





Faculté des sciences et techniques

Département des sciences de la Terre

Mémoire pour l'obtention :

du diplôme de Licence en Sciences et Techniques

Option « Eau et Environnement »

Année universitaire: 2018 - 2019

ETUDE DE PROTECTION CONTRE LES INONDATIONS AU NIVEAU DU DOUAR LALLA AARIBA, COMMUNE DE NFIFA, PROVINCE DE CHICHAOUA (MAROC)

Réalisée par : Ayoub ELHADDAJI

Soutenu: Le 25 Juin 2019

Devant le jury composé de :

Pr. Mohammed El Mehdi SAIDI : FST Marrakech, Encadrant

Ing. Intissar ABOUNKI : ABHT Marrakech, Co-Encadrante

Pr. Abdeljabar RIZKI : FST Marrakech, Examinateur

Remerciements:

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès de mon stage et qui m'ont aidé lors de la rédaction de ce mémoire.

Je voudrais dans un premier temps remercier, mon encadrant interne Monsieur **SAIDI Mohamed El Mehdi**, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Je tiens à témoigner toute ma reconnaissance aux personnes suivantes, pour leur aide dans la réalisation de ce mémoire :

Messieurs **ELALAOUI Abdel Hafid** et **ADALLAL Rachid** qui ont fourni un grand effort au niveau de la formation d'initiation à l'utilisation du Logiciel ArcGIS qui s'est déroulée pendant le mois d'avril.

Mon encadrante externe Madame **ABOUNKI Intissar**, qui fut la première à me faire découvrir le sujet qui a guidé mon mémoire ; pour sa gentillesse, sa modestie, sa riche expérience et l'accueil cordial qu'elle m'a toujours réservé.

Je remercie également toute l'équipe de l'Agence du Bassin Hydraulique du Tensift pour leur accueil et leur assistance.

Je tiens enfin à remercier tout particulièrement ma famille qui m'a accordé la liberté d'action et la patience nécessaires pour réaliser ce travail ainsi que toutes les personnes qui m'ont soutenu.

Table des matières

Introduction généro	ale:	6
Présentation de l'a	gence du bassin hydraulique du Te	nsift :7
Chapitre 1 : Prései	ntation de la zone d'étude	9
1- Contexte géog	raphique et administratif :	9
	tique :	
	pgique :	
4- Investigations e	t diagnostic :	11
Chapitre 2 : Etude	Hydro-pluviométrique	16
1- Morphologie d	lu bassin versant :	16
1-1- Délimitation du b	passin versant :	16
1-2- Lithologie du bas	ssin versant :	17
1-3- Caractéristiques	géométriques du bassin versant :	17
1-4- Le temps de cond	centration :	21
	les courbes Intensité - Débit - Fréquence (ID	
·	ocalisation de la station lloudjane par rapport au bassin v	
2-2- Notion d'averse	et d'intensité de pluie :	24
2-3- Définition et utilit	é des courbes IDF :	25
2-4- Construction des	courbes IDF :	26
2-5- Courbes IDF et p	paramètres a et b de la formule de Montana :	27
3- Estimation des a	débits de pointe et établissement de l'hydrog	gramme de crue :
3-1- Estimations des d	lébits de pointe :	28
3-2- Établissement de	l'hydrogramme de crue :	3C
Chapitre 3 : Simula	ation hydraulique et protection	32
1- Simulation hydr	aulique :	32
1-1- Didacticial de sin	nulation hydraulique on 2D :	32

1-2- Résultats et commentaires :	35
2- Plans de protection :	36
Conclusion	36
Bibliographie	38
Annexes :	

Liste des figures :

Figure 1: Carte de la zone d'action de l'agence du bassin hydraulique du Tensift	88
Figure 2 : carte de localisation de Douar LALLA AARIBA	9
Figure 3 : Extrait de carte géologique de la région d'Imintanout	
Figure 4: Image satellite de la zone d'étude	
Figure 5 : Carte topographique de la zone d'étude	14
Figure 6 : modèle numérique de terrain du bassin versant LALLA AARIBA	
Figure 7: Carte de la géologie du bassin versant LALLA AARIBA	
Figure 8 : carte hypsométrique du bassin versant LALLA AARIBA	
Figure 9 : rectangle équivalente du bassin versant LALLA AARIBA	
Figure 10 : Carte de la situation de la station lloujdane par rapport au bassin versant Lalla Aariba	
Figure 11 : Représentation schématique des courbes IDF	25
Figure 12 : Prise d'écran au niveau d'interface d'importation de support topographique	32
Figure 13 : Prise d'écran au niveau d'interface de délimitation de l'aire d'écoulement et insert	ion
de coefficient Manning	33
Figure 14 : Prise d'écran au niveau d'interface de définition des conditions aux limites	34
Figure 15 : Prise d'écran de l'interface d'initiation de simulation	
Figure 16 : Résultats de simulation lors de la crue centennale (Crue 2016)	
Figure 17 : Résultats de simulation lors de la crue centennale état actuelle	35
Liste des photos : 1	
Image 1 : Localisation du douar par rapport à l'Oued (Vue aval)	13
Image 2 : Chemin d'accès au douar traversant la digue	13
Image 3 : Chenal d'écoulement en aval de l'oued (Vue amont)	14
Liste des tableaux :	
Tableau 1: Cordonnées géographiques de la zone d'étude	10
Tableau 2: Les paramètres physiques du bassin versant Lalla Aariba	
Tableau 3 : Temps de concentration calculés	
Tableau 4 : Coefficients a et b de la formule de Montana au niveau de la station d'Iloudjane.	:27
Tableau 5 : Quelques méthodes de calcul de debit de pointe	
Tableau 6: Valeurs du coefficient de ruissellement d'après Recommandations pour l'Assainisse	ement
Routier du SETRA - RAR 1982	
Tableau 7: Débits obtenus par différentes formules	30
Liste des tableaux :	
	1 🔿
Graphique 1 : Courbe hypsométrique du bassin versant LALLA AARIBA	19
Graphique 2: Représentation des courbe IDF (formule de Montana) Station pluviométrique	つフ
d'Iloudjane 1989-2016	
Graphique 3 : Hydrogramme de crue centennale	ا ک

Outils de travail :

- ARC-GIS:

ArcGIS est une suite de logiciels d'information géographique (ou logiciels SIG) développés par la société américaine Esri (Environmental Systems Research Institute, Inc.). Arc GIS est composée de trois parties (Applications ou logiciels) essentiels :

- Arc Map : Permet d'éditer les fichiers en format géodatabase
- Arc Catalog : Permet la gestion des données c'est -à-dire d'obtenir le maximum d'information sur l'objet édité. Il s'agit d'un système de gestion de bases de données (SGBD).
- Arc ToolBox : Composée d'un ensemble d'outils de transformation des données.

- HYFRAN PLUS

Le logiciel HYFRAN-PLUS permet d'ajuster un nombre important de distributions statistiques à une série de données qui vérifient les hypothèses d'indépendance, d'homogénéité et de stationnarité.

- HEC-RAS

HEC-RAS est un logiciel développé par le centre d'Ingénierie hydraulique des corps de l'armée Américaine pour la modélisation monodimensionnelle d'un réseau fluvial et Mike Basin pour la modélisation bidimensionnelle. HECRAS 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.





Introduction générale :

Le Maroc a enregistré pas moins de 35 épisodes d'inondations entre 1951 et 2016. Les crues soudaines sont capables de transformer les lits secs des oueds en torrents violents et destructeurs, causant de pertes humaines et matérielles très importantes. Les inondations rapides et brutales détruisent les biens immobiliers et les infrastructures installés dans ces zones, laissant derrière elles une situation de misère pour les survivants.

