

Sommaire

Remerciement.....	iii
Liste des tableaux.....	iv
Liste des figures.....	v
<u>Introduction générale.....</u>	1
<u>Chapitre 1 : Présentation de la zone d'étude</u>	2
I. Situation géographique de Sidi Ifni	3
II. Géologie du bassin versant de Sidi Ifni.....	3
III. Climat régional.....	5
1. Climatologie	5
2. Précipitation moyenne annuelles.....	5
2.1. Données disponibles	5
2.2. Précipitations moyennes annuelles.....	5
2.3. Précipitations maximum journalières	6
<u>Chapitre 2 : Caractéristiques physiographiques du Bassin versant de Sidi Ifni</u>	9
Introduction.....	10
I. Propriétés géométriques du bassin versant de Sidi Ifni	10
1. Superficie.....	10
2. Périmètre.....	10
3. Indice de compacité et de Gravius.....	10
4. Rectangle équivalent.....	11
5. Longueur du cours d'eau principal.....	12
6. Indice de pente.....	12
7. Densité de drainage.....	13
II. Caractéristiques topographiques du bassin versant de Sidi Ifni.....	13
1. Relief	12
2. Hypsométrie du bassin versant de Sidi Ifni.....	14
3. Altitudes caractéristiques.....	15
a. Altitude maximale et minimale.....	15
b. Altitude moyenne.....	15
4. Indices de pente.....	16
4.1. Réalisation d'une carte de pente.....	16
4.2. Pente moyenne.....	17
4.3. Indice de pente globale.....	17
4.4. Dénivelé spécifique.....	17
III. Réseau hydrographique.....	18
1. Densité de drainage.....	19
2. Caractéristiques du Bassin versant de Sidi Ifni.....	20
Conclusion.....	20
<u>Chapitre 3 : Approche de détermination de débit de crue.....</u>	21

Introduction.....	22
I. Historique de crues.....	22
1. Inondation du 1985 et 2014.....	22
II. Calcul de temps de concentration par différentes formules empiriques.....	23
III. Etude fréquentielle des pluies journalières.....	24
1. Ajustement des pluies journalières par la loi de Gumbel.....	24
2. Estimation de débit de pointe par les formules régionales.....	25
2.1. Résultats des différentes formules régionales.....	27
3. Ajustement de débit maximum instantané.....	27
4. Transposition à partir des bassins limitrophes.....	28
5. Méthode de gradex.....	30
5.1. Estimation de débit de référence pour période de retour 10 ans.....	31
5.2. Estimation de débit de pointe pour les autres périodes de retour.....	31
Conclusion.....	32
<u>Chapitre 4 : Modélisation hydraulique du tronçon de l’oued de Sidi Ifni.....</u>	33
Introduction.....	34
I. Construction du modèle de l’oued Ifni.....	34
1. Diagnostique de la situation actuelle de oued de Ifni.....	34
2. Rappel du diagnostic de la situation existante du tronçon à modéliser.....	34
3. Géométrie de profils en travers.....	35
5.3. Subdiviser le cours d’eau en profils transversales.....	35
5.4. Choix du coefficient de Manning correspondant à chaque profil.....	36
4. Débit et condition aux limites.....	37
5. Calage et validation.....	37
6. Visualisation et discussions des résultats.....	38
6.1. Profil en long du cours d’eau de la situation existante.....	38
6.2. Vue en 3D du niveau d’eau dans le tronçon.....	39
6.3. Vitesse d’écoulement.....	40
II. Simulation des crues de différentes périodes de retour.....	41
III. Travaux d’aménagement.....	41
1. Installation du barrage de KRAYMA.....	42
2. Présentation de résultat de simulation pour la crue de 10 ans, 50 ans, 100 ans.....	42
3. Implantation du barrage d’OUNDER.....	44
4. Présentation des résultats en présence des deux barrages.....	35
5. Résultat et interprétation.....	46
Conclusion Générale ;.....	48
Liste des références	49

Remerciement

Je remercie Dieu avant tout de m'avoir aidé.

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 rapport.

*Tout d'abord, j'adresse mes remerciements à mon professeur, **Mr EL GAROUANI Abdelkader** qui m'a beaucoup aidé dans ma recherche de stage pour son écoute et ses conseils m'ont permis de cibler mes candidatures.*

*Je tiens à remercier vivement mon maitre de stage, **Mr El MENAOUI**, pour son accueil, le temps passé ensemble et le partage de son expertise au quotidien. Grâce aussi à sa confiance, j'ai pu m'accomplir totalement dans mes missions. Il fut d'une aide précieuse dans les moments les plus délicats.*

*Je tiens également à exprimer nos remerciements à **Mme Naoual RAIS** et **Mr. Raouf JABRANE** d'avoir accepté de juger ce travail.*

*Je remercie également toute l'équipe d'**ABHSM** pour leur accueil, leur esprit d'équipe et en particulier **Mr Oussama Ait Raoui**, qui m'a beaucoup aidé tout au long de mon stage.*

Enfin, je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont conseillé et relu lors de la rédaction de ce rapport de stage : ma famille, mes camarade de promotion.

Liste des figures

Figure 1 : Situation géographique de Sidi Ifni.....	3
Figure 2 : Carte géologique du bassin versant de Sidi Ifni.....	4
Figure 3 : Histogramme des précipitations moyennes annuelles de la région de Sidi Ifni.....	5
Figure4 : Histogramme des Précipitations moyennes mensuelles.....	6
Figure 5: Ourbe des hauteurs cumulées.....	7
Figure 6 : Histogramme des Précipitations maximum journalière.....	8
Figure 7 : Carte de relief du Bassin Versant de Sidi Ifni.....	13
Figure 8 : Courbe hypsométrique du bassin versant de Sidi Ifni	14
Figure 9 : Carte des pentes.....	16
Figure 10 : Schéma synoptique des Bassins Versants de la localité de Sidi Ifni.....	18
Figure 11: Réseau hydrographique du Bassin de l'Oued Ifni.....	19
Figure 12 : Photo prise lors de la crue de janvier 1985.....	23
Figure13 : Photo prise lors de la crue de 2014.....	23
Figure14 : Ajustement par la loi de Gumbel des Pluie journalières de Sidi.....	25
Figure 15: Ajustement de débit instantané de la station d'Assaka par la loi de Gamma.....	28
Figure 16 : Diagnostic de la situation existante.....	35
Figure 17 : Topographie de Sidi Ifni.....	36
Figure 18:Résultat de l'interpolation entre les profils.....	36
Figure 19 : Calage du modèle.....	28
Figure 20 : Profil en long du cours d'eau de la situation existante.....	39
Figure 21: Géométrie en 3D.....	40
Figure 22 : Vitesse d'écoulement en fonction de la distance pour chaque période de retour...40	40
Figure 23 : Délimitation du domaine public hydraulique	41
Figure 24 : Limites des hauteurs d'eau pour la crue de 10ans avec et sans barrage de KRAYMA.....	43
Figure 26: Limite des hauteurs d'eau pour la crue de 50ans en présence et absence du barrage de KRAYMA.....	44
Figure 28: Limite des hauteurs d'eau pour la crue de 100ans en présence et absence du barrage de KRAYMA.....	45
Figure 27: Situation du barrage propos.....	45
Figure 28: Situation du barrage proposé.....	46
Figure 29: Limite des PHE pour la crue de 10 ans, en prenant en considération les 2 barrages.....	46

Liste des tableaux

Tableau 1 : Résultats de calcul sur une série de 1972 à 2015.....	6
Tableau 2 : Hypsométrie du Bassin Versant de Sidi Ifni.....	14
Tableau 3: Classe et type de pente.....	16
Tableau 4. Caractéristiques morphologiques des sous bassins de l'oued Ifni.....	20
Tableau 5: Formules empiriques utilisé pour le calcul du temps de concentration.....	24
Tableau 6 : Récapitulation des résultats du temps de concentration.....	24
Tableau 7 : P _j max pour chaque période de retour.....	25
Tableau 8 : P ₂₄ pour chaque période de retour.....	26
Tableau 9 : Différentes formules d'estimation de débit de pointe.....	26
Tableau 10: Résultats des différentes formules régionales.....	27
Tableau 11 Débits de pointe des différentes périodes de retour obtenus par l'ajustement statistique par la loi de gamma.....	28
Tableau 12: Estimation de débit de pointe et les paramètres de Francou-Rodier pour différentes périodes de retour.....	29
Tableau 13: Moyennes des débits obtenues par les formules de Fuller II et Hazan pour chaque période de retour.....	30
Tableau 14 : Variables de Gumbel U en fonction des différents périodes de retour	32
Tableau 15 : Lane de ruisselée pour différente période de retour.....	32
Tableau 16 : Débit de pointes selon la méthode de gradex pour différentes périodes de retour.....	32
Tableau 17 : Débits de pointes obtenus par la méthode de Gradex.....	32
Tableau 18 : Table de référence.....	37
Tableau 19 : Débits de pointes pour différentes périodes de retour.....	37
Tableau 20 : Laminage du barrage KRAYMA pour différentes fréquences.....	42
Tableau 21: Débits de crues en prenant en considération l'existence du barrage KRAYMA..	42
Tableau 22 : Débits de crues en prenant en considération l'existence des 2 barrages.....	46

Introduction générale

Le Maroc a enregistré pas moins de 35 épisodes d'inondations entre 1951 et 2015. Les crues soudaines sont capables de transformer les lits secs des Oueds en torrents violents et destructeurs, souvent à l'origine 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.

Ce phénomène a commencé à être ressenti d'une façon plus accrue lors des deux Dernières décennies, cela en raison l'occupation croissante des zones vulnérable ainsi que les changements climatiques engendrant de forts orages localisés à l'origine de crues Rapides et violentes. La province de Tiznit ou se situe notre zone d'étude est la meilleure preuve à ce phénomène extrême (inondation de 2014).

L'étude dans ce rapport se penche sur l'impact grave de l'évènement pluvieux de 2014 (la crue) qui s'est produit dans la ville d'Agadir .Parmi les zones les plus affecter on cite notre zone d'étude Sidi Ifni une région de Sud-Ouest du Maroc, la ville de Ifni a été situé parmi les villes les plus touchés par la vague d'inondations enregistrant des pertes humaines, ainsi que la destruction des infrastructures.

C'est dans cette optique vient ce présent rapport qui a pour objectif dans un premier temps d'un modèle hydraulique dans la prévention des crues et l'adaptation des interventions contre les effets des crues dans les zones inondables. Puis dans un deuxième temps défini les schémas d'aménagements projetés au niveau de l'oued Ifni, tout ceci s'inscrit dans un objectif final qui est la protection contre les inondations de la ville de Sidi Ifni dans la province de Tiznit, avant de commencer cette étude on doit définir la zone d'étude et rassembler le maximum d'information à propos du bassin versant de Sidi Ifni donc dans ce cas la première partie du rapport va être consacrer pour les généralités qui vont nous aider par la suite à réaliser l'étude hydraulique du bassin versant de sidi Ifni

Notre étude, vise à délimiter les zones inondables dans la ville de Sidi Ifni qui se situe dans la province de Tiznit et qui est exposé à des inondations provoquées par l'Oued de Ifni par l'utilisation combine du logiciel HEC-RAS ce qui permettra de proposer des aménagements de protection contre ce risque le long des cours d'eau qui traversent cette ville.

Le document est réparti en 4 chapitres. Il commence par des généralités sur les inondations, suivi de 2 chapitres qui traitent les caractéristiques du bassin versant de Sidi Ifni.

Les chapitres 3 et 4 concernent l'étude hydrologique et la modélisation hydraulique d'oued Ifni Et enfin la conclusion générale, et les annexes

CHAPITRE I : PRESENTATION
DE LA ZONE D'ETUDE

I. Situation géographique de Sidi Ifni

Le bassin de Sidi Ifni est situé entre les longitudes 9° 50' et 10° 10' et les latitudes 29° 10' et 29° 28', sur la côte atlantique au sud du Maroc. Il se localise entre le bassin de l'oued Noun au Sud et celui de l'oued Massa au Nord, il est limité au Nord-est par l'Adrar Jema Tamouchcha, au Sud-est par l'Adrar Bou Timezguida et à l'ouest par l'océan atlantique. La ville de Sidi Ifni est située au sud de la ville d'Agadir sur le littoral atlantique. On peut y accéder par la route régionale RR14 depuis TIZNIT.

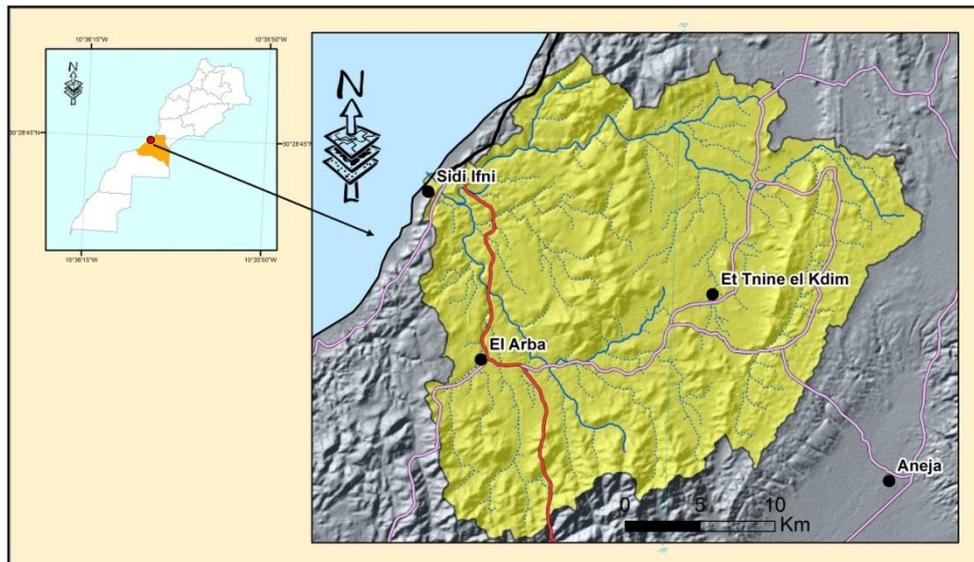


Figure 1 : Situation géographique de Sidi Ifni

Les coordonnées Lambert moyennes de la localité de Sidi Ifni sont présentées dans le tableau suivant :

Localité	X	Y
Sidi Ifni	38060	274630

II. Géologie du Bassin versant de Sidi Ifni

Le bassin de l'oued Ifni s'étend sur la boutonnière d'Ifni dont l'axe passe à proximité de la côte atlantique. Le socle est constitué de migmatites et de roches profondément granitisées, sur lesquelles reposent les rhyolites et les andésites du Précambrien II et III.

Le témoin le plus ancien des formations du Précambrien inférieur est le granite d'Alouzad qui renferme des enclaves de schistes. Le Précambrien moyen est formé de grés et de quartzites.

Le Précambrien Supérieur est constitué de dépôts volcan détritiques: le complexe inférieur qui connaît la mise en place des granites de Mesti, d'Ifni et du Sahel.

