES

E.1- CONCEPTION DE LA DIGUE DE PROTECTION

Sur la base de la géométrie et de la nature géologique de la berge de l'oued El Waaer, devant le quartier Ouled Bounouna, l'aménagement de protection contre les inondations adopté, est une digue triangulaire en caissons alvéolaires de béton armé, remplis d'un tout-venant de choix.

Vu que la falaise est très entamée par l'érosion et le sapement, la digue sera avancée par rapport à celle-ci de 3 m, de sorte à ne pas la déstabiliser lors des travaux d'affouillement.

Cet espace sera aménagé en terreplein rempli d'un remblai compacté prélevé sur la rive droite.

Cette même rive droite sera taillée sur toute sa hauteur dans une profondeur de 4 m pour élargir la section d'écoulement de l'oued en même temps que de prélever le remblai de remblayage du terreplein.

Ce terreplein sera reboisé en le couvrant auparavant de terre végétale.

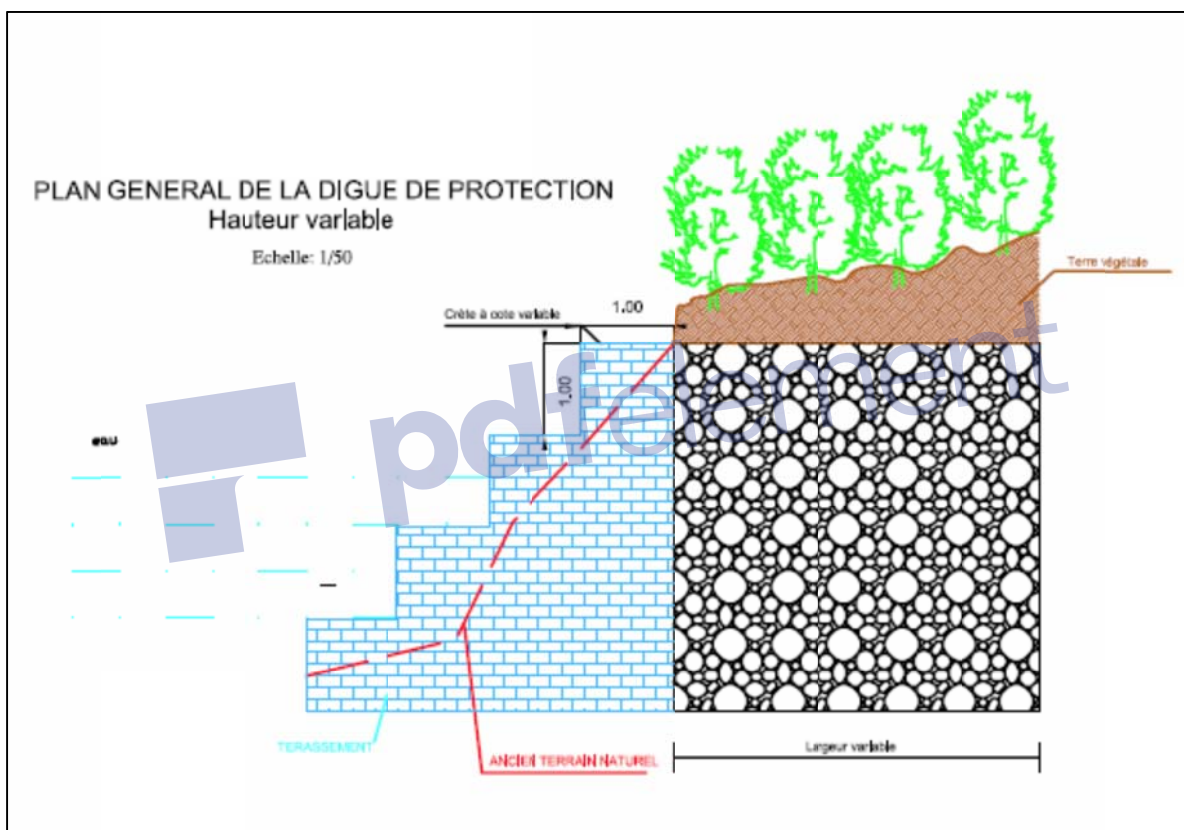


Figure 16 : Structure de la digue de protection.

Le tableau des caractéristiques hydrauliques en annexes 2, donne une hauteur moyenne d'eau de 3 m au niveau des sections d'écoulement. La hauteur de la digue sera ainsi fixée à 4 m.