Les crues ne sont pas une nouveauté au Maroc où traditionnellement elles étaient accueillies positivement en tant que source d'irrigation pour les cultures dans les régions arides. Cependant, ces dernières années, la forte urbanisation, la croissance de la population et les changements climatiques font de ces crues une véritable source de risques pour un nombre toujours plus important de personnes et d'infrastructures vitales.

Afin de remédier les effets d'inondation, le Maroc dispose plusieurs acteurs gouvernementaux et non gouvernementaux qui agissent en termes d'élaboration de plans d'interventions, d'urgence et la préparation des plans d'aménagement pour la réduction des catastrophes.

La présente étude est effectuée au sein de l'agence du bassin hydraulique du Tensift dans le cadre d'un stage de fin d'étude. Mettant comme objectif la réalisation d'un document qui servira à la protection des habitants de douar Lalla Aariba et leurs propriétés. À cet effet, nous optons pour l'approche suivante :

- <u>La première partie</u>: Présentation de la zone d'étude en définissant son contexte géographique, climatique, géologique et investiguant les imageries satellites, articles journaliers, témoignages d'habitants et visite de terrain pour un évènement d'inondation passé.
- La deuxième partie: Etude hydro pluviométrique qui portera sur la délimitation du bassin versant, l'identification des différents paramètres physiques liés à ce dernier et l'analyse fréquentielle des données pluviométriques afin de calculer les débits de pointe pour différentes périodes de retour.
- <u>La troisième partie</u>: <u>Simulation hydraulique et protection</u>. Cette partie consiste à visualiser les résultats de la deuxième partie et trouver des solutions aux problèmes d'inondation.



Présentation de l'agence du bassin hydraulique du Tensift :

L'agence du bassin hydraulique du Tensift (ABHT) est une des neuves agences créées par la loi 10-95 sur l'eau en tant qu'établissements publiques, dotées de la personnalité morale et de l'autonomie financière, chargées du développement et la gestion de l'eau et du domaine public hydraulique d'un bassin ou groupement de bassins hydrographiques.

L'Agence du bassin est chargée :

- D'élaborer le plan directeur d'aménagement intégré des ressources en eau à l'intérieur de sa zone d'action.
- De veiller à l'application des recommandations du plan directeur d'aménagement intégré des ressources en eau.
- De délivrer les autorisations et concessions d'utilisation du domaine public hydraulique prévues dans le plan directeur d'aménagement intégré des ressources en eau à l'intérieur de sa zone d'action.
- De fournir toute aide financière et prestation de service, notamment d'assistance technique, aux personnes publiques ou privées qui en feraient la demande, soit pour prévenir la pollution des ressources, soit en vue d'un aménagement ou d'une utilisation du domaine public hydraulique.
- De réaliser toutes les mesures piézométriques et de jaugeages ainsi que les études hydrologiques et hydrogéologiques, de planification et de gestion de l'eau tant sur le plan quantitatif que qualitatif.
- De réaliser toutes les mesures de qualité et d'appliquer les dispositions de la loi 10/95 et des lois en vigueur relatives à la protection des ressources en eau et à la restauration de leur qualité, en collaboration avec l'autorité gouvernementale chargé de l'environnement.
- De proposer et d'exécuter les mesures adéquates, d'ordre réglementaire, notamment, pour assurer l'approvisionnement en eau potable des populations en période de pénurie déclarée et pour prévenir les risques d'inondation.
- De gérer et contrôler l'utilisation des ressources en eau mobilisées.
- <u>De réaliser les infrastructures nécessaires à la prévention et à la lutte contre les inondations.</u>





De tenir un registre des droits d'eau reconnus et des concessions et autorisations de prélèvement d'eau accordées.

Extrait du Dahir n° 1-95-154

La carte en dessous représente les provinces appartenant à la zone d'action de l'ABHT

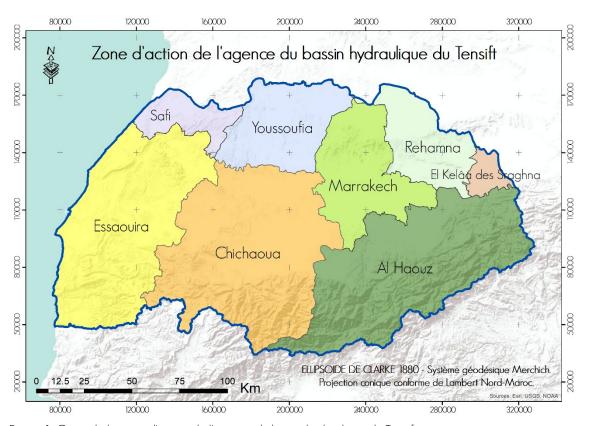


Figure 1: Carte de la zone d'action de l'agence du bassin hydraulique du Tensift





Chapitre 1 : Présentation de la zone d'étude

1-Contexte géographique et administratif :

La localité Lalla Aariba fait partie de la commune Nfifa de la province Chichaoua au niveau de la région Marrakech-Safi.

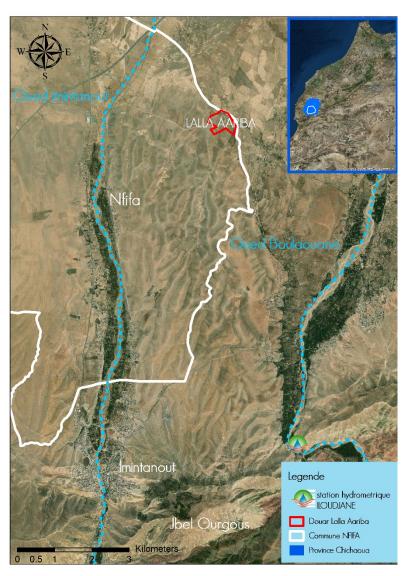


Figure 2 : carte de localisation de Douar LALLA AARIBA

Le douar Lalla Aariba est situé à 110 kilomètres au sud-ouest de Marrakech, il est limité à l'ouest par Oued Imintanout, à l'est par Oued Boulaouane appelé aussi Sekssawa et au sud par la ville d'Imintanout. Le douar se trouve à l'aval de Jebel Ourgous.





Les cordonnées correspondants au douar lalla araiba :

Cordonnées Lambert	X= 174000 Y= 79300
Cordonnées en dégrées décimale	Latitude: 31.26 °
	Longitude : 8.82 °
Cordonnées en dégrées minutes seconde	Latitude : 31° 15′ 35 ″ N
	Longitude : 8° 49′ 22 ′′ W

Tableau 1: Cordonnées géographiques de la zone d'étude

2-Contexte climatique : (Kaoutar NASSIRI et Raouia ELIDRISSI, 2013)

Le climat est de type aride ; chaud en été et froid en hiver. Les températures sont Relativement élevées avec des écarts thermiques importants, une faible hygrométrie et une forte évaporation. La température moyenne enregistrée à lmintanout est de l'ordre de 20°C. En été la température peut atteindre 45°C et en hiver elle descend jusqu'à -2°C.

On note aussi qu'il y a des variations notables dans le régime climatique d'Est en Ouest et du Nord au Sud. Ceci est principalement dû au relief de la chaîne Haut Atlasique ainsi que l'influence de l'océan dans la façade atlantique.

En se basant sur les données de pluviométrie journalier maximale de la station hydrologique lloudjane sur l'oued Sekssawa (Annexe). La station enregistre une pluviométrie annuelle moyenne de l'ordre de 314,2 mm.

3-Contexte géologique :

Douar Lalla Aariba est situé à l'extrémité sud de la plaine de Haouz a quelques kilomètres de la chaine du haut atlas occidental. Le terrain sur lequel le douar est fondé contient des terrasses caillouteuses a ciment rougeâtre peu calcaire d'âge quaternaire.

La figure en dessous montre les différents affleurements au niveau de la zone d'étude.