Le complexe supérieur, attribué au Précambrien terminal est formé par les granites de Taoulecht, Tyourhza et de celui Mirleft.

Le centre de la boutonnière est formé de roches ignées et éruptives, tandis qu'à l'est viennent en discordance les formations sédimentaires de l'Adoudounien, principalement des dolomies et grès.

Le Quaternaire affleure dans les oueds, sous forme d'alluvions en terrasses ou en placage sur des roches anciennes, sous forme d'un manteau d'altération. Bien que d'un aspect montagneux, le pays est principalement formé de molles collines. Les conséquences hydrogéologiques de la géomorphologie du bassin sont, dans un premier abord, assez simple : sur les rhyolites, les sols épais, la croûte calcaire et les pentes assez fortes concourent à limiter l'infiltration des eaux de pluie au profit du ruissellement. Sur les granites par contre, les pentes faibles, la faible épaisseur des altérations et les arènes de la base des profils favorisent l'alimentation de nappes alluviales ou nappes plus profondes. (*Rapport ABHSM 2007*)

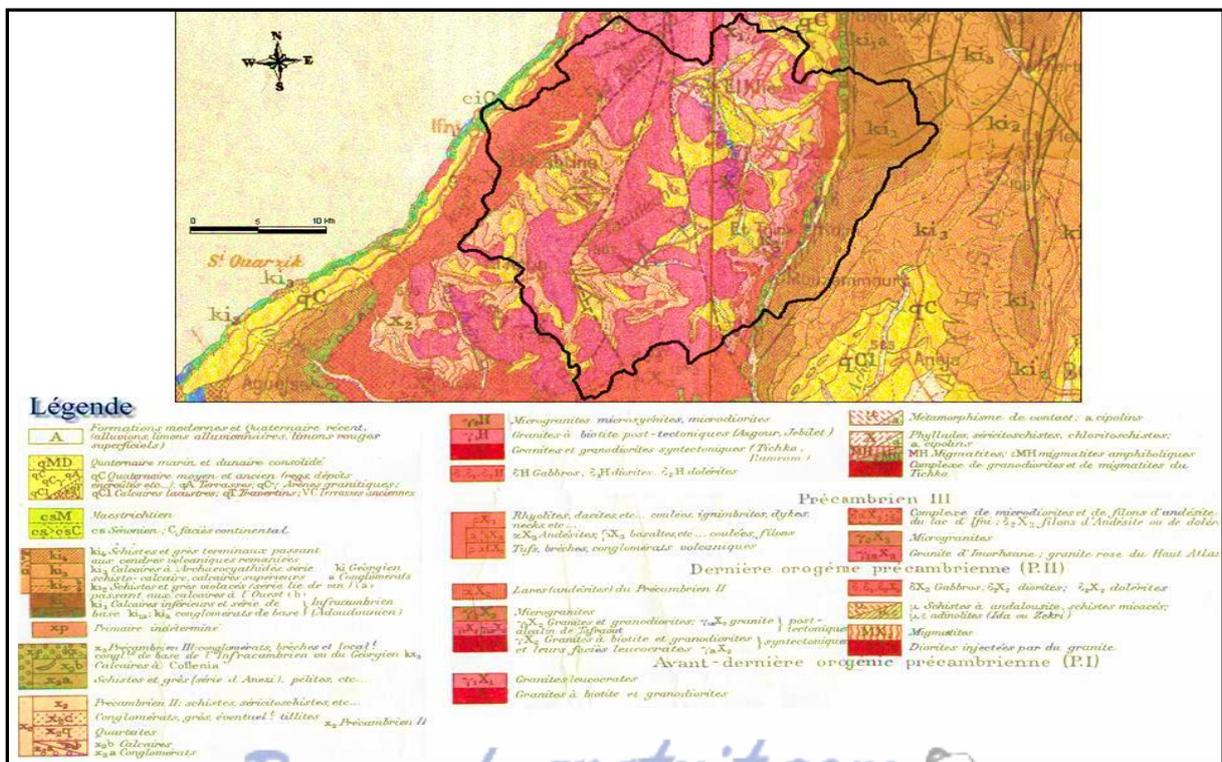


Figure 2 : Carte géologique du bassin versant de Sidi Ifni

III. Climat régional

1. Climatologie

Le climat de Sidi Ifni est semi-aride avec des températures modérées grâce à l'effet adoucissant de l'océan. Les écarts thermiques quotidiens et annuels sont peu importants. Les moyennes annuelles des températures maximales et minimales sont respectivement de 22° et 16°. La précipitation moyenne interannuelle est de 220 mm. ([Rapport ABHSM 2007](#))

2. Précipitations moyennes annuelles

Les précipitations se produisent essentiellement sous forme d'orages brefs et violents, et irrégulièrement réparties au cours de l'année. En général, on peut distinguer une saison pluvieuse d'octobre à avril où la zone reçoit presque 97% du volume total des précipitations et une saison sèche de Mai à Septembre

2.1. Données disponibles

Le bassin de l'oued Ifni dispose d'une seule station, c'est la station d'Ifni. Elle est située entre la ville de Sidi Ifni et la confluence des oueds AssifOunder et Assif El Krimate (X=36.0, Y=273.0, Z=59m).

Des données disponibles, il est pris en compte :

- Les pluies mensuelles sur la période allant de 1972 à 2015;
- Les pluies annuelles sur la même période;
- Les pluies journalières maximales sur la même période

2.2. Précipitations moyennes annuelles

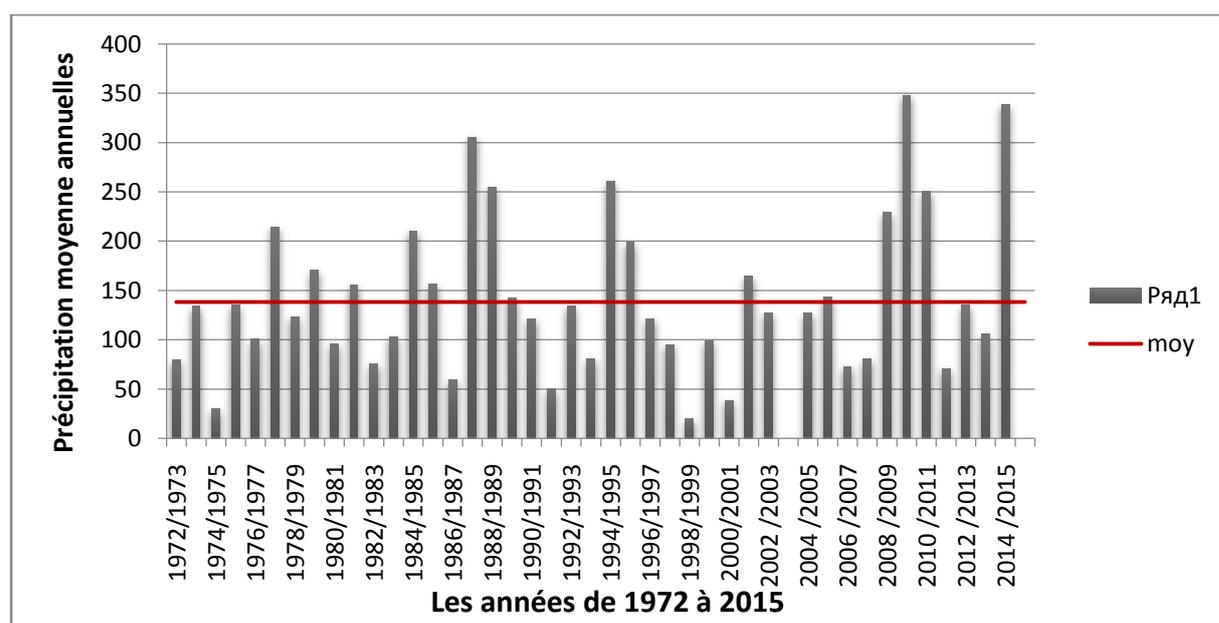


Figure 3 : Histogramme des précipitations moyennes annuelles de la région de Sidi Ifni

L'histogramme représente les pluies annuelles enregistrées à la station entre 1972 et 2015

L'examen de cet histogramme révèle que:

- Les pluies annuelles enregistrées sont très variables d'une année à l'autre;
- La pluie moyenne annuelle sur le bassin est de 138 mm;
- L'année la plus pluvieuse est l'année hydrologique 2010-2011 avec une valeur de 350 mm (2.3 fois la moyenne);
- L'année sèche est 2004-2005 avec une pluviométrie de 0 mm (0.23 fois la moyenne).

2.3. Précipitations moyennes mensuelles

Les données de pluie mensuelle relevées ont été utilisées pour calculer la pluie moyenne, la pluie maximale, l'écart type et le coefficient de variation de chaque mois de l'année et le pourcentage de contribution de chaque mois à la pluie annuelle. Le tableau présente les résultats obtenus sur la série de pluie mensuelle s'étendant de 1972 à 2015

Tableau 1 : Résultats de calcul sur une série de 1972 à 2015

Moy	3.3	6.6	15.6	26.7	24.0	23.4	15.2	8.2	3.2	2.2	3.3	0.9
% An	3	5	12	20	18	18	11	6	2	2	2	1
Max	26.0	48.1	124.0	86.2	99.5	90.8	75.9	45.6	16.4	9.0	46.8	5.6
ET	6.0	11.4	25.3	22.4	31.6	23.2	17.7	11.0	3.7	2.7	8.5	1.3
CV%	1.8	1.7	1.6	0.8	1.3	1.0	1.2	1.4	1.2	1.2	2.6	1.5

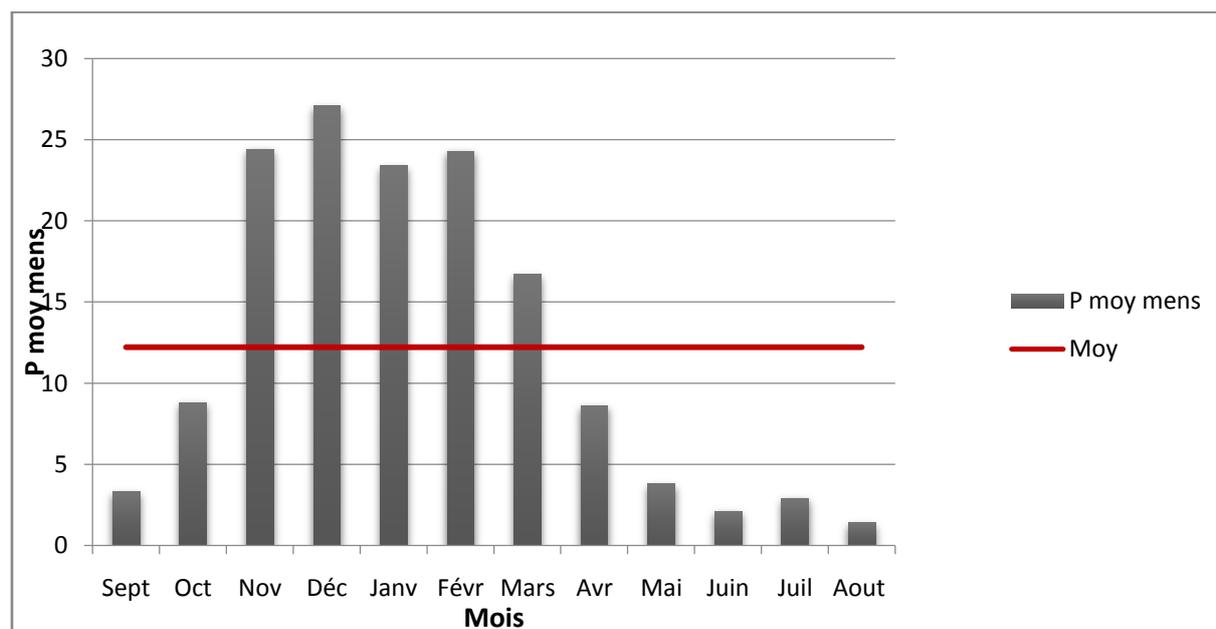


Figure4 : Histogramme des Précipitations moyennes mensuelles

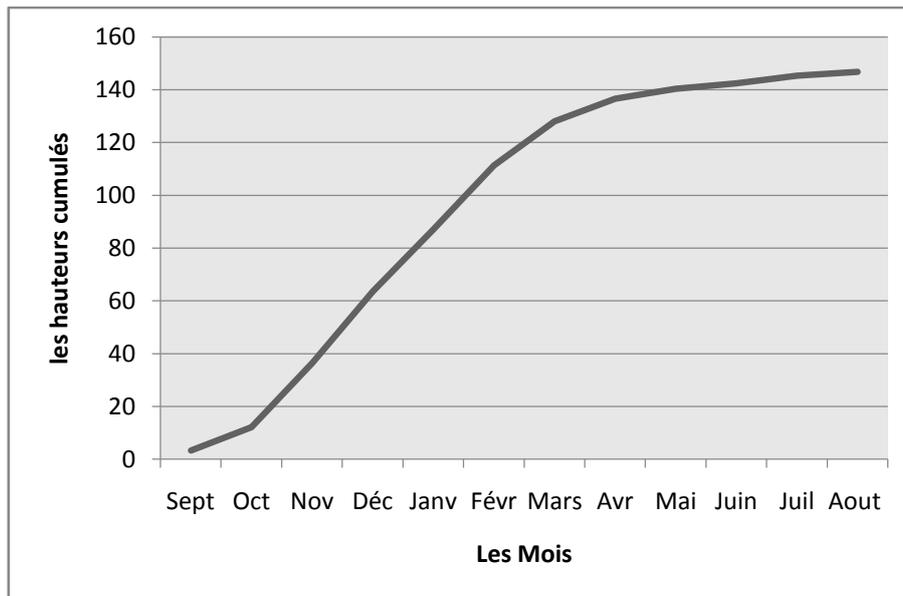


Figure 5: Courbe des hauteurs cumulées

L'examen de l'hyétoqramme de la pluie moyenne de chaque mois montre que:

- La distribution des pluies moyennes est dissymétrique gauche avec un maximum en mois de décembre;
- Le mois de décembre est le mois qui a connu le plus de précipitations, avec une valeur moyenne de 26.7 mm;
- Le mois d'août est le mois le plus sec avec une valeur moyenne de 0.9 mm;

L'examen de la courbe des hauteurs cumulées révèle que:

- Cette courbe présente une forme étalée en S;
- Du mois de novembre au mois de mars, le cumul des précipitations moyennes mensuelles est le plus important de toute l'année;
- Au-delà du mois de mars, le cumul des précipitations mensuelles devient quasi-statique du fait de la rareté des précipitations durant ces mois.