Les photos suivantes montrent clairement la trace maximale des crues qui se situent à 4 m au-dessus du niveau minimal de la section d'écoulement.



Photo 9 : Traces des crues maximales sur les berges des deux rives





Le choix de la plantation en arbres et arbustes du terreplein derrière la digue est dicté par l'observation de terrain, montrant une bonne tenue de la berge là où elle est reboisée, comme le montrent les photos ci-après :



Photo 10 : Bonne tenue des berges reboisées : cactus, bambous, plantes grasses rampantes



E.2- IMPLANTATION DE LA DIGUE

La digue a été implantée de façon à protéger toute la berge adossée au quartier Ouled Bounouna, comme l'illustre la figure ci-après.

Les plans d'implantation de la digue devant le quartier et au niveau des profils en travers sont donnés en annexes 3.

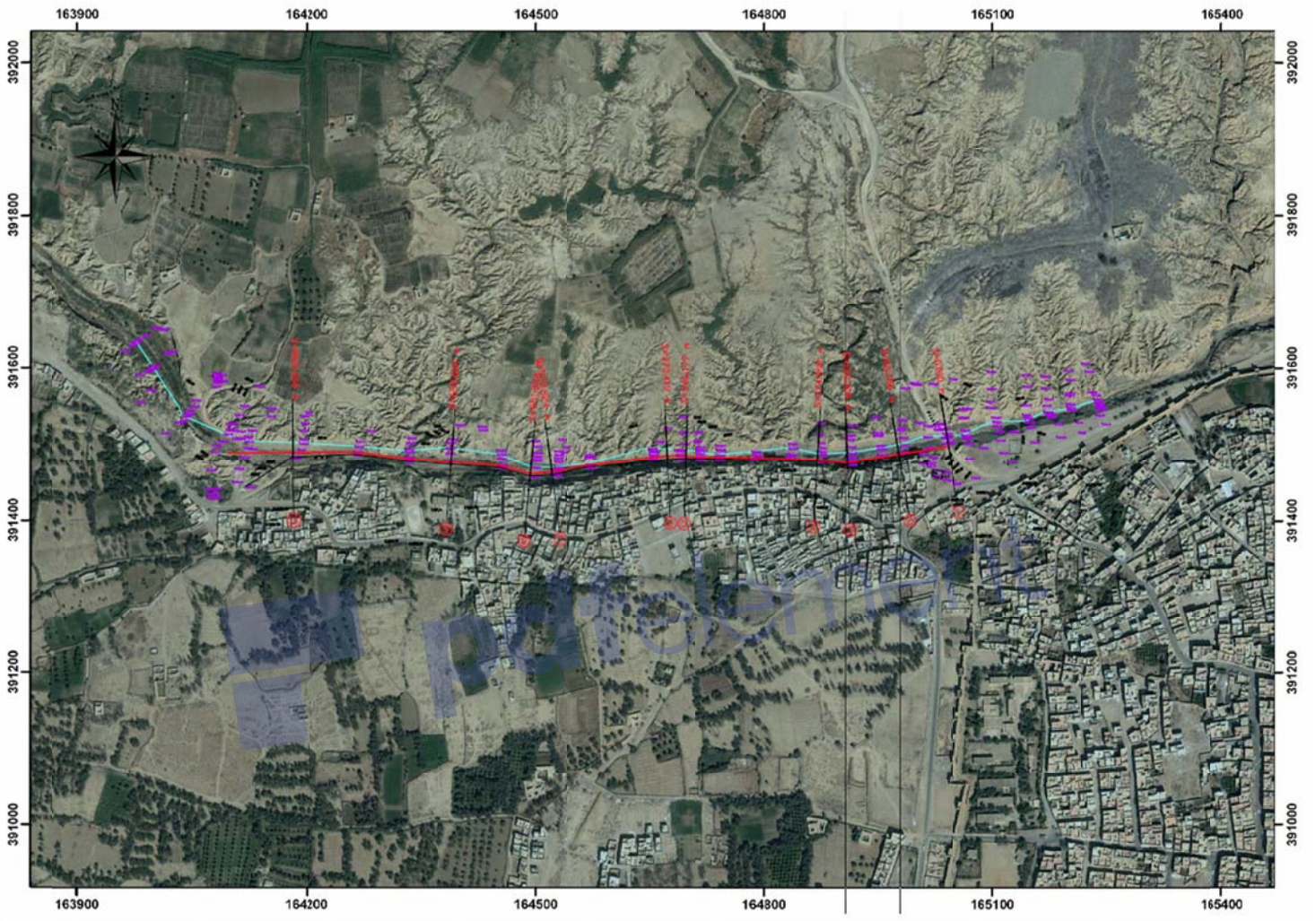


Figure 17 : Tracé de la digue

F- STABILITE DE LA DIGUE

La digue est formée de caissons alvéolaires. Elle a une forme triangulaire avec le parement vertical adossé remblai du terreplein et e parement en gradins face à l'eau. Elle a une base de 4 m et une hauteur de 4m.

L'étude de la stabilité de la digue concerne son équilibre. On procède à la vérification de sa sécurité au renversement, au glissement, au poinçonnement. De même qu'on vérifie la résistance du sol de la fondation aux contraintes qu'il subit.

Les calculs seront faits pour un mètre linéaire de digue.

Deux cas seront examinés : stabilité de la digue quand l'oued est en crue : en présence d'eau et sa stabilité quand l'oued est à sec : en absence d'eau.

F.1- STABILITE DE LA DIGUE EN CAS DE CRUE

Le schéma suivant indique les forces auxquelles est soumise la digue quand l'oued est en crue.