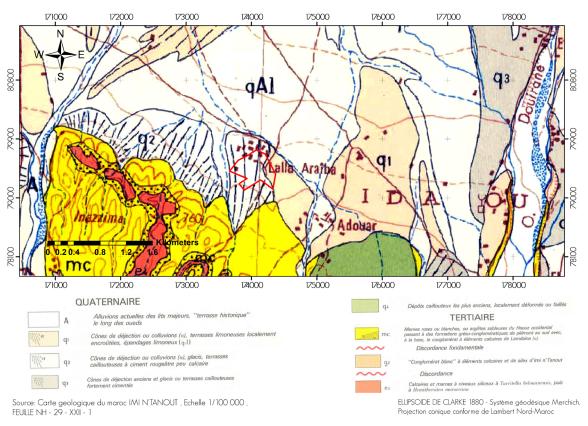


Figure 3 : Extrait de la carte géologique de la région d'Imintanout

4-Investigations et diagnostic :

Afin d'étudier la vulnérabilité de douar Lalla Aariba face aux inondations une investigation doit être mener, pour relever des traces de crue antécédente.

Le 6 novembre 2016 douar Lalla Araiba a connu un débordement des eaux d'un cours d'eau qui passe au voisinage du douar. Ce jour, la région de Chichaoua a connu des averses intenses dont la hauteur maximale de pluie était de l'ordre de 72 mm. Le débordement a causé des dégâts matériels et l'envahissement des terrains agricoles et maisons par les eaux de l'oued.

Selon les témoignages des habitants et des autorités locales la zone n'a jamais connue un envahissement avant l'année 2016. Afin d'assurer la protection du douar face à un autre débordement des eaux de l'oued, la commune à réaliser une digue de protection le long de la rive droite.

Les figure en dessous représentent l'emplacement du douar par rapport à l'oued auquel nous allons attribuer le nom Oued Lalla Aariba et l'emplacement de la digue de protection.



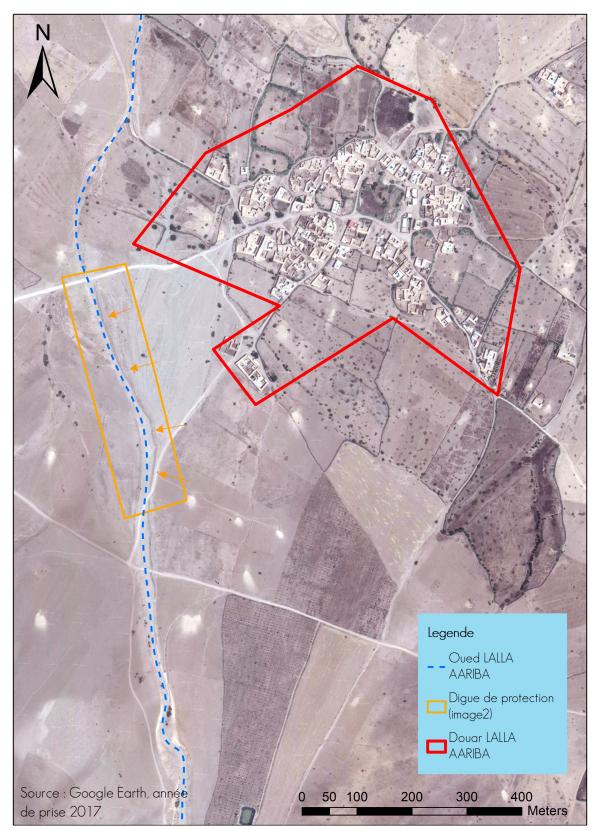


Figure 4: Image satellite de la zone d'étude



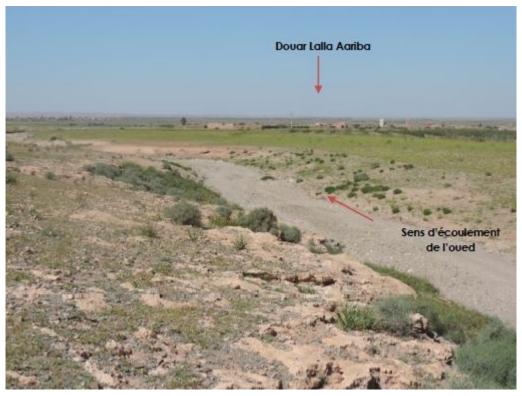
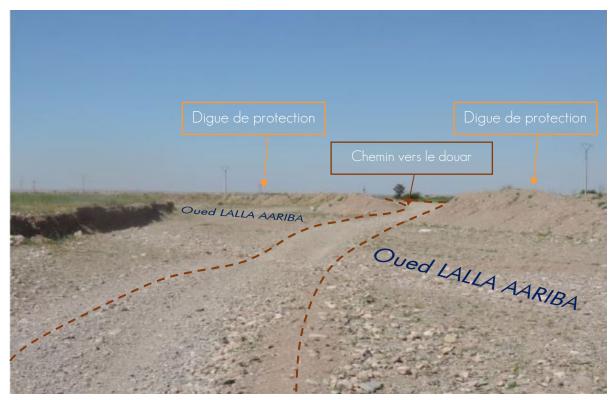


Image 1 : Localisation du douar par rapport à l'Oued (Vue aval)



lmage 2 : Chemin d'accès au douar traversant la digue





Image 3 : Chenal d'écoulement en aval de l'oued (Vue amont)

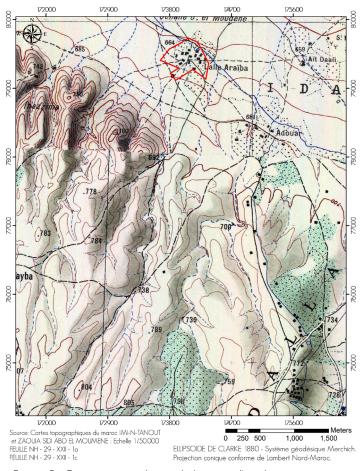


Figure 5 : Carte topographique de la zone d'étude





Plusieurs remarques peuvent être tirées à partir des figures :

- Le douar Lalla Aariba est situé sur la rive droite de l'oued.
- L'effet de la crue de 2016 est encore visible sous forme de chenaux et dépôt d'alluvions qu'on peut les observer au voisinage de la digue (Figure 4, image 2).
- La digue mesure 410 mètres de longueur avec une hauteur variable qui ne dépasse pas 2 mètres et se présente sous forme de remblai de terre (Image 2).
- Le douar Lalla Aariba se situe dans une plaine au pied des collines qui consistent l'origine de l'oued du même nom. (Figure 5).





Chapitre 2 : Etude Hydro-pluviométrique

L'étude hydrologique est l'étape cruciale de l'étude de protection contre les inondations, les résultats de cette étape vont jouer un rôle important en termes de crédibilité de la modélisation hydraulique.

1-Morphologie du bassin versant :

Le bassin consiste une enceinte pour les eaux de précipitation. Or, la superficie, périmètre et autres facteurs physiques jouent un rôle essentiel au niveau de la réponse hydrologique du bassin, par exemple un bassin de petite surface agit rapidement face à une averse.

1-1- Délimitation du bassin versant :

Pour délimiter le bassin versant alimentant l'oued Lalla Aariba nous nous sommes basés sur deux cartes topographiques d'échelle 1/50000 (Figure 5) et un modèle numérique de terrain (MNT) d'une résolution de 12,5 mètres tiré à partir du portail de données du satellite Alaska pour l'imagerie de la Terre par télédétection

https://vertex.daac.asf.alaska.edu/.

Grâce aux outils d'analyse hydrologique, le logiciel ArcGIS permet une automatisation des processus suivants : la délimitation du bassin versant ; tracé du réseau hydrographique ; mesure de surface et périmètre ; calcule de pente du bassin et cours d'eau ; classification d'altitude selon des tranches.