2.4. Précipitations maximum journalières

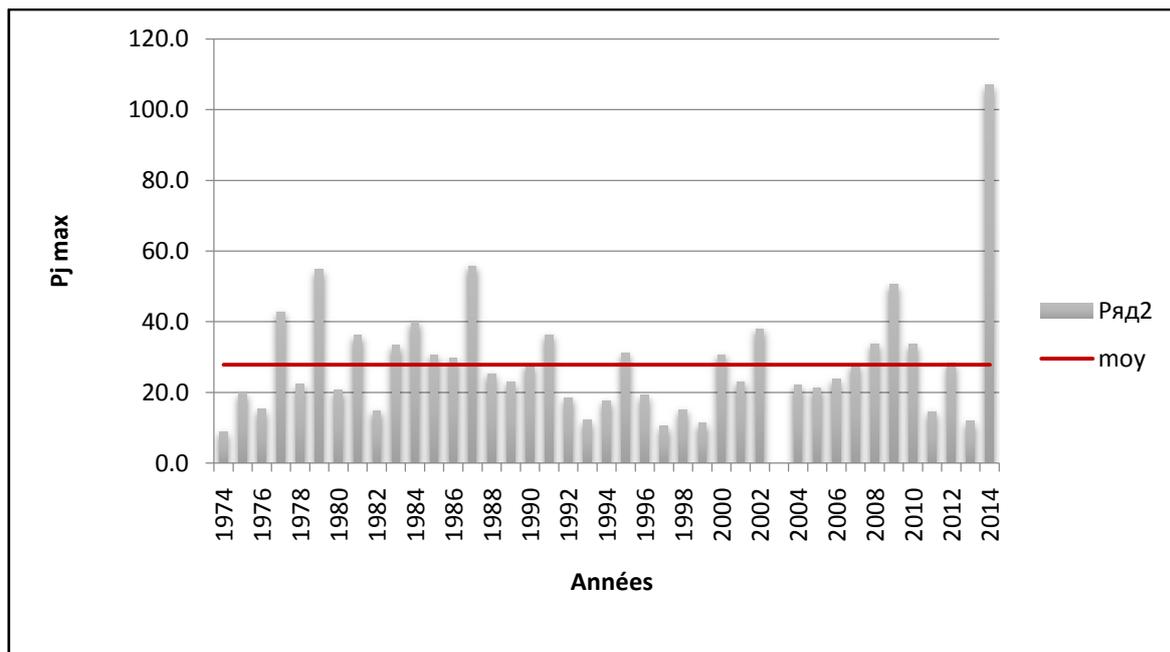


Figure 6 : Histogramme des Précipitations maximum journalières

- Les pluies annuelles enregistrées sont très variables d'une année à l'autre;
- La pluie moyenne annuelle sur le bassin est de 35 mm;
- L'année la plus pluvieuse est l'année hydrologique 2014 avec une valeur de 110 mm (2.3 fois la moyenne);
- L'année sèche est 2003 avec une pluviométrie de 0 mm (0.23 fois la moyenne).

Conclusion

Le relief de la zone côtière d'Ifni, d'une superficie totale de 1.530 km², qui s'étend entre les embouchures des oueds Adoudou et Assaka.

La population du bassin est actuellement de près de 311.600 habitants dont près de 62% en milieu rural. Le bassin se caractérise par un climat aride qui bénéficie dans sa zone côtière de l'influence océanique. Par contre sur les reliefs, les températures peuvent descendre en dessous de 0°C en hiver et dépasser 40°C en été

Pour conclure et d'après ces histogrammes et tableaux on distingue que le climat du bassin est aride avec des températures modérées grâce à l'effet adoucissant de l'océan. Les écarts thermiques quotidiens et annuels sont peu importants. Les moyennes annuelles des températures maximales et minimales sont respectivement de 22° et 16°. La précipitation moyenne inter-annuelle varie de 50 et 350mm et L'évaporation est de 1500 mm/an sur la côte et de 2200mm/an sur les reliefs. Les principales activités économiques dans cette zone sont l'agriculture, l'élevage et le commerce.

CHAPITRE II :
CARACTERISTIQUES
PHYSIOGRAPHIQUES DU BASSIN
VERSANT DE SIDI IFNI

Introduction

Cette partie est consacrée à une description générale du bassin versant analysé afin de donner les indications géographiques, physiographiques, bases indispensables à la compréhension future des mécanismes hydrologiques. En effet l'altitude, la pente et la forme d'un bassin versant reliées à la lithologie renseignent sur le type de réponse hydrologique du bassin.

Les principales caractéristiques physiographiques et géomorphologiques d'un bassin versant étudié ont une importance majeure car elles interviennent, et souvent d'une façon combinée, dans les modalités de l'écoulement superficiel. Les caractéristiques physiques d'un bassin versant influencent fortement sa réponse hydrologique, et notamment le régime des écoulements en période de crue ou d'étiage. Le comportement hydrologique d'un bassin versant est influencé par les facteurs physiographiques qu'on va détailler par la suite, généralement ces caractéristiques vont être estimées à partir de la carte topographique de la région

I. Propriétés Géométriques du Bassin Versant

1. Superficie

Le bassin versant étant l'aire de réception des précipitations et d'alimentation des cours d'eau, les débits vont donc être en partie reliés à sa surface. Celle-ci correspond à l'aire délimitée par l'ensemble des points les plus hauts qui constituent la ligne de partage des eaux. La surface (A) du bassin versant, exprimée en km^2 , peut être déterminée à l'aide d'un planimètre ou mieux par les techniques de la digitalisation.(DUBREUIL 1966)

2. Périmètre

Le périmètre représente toutes les irrégularités du contour ou de la limite du bassin versant, il est exprimé en km. Le contour du bassin est constitué par une ligne joignant tous les points les plus élevés. Il n'influence pas l'état d'écoulement du cours d'eau au niveau du bassin versant. Le périmètre peut être mesuré à l'aide d'un curvimètre ou automatiquement par des logiciels.(DUBREUIL 1966)

3. Indice de compacité et de Gravelius

L'indice de compacité (KG) renseigne sur la forme du bassin versant qui a une grande influence sur l'écoulement global du cours d'eau et surtout sur l'allure de l'hydrogramme à l'exutoire du bassin, résultant d'une pluie donnée. Il est établi en comparant le périmètre du

bassin à celui d'un cercle qui aurait la même surface. Il s'exprime par la formule suivante (ROCHE, 1963) :

$$K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Avec :

KG : Indice de compacité de Gravelius

P : Périmètre stylisé en km du bassin versant, mesuré au curvimètre en estompant les irrégularités de la limite réelle qui n'ont aucune influence sur les écoulements.

A : Superficie du bassin versant en km²

Cet indice se détermine à partir d'une carte topographique en mesurant le périmètre du bassin versant et sa surface. Il est proche de 1 pour un bassin versant de forme quasiment circulaire et supérieur à 1 lorsque le bassin est de forme allongée. Un bassin versant circulaire est mieux drainé qu'un bassin allongé.(DUBREUIL 1966)

4. Rectangle équivalent

Le rectangle équivalent ou rectangle de Gravelius correspond à une transformation purement géométrique du bassin versant. Il prend alors une forme rectangulaire tout en gardant la même superficie, le même périmètre, le même indice de compacité et donc par conséquent la même répartition hypsométrique.

Dans ce cas, les courbes de niveau deviennent parallèles aux cotés du rectangle équivalent. La climatologie, la répartition des sols, la couverture végétale et la densité de drainage restent inchangées entre les courbes de niveau. Plus un rectangle équivalent est allongé moins il sera drainé. Les dimensions du rectangle équivalent sont déterminées par les formules suivantes (ROCHE, 1963) :

La longueur L :

$$L = \frac{K_G \sqrt{A}}{1,12} \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_G} \right)^2} \right)$$

La largeur l :

$$l = \frac{K_G \sqrt{A}}{1,12} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_G} \right)^2} \right) = \frac{A}{L}$$

Avec :

KG : Indice de compacité de Gravelius

A : Superficie du bassin versant en km²

L : Longueur du rectangle équivalent en km

l : Largeur du rectangle équivalent en km.

Le tracé des droites de niveau du rectangle équivalent découle directement de la répartition hypsométrique cumulée.(DUBREUIL 1966)

5. Longueur du cours d'eau principal

La longueur du cours d'eau principal (LOG) est la distance curviligne depuis l'exutoire jusqu'à la ligne de partage des eaux, en suivant toujours le segment d'ordre le plus élevé lorsqu'il y a un embranchement et par extension du dernier jusqu'à la limite topographique du bassin versant. Cette distance parcourue est exprimée en km. Si les deux segments à l'embranchement sont de même ordre, on suit celui qui draine la plus grande surface. Autrement dit, c'est la distance mesurée le long du cours d'eau principal depuis l'exutoire jusqu'à la ligne des partages des eaux d'un bassin versant. (DUBREUIL 1966)

6. Pente moyenne

C'est une caractéristique importante des bassins versants qui renseigne sur la topographie du bassin. La pente moyenne du cours d'eau détermine la vitesse avec laquelle l'eau se rend à l'exutoire du bassin donc le temps de concentration. Elle influence sur l'état d'écoulement du cours d'eau au niveau du bassin versant. En effet, plus la pente est forte, plus la durée de concentration des eaux de ruissellement dans les affluents et le cours principal est faible, par conséquent le bassin réagira d'une façon rapide aux averses. (DUBREUIL 1966)

La pente moyenne est alors donnée par la relation suivante :

$$S = \frac{l}{A} \sum Di$$

Avec :

S : Pente moyenne du bassin versant en %

l : Largeur du rectangle équivalent en km

Di : Différence de niveau entre deux courbes de niveau consécutives

A : Surface élémentaire en km². Pour le calcul de cette pente moyenne, on ne tient pas compte de la forme de la courbe hypsométrique.

Cette dernière correspond à la superficie entre les courbes de niveau en fonction des altitudes correspondantes. Elle donne une idée sur la pente et l'allure du relief

7. Densité de drainage

La densité de drainage est la longueur totale du réseau hydrographique par unité de surface du bassin versant. Elle correspond pour un bassin versant donné de superficie A comme étant la longueur totale des cours d'eau d'ordre quelconque sur la superficie totale A du bassin versant. La densité de drainage est exprimée en km/km^2 ou en km^{-1} . (DUBREUIL 1966)
Elle est donc :

$$D_d = \frac{\sum L_i}{A}$$

Avec :

L_i : Longueur totale des cours d'eau en km

A : Superficie du bassin versant en km^2

II. Caractéristiques topographiques du bassin versant

1. Le relief

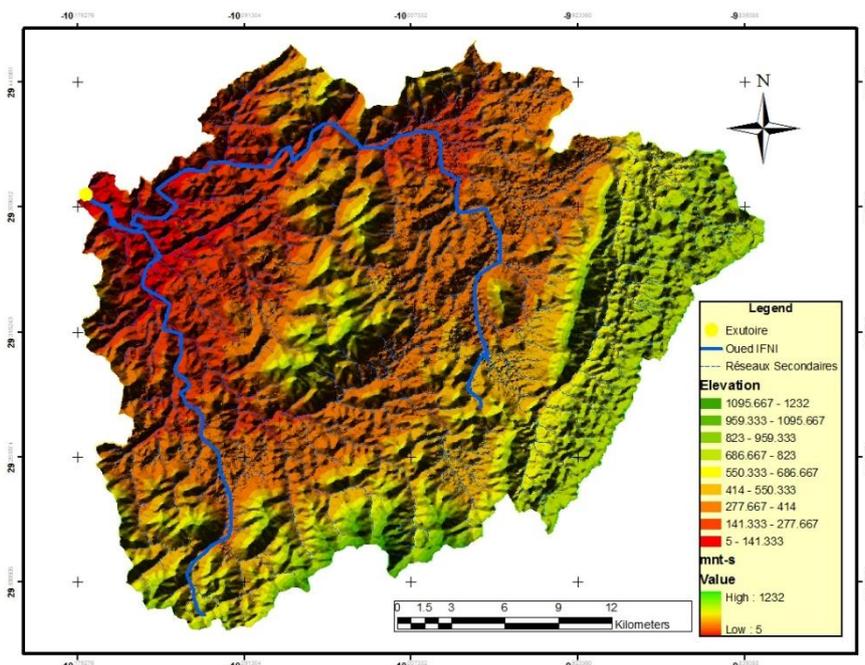


Figure 7 : Carte de relief du Bassin Versant de Sidi Ifni

L'altitude moyenne du bassin versant de l'Oued d'Ifni est de 618 m avec un sommet à 1232m et un exutoire à 5 m. L'amont de ce bassin s'élargit progressivement en allant vers l'aval Ce qui permet de constater qu'on a un bassin versant est Circulaire.

1. Hypsométrie du bassin versant

La caractérisation du relief du bassin a été faite à partir de la courbe hypsométrique de l'étude hydrologique du bassin versant de l'oued Ifni. Le tableau 4 présente la répartition, en % et en km², des superficies en fonction de l'altitude

Tableau 2: Hypsométrie du Bassin Versant de Sidi Ifni

Altitude (m)	Superficie entre les courbes		% au-dessus de la limite inférieure
	en km	en %	
1200-1250	1	0.15%	0.15%
1100-1200	1	0.15%	0.30%
1000-1100	3	0.44%	0.74%
900-1000	5	0.74%	1.48%
800-900	15	2.22%	3.70%
700-800	75	11.09%	14.79%
600-700	105	15.53%	30.33%
500-600	35	5.18%	35.50%
400-500	110	16.27%	51.78%
300-400	145	21.45%	73.22%
200-300	135	19.97%	93.20%
100-200	30	4.44%	97.63%
23-100	16	2.37%	100.00%

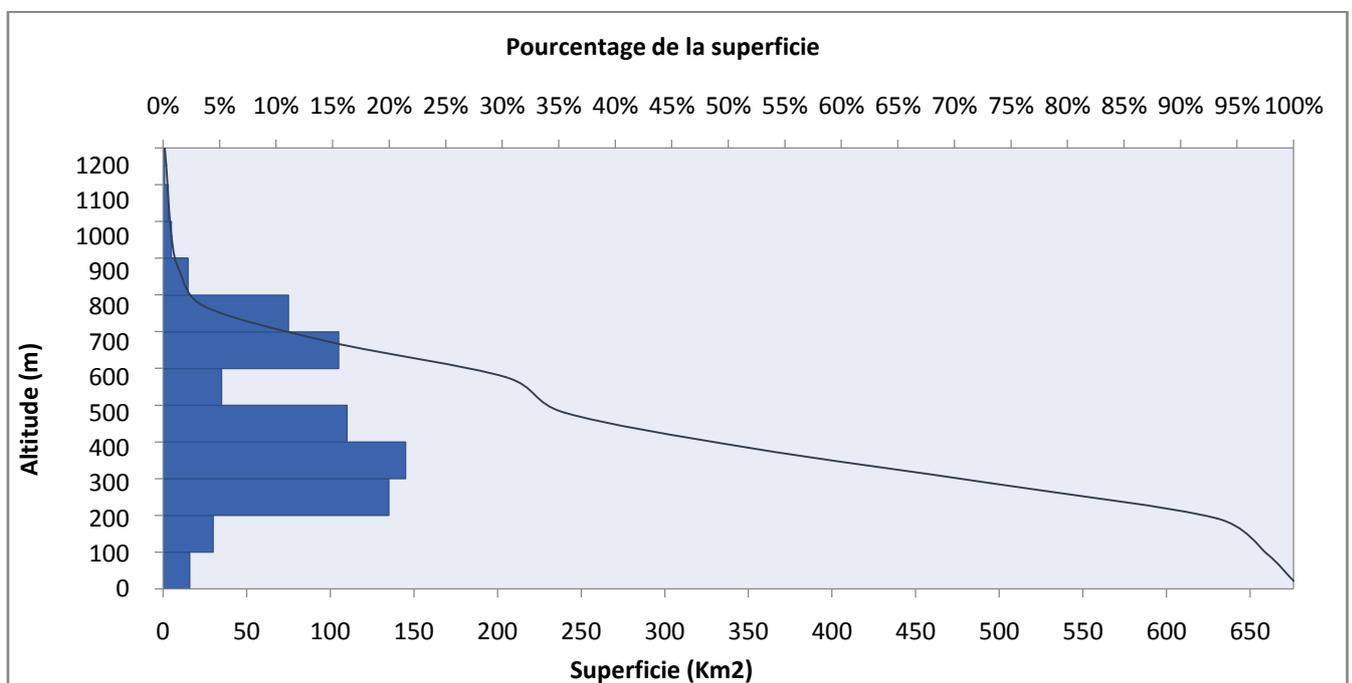


Figure 8 : Courbe hypsométrique du bassin versant de Sidi Ifni

L'examen de ces données montre que :

- La quasi-totalité du bassin est située au-dessus de 23 m d'altitude et plus de 70% de sa surface se situe au-dessus de 300 m.
- Entre 300 et 800 m, l'allure régulière de la courbe hypsométrique dénote une certaine homogénéité de répartition des différentes tranches d'altitude avec une légère déviation entre 500 et 600 m.
- L'altitude maximale : $H_{\max} = 1250$ m.
- L'altitude minimale : $H_{\min} = 23$ m.
- L'altitude médiane : $H_{\text{med}} = 400$ m.
- L'altitude moyenne: $H_{\text{moy}}=452$ m.
- L'altitude la plus fréquente: $H=350$ m.
- L'altitude limitant 5 % de la surface la plus élevée : $H_5 = 780$ m.
- L'altitude limitant 5 % de la surface la plus basse : $H_{95} = 170$ m.