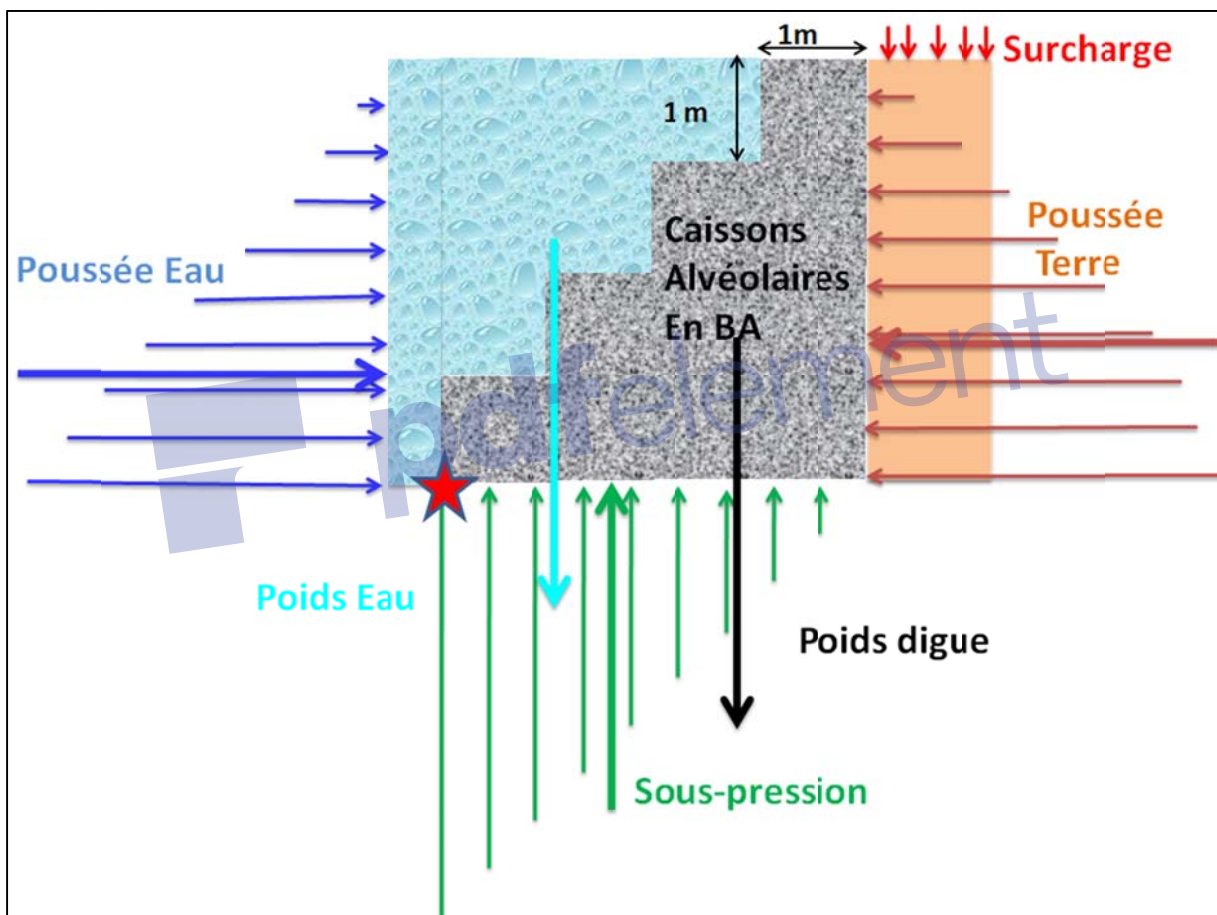


Figure 18 : Forces auxquelles est soumise la digue

F.1.1- Actions sur la digue

Les actions auxquelles est soumise la digue, sont :

1. Poussée des terres derrière la digue.
2. Surcharge du terrain supportée par les terres.
3. Poussée hydrostatique de l'eau sur le parement coté oued.
4. Sous-pression : action de l'eau qui a pénétré dans les interstices de la fondation de la digue et qui tend à la soulever.



5. Poids propre de la digue composée de deux éléments.
6. Poids propre de l'eau sur le parement incliné de la digue.

F.1.1.1- Poussée de la terre

La poussée de la terre est définie par :

$$P_s = \gamma_s \cdot H_s \cdot \frac{H_s}{2} \cdot \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\Phi}{2} \right)$$

Formule 2 : Poussée de la terre

Avec :

- P_s : Poussée de la terre en T/m ;
- γ_s : masse volumique des terres de la terrasse de cultures (1,65 T/m³) ;
- H_s : Hauteur de la terre en m.
- Φ : angle interne de frottement. Il vaut 30° pour le sol local qui est un sable compact.

F.1.1.2- Surcharge du terrain

Elle est fixée à 1 T/ml.

F.1.1.3- Poussée de l'eau :

Elle est définie par :

$$P_e = \frac{1}{2} \cdot \gamma_w \cdot H_e^2$$

Formule 3 : Poussée de l'eau

Avec :

- P_e : Poussée de l'eau en T/m ;
- γ_w : masse volumique de l'eau (1 T/m³) ;
- H_e : Hauteur de l'eau en m.

F.1.1.4- Sous-pression de l'eau

Elle est définie par :

$$S = \frac{1}{2} \cdot \gamma_w \cdot H_e \cdot L$$

Formule 4 : Sous-pression de l'eau

Avec :