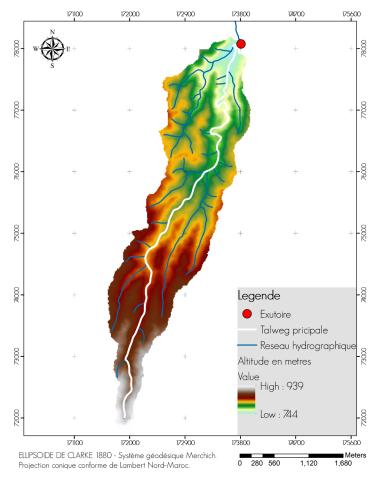


Figure 6 : modèle numérique de terrain du bassin versant Lalla Aariba



1-2- Lithologie du bassin versant :

La lithologie du substratum influe non seulement l'écoulement sous terrain mais aussi le ruissellement. Un terrain rocheux par exemple aura une vitesse de montée de crue importante donc des crues violentes. Un terrain perméable amortit la crue par l'absorption d'une partie des eaux ruisselées.

Le bassin versant Lalla Aariba est formé dans sa grande majorité par des marnes roses, argilites sableuses avec des conglomérats à éléments calcaires à la base. Des calcaires et marnes à niveaux siliceux contenants des fossiles affleurent au niveau des crêtes situées à l'extrémité sud du bassin versant.

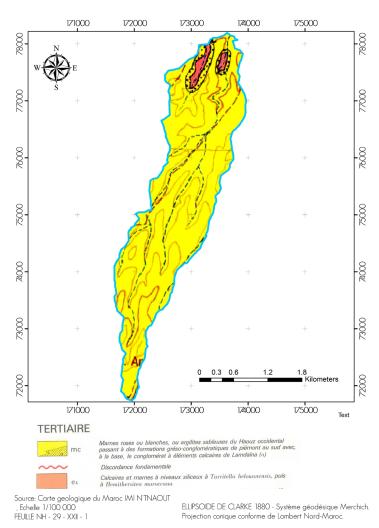


Figure 7: Carte de la géologie du bassin versant LALLA AARIBA

1-3- Caractéristiques géométriques du bassin versant :

• Superficie et périmètre :

La superficie et le périmètre d'un bassin versant jouent un rôle primordial dans son étude. Leur influence se manifeste dans la nature de la relation entre le débit et le temps, un petit bassin versant réagit très vite à une averse.

Pour le bassin versant Lalla Aariba, il s'étale sur une superficie de 6,10 Km² et un périmètre de 15,7 Km.





• La forme :

Différents indices morphologiques peuvent être utilisés pour caractériser les écoulements et comparer les différents bassins versants. Par exemple, l'indice de forme de Gravelius K_G est un indice de compacité défini comme la relation entre le périmètre d'un bassin versant et le périmètre d'un cercle de même surface. Il est exprimé par l'équation suivante :

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

Avec K_G est l'indice de forme de Gravelius, A la surface du bassin versant km^2 et P le périmètre du bassin versant km.

L'indice de forme de de Gravelius du bassin LALLA AARIBA est 1,7 une valeur qui caractérise les bassins de forme allongée.

• Le relief :

L'influence du relief l'écoulement est facile à comprendre car un certain nombre de paramètres hydrométéorologiques varient fonction de l'altitude (précipitations, température. etc.) et de morphologie du bassin versant. Par exemple, la pente influe sur la vitesse d'écoulement. Le relief peut être déterminé à l'aide d'indices ou de courbes caractéristiques telles que la courbe hypsométrique qu'on réalise à partir d'une carte des tranches d'altitude.

La figure 8 représente les différentes tranche d'altitude et leurs pourcentages :

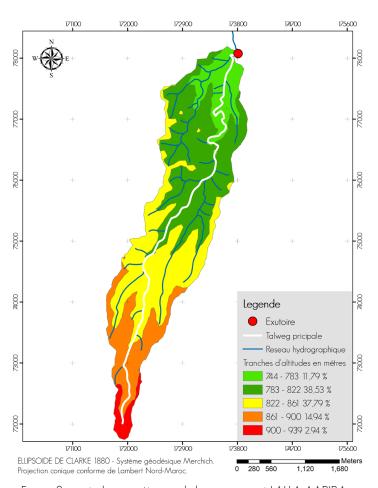
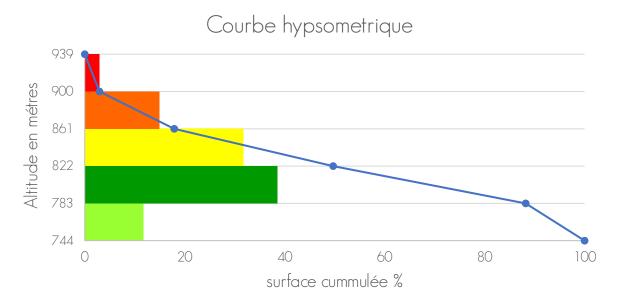


Figure 8 : carte hypsométrique du bassin versant LALLA AARIBA



• La courbe hypsométrique :

Une courbe hypsométrique fournit une vue globale de la pente d'un bassin versant et donc du relief. Cette courbe représente la distribution de la surface du bassin versant en fonction de son altitude.



Graphique 1 : Courbe hypsométrique du bassin versant LALLA AARIBA

Le bassin versant Lalla Aariba est caractérisé par une pente faible, altitude maximale de 939 mètres et une altitude minimale de 744 mètres et la majorité de la surface du bassin (76%) est occupé par des terrains d'altitude qui varie entre 783 et 861 mètres.

• Le rectangle équivalent :

Le concept de rectangle équivalent, ou rectangle de Gravelius, est utilisé dans le calcul de la pente dans un bassin versant. Cette méthode, introduite par Roche en 1963, permet de comparer les pentes de différents bassins versants pour comprendre l'effet des caractéristiques de la pente sur le débit.

Les dimensions du rectangle équivalent sont calculées par ces deux relations :

$$L = \frac{1}{2} \cdot K_G \cdot \sqrt{\pi \cdot A} \cdot \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{2}{\sqrt{\pi} \cdot K_G}\right)^2}\right)$$

$$l = \frac{1}{2} \cdot K_G \cdot \sqrt{\pi \cdot A} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{2}{\sqrt{\pi} \cdot K_G}\right)^2}\right)$$

Avec L est la longueur du rectangle équivalent, I sa largeur, K_G est l'indice de forme de Gravelius, A la surface du bassin versant en km^2 et P le périmètre du bassin versant en km.





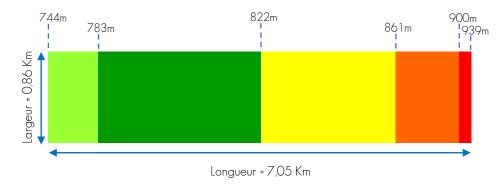


Figure 9 : rectangle équivalent du bassin versant LALLA AARIBA

- Pente du bassin i_m (d'après le rectangle équivalent) :

$$i_m = \frac{\Delta H}{I_c}$$

Le tableau en dessous regroupe les paramètres physiques du bassin versant :

Paramètres	Valeurs			
Surface km²	6,10			
Périmètre km	15,72			
L'indice de forme de Gravelius KG	1,796			
Da atam ala Kanin alam	Longueur (km)	7,05		
Rectangle équivalent	Largeur (km)	0,86		
Longueur du talweg principale (km)	7,57			
Altitude maximale (m)	939	939		
Altitude minimale (m)	744			
Altitude moyenne (m)	825,4			
Dénivelé (m)	195			
Pente moyenne du bassin i _m (m/m)	0,027			
Pente moyenne du bassin MNT (m/m)	0,125			
Pente moyenne du Talweg (m/m)	0,02			

Tableau 2: Les paramètres physiques du bassin versant Lalla Aariba





1-4- Le temps de concentration :

Le temps de concentration est le plus souvent estimé à l'aide de formules empiriques. En théorie, il est défini comme le temps maximal que met une goutte pour parcourir tout le bassin versant jusqu'à son exutoire. Dans les modèles hydrologiques, le temps de concentration est souvent compris comme le temps entre la fin de la pluie nette et la fin du ruissellement direct.