Toutes ces informations vont nous permettre à dégager plusieurs informations

2. Altitudes caractéristiques

2.1. Altitude maximale et minimale

Ces altitudes sont obtenues directement à partir de la carte topographique, ces données sont importants et vont être utilisées par la suite dans la détermination de la pente.

- **Alt max=1250 m**
- **Alt min= 23 m**

2.2. Altitude moyenne

L'altitude moyenne est déduite à partir de la relation suivant :(DUBREUIL 1966)

$$H_{\text{moy}} = \sum \frac{A_i \cdot h_i}{A}$$

Avec :

H_{moy} : altitude moyenne du bassin [m] ;

A_i : aire comprise entre deux courbes de niveau [km²] ;

h_i : altitude moyenne entre deux courbes de niveau [m] ;

A : superficie totale du bassin versant [km²].

3. Indices de Pente

Il est important de connaître le maximum des informations à propos de la pente et ces indices cette dernière nous renseigne sur le Ruissèlement, plus la pente est élevée plus l'eau ruissèle rapidement on peut citer le cas des zones montagneuses où on rencontre des crues importantes, par contre pour le cas d'une faible pente on aura un faible ruissèlement.

3.1. Réalisation d'une carte de pente

La carte des pentes est déduite à partir du Modèle Numérique de Terrain (MNT), à partir de cette carte on peut déduire si on a des pentes faibles, moyennes ou bien fortes

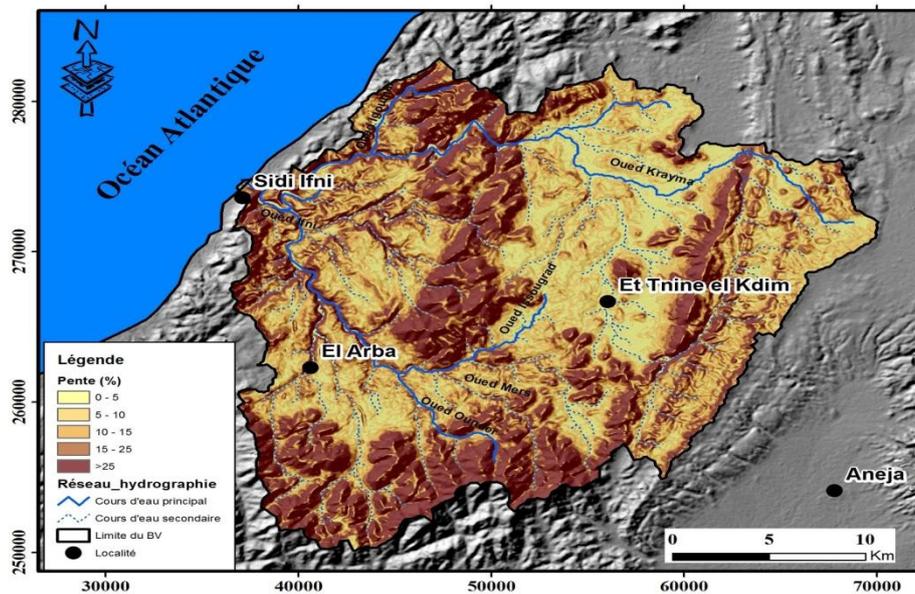


Figure 9 : Carte des pentes

A partir de la carte des pentes on peut déduire que les pentes au niveau du bassin versant de Sidi Ifni varient en majorité entre abrupte et extrême (10 à 25%).

Tableau 3: classe et type de pente

Classe	Type de pente
1	Nulle à faible 0-5 %
2	Modérée 5-10%
3	Abrupte 10-15 %
4	Très abrupte 15-25 %
5	Extrême > 25 %

3.2. Pente moyenne

La pente moyenne renseigne sur la topographie du bassin, donc elle influence sur l'état d'écoulement du cours d'eau au niveau du bassin versant.. Les pentes fortes à très fortes peuvent produire des écoulements de nature torrentielle qui sont à l'origine des crues dévastatrices(DUBREUIL 1966)

On l'estime par la relation suivante :

$$P_{\text{moy}} = 2 H_{\text{moy}}/L$$

Avec :

P moy : pente moyenne du bassin ;

H moy : l'altitude moyenne du bassin(m) ;

0L : longueur du cours d'eau principal en (Km).

3.3. Indice de pente globale

L'indice de pente globale sert à classer le relief du bassin versant et va être utilisé pour déduire le dénivelé, L'indice de pente influence la réponse du bassin au niveau du volume écoulé ainsi que le débit écoulé et la durée de l'écoulement (DUBREUIL 1966), on l'estime par la relation suivante :

$$I_g = \frac{Du}{Leq}$$

Avec :

Du : H5% - H95%

H5%: altitude correspondant à 5% de la surface totale du bassin au dessus

H95%: altitude correspondant à 95% de la surface totale du bassin versant

Ig : indice de pente globale ;

Leq : longueur du rectangle équivalent.

3.4. Dénivelé spécifique

Il permet la comparaison des pentes de bassins de taille différente se fait en se basant sur le dénivelé spécifique qui dérive de la pente globale en la corrigeant de l'effet de la surface.(DUBREUIL 1966)

$$D_s = I_g \sqrt{A}$$

Avec :

Ds= dénivelée spécifique ;

A= surface du bassin versant (Km²) ;

I_g =indice de pente globale

III. Réseau hydrographique

L'Oued Ifni est formé par la confluence, à 5 Km en amont de l'embouchure de l'oued sur la côte atlantique, de l'AssifOunder et de l'Assif El Krimate.

L'AssifOunder, avec une longueur de 27 Km, draine la partie Sud du bassin. Il prend naissance dans la limite sud des versants de la chaîne de l'Adrar Bou Timezguida.

L'Assif El Krimate, draine la partie Nord du bassin, il présente une longueur de 47 Km. Il prend sa source sur la limite Est, sur le versant de la chaîne de l'Adrar Tammouchcha.

Ces deux oueds divisent le bassin en trois sous bassins, le sous bassin de l'Oued Ifni, de l'AssifOunder et de l'Assif El Krimate

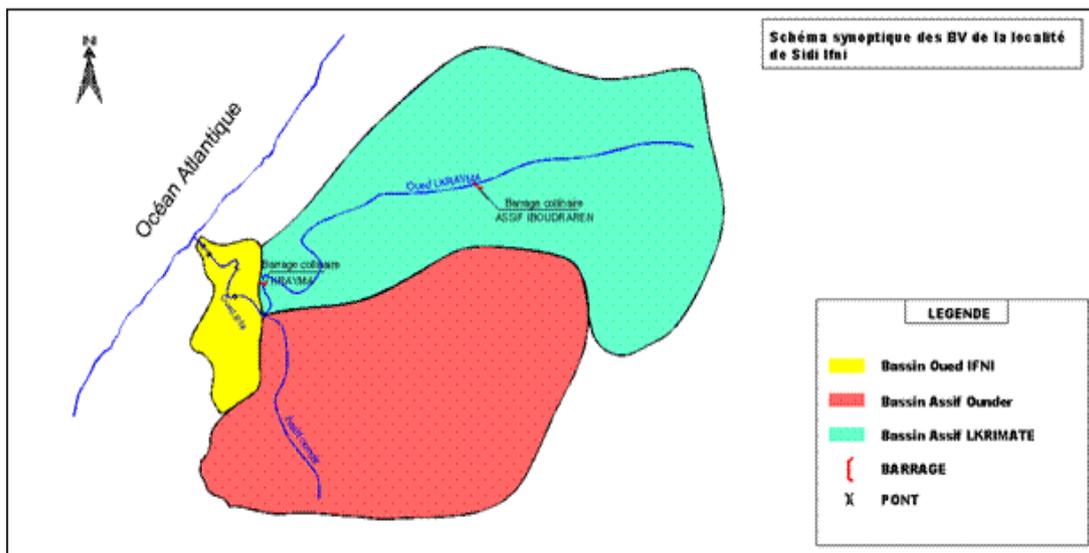


Figure 10 : Schéma synoptique des Bassins Versants de la localité de Sidi Ifni

Le tableau suivant résume les caractéristiques morphologiques de chaque sous bassin.

Tableau 4 : Caractéristiques morphologiques des sous bassins de l'oued Ifni

Sous bassin	N° BV	Superficie (km ²)	Périmètre (km)	Indice de Gravelius	Longueur équivalente (Km)	Largeur équivalente (Km)
Oued Ifni 1	BV1	10	17	1,52	7,17	1,39
AssifOunder	BV2	412	103	1,43	42,12	9,78
Assif El krimate	BV3	284	115	1,93	52,54	5,41
Oued Ifni	BV4	706	133	1,41	53,92	13,09

La figure représente les composantes du bassin versant de l'oued Ifni. Le réseau hydrographique du bassin est en forme arborescente très condensée dans le sous bassin d'El Krimate.

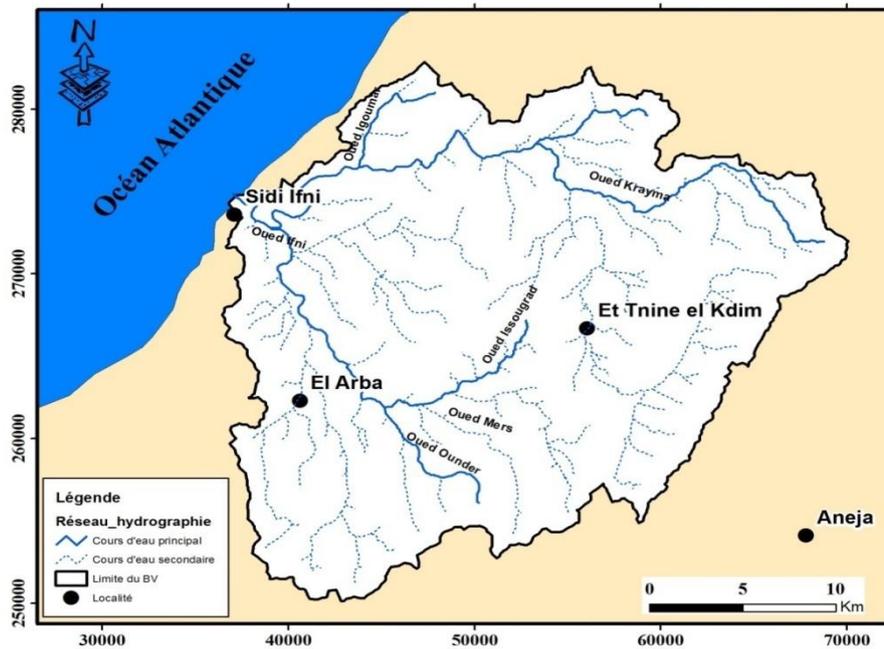


Figure 11: Réseau hydrographique du Bassin de l'Oued Ifni

1. Densité de drainage

La densité de drainage (D_d) est définie comme le rapport entre la longueur totale du réseau hydrographique (L_i = longueur de tous les cours d'eau, pérennes ou temporaires) et la superficie du bassin versant. (DUBREUIL 1966)

$$D_d = \sum \frac{L_i}{A}$$

Avec :

L_i : longueur totale des cours d'eau en Km

A : superficie du bassin versant en Km^2

IV. Caractéristiques du Bassin versant de Sidi Ifni

Les caractéristiques morphologiques du bassin versant de Sidi Ifni sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 4: Caractéristiques du Bassin versant de Sidi Ifni

La superficie (Km2)	685
Le Périmètre (Km)	148.41
Indice de GraviusKc	1.6
La largeur du rectangle équivalent (km)	11.38
Lalongeur du rectangle équivalent (Km)	62.36
La pente moyenne (m/m)	16.98
La densité de drainage (km)	0.07
Altitude maxi (m)	1250
L'altitude min (m)	23
L'altitude moy (m)	425
H 5%	780
H 95%	170
L'indice de pente global (m/m)	0.009
Le dénivelé spécifique	0.23

Conclusion

L'analyse de ces différents paramètres physiques et géomorphologiques (lithologiques) permettra une meilleure compréhension des causes des variations des régimes hydrologiques du bassin versant étudié et par conséquent sa contribution dans la genèse des crues. Et l'interaction détermine la variabilité des phénomènes hydrologiques dans le temps et dans l'espace. Pour cet effet, l'analyse des données physiques et hydro pluviométriques par différents outils statistiques s'est avérée nécessaire pour analyser l'influence des caractéristiques physiques sur la répartition et l'évolution spatio-temporelle des écoulements superficiels afin de mieux comprendre le comportement hydrodynamique au sein des bassins versants étudiés. Une analyse fréquentielle des débits de crue a été effectuée pour déterminer les probabilités d'occurrence et les périodes de retour (prévisions) au niveau des différents bassins étudiés. L'approche méthodologique adoptée est fondée sur diverses méthodes statistiques qui ont été utilisées comme outils et techniques bien adaptés à cette problématique. Ces outils représentent une évaluation préliminaire pour l'étude de tout système hydrologique avant d'établir un modèle de son mode fonctionnement

CHAPITRE III : APPROCHE DE
DETERMINATION DE DEBIT
DE CRUE

Introduction

L'objectif de cette étude est de déterminer les débits de pointe des crues du bassin de Sidi Ifni, Nous utiliserons plusieurs méthodes pour estimer le débit parmi ces méthodes on a la méthode de Gradex, les formules empiriques, ajustement par la loi de gamma et la transposition par la méthode de franco-rodier

Cette étude à deux sous-objectifs:

- Estimer les débits de pointe (Q_p) à l'exutoire du bassin versant étudié, pour des périodes de retour allant de 10 à 1000 ans;
- Estimer les volumes de crues.