- S = Sous-pression en T/m
- γ_w : masse volumique de l'eau (1 T/m³) ;
- H_e : Hauteur de l'eau en m.
- L : largeur de la digue en m

F.1.1.5- Poids propre de la digue

Le poids de la digue vaut :

$$P_d = \gamma_g \cdot (V_1 + V_2 + V_2 + \dots \dots V_n)$$

Formule 5 : Poids de la digue

Avec :

- P_d : Poids de la digue en T/m ;
- γ_g : masse volumique de la structure en béton armé est 2,4 T/m³.



- $V_{1,2,...n}$: Volumes partiels de la digue. Cages de 1, 2, 3...n m³ de gabions, coulés dans du béton.

F.1.1.6- Poids de l'eau par-dessus de la digue

La colonne d'eau sur le parement en gradins de la digue exerce une force sur celle-ci.

F.1.2- Stabilité de au renversement

L'une des principales causes de rupture d'un ouvrage est son renversement. Il se produit quand les forces horizontales sont suffisamment grandes par rapport aux forces verticales pour amener leur résultante en dehors des limites de la surface de base de cet ouvrage.

La vérification de la stabilité au renversement consiste à calculer par rapport au pied extérieur de la digue (du côté de l'eau) les moments des forces qui lui sont appliquées en séparant les forces motrices (poussée de l'eau, des terres et sous-pression) des forces stabilisatrices : poids de la digue, de l'eau et autres et vérifier que la résultante des forces coupe la base dans le tiers central.

Dans ce qui suit, les calculs sont menés pour 1 ml de digue haute de 4 m.

Les mêmes calculs menés pour une digue haute de 5 m aboutissent à sa bonne stabilité.