Il existe plusieurs formules pour calculer le temps de concentration Parmi les formules classiques et très générales (donc souvent très approximatives), on peut citer :

Formule Giandotti :

$$T_c = \frac{4.\sqrt{A} + 1, 5.L_R}{0, 8.\sqrt{h}}$$

Tc : temps de concentration (heures) A : surface du bassin versant (Km2)

L_R: longueur du rectangle équivalent (Km)

h : différence entre l'altitude moyenne et l'altitude minimale

• Formule Ventura:

$$T_c=0,13.\sqrt{\frac{A}{I}}$$

Tc: temps de concentration (heures) A: surface du bassin versant (Km2)

I : pente moyenne du bassin versant (m/m)

• Formule Turraza :

$$T_c = 0,0529.A. \sqrt[3]{\frac{L}{S}}$$

Tc: temps de concentration (heures) A: surface du bassin versant (Km2)

L: longueur du Talweg (Km)

S : pente moyenne du Talweg (m/m)





• Formule Kirpich:

$$T_c = \frac{0.01947}{60} \cdot L^{0.77} \cdot S^{-0.385}$$

Tc: temps de concentration (heures)

L: longueur du Talweg (Km)

S : pente moyenne du Talweg (m/m)

• Formule Passini :

$$T_c = 0$$
, 108. $\left(\frac{\sqrt[3]{A.L}}{\sqrt{I}}\right)$

Tc: temps de concentration (heures) A: surface du bassin versant (Km2)

L: longueur du Talweg (Km)

I : pente moyenne du bassin versant (m/m)

• Formule Ven Te CHOW:

$$T_c = 52,64. \left(\frac{L}{\sqrt{S}}\right)^{0.64}$$

Tc: temps de concentration (minutes)

L: longueur du Talweg (Km)

S: pente moyenne du Talweg (m/Km)

• Formule Mockus:

$$T_C = \frac{L^{0.8} \cdot \left(\frac{1000}{82} - 9\right)^{1.67}}{20837 \cdot \sqrt{S}}$$

Tc: temps de concentration (heures)

L : longueur du Talweg (mètres)

S: pente moyenne du Talweg (m/m)





• Formule US Corps :

$$T_C = 16,682. \left(\frac{L.\,S^{-0.25}}{1000}\right)^{0.77}$$

Tc: temps de concentration (minutes)

L: longueur du Talweg (mètres)

S: pente moyenne du Talweg (m/m)

• Formule espagnole:

$$T_C = 0, 3. \frac{L^{0,77}}{S^{0,1925}}$$

Tc: temps de concentration (heures)

L: longueur du Talweg (Km)

S: pente moyenne du Talweg (m/m)

Le tableau au-dessous représente les valeurs de temps de concentration pour chaque formule :

Formule	Temps de concentration (heures)
Giandotti	2,84
Ventura	0,91
Turraza	2,29
Kirpich	1,39
Passini	1,10
Ven Te CHOW	1,21
Mockus	2,91
US Corps	2,78
Espagnole	2,99

Tableau 3 : Temps de concentration calculés

Temps de concentration au niveau du bassin versant Lalla Aariba :

$$T_C = 2,05 \text{ heures}$$

Le temps de concentration obtenue est la moyenne des temps de concentration calculés qui donnent des valeurs comparables et assez avoisinante



2-Etablissement des courbes Intensité – Débit – Fréquence (IDF) pour la station lloudjane :

2-1- Présentation et localisation de la station lloudjane par rapport au bassin versant Lalla Aariba :

La station hydrométrique lloudjane est située sur la rive droite de l'oued Boulaouane à une altitude de 757 mètres. Elle est mise en service le 15 octobre 1974.

La station est chargée de la mesure du débit au niveau de l'oued Boulaouane. L'annonce des crues et la mesure des précipitations journalières maximales.

La distance entre la station et le bassin versant Lalla Aariba est d'environ 6 Km.

Les données enregistrées au niveau de la station s'étalent sur une période de 28 ans, de 1989/90 jusqu'à 2016/17.

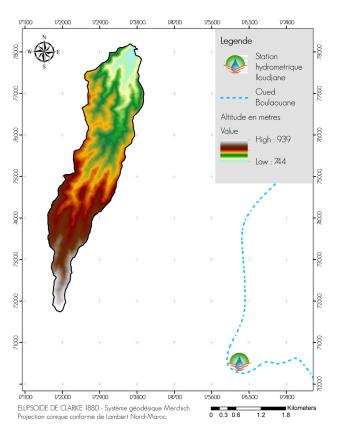


Figure 10 : Carte de la situation de la station lloujdane par rapport au bassin versant Lalla Aariba

2-2- Notion d'averse et d'intensité de pluie :

Le terme "Averse" désigne une série de pluies liées à une perturbation météorologique bien définie. La durée de l'averse peut varier de quelques minutes à plusieurs jours ou plus, et peut affecter quelques kilomètres carrés (Orage) à quelques milliers de kilomètres carrés (pluies cycloniques).

Par conséquence, l'averse est définie comme un épisode de pluie continue qui peut avoir des intensités très différentes. L'intensité moyenne d'une averse est exprimée comme le rapport entre la hauteur de pluie et la durée t de la tempête :





$$i_m = \frac{h}{t}$$

Où:

 $m{i_m}$: intensité moyenne de la pluie [mm/h, mm/min] $m{h}$: hauteur de pluie de l'averse ou lame précipite [mm]

t : durée de l'averse [h ou min]

2-3- Définition et utilité des courbes IDF :

Les courbes IDF sont des courbes donnant la probabilité de diverses intensités de pluie de courte durée pour diverse durées en lieu donné. Il s'agit souvent d'une famille de courbes, dont chacune représente une certaine fréquence d'occurrence ou une certaine période de retour exprime en années. (Figure 10)

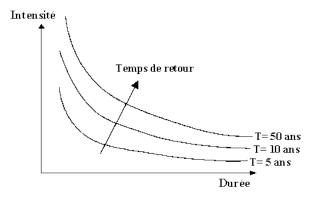


Figure 11 : Représentation schématique des courbes IDF

Les courbes IDF ne sont pas des fins en elles-mêmes, mais elles sont construites dans un but très précis. Ils permettent de :

- Synthétiser les informations de pluviométrie d'une station donnée.
- Calculer de manière succincte le débit d'un projet et d'estimer le débit des eaux de crue par une méthode simplifiée, par exemple la méthode rationnelle.
- Déterminer la pluviométrie de drainage utilisée dans la modélisation hydrologique.





2-4- Construction des courbes IDF:

Les courbes IDF sont construites à partir de l'analyse des données enregistrées dans une station pluviométrique sur une longue période. Ces courbes peuvent être analysées à l'aide des méthodes statistiques.

Différentes formules ont été proposées pour représenter l'intensité d'un événement pluvieux en fonction de sa durée pour une période de retour définie.

La formule la plus générale et la plus utilisée est la suivante :

Formule de Montana

$$i(t) = \frac{a}{t^b}$$

i(t): intensité maximale de la pluie [mm/h]
t: durée de la pluie [minutes ou heures]
a et b: constantes locales, dépendant généralement du lieu qui correspondent aussi aux paramètres des courbes IDF

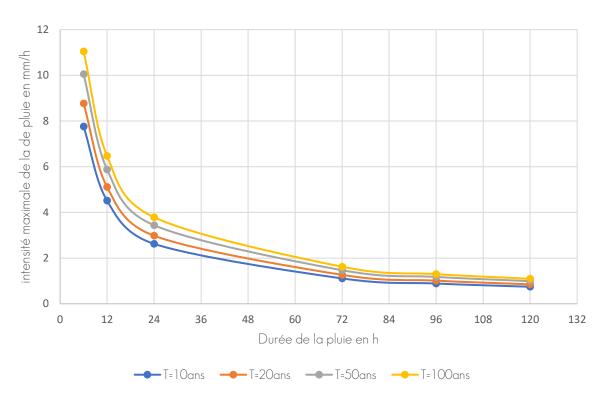
Pour le cas de la station hydrométrique lloudjane, nous disposons de données journalières des précipitations maximales annuelles de 1989 à 2017 pour des durées comprises entre 1 et 5 jours (Annexe).