La méthode de Gradex est la méthode de référence pour les bassins versants des zones de reliefs et a été utilisée dans de nombreuses études tant que c'est la méthode qui donne des résultats fiables

Le succès de cette méthode de Gradex est en particulier lié à sa (relative) facilité de mise en oeuvre, qui résulte de la simplification extrême du processus de transformation de la pluie en débit.

I. Historique des Crues

1. Inondation du 1985 et 2014

L'enquête des traces des deux crues exceptionnelles qui ont frappé le bassin d'Ifni en 1985 et 2014 ont été menée sur l'ensemble du tronçon étudié: entre la confluence Oued Ounder et Krima et l'embouchure. Une importance particulière a été accordée aux zones à enjeux humains, matériels et fonciers.

Le propos et les témoignages des personnes interviewées ayant vécu la crue ont été disparates et parfois contradictoires. Pour cela, seuls les témoignages qui concordent avec les délaissées de la crue ont été retenus pour délimiter la zone inondée. Un autre handicap, pas moins important, est lié à la sensibilité des riverains à ce genre d'études. Quelques personnes interviewées ont tenté, par peur de perdre leurs propriétés, d'orienter l'enquête de manière à épargner leurs « intérêts », tentant souvent à considérer leurs propriétés à l'abri de risque d'inondations.

Sur la base des traces laissées par la crue et les témoignages des riverains, nous avons établi une reconstitution de la ligne crue. (*Rapport ABHSM : rapport mission IFNI*)



Figure 12 : Photo prise lors de la crue de janvier 1985



Figure13 : Photo prise lors de la crue de 2014

II. Calcul de temps de concentration par les différentes formules empiriques

Le temps de concentration t_c des eaux sur un bassin versant se définit comme le maximum de durée nécessaire à une goutte d'eau pour parcourir le chemin hydrologique entre un point du bassin et l'exutoire de ce dernier.

Le temps de concentration peut être déduit de mesures sur le terrain ou s'estimer à l'aide de formules le plus souvent empiriques([ABHSM rapport mission Gulmim](#)). Nous utilisons celles les plus répandues au Maroc :

Tableau 5: Formules empiriques utilisé pour le calcul du temps de concentration

Formule de Kiripich	$T_c = L^{0,77} * I^{0,385} / (52 * 60)$ <p>Avec :</p> <p>L : longueur du Talweg principal en (m) I : indice de pense en m/m</p>
Formule TurrazaPassini	$T_c = 60 * 0,108 * (L * S)^{0,333} * I^{0,5}$ <p>Avec :</p> <p>L : longueur du Talweg principal en (m) I : indice de pense en m/m S : surface en km²</p>
Formule de Ventura	$T_c = 76,3 * (S/I)^{0,5}$ <p>Avec :</p> <p>I : indice de pense en % S : surface en km²</p>
Formule Giandotti	$T_c = 60 * (4 * S^{0,5} + 1,5 * L) / (0,8 * H^{0,5})$ <p>Avec :</p> <p>L : longueur du Talweg principal en (m) S : surface en km² H : Dénivelé en m</p>
Formule Espagnole	$T_c = 18 * (L/1000)^{0,77} * I^{0,1925}$ <p>Avec :</p> <p>L : longueur du Talweg principal en (m) I : Indice de pente en m/m</p>

Tableau 6 : Récapitulation des résultats du temps de concentration

	Kirpich	Espagnole	Turraza	Ventura	giandotti	Tc Moyenne
			Passini			(mn)
Min	1.865	750.971	1358.838	1289.033	3226.594	1323.936
H	0.031	12.516	22.647	21.484	53.777	22

On conclue que le temps de concentration moyen que prend les eaux pour arriver au exutoire est de 22h ceci est liée à la forme du bassin versant, dans le cas d'un bassin versant circulaire les eaux se ressemblent rapidement vers l'exutoire.

III. Etude fréquentielle des pluies journalières

1. Ajustement des pluies journalières par la loi de Gumel

L'Etude fréquentielle des pluies consiste a ajusté les pluies journalières de la zone de Sidi Ifni par la loi de Gumel afin d'obtenir les pluies précipitations maximum journalière de différentes période de retour

Notre échantillon va être représenté sur la figure 13 ; l'axe des X représente les valeurs de variables de Gumel et l'axe des Y représente les pluies max journalières de la station de Sidi Ifni

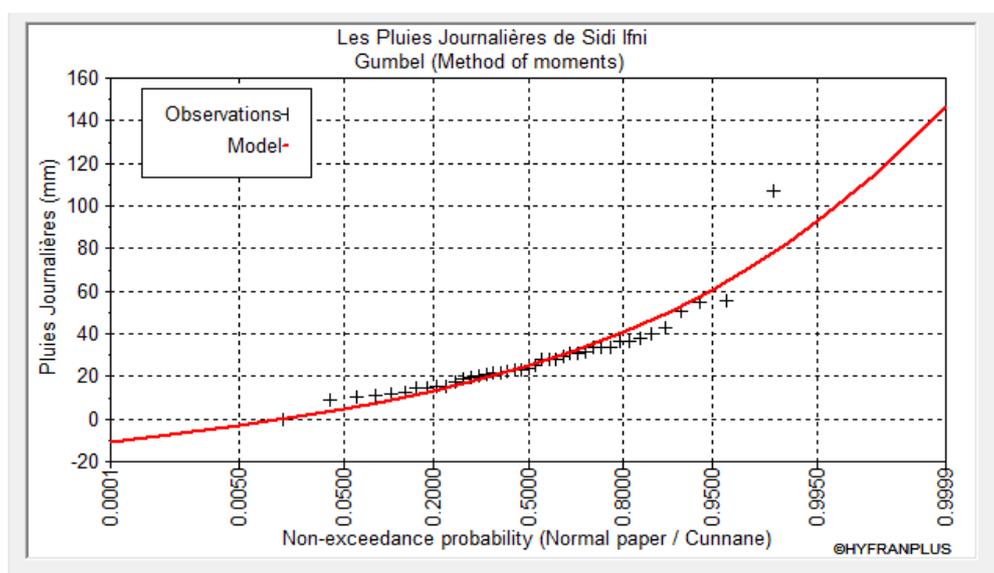


Figure14: Ajustement par la loi de Gumbel des Pluie journalières de Sidi

A partir de la figure 14 on a tiré les précipitations maximales journalières pour différentes périodes de retour.

Tableau 7 : Pj max pour chaque période de retour

période de retour T =	2	5	10	20	50	100	500
probabilité de non dépassement de P =	0.5	0.8	0.9	0.95	0.98	0.99	0.998
variable réduite de Gumbel =	0.37	1.50	2.25	2.97	3.90	4.60	6.21
Pmoy pour période de retour T =	20.0	34.2	43.7	52.8	64.5	73.3	93.6

Les valeurs représentées dans le tableau correspond au valeurs des pluies journalières, donc le passage des pluies à 24h se fera en multipliant ces valeurs par un coefficient égale 1.15 ceci pour tenir compte des erreurs systématiques

Tableau 8 : P_{24} pour chaque période de retour

Période de retour T	10	20	50	100	500	5	2
Pmoy	43.7	52.8	64.5	73.3	93.6	34.2	20
P (24h)	50.255	60.72	74.175	84.295	107.64	39.33	23

2. Estimation de débit de pointe par les différentes formules régionale

Les méthodes de calcul recensées en utilisant différentes formules empiriques tiennent compte de deux facteurs essentiels :

- La taille du bassin versant ;
- Le gradient topographique du bassin versant.

Dans notre cas on travaille avec un bassin versant dont la superficie dépasse les 100ha donc les formules qui vont être utilisé pour estimer le débit de pointe sont données dans le tableau suivant :

Tableau 9 : Différentes formules d'estimation de débit de pointe (Rapport ABHSM : mission Guelmim)

<p>Fuller I</p>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;"> $Q_t(T) = Q(1000) * (1 + a * \log(T)) / (1 + a * \log(1000))$ </div> <p>Q (T) : Débit de pointe en m³/s de récurrence T. a: Coefficient régional variant de 0,8 à 2 pour la partie nord du Maroc, 2 à 3,5 pour le Rif Occidental Nous prenons a = 2</p>
<p>Maillet Gauthier</p>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;"> $Q_t = 2 \times k \times \log_{10}(1 + aH) \times \frac{A}{\sqrt{L}} \times \sqrt{1 + 4 \times \log_{10} T - \log_{10} A}$ </div> <p>Q : Débit maximal en m³/s, temps de retour T = (10, 20, 50, 100 ans). H : Hauteur moyenne annuelle de pluie en m. H a été extraite du poste d'Assaka. La valeur retenue est 148.20mm. A : Superficie du bassin versant en Km². a : Coefficient variant de 20 à 30 (au Maroc, on prend a = 20) L : Longueur du drain principal en Km K : Coefficient variant de 0,50 à 6,00 (au Maroc, on prend k = 2) T : Temps de retour en années (T = 10, 20, 50, 100 ans).</p>

<p>Fuller II</p>	$Q_t = (1 + a * \log (T)) * (S^{0.8} + 8 / 3 * S^{0.5}) * 4 / 3 * N / 100$ <p>Q_t : Débit de pointe en m³/s de récurrence T. T: Période de retour égale à (10, 20, 50 et 100 ans). a: Coefficient variant entre 0,7 et 0,8 au Maroc. Nous adoptons a = 0,8. S: Superficie du bassin versant en Km². N: Coefficient régional pris égal à 80 en plaine, 85 en région accidentée et 100 en montagne. Nous prenons N = 85.</p>
<p>Hazan Lazarevick</p>	$Q_t(1000) = k1 * S^{k2}$ <p>Où : Q (1000) Débit de pointe en m³/s de récurrence 1000 ans S Superficie du bassin versant en km². K1 : 9.86 K2 :0.742</p>

2.1. Les résultats des différentes formules régionales

Tableau 10: Résultats des différentes formules régionales

Méthode	Fuller II	Mallet Gautier	Hazan-LAZAREVICK	Fullet I
Q(10)	520.98	357.23	648.42	537.01
Q(20)	590.68	373.84	735.17	644.78
Q(50)	682.82	394.72	849.85	787.25
Q(100)	752.53	409.81	936.60	895.02
Q(500)	914.37	442.8	1129	1129.35
Q(1000)	984.07	456.37	1 253.02	1253

3. Ajustement de débit maximum instantané

Cette méthode est basée sur autant de données que l'on a d'années à disposition des débits instantanés maximaux annuels. Dans le cas de notre zone d'étude on va ajuster les données par la station la plus proche de Sidi Ifni et qui représente les mêmes caractéristiques de cette dernière, cette station est celle de Assaka, qui se trouve dans le bassin de bas draa il doit être suivies et jaugées régulièrement, cette méthode nous permet d'assurer la fiabilité des résultats. La série des débits enregistrés a été ajustée avec les lois suivantes :

Galton, Gumbel, Frechet, Carré-Gauss, Cube Gauss. Pour chaque loi, nous obtenons un tableau récapitulatif des paramètres statistiques. La loi retenue est celle qui donne le meilleur ajustement sur la base du test χ^2 .

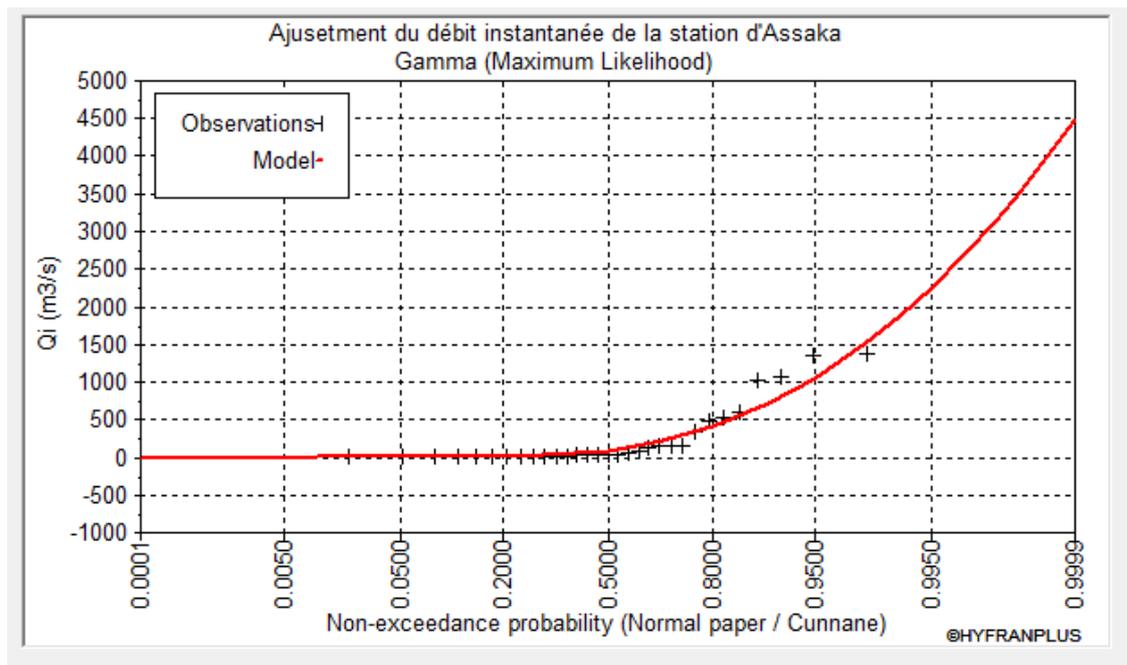


Figure 15 : Ajustement de débit instantané de la station d'Assaka par la loi de Gamma

La loi de Gamma est celle qui s'ajuste le mieux à notre échantillon. Les valeurs des débits et la représentation graphique résultant de cet ajustement sont données dans le tableau suivant :

Tableau 11: Débits de pointe des différentes périodes de retour obtenus par l'ajustement statistique par la loi de gamma

période de retour T=	2	5	10	20	50	100	1000
Qp pour période de retour T =	93.5	409	713	1050	1510	1880	3150

4. Transposition à partir des bassins limitrophes

Afin de pouvoir mieux préciser les débits de pointes et assurer la fiabilité des résultats on a recours à la méthode de transposition par analogie avec un autre bassin versant similaires et limitrophes. Les critères de similitude sont essentiellement la morphologie et le régime pluviométrique.

La station hydrologique précitée est la plus proche de la zone d'étude et dispose d'un historique suffisant pour faire l'objet d'ajustements statistiques.