F.1.2.1- Sollicitations de renversement

Le tableau suivant résume les forces qui tendent à renverser la digue :

Tableau 6 : Forces de renversement de la digue, oued en crue

Désignation	Valeur en T	Bras de levier en m	Moment / ^t au pied coté eau en T
Poussée de la terre	4,40	1,33	5,852
Surcharge du terrain	1,00	2,00	2,00
Poussée de l'eau (s'oppose à la poussée des terres)	-8,00	1,33	-10,64
Sous-pression	8,00	1,33	10,64
TOTAL	$\sum F_r = 5,40$	--	$\sum M_r = 7,852$

F.1.2.2- Sollicitations de stabilité

Le tableau suivant résume les forces qui stabilisent la digue :

Tableau 7 : Forces de stabilisation de la digue, oued en crue

Désignation	Valeur en T	Bras de levier en m	Moment / ^t au pied coté eau en T
Poids de la digue	24,00	composé	60,00
Poids de l'eau	6,00	composé	7,00
TOTAL	$\sum F_s = 30,00$	--	$\sum M_s = 67,00$

F.1.2.3- Vérification de la condition de stabilité

La stabilité est acquise si le coefficient de stabilité au renversement :

$$K_r = \frac{\sum M_s}{\sum M_r} \geq 1,50,$$

Formule 6 : Condition de stabilité au renversement

Ici, il vaut $K_r = 8,53286$



F.1.3- Stabilité au glissement

Les forces horizontales telles que la poussée de l'eau et des terres tendent à déplacer l'ouvrage. Sa fondation résiste à celles-ci grâce à sa cohésion et son coefficient de frottement.

Le coefficient de glissement est :

$$f = tg(\Phi = 30), \text{ soit } f=0,577.$$

Formule 7 : Coefficient de glissement

La force s'opposant au glissement est la somme des forces stabilisatrices (verticales) multipliée par le coefficient f de glissement $\sum F_v \cdot f$

Les forces qui tendent à faire glisser la digue sont les forces renversantes (horizontales).

Le coefficient de sécurité au glissement est le rapport de la résultante des forces verticales à celle des forces horizontales. Sa formule est la suivante :

Le non glissement est vérifié si :

$$K_g = \frac{\sum F_s \cdot f}{\sum F_r}, \text{ est supérieur à } 1,50 \text{ (condition)}$$

Formule 8 : Condition de stabilité au glissement

Ici, il vaut supérieur $K_g = 3,30556$.

F.1.4- Vérification de la résistance du sol de fondation

F.1.4.1- Vérification de l'excentricité

Pour éviter le poinçonnement du sol sous la digue, la résultante des forces verticales doit rester dans le tiers central de sa base. En effet, celle-ci doit rester comprimée. Ce qui correspond à la condition suivante :

$$-\frac{b}{6} < e = \left(\frac{\sum M_s}{\sum F_s} - \frac{b}{2} \right) < +\frac{b}{6} \text{ soit } 0,23333 \text{ bien inférieur à } \frac{4}{6} = 0,66667$$

Formule 9 : Condition de non excentricité

Avec :

- b : Largeur à la base de la digue.

F.1.4.2- Vérification de la portance du sol

La condition de résistance du sol de fondation est que la contrainte minimale soit positive et la contrainte maximale soit inférieure à la portance du sol.

La contrainte minimale est $\sigma_{min} = \frac{\sum F_s}{b} \cdot \left(1 - 6 \frac{e}{b} \right) > 0$, soit 4,87504

La contrainte maximale est $\sigma_{max} = \frac{\sum F_s}{b} \cdot \left(1 + 6 \frac{e}{b} \right) < \sigma_{sol}$, soit 10,12496 bien inférieure à la portance du sol 35 T/m².



F.2- STABILITE DE LA DIGUE QUAND L'OUED EST A SEC

F.2.1- Stabilité de au renversement

F.2.1.1- Sollicitations de renversement

Le tableau suivant résume les forces qui tendent à renverser la digue :

Tableau 8 : Forces de renversement de la digue, oued à sec

Désignation	Valeur en T	Bras de levier en m	Moment / au pied coté eau en T
Poussée de la terre	4,40	1,33	5,852
Surcharge du terrain	1,00	2,00	2,00
TOTAL	$\sum F_r = 5,40$	--	$\sum M_r = 7,852$

F.2.1.2- Sollicitations de stabilité

Le tableau suivant résume les forces qui stabilisent la digue :

Tableau 9 : Forces de stabilisation de la digue, oued en crue

Désignation	Valeur en T	Bras de levier en m	Moment / au pied coté eau en T
Poids de la digue	24,00	composé	60,00
TOTAL	$\sum F_s = 24,00$	--	$\sum M_s = 60,00$

La stabilité est acquise si $K_r = \frac{\sum M_s}{\sum M_r} \geq 1,50$, ici il vaut $K_r = 7,64137$

Stabilité au glissement

Le non glissement est vérifié avec $K_g = \frac{\sum F_s \cdot f}{\sum F_r} = 2,56444$ supérieur à 1,50 (condition).