Nous avons opté pour la méthodologie de travail suivante afin d'établir les courbes IDF et leur paramètre a et b.

- 1- Ajustement des séries de pluie selon une distribution de Gumbel a l'aide du logiciel HyfranPlus afin d'estimer les lames moyennes précipitées maximales de différents temps de retour.
- 2- Transformer les lames moyennes précipitées maximales en intensité moyenne.
- 3- Représenter graphiquement les résultats sous la forme de courbes IDF
- 4- Calculer les paramètres de la formule de Montana pour chaque période de retour à partir des courbes obtenus dans l'étape 3 et représenter les courbes IDF avec la formule de Montana en intégrant les intensités de 12 h, 10h et 6h.



2-5- Courbes IDF et paramètres a et b de la formule de Montana :



Graphique 2: Représentation des courbe IDF (formule de Montana) Station pluviométrique d'Iloudjane 1989-2016

	T=10ans	T=20ans	T=50ans	T=100ans
Montana a	31,50	35,39	40,17	44,07
Montana b	0,782	0,779	0,774	0,772

Tableau 4 : Coefficients a et b de la formule de Montana au niveau de la station d'Iloudjane



3-Estimation des débits de pointe et établissement de l'hydrogramme de crue :

3-1- Estimations des débits de pointe :

La détermination d'un débit de pointe prend en compte plusieurs facteurs traduisant les paramètres d'ordres climatique et morphologique, se rattachant au bassin versant et au cours d'eau drainant. Le débit de pointe correspondant à une période de retour donnée, de l'événement crue, peut être calculé de deux manières :

- Si le bassin versant est équipé d'une station climatique de jaugeage, le débit de pointe est alors estimé statistiquement, en utilisant les lois d'ajustement des valeurs mesurées directement sur le cours d'eau alimenté par le bassin versant à l'étude (hydrologie statistique)
- Si le bassin versant n'est pas équipé d'une station de jaugeage et nous disposons peu de données concernant le bassin versant à l'étude, c'est le cas de notre étude. De ce fait, le débit de pointe est évalué à partir de formules empiriques ou semi empiriques,
 - Formule empirique : Les formules empiriques utilisent des connaissances expérimentales sur les relations existantes entre les débits maximaux d'inondations et certaines caractéristiques du bassin.
 - Formule pseudo-empiriques ou rationnelle: peuvent être distinguées des modèles présentés ci-dessus par leur degré de conceptualisation. Par exemple, ils expriment souvent les débits de pointe d'une ou de plusieurs variables liées aux précipitations maximales pouvant affecter le bassin. Parmi ces formules, les plus connues est sans aucun doute la formule rationnelle et la formule de Burkli-Ziegler.

Le tableau suivant cite quelques méthodes d'estimation de débits de pointe :

Type de formule	Nom de formule
Formule empirique	Fuller II
	Maillet Gauthier
	Hazen-lazarevic
	Francou-Rodier
Formule pseudo-empirique	Rationnelle
	Burkli-Ziegler

Tableau 5 : Quelques méthodes de calcul de débit de pointe





Le bassin versant Lalla Aariba s'étale une surface de 6 Km². Or, L'expérience marocaine dans l'application des formules d'estimation de débits de pointe montre que pour les bassins versant qui ne dépassent pas 10 Km², la formule pseudo-empirique de Burkli-Ziegler ou la formule Rationnelle donnent de bons résultats. En ce qui concerne les formules empiriques la formule Fuller II donne aussi des résultats acceptables.

• Formule de Burkli-Ziegler

$$Q_T = 0.0039. C_r. H_{1h}. A^{0.75}. I^{0.25}$$

 Q_T : débit maximal (en m³/s) de période de retour T

I = pente moyenne du bassin versant (en mm/m).

 H_{1h} : précipitation maximale (en mm) pendant 1 heure

A: surface du bassin versant (en ha)

 \mathcal{C}_r : coefficient de ruissellement, dans notre nous avons une couverture végétale de pâturage, morphologie montagneuse et le sol est de type argileux limoneux alors

 $C_r = 0.42$

Rappelant:
$$\boldsymbol{i(t)} = \frac{h}{t}$$
 et $\boldsymbol{i(t)} = \frac{a}{t^b}$ (formule Montana)

Or
$$H_{1h} = \frac{a}{t^b} \cdot 1$$
 heure dans notre cas $H_{1h} = 31.48$ mm

Coefficient de ruissellement :

Le tableau ci-après donne les valeurs du coefficient de ruissellement, en fonction de la couverture végétale, de la nature du sol et de la pente du terrain naturel :

Couverture végétale	Morphologie	Pente (%)	Sable grossier	Argileux Iimoneux	Argileux compact
	Presque plat	0 à 5	0,10	0,30	0,40
Bois	Ondulé	5 à 10	0,25	0,35	0,50
	Montagneux	10 à 30	0,30	0,50	0,60
Pâturage	Presque plat	0 à 5	0,10	0,30	0,40
	Ondulé	5 à 10	0,15	0,36	0,55
	Montagneux	10 à 30	0,22	0,42	0,60
Culture	Presque plat	0 à 5	0,30	0,50	0,60
	Ondulé	5 à 10	0,40	0,60	0,70
	Montagneux	10 à 30	0,52	0,72	0,82

Tableau 6: Valeurs du coefficient de ruissellement d'après Recommandations pour l'Assainissement Routier du SETRA -RAR 1982





Formule Fuller II

$$Q_T = (1 + a \log T) \left(A^{0,8} + \frac{8}{3} \cdot A^{0,5} \right) \frac{4}{3} \frac{N}{100}$$

 Q_T : débit maximal (en m³/s) de période de retour T

T: période de retour (en ans)

a: coefficient régional fonction du climat, dans notre cas a = 0.8 région aride.

A : superficie du bassin en Km²

N: Coefficient régional variant de 80 à 100 en fonction de relief, dans notre cas N=83

Le tableau suivant représente les débits de pointe calculés au niveau du bassin Lalla Ariba :

	Débits de pointe en m3/s						
	10ans 20ans 50ans 100ans						
Formule de Burkli-Ziegler	20,16	22.,65	25,71	28,21			
Formule Fuller II	19,23	21,80	25,20	27,78			
Moyenne	19,70	22,23	25,46	28			

Tableau 7: Débits obtenus par différentes formules

3-2- Établissement de l'hydrogramme de crue :

Un hydrogramme de crue est un graphique indiquant le débit en fonction du temps à un point donné d'une rivière. La forme de l'hydrogramme de crue a une grande importance dans les simulations hydraulique, la reconstitution de se dernièr repose sur la définition du temps de concentration et du débit de pointe.

Il existe plusieurs formes d'hydrogramme crues qui diffèrent des uns aux autres en termes d'existence de données hydrologiques :

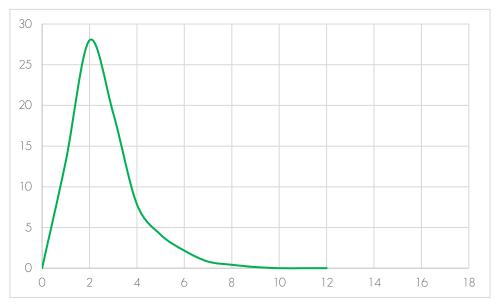
- **Hydrogramme naturel** : obtenu directement à partir des enregistrements de débits au niveau d'une rivière jaugée.
- Hydrogramme synthétique : obtenu en utilisant les paramètres de bassin versant et les caractéristiques des tempêtes pour simuler un hydrogramme naturel.