La transposition des débits des crues déterminées par ajustement aux stations hydrologiques vers les bassins versants de la zone de l'étude se fait grâce à la formule de Francou-Rodier communément utilisée au Maroc. Cette formule s'écrit sous la forme suivante (*Rapport ABHSM : mission Gulmim*)

$$Q_p = 10^{-6} \left(\frac{S}{10^8} \right)^{1 - \frac{K}{10}}$$

Avec :

- Q_p = Débit de pointe m³/s au bassin cible
 S = Surface du bassin cible en km²
 K = Paramètre de Francou-Rodier

Le paramètre K est déterminé grâce à la surface active du bassin d'origine (S') en km², selon la formule suivante (*Rapport AHBSM : mission Gulmim*) :

$$K = 10 \cdot \frac{\text{Log} (S'/100 Q'_p)}{\text{Log} (S'/10^8)}$$

Les valeurs du coefficient K ainsi déterminées permettent de transposer les débits des crues aux bassins actifs cibles.

Les valeurs des débits des crues pour le bassin de référence, ainsi que les paramètres de Francou-Rodier, sont données, en m³/s, dans le tableau suivant :

Tableau 12: Estimation de débit de pointe et les paramètres de Francou-Rodier pour différentes périodes de retour

	K	Qp
T(2ans)	2.58	794.18
T(5ans)	2.74	1 064.89
T(10ans)	3.16	2 300.73
T(20ans)	2.95	1 555.42
T(50ans)	3.05	1 900.40
T(100ans)	3.13	2 174.89
T(1000ans)	3.33	3 175.21

Les débits calculés par les formules de Fuller II et Hazan-LAZAREVICK donnent des valeurs comparable qui peuvent être retenus par contre les deux valeurs obtenus par la formule de Mallet Gautier et celle d'ajustement statistique par la formule de Gamma sont sous-estimés donc on les retient pas.

Donc les débits de pointes considérer pour chaque période de retour et ceux qui sont obtenus par les deux formules Fuller II et Hazan on va faire la moyenne des deux.

Tableau 13: Moyennes des débits obtenues par les formules de Fuller II et Hazan pour chaque période de retour

Méthode	Fuller II	Hazan-LAZAREVICK	Moyenne
Q(10)	520.98	648.42	584.7
Q(20)	590.68	735.17	662.925
Q(50)	682.82	849.85	766.335
Q(100)	752.53	936.6	844.565
Q(500)	914.37	1129	1021.685
Q(1000)	984.07	1 253.02	1118.545

5. Méthode de Gradex

La méthode du GRADEX est une approche hydro-pluviométrique probabiliste du calcul des débits de crues, Pour estimer le Gradex, différentes approches sont possibles. Lorsque la série d'observation est longue (>30 ans) le plus simple et le plus efficace est d'ajuster directement les pluies maximales annuelles à une loi de Gumbel.

La méthode du Gradex permettant d'atteindre deux objectifs principaux :

- l'estimation des débits de pointe (Qp) à l'exutoire du bassin versant étudié, pour des périodes de retour allant de 10 à 1000 ans
- l'estimation des volumes de crues.

5.1. Estimation des débits de référence pour période de retour 10 ans

La fréquence de référence est comprise entre la fréquence décennal et vingtennale, selon la perméabilité du sol, les débits de référence qui vont être utilisé pour déterminer débit de pointe sont ceux qui sont la moyenne des débits calculé par les méthodes empiriques

Après la détermination du débit de Crue on va déduire le volume d'eau pour chaque période de retour de 10ans, ainsi que la lame d'eau ruisselé, ces deux paramètres sont déterminé par les relations suivantes :

$$V(T = 10 \text{ ans}) = \frac{Q \times 2Tc}{2}$$

$$V(T=10\text{ans})=46.31 \text{ mm}^3$$

Avec :

Q (m³/s) : le débit de référence pour une période de retour de 10ans

Tc (s) : le temps de concentration en heure

La lame d'eau ruisselée de référence est déduite du volume de référence V(T = 10 ans) divisé par la superficie du bassin versant.

$$L_r(T = 10 \text{ ans}) = \frac{V}{S_{bv}}$$

Avec :

$$L_r(T=10\text{ans}) = 67.60 \text{ mm}$$

V (m³) : le volume de référence

S_{bv} (km²) : la superficie du bassin versant

5.2. Calcule de débit de pointe pour les autres périodes de retour

Le bassin versant de Sidi Ifni est soumis à des épisodes pluvieux dont la durée coïncide avec le temps de concentration du bassin, supposant qu'une période de retour T engendre une crue de même période de retour, pour passer des pluies en 24 heures aux pluies de temps de concentration on applique la relation suivante : *(Duband,1982, Meylan et Musy,1999)*

$$P(T_c) = P(24) \times \left(\frac{T_c}{24} \right)^{(1-b)}$$

$$P(T_c)=46.53$$

Avec :

B est le coefficient de Montana qui égale à 0.12

T_c(h) le temps de concentration (T_c=22h).

$$P(24\text{heures})=50.24$$

La lame d'eau ruisselée pour les autres périodes de retour est obtenue en utilisant la relation suivante :

$$L_r(T / T_c) = L_r(T_r / T_c) + G_p(T_c) \times [U(T) - U(T_r)]$$

Avec :

L_r(T_r/T_c) est la lame d'eau ruisselée de référence (10ans) L_r=67.60

G_p le gradex de pluie G_p= 14.48

U(T) la variable de Gumbel

$$U(T) = -\ln(-\ln(1 - \frac{1}{T}))$$

U(T_r) la variable de Gumbel pour un temps de référence de 10ans. *(Duband, D.(1982), Meylan et Musy,1999)*

Tableau 14 : Variables de Gumbel U en fonction des différents périodes de retour

les périodes de retour	10	20	50	100	500	1000
les variables de Gumbel U	2.25	2.97	3.90	4.60	6.21	6.90

Le résultat de calculs des lames d'eau ruisselé est donné dans le tableau suivant :

Tableau 15 : lame de ruisselée pour différente période de retour

les périodes de retour	10	20	50	100	500	1000
la lame d'eau ruisselée (mm)	46.31	52.92	61.48	67.9	82.72	89.09

Après ces calculs on va déduire le débit de pointe par la relation suivante :

$$Q(\text{m}^3/\text{s}) = V(\text{m}^3)/T (\text{s})$$

Tableau 16: Débit de pointes selon la méthode de Gradex pour différentes périodes de retour

Les période de retour	10	20	50	100	500	1000
la lame d'eau ruisselée (mm)	67.60	77.26	89.76	99.12	120.76	130.06
le volume (mm ³)	46.31	52.92	61.48	67.90	82.72	89.09
Le débit de pointe (m ³ /s)	584.70	668.20	776.29	857.29	1 044.46	1 124.93

Conclusion

Les débits calculés par les formules de Fuller II et Hazan donnent des valeurs comparables qui peuvent être retenus par contre les deux valeurs obtenus par la formule de Mallet Gautier et celle d'ajustement statistique par la formule de Gamma ainsi que celle de transposition par Franco-Rodier sont sous-estimées donc on les retient.

L'étude hydrologique effectuée par la méthode de Gradex nous donne des débits allant de 584 à 1124 pour des périodes de retour de 10 ans à 1000 ans, la méthode de Gradex est la méthode la plus utilisée dans les calculs des débits de crue vu la fiabilité des résultats et surtout lorsqu'on a une série de données supérieures à 30 ans donc la méthode qui ajuste mieux nos données est celle de Gradex, ces résultats obtenus par la méthode de Gradex vont être utilisés par la suite dans la partie de modélisation hydraulique qui permettent la prévision des inondations, la détermination des zones inondables et la gestion des risques hydrologiques dans les plaines inondables.

Tableau 17 : Débits de pointes obtenus par la méthode de Gradex

Période de retour	10	20	50	100	500	1000
Débit de pointe Qp (m ³ /s)	584.7	662.9	766.2	857.2	1044.4	1124.9

CHAPITRE IV : MODELISATION
HYDRAULIQUE DU TRONCON
D'OUED SIDI IFNI

Introduction

L'étude hydraulique consiste à faire un diagnostic de la zone d'étude elle consiste à évaluer et intégrer tous les paramètres fondamentaux, tels que la géométrie, le débit, et les conditions aux limites pour déterminer les zones de débordement, dans cette étude nous avons utilisé des logiciels : un logiciel spécifié dans la simulation hydraulique, la modélisation de rivière ainsi que la reproduction de l'état naturelle à l'état numérique (HEC-RAS), et un logiciel de système d'information géographique (Arc-Gis) et un Auto-Cad pour présenter les zones inondables. Cette partie consiste à :

Identifier les zones à risque d'inondations dues aux crues

Définir les schémas d'aménagements nécessaires pour la protection de ces zones en tenant compte des aménagements existant ou projetés.

I. Construction du modèle de l'oued Ifni

1. Diagnostic de la situation actuelle de l'oued Ifni

La présente étude hydraulique s'intéresse aux cours d'eau et ouvrage hydrauliques qui sont à l'origine des inondations au niveau de la ville de Sidi Ifni.

Pour résoudre la problématique des inondations créés par cet oued, deux barrages ont été récemment réalisés, leurs rôles principale est la protection contre les inondations, la recharge de la nappe et l'irrigation

2. Rappel du diagnostic de la situation existante et tronçon à modéliser

Le cours d'eau au niveau de la ville de Sidi Ifni et les ouvrages qui ont été choisis sur la base de :

- L'existence des habitations menacées par le cours d'eau et des ouvrages hydrauliques
- Les dégâts occasionnés par les crues antérieures
- Les risques potentiels pour les infrastructures existants
- Le cours d'eau et les aménagements qui font l'objet de l'analyse hydraulique sont les suivants :
- La route allant vers Guelmim : Elle se prolonge par la route de la plage est située sur la rive gauche de l'oued.
- L'ancien zoo de la ville de Sidi Ifni : L'ancien parc zoo est situé sur la rive droite de l'oued Ifni.
- La zone villas située sur la rive gauche de l'oued Ifni: La zone villas, quartier en standing, est située sur la rive gauche de l'oued Ifni. Cette zone a été particulièrement frappée par les inondations à cause de sa situation et de son niveau par rapport au lit de l'oued.



- La zone située entre le pont et le radier submersible contenant le stade municipal sur une rive et des parcelles utilisées pour des fins agricoles sur l'autre: Cette zone a été aussi touchée par les inondations. (ABHSM,2007)

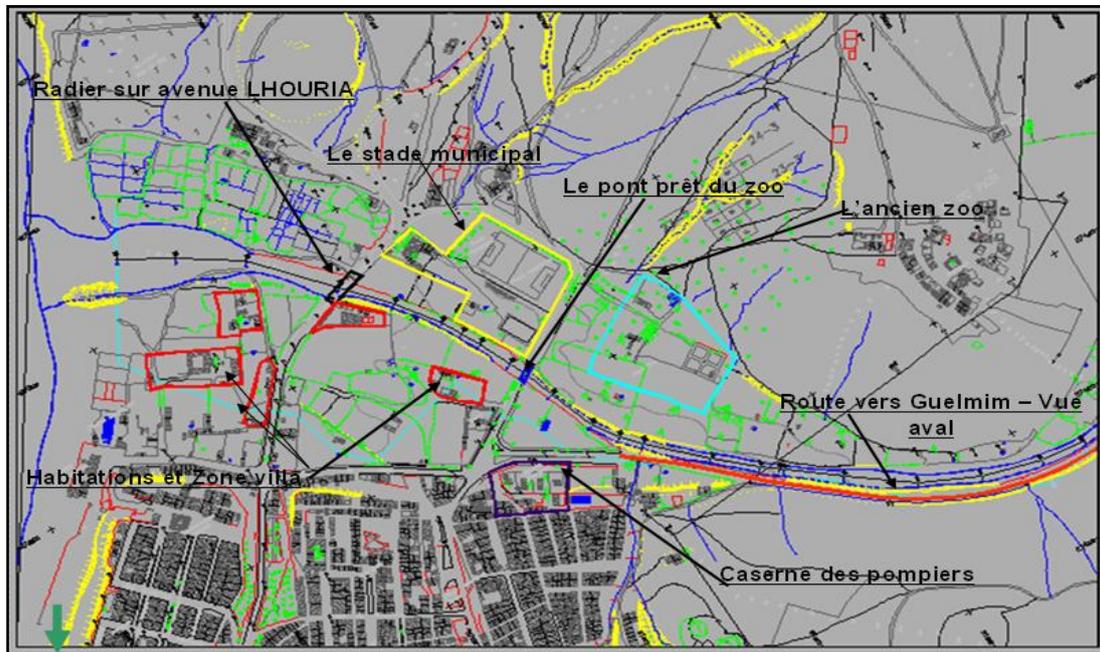


Figure 16 : Diagnostic de la situation existante

3. Géométrie de profils en travers

La délimitation des zones inondables est déterminée au moyen de logiciel de simulation hydraulique HEC-RAS en suivant les étapes :

3.1.Subdiviser le cours d'eau en profils transversales

Pour faire une simulation hydraulique on aura besoin de la topographie de la zone de sidi Ifni, la topographie est réalisé à partir de 53 profils en travers tout au long du tronçon étudié, ces profils doivent respecter certains conditions :

Les profils doivent être perpendiculaire à la direction d'écoulement des eaux ;

- Ils ne doivent pas se croiser ;
- Ils doivent recouper toute la plaine d'inondation ;
- Ils doivent décrire le profil en long du cours d'eau.

Pour augmenter la stabilité des calculs de niveau par le modèle, il est recommandé d'avoir une distance raisonnable entre deux sections transversales.

La longueur du tronçon de l'oued ayant fait l'objet des travaux topographiques est de 7027 m. Ce tronçon s'étend du point de coordonnées : X= 40071.16 et Y= 271167.18, à l'embouchure de l'oued à l'océan.