Vérification de l'excentricité

$$-\frac{b}{6} < e = \left(\frac{\sum M_s}{\sum F_s} - \frac{b}{2} \right) < +\frac{b}{6} \text{ soit } 0,50 \text{ bien inférieur à } \frac{4}{6} = 0,66667$$

Vérification de la portance du sol

La contrainte minimale est $\sigma_{min} = \frac{\sum F_s}{b} \cdot \left(1 - 6 \frac{e}{b} \right) > 0$, soit 1,5

La contrainte maximale est $\sigma_{max} = \frac{\sum F_s}{b} \cdot \left(1 + 6 \frac{e}{b} \right) < \sigma_{sol}$, soit 10,50 bien inférieure à la portance du sol 35 T/m².



F.3- PLANS D'EXECUTION

Les plans de ferrailage de la digue sont données en annexes 4.

La digue en caissons alvéolaires est une version améliorée des cages en gabions dans laquelle on remplace le fil du gabion par des dalettes et les pierres par du tout-venant.

Les éléments constituant d'un caisson alvéolaire en béton armé sont :

- La dalette,
- Le poteau,
- La chape supérieure en béton.
- Le tout venant de choix,
- Les remblais compactés

Ces éléments sont assemblés pour former la digue selon la conception définie.

On note que la structure présente une pente de 1V/1H et qu'elle est imbriquée en couples de 2 caissons dans les deux sens : vertical et horizontal. Elle est aussi ancrée dans la berge par des poteaux de 50 cm tous les mètres.

Si la berge est meuble, elle sera posée sur un tout venant de choix compacté.

F.4- LES AVANT-METRES ET DETAIL ESTIMATIF

F.4.1- Un caisson alvéolaire

La digue est formée de caissons alvéolaires, obtenus par assemblage des éléments constitutants.

Le métré d'un caisson alvéolaire est comme suit :

Tableau 10: Métré des composants d'un caisson alvéolaire en béton armé

	Béton armé m ³	Aciers Kg			Total	Tout venant
		T6	T8	T10		
Dalette 0,80x1,00x0,10m	0,080 B2	*	4,345	*	4,345	*
Poteau 1,20x0,20x0,20m	0,040 B2	0,932		2,715	3,647	*
Chape 1 m ² x0,10m	0,10 B4	*	3,753	*	3,753	*
Tout venant 0,9*1*0,9 – moins les coins	*	*	*	*	*	0,800

Les prix actuels communiqués par une entreprise de travaux publics sont :

- Béton classe B2, le mètre cube : ... Dhs Hors Taxes ;
- Béton classe B4 le mètre cube : ... Dhs HT;
- Aciers façonnés le Kg : ... Dhs HT ;
- Tout venant de choix le mètre cube : ... Dhs HT ;

Sur la base de ces prix :

- Une dalette coûterait : ... Dhs arrondi à ... Dhs HT;
- Un poteau coûterait ... arrondi à ... Dhs HT ;
- Un caisson alvéolaire individuel avec chape coûterait ... arrondi à ... HT Dhs ;

F.4.2- Toute la digue Bounouna

La digue Bounouna est du type triangulaire de base 4m et de hauteur 4m. Elle est longue de 800 m.

On trouve à chaque niveau :

- 5 Dalettes,
- 3 poteaux
- 1,6 m³ de tout venant de choix,
- 1 m² de chape.



L'avant métré et le détail estimatif est comme suit :

Tableau 11: Avant métré et détail estimatif de toute la digue Bounouna, L=800m – H=4m.