Hydrogramme unitaire sans dimension SCS: hydrogramme obtenu en utilisant seulement le temps de concentration et le débit de pointe. Il est basé sur un hydrogramme triangulaire simple. L'élaboration de l'hydrogramme de crue repose sur des rapports Q/Qp et t/tp donnés (Annexe)

Dans notre cas on s'intéresse à élaborer un hydrogramme de crue basé sur l'hydrogramme unitaire sans dimension SCS avec un débit de pointe qui correspond à la crue centennale (28 m³/s).



Graphique 3 : Hydrogramme de crue centennale





Chapitre 3 : Simulation hydraulique et protection

La simulation hydraulique a pour but la cartographie des zones inondables à partir des débits de pointe calculés. À la lumière de ces résultats, des plans de protection seront proposés.

1-Simulation hydraulique:

Nous avons opté pour une simulation à l'aide du logiciel HEC- RAS. La simulation réalisée est de type 2D.

1-1- Didacticiel de simulation hydraulique en 2D :

• 1^{ère} étape : Importation de la topographie

Pour modéliser l'écoulement d'eau dans un oued, un support topographique visualisant la structure de l'oued est indispensable. Le support topographique peut être un modèle numérique de terrain haute résolution type LiDAR. C'est le type de support utilisé dans cette étude. On peut aussi utiliser un modèle numérique de terrain d'une résolution modeste (entre 12,5 et 30 mètres) ou un lever topographique de la zone d'étude (les courbes de niveaux du lever topographique doivent être converties en modèle numérique de terrain).

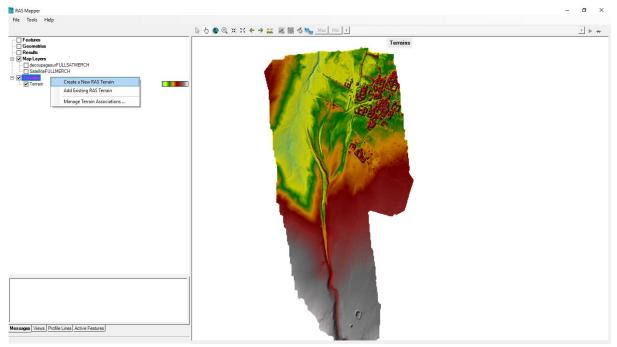


Figure 12 : Prise d'écran au niveau de l'interface d'importation de support topographique





• 2ème étape : Délimitation du milieu d'écoulement et insertion des paramètres relatifs au milieu.

Cette étape consiste à définir la zone où l'eau va s'écouler et identifier le coefficient n de rugosité de Manning qui caractérise le milieu. Dans notre cas n=0.03, Ce coefficient est tiré d'après le tableau des valeurs du coefficient n de Manning (Annexe)

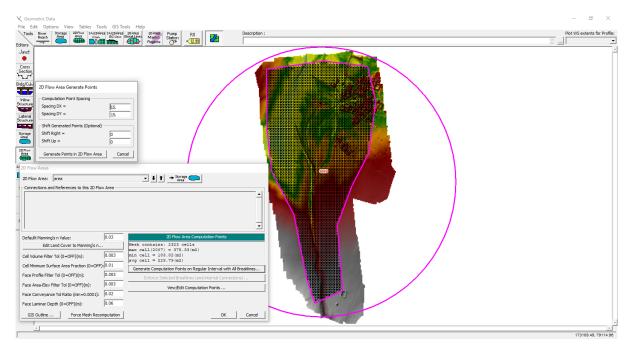


Figure 13 : Prise d'écran au niveau d'interface de délimitation de l'aire d'écoulement et insertion de coefficient Manning

• 3ème étape : Définition des conditions aux limites (Condition amont et condition aval)

Cette étape consiste à définir l'emplacement de l'amont et l'aval au niveau du terrain. Nous insérons ensuite les paramètres suivants pour chaque condition à la limite :

- Condition aval (dowstreamBC): Correspond à la pente moyenne d l'oued au niveau du tronçon aval. Pente égale à 0.05 m/m
- **Condition amont (***upstreamBC***)** : Correspond à l'hydrogramme de crue centennale élaboré dans le chapitre précèdent.





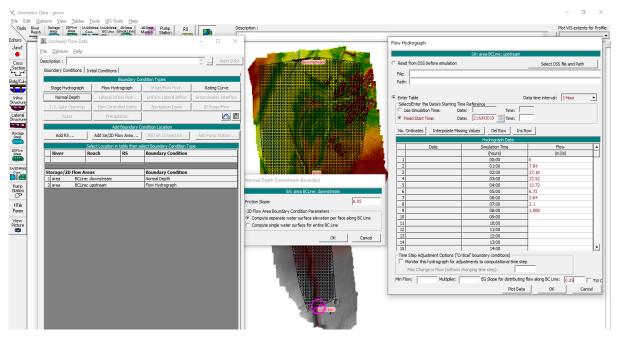


Figure 14 : Prise d'écran au niveau d'interface de définition des conditions aux limites

• 4ème étape : Initiation de la simulation et cartographie de la zone inondable

C'est l'étape finale de la simulation. La zone inondable va être affichée sur le terrain

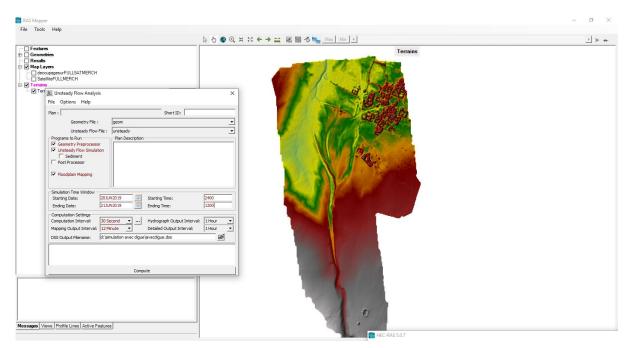


Figure 15 : Prise d'écran de l'interface d'initiation de simulation



1-2- Résultats et commentaires :

En ce qui concerne les résultats nous avons effectué deux simulations : la première représente l'état actuelle (Présence d'une digue de protection) et une deuxième simulation représente l'état lors de la crue de novembre 2016 (sans digue).

> Simulation sans présence de la digue de protection lors de la crue de 2016 :

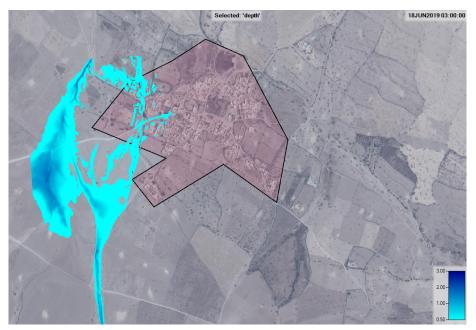


Figure 16 : Résultats de simulation de la zone inondable lors de la crue centennale (Crue 2016)

Simulation en présence de la digue de protection (état actuelle)

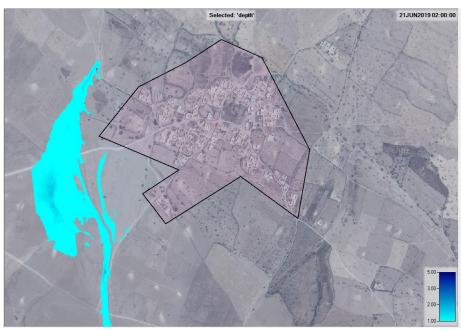


Figure 17 : Résultats de simulation de la zone inondable lors de la crue centennale à l'état actuelle





On remarque que lors du passage de la crue centennale, une bonne partie du douar est débordé par les eaux de l'oued, alors qu'avec la digue actuelle on remarque l'eau déborde encore un peu sur le douar, mais pas comme avant.