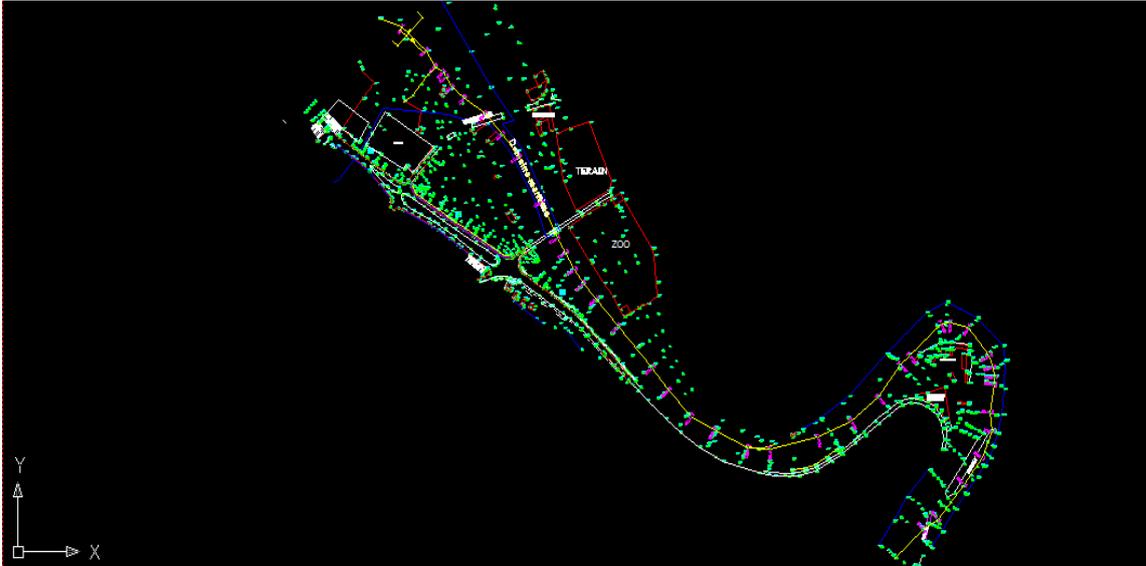


Figure 17 : Topographie de Sidi Ifni

Au cours de la simulation on extrait les distances et les élévations de chaque profil en travers, ces données vont être visualisé par la suite dans HEC-RAS, ces données vont nous renseigner sur la géométrie du cours d'eau de Sidi Ifni

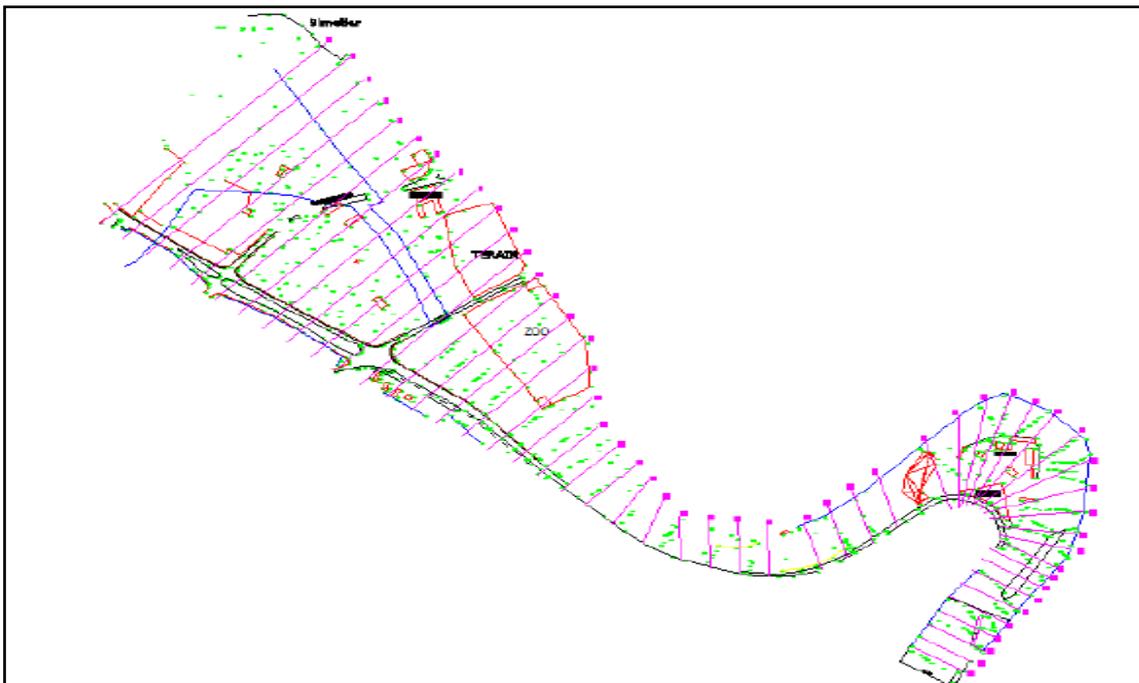


Figure 18: Résultat de l'interpolation entre les profils

3.2. Choix du coefficient de Manning correspondant à chaque profil

Les valeurs des coefficients de manning ont été déterminées sur la base des observations de terrain, en se reportant aux tableaux de références données dans la littérature et, également, en

se basant sur l'expérience de l'Ingénieur conseil dans ce domaine.(ABHSM : rapport mission SIDI IFNI).

Tableau 18 : Table de référence (ABHSM :rapport mission SIDI IFNI(2007))

Nature des parois	Valeur de $k=1/n$
Béton lisse	75
Canal en terre, non enherbé	60
Canal en terre, enherbé	50
Rivière de plaine sans végétation arbustive	35-40
Rivière de plaine large végétation peu dense	30
Rivière à berge étroites très végétalisées	10-15
Lit majeur en prairie	20-30
Lit majeur en vigne ou taillis	10-15
Lit majeur urbanisé	10-15
Lit majeur en foret	<10

Le coefficient ainsi choisis est de 0.033.

Ce coefficient a été adopté pour l'intégralité des tronçons de l'oued.

4. Débit et condition aux limites

L'étape suivante de la modélisation hydraulique est de spécifier les débits utilisés pour calculer les profils d'écoulements. Les débits utilisés ont été obtenus à partir de l'étude hydrologique précédemment réalisée et réaffichée dans le tableau suivant :

Tableau 19: Débits de pointes pour différentes périodes de retour

Période de retour	10	20	50	100	500	1000
Débit de pointe Q_p (m3/s)	584.7	662.9	766.2	857.2	1044.4	1124.9

5. Calage et validation

Le calage est l'ajustement d'un modèle. Il consiste à comparer les résultats obtenus avec les archives des résultats et des événements historiques de la zone. Le calage a pour but d'optimiser le modèle construit afin de pouvoir le simuler avec la crue de projet.

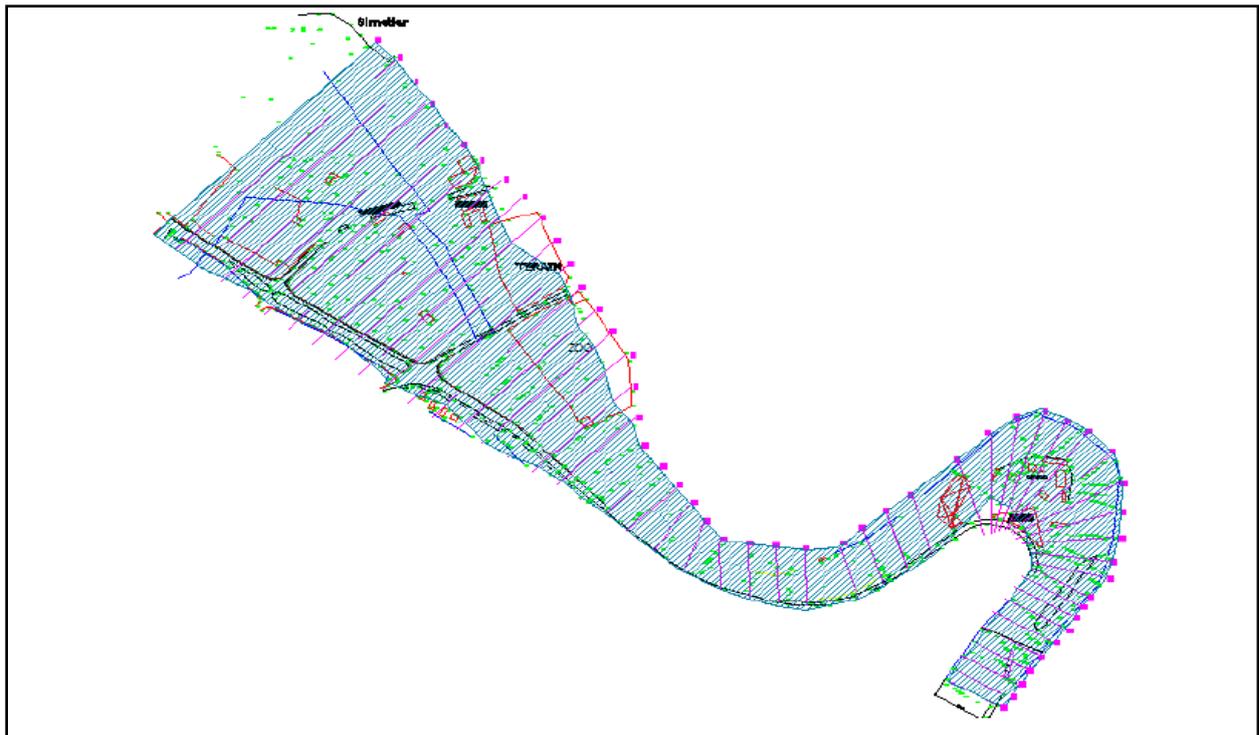


Figure 19 : Calage du modèle

6. Visualisation et discussions des résultats

La saisie des données géométriques concernant les profils des sections transversales et les débits de pointe de différentes période de retour, ainsi que les conditions limites dans le logiciel HEC-RAS ont permis d'effectuer les calculs et d'extraire des résultats comme :

- le niveau d'eau de chaque période de retour sur les profils,
- la vue de trois dimensions du niveau d'eau dans le tronçon d'étude des tables descriptives
- La courbe de la vitesse d'écoulement

6.1. Niveau d'eau de chaque période de retour sur les profils,

La simulation de la situation actuelle du cours d'eau moyennant HEC RAS a été faite, en se basant sur les résultats de l'étude hydrologique.

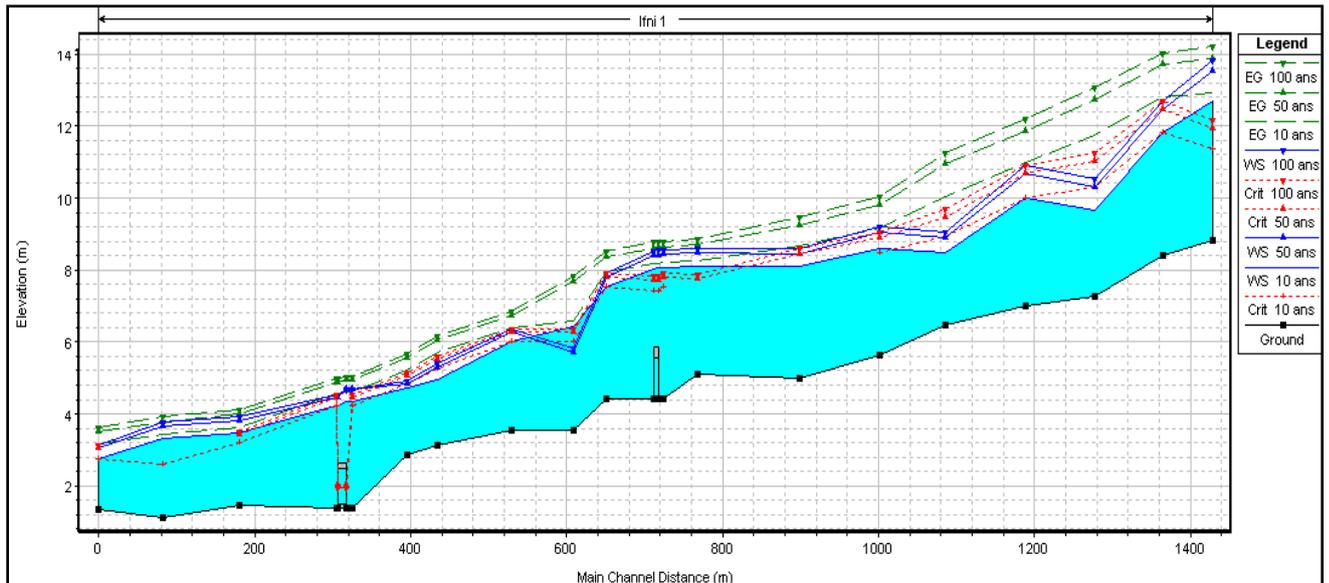


Figure 20 : Profil en long du cours d'eau de la situation existante

La figure montre les profils en long du cours d'eau de la situation existante, On remarque que le niveau d'eau pour la crue de 10ans varie de 4m à 7 m avec une distance allant de 0 à 660m, et à partir de cette distance ($x=660m$) on remarque que la hauteur d'eau augmente progressivement pour le débit de 50 ans à 100 ans donc cette zone est potentiellement inondable, pour cette raison ils ont injectés des puits pour l'alimentation de la nappe

6.2. Vue de trois dimensions du niveau d'eau dans le tronçon d'étude des tables descriptives

HEC-RAS fournit une vue en trois dimensions qui facilite le suivi du comportement des eaux de crue de période de retour .on remarque que la partie amont située au sud du bassin versant ne subit un très fort débordement cela est à cause de la construction des deux barrages Krayma et Ounder qui jouent un rôle majeur dans la protection contre les inondations, ainsi que l'abaissement du hauteur d'eau et diminue la valeur de débit, par contre en allant vers la partie aval qui présente l'exutoire du bassin versant on remarque un énorme débordement ce dernière touche la ville de Sidi Ifni.

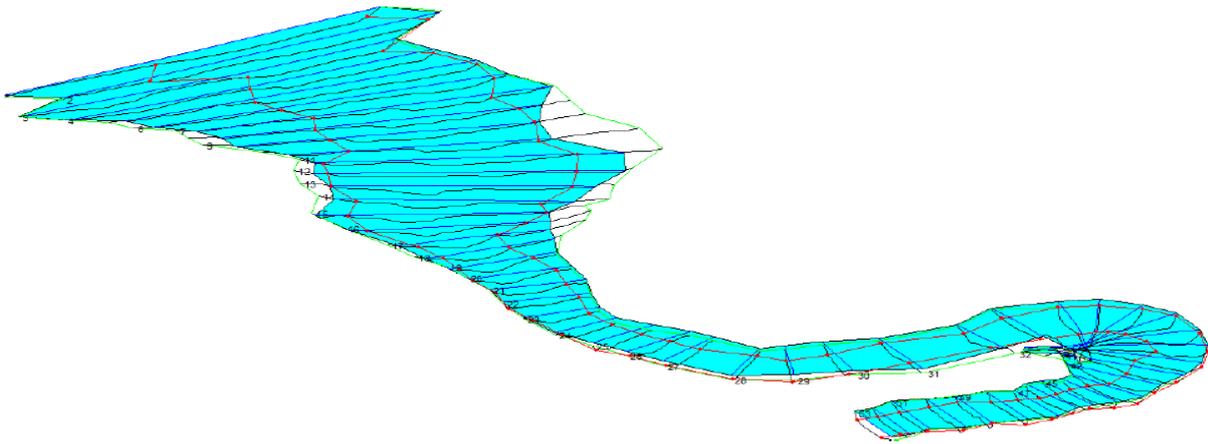


Figure 21: Géométrie en 3D

6.3. Vitesse d'écoulement

La figure présente la vitesse d'écoulement des eaux pour chaque période de retour, on observe presque la même allure pour tous les niveaux d'eau en allant de l'amont vers l'aval. D'après la figure on remarque que l'allure de la vitesse augmente et diminue en fonction de la variation de la distance, cette variation est due à la topographie du terrain.

En aval et à partir de l'exutoire la vitesse est moyennement faible avec une valeur de 2,2 m/s à une distance de 2450 m et commence à augmenter jusqu'à une valeur de 5,1 m/s à une distance de 2400 m, cette augmentation de vitesse est due à la présence d'une forte pente.

Pour la vitesse qui se situe au centre de la rivière est plus importante que les vitesses à la rive droite et gauche.