Désignation	Unité	Quantité	Prix Unitaire HT	Montant Total HT
Déblais en terrain toute nature	m ³	36800,00		
Remblai compacté	m ³	7200,00		
Béton pour béton armé classe B2	m ³	2048,00		
Béton pour gros béton classe B4	m ³	320,00		
Béton pour béton de propreté classe B5	m ³	680,00		
Acier HA	Kg	124115		
Joints transversaux de dilatation	m ²	800,00		
Tout-venant de choix compacté	m ³	6400,00		
Enrochements de confortement de la base de la digue	m ³	1200,00		
Mise en place de barbacanes de drainage PEHD Ø100	ml	480,00		
Terre végétale	m ³	500,00		
			TOTAL HT	6.900.582,00
			TVA à 20%	1.380.116,00
			TOTAL T TC	8.280.698,00

La feuille de calcul EXCEL est donnée en annexes 5.





CONCLUSION

Le bassin versant de l'oued El Waaer est situé au Nord de la ville de Taroudant. D'une superficie de 232 Km², il est à cheval sur plusieurs communes de la province de Taroudant, dont les principales sont Imoulass, Tamaloukte et Taфраouten.

La pluie moyenne annuelle reçue par le bassin versant est 246 mm.

L'hydrologie de l'oued El Waaer se caractérise par une grande irrégularité intra et interannuelle de ses apports en eau. Son apport moyen annuel est de 19,3 Millions m³/an. Le débit de pointe centennal est 600 m³/s.

L'apport solide annuel de l'oued El Waaer, au niveau du barrage en construction Sidi Abdellah, approche 175000 tonnes/an.

Le quartier Ouled Bounouna, se trouve construit sur une berge de l'oued El Waaer, de nature friable, sapée par les forces des eaux. Toutes les habitations construites en surplomb de cette berge en falaise, sont ainsi menacées par les crues de l'oued.

La simulation hydraulique de l'écoulement a permis d'étudier ses paramètres usuels et de fixer la hauteur atteinte par les eaux, et par conséquent celle de la digue de protection.

En fonction des particularités du site et de la nature du terrain constituant la berge, il est proposé de construire une digue triangulaire massive.

Pour ne pas déstabiliser la berge au moment des travaux, elle sera placée en avant de celle-ci, à une distance d'au minimum 3m. L'espace ainsi laissé sera aménagé en terre-plein boisé.

La section d'écoulement de l'oued tout au long du quartier Ouled Bounouna, sera également agrandie, en taillant la berge rive droite non habitée, sur sa hauteur d'environ 9 m et dans une profondeur de 4m.

D'une longueur de 800 m et haute de 4 m, son coût estimé avoisine 8,3 Millions Dhs.



BIBLIOGRAPHIE - ETUDES CONSULTÉES

- [1]** : Elaboration d'un programme de lutte contre la désertification dans le bassin de Souss par analyse d'images satellitaires et présentation des résultats dans un système d'information géographique. Secrétariat d'Etat auprès du ministère de l'Energie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement. Département de l'Environnement. ADI 2002.
- [2]** : Etude hydrologique pour l'actualisation des potentialités des ressources en eau de surface dans le bassin du Souss-Massa. Agence du bassin hydraulique du Souss Massa et Draa, LPEE – 2003.
- [3]** : Bases de données pluie et débit de l'ABHSMD Agadir.
- [4]** : Dossier de l'APD du barrage Sidi Abdellah. Ministère de l'Equipement, Direction Générale de l'Hydraulique, Direction des Aménagements Hydrauliques. Mai 1998.
- [5]** : Etude d'impact sur l'environnement et de rentabilité économique du barrage Sidi Abdellah dans la province de Taroudant. Mission 1 : Identification et évaluation des impacts du barrage de Sidi Abdellah sur l'environnement. Direction de la Recherche et de la Planification de l'eau, Aout 2009.
- [6]** : Handbook of hydrology – David R. Maidment.
- [7]** : Handbook of applied hydrology – VEN TE CHOW.
- [8]** : Hydraulique générale et appliquée – M. CARLIER.





ANNEXES

- ☛ ANNEXE 1 : NOTE SUR LE MODELE HEC RAS.
- ☛ ANNEXE 2 : TABLEAUX DES SIMULATIONS HEC-RAS.
- ☛ ANNEXE 3 : IMPLANTATION PLANIMETRIQUE ET ALTIMETRIQUE DE LA DIGUE
- ☛ ANNEXE 4 : PLANS COFFRAGE ET FERRAILLAGE DE LA DIGUE
- ☛ ANNEXE 5 : FEUILLE DE CALCUL DES AVANT-MÉTRÉS.