2-Plans de protection :

D'après les résultats de la simulation hydraulique et la visite sur site nous pouvons proposer un plan de protection pour résoudre les problèmes d'inondations qui touchent notre zone d'étude

- Tout d'abord il faut refaire la digue de protection au long de la zone inondée, Cette digue, qui a été mise par la commune suite à l'évènement d'inondation, présente quelques défaillances.
- La digue de protection risque toujours d'être emportée par une crue violente
- Un réaménagement de l'accès au douar est nécessaire car les pistes y menant traversent la digue et l'oued.





Conclusion

Le Maroc a connu dans son histoire plusieurs épisodes catastrophiques liés aux inondations. Ces inondations malheureusement touchent les populations en causant dans la plupart des cas, des pertes considérables. La présente étude montre que même un petit bassin de faible pente et de faible dénivelé peut déborder sur une agglomération et causer des dégâts. Les simulations effectuées indiquent justement que sur les zones de plaine soumises à de fortes précipitations, la lame d'eau d'écoulement peut latéralement s'étendre sur de larges zones. La nécessité d'ouvrages de protection est donc confirmée, bien que certains aménagements de protection contre les inondations sont parfois mal dimensionnés et leurs ruptures augmentent la violence des inondations. Un dimensionnement adéquat requiert donc une importance capitale.

Cette étude réalisée au sein de l'agence du bassin hydraulique du Tensift, m'a permis d'appliquer les différentes informations et connaissances acquises au cours de mes études universitaires.

J'espère que ce document contribuera à l'élaboration de nouveaux plans d'aménagement et de protection pour la localité étudiée et bien d'autres.





Bibliographie

Ancey Christophe. 2018. Hydraulique à surface libre. Lausanne : Ecole polytechnique féderale de Lausanne, 2018. p. 234.

André Musy, Christophe Higy. 2011. Hydrology A Science of Nature. New York: CRC Press, 2011. p. 342.

Benoît Hingray, Cécile Picouet , André Musy. 2015. Hydrology A Science for Engineers. New York: CRC Press, 2015. p. 583.

Conseil, ingenierie et developpement. Décembre 2008. Guide de conception des routes rurales. Décembre 2008. p. 321, Guide. 26263/M2/E/Guide-Volume A-A1.

EPFL. Les precipitations. [En ligne] http://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre3/chapitre3.html.

EPFL. Hydrologie Fréquentielle , HF 0201 Construction des courbes IDF. [En ligne] http://hydrologie-2.org/Pages/HF02.htm.

EPFL. Le bassin versant et son complexe. [En ligne] http://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre2/chapitre2.html.

HDID Fatima, RAFIK Hiba,. 2018. Etude hydrologique et simulation hydraulique pour la delimitation des zones inondables au niveau de la localite de tlet ighoud, province d'al youssofia, (maroc), projet de fin d'etude, Licence Ssc. Tech. EE, FST MARRAKECH. 2018. p. 50.

Kaoutar NASSIRI, Raouia ELIDRISSI BOUKHATTARA. 2013. Régime hydro pluviométrique et relation pluie-débit sur le Haut Atlas occidental Exemple du bassin versant de Seksaoua à lloudjane ,projet de fin d'etude, Licence Ssc. Tech. EE, FST MARRAKECH. 2013. p. 58.

Michel Lang, Jacques Lavabre. 5 november 2007. Estimation de la crue centennale pour les plans de prévention des risques d'inondations. Première edition. Versailles : Éditions Quæ , 5 november 2007. p. 232. ISSN :1767-7923 .

Roche Marcel. 1963. Hydrologie de surface. Paris : Gauthier-Villars, 1963. p. 429.

United States Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service. **2007**. *National Engineering Handbook*. 2007. Vol. Part 630 Hydrology.





Annexes:

Année	Pluie annuelle (mm)
1989	244.4
1990	401.5
1991	221.7
1992	146.1
1993	389.4
1994	350.5
1995	390
1996	518.1
1997	380.9
1998	355.4
1999	394.6
2000	229
2001	268.6
2002	329.9
2003	508.3
2004	231.6
2005	405.9
2006	280.5
2007	162.4
2008	482.2
2009	302
2010	314.3
2011	131.5
2012	188.2
2013	262.6
2014	502
2015	248.6
2016	156

Tableau A 1 : Pluviométrie annuelle de la station d'iloudjane





Année	P1jMAX	P2jMAX	P3jMAX	P4jMAX	P5jMAX
1989	(mm) 36.3	(mm) 55.5	(mm) 57.6	(mm) 57.6	(mm) 57.6
1909	58.6	114.5	142.9	150	150
1991	32.5	38.1	38.1	38.1	42.1
1992	30	36.4	36.4	46.2	53.4
1993	24.5	33.8	38.2	46.5	47.1
1994	60	95	95	95	105.5
1995	24	34.2	54.3	54.9	62.6
1996	55.8	71.3	78	82.6	82.6
1997	30.9	33.4	46.3	46.3	49.5
1998	59	67.5	75.8	93.5	96
1999	59.7	63.7	107.2	119	123
2000	50.1	51.6	51.6	51.6	51.6
2001	42.5	43.8	43.8	52.8	52.8
2002	28.4	44.6	45.8	45.8	45.8
2003	55.1	55.1	60.8	63.3	63.3
2004	52.1	54.5	54.5	54.5	69.9
2005	58.1	63.6	63.6	63.6	63.6
2006	50.8	51.3	51.3	51.3	66.2
2007	34.1	41.2	50.3	81.9	81.9
2008	46.3	47.8	52.1	68.9	75.3
2009	26.1	38.2	43.3	44.8	49.8
2010	59.4	89.9	89.9	89.9	89.9
2011	29.8	33.9	33.9	33.9	33.9
2012	20.7	29.9	29.9	34.4	39.6
2013	33.2	34.8	35.6	36	36
2014	50	70	81.4	84.8	84.8
2015	37.2	37.2	39.6	39.6	67.6
2016	29.6	30.4	32.2	34.2	35

Tableau A 2 : précipitations maximales annuelles de 1989 à 2017 pour des durées comprises entre 1 et 5 jours station lloudjane





SCS		
t/tp	Q/Qp	
0	0	
0.1	0.030	
0.2	0.100	
0.3	0.190	
0.4	0.310	
0.5	0.470	
0.6	0.660	
0.7	0.820	
0.8	0.930	
0.9	0.990	
1	1.000	
1.1	0.990	
1.2	0.930	
1.3	0.860	
1.4	0.780	
1.5	0.680	
1.6	0.560	
1.7	0.460	
1.8	0.390	
1.9	0.330	
2	0.280	
2.2	0.207	
2.4	0.147	
2.6	0.107	
2.8	0.077	
3	0.055	
3.2	0.040	
3.4	0.029	
3.6	0.021	
3.8	0.015	
4	0.011	
4.5	0.005	
5	0.000	

Tableau A 3 : rapports t/tp et Q/Qp pour l'hydrogramme unitaire sans dimension

t(h)	Q(m³/s)
0	0
1	7.75
2	24.75
3	21.5
4	11.5
5	5.175
6	2.675
7	1.375
8	0.725
9	0.275
10	0.125
11	0
12	0

Tableau A 4 : Débits de l'hydrogramme de crue centennale





B) Cours d'eau naturels	
1) Propres, rives en ligne droite	0.025
2) Idem 1 avec quelques herbes et pierres	0.030
3) Avec méandres, avec quelques étangs et endroits peu profonds, propres	0.035
4) Idem 3, l'eau à l'étiage, pente et sections plus faibles	0.040
5) Idem 3, avec quelques herbes et pierres	0.033
6) Idem 4, avec pierres	
7) Zones à eau coulant lentement avec herbes ou fosses très profondes	
8) Zones avec beaucoup de mauvaises herbes	

Tableau A 5 : Valeurs du coefficient n de Manning