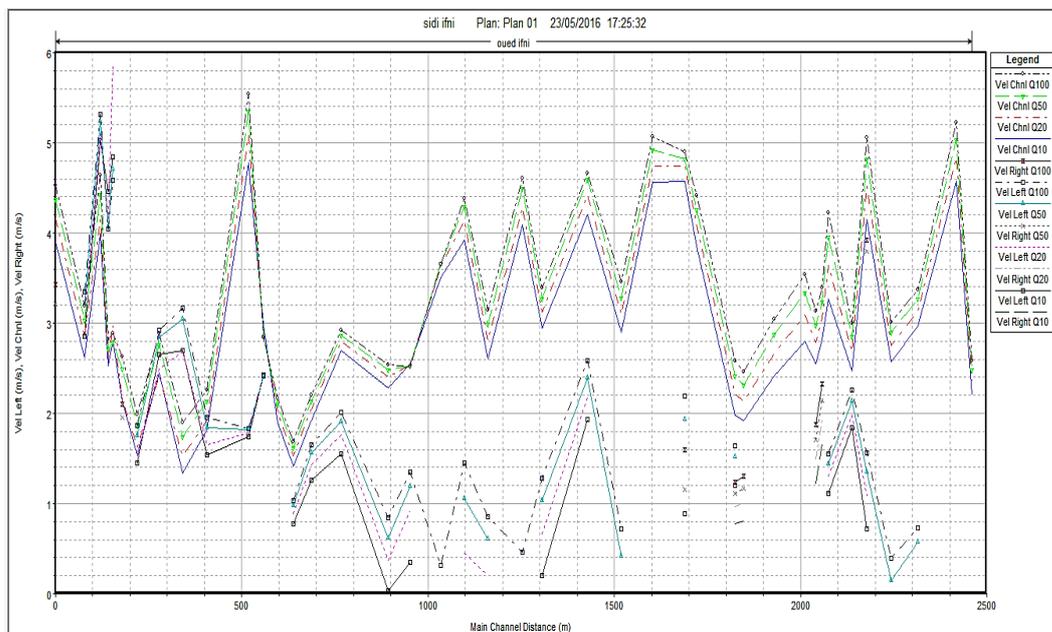


Figure 22 : Vitesse d'écoulement en fonction de la distance pour chaque période de retour

II. Simulation des crues de différentes périodes de retour

La figure suivante montre la modèle de délimitation des zones inondables pour des périodes de retour de 10ans, 50 ans, 100 ans.

On remarque que les hauteurs d'eau pour les crues de 10 ans, 50 ans, 100ans sont très hautes et on a un très fort débordement qui menace les infrastructures existantes parmi lesquels l'ancien zoo, la route vers Guelmim, une partie du stade municipal entre le radier et le pont, et quelques habitations.

En effet, la menace de la ville de Sidi IFNI par les inondations est due essentiellement à la situation topographique de la ville et à la position des infrastructures existantes qui constituent un étranglement du passage naturel de l'Oued.

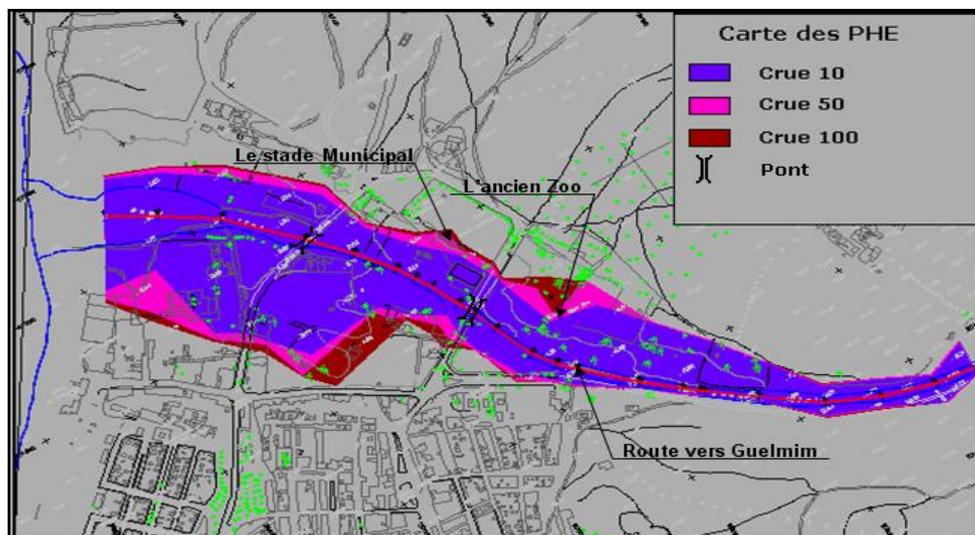


Figure 23 : Résultat de Délimitation des zones inondables pour les périodes de retour de 10ans, 50 ans, 100ans

III. Les travaux d'aménagement

Les inondations résultent principalement des débordements en périodes pluvieuses de l'oued qui traverse et qui longe la ville et de la Aménagements projetés

Dans ce cadre la Direction des Aménagements Hydrauliques (DAH) a prévu la construction de KRAYMA sur le cours d'eau KRAYMA :

Barrage KRAYMA : à l'est de la ville à environ 2 km à vol d'oiseau de celle-ci. Cette retenue aura pour objet l'écêtement et le laminage de la crue décennale. Les études de conceptions de ce barrage sont terminées, et sa construction est prévue pour 2009.

Barrage de Ounder : à l'amont du tronçon de sidi Ifni. Le barrage aura une côte de retenue normale de 70m, une étendue de 147,5 ha et un volume de retenue d'environ 16,6 Mm³

1. Installation du barrage de KRAYMA

Le laminage des crues est la transformation de l'onde de crue entre un point amont et un point aval d'un cours d'eau. Il a pour effet de diminuer le débit de pointe (le débit maximal) en répartissant le volume de la crue dans le temps. Ceci est possible grâce au stockage temporaire d'une partie du volume de la crue dans le lit majeur d'un cours d'eau (laminage naturel) ou dans la retenue d'un barrage (laminage artificiel).(wikipedia /Laminage)

Dans notre cas le laminage est artificiel et ceci par l'action de l'installation d'un barrage en amont cela va permettre de réduire le débit c'est-à-dire le débit de la sortie sera inférieur au débit à l'entrée, ce barrage va faire le laminage et comme résultat la réduction du débit ainsi que l'abaissement de la hauteur d'eau.

Le Barrage KRAYMA sera efficace pour l'écêtement de la crue décennale avec un taux de laminage de 57%.

Le tableau suivant résume les débits sortant et les taux de laminage pour chaque fréquence de crue.

Tableau 20 : Laminage du barrage KRAYMA pour différentes fréquences

T ans	Q entrant [m3/s]	Q sortant [m3/s]	Taux de laminage
10	123	54	57 %
50	200	111	44,1 %
100	443	385	13 %

Les résultats du calcul hydrologique sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 21 : Débits de crues en prenant en considération l'existence du barrage KRAYMA

T ans	Q sans barrage [m3/s]	Q avec barrage [m3/s]
10	584,7	350
50	766,2	535
100	857,2	889

2. Présentation de résultat de simulation pour la crue de 10 ans, 50 ans,100 ans

Les résultats de la simulation hydraulique permettent de suivre l'état de débordement des crues en présence et absence du barrage ainsi que connaître le rôle important du barrage dans la protection contre les inondations et cela pour différentes périodes de retour en allant de 10ans à 100ans

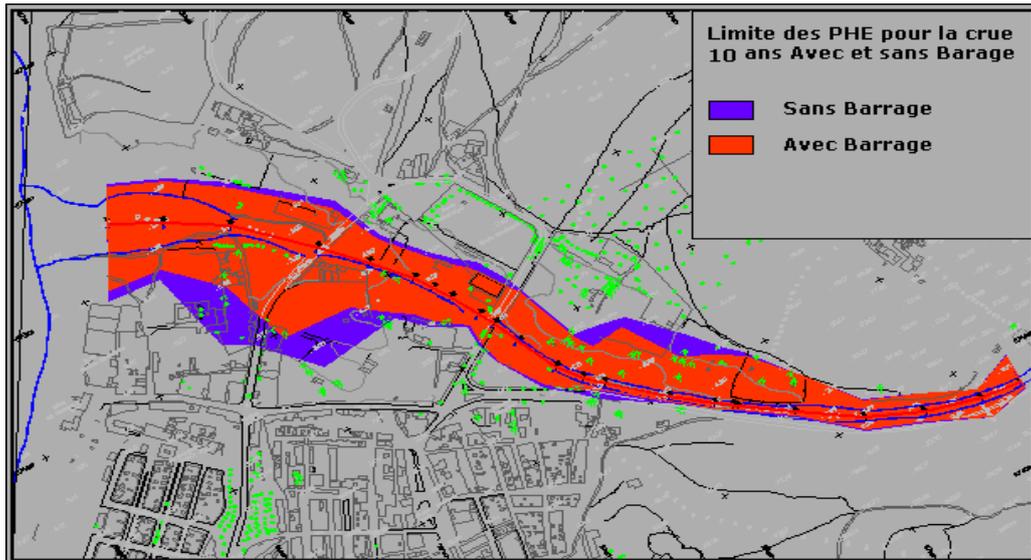


Figure 24 : limites des hauteurs d'eau pour la crue de 10ans avec et sans barrage de KRAYMA

La figure présente la limites des hauteurs d'eau pour la crue de 10ans avec et sans barrage , Pour la crue décennale lors de l'absence du barrage on a un très fort débordement qui a touché les infrastructures et les zones d'habitations alors qu'en présence de barrage on a toujours un débordement mais avec moins de dégâts par rapport au cas d'absence de barrage, cela nous renseigne que le barrage joue un rôle important dans l'abaissement des hauteurs d'eau ainsi que le débit de crue.

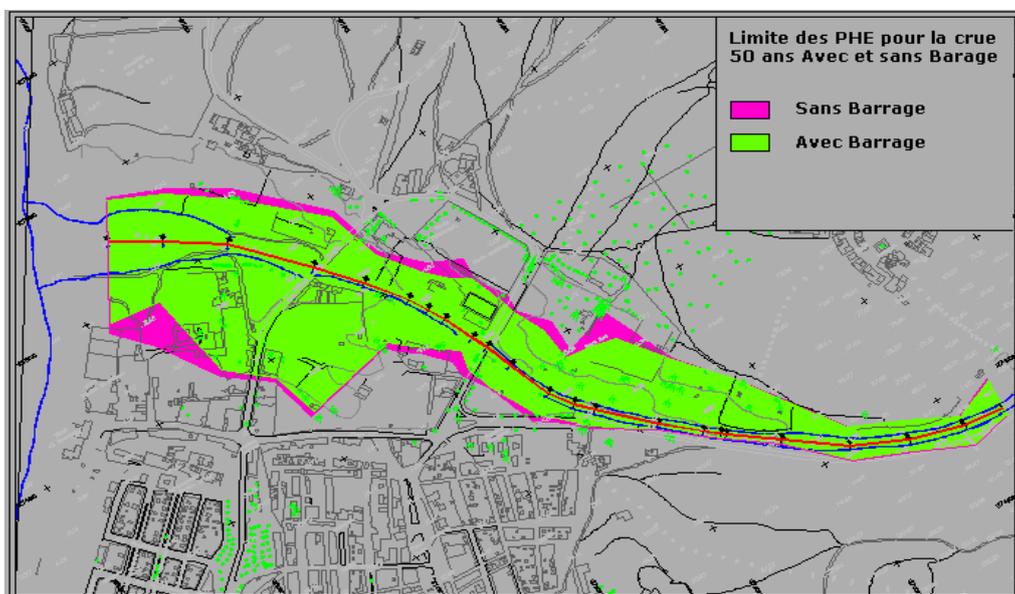


Figure 25 : limite des hauteurs d'eau pour la crue de 50 ans en présence et absence du barrage Krayma

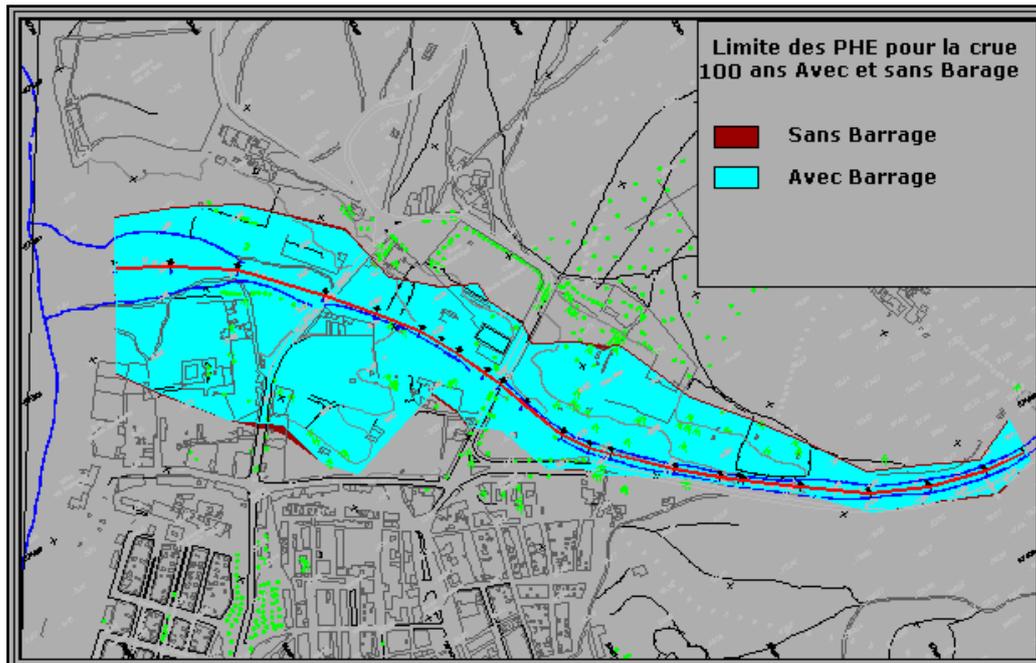


Figure 26 : Limite des hauteurs d'eau pour la crue de 100ans en présence et absence du barrage

Krayma

Pour la crue de fréquence de 50ans et 100ans on remarque que le débordement a touché les infrastructures et les zones d'habitations sont épargnées dans les deux cas de présence et absence du barrage de Krayma, donc on constate que pour ces deux fréquences le barrage sera inefficace.

3. Implantation du barrage de Ounder

Vu que son rôle n'est que l'écêtement des eaux en provenance de KRIYMATE alors que les eaux en provenance d'Assif OUNDER ne sont pas laminées. Le Barrage KRAYMA n'assure pas la protection de la ville de Sidi Ifni, contre les inondations, pour remédier a ce problème l'ABHSM propose la projection d'un nouveau barrage pour l'écêtement des eaux en provenance du bassin versant Assif OUNDER.

Ce Barrage sera situé sur L'oued Ifni, dans le bassin versant de Assif OUNDER, juste avant le point de confluence de l'Assif OUNDER et l'Assif LKRIMATE.

Les coordonnées Lambert du site sont :

X= 39 816

Y= 272 59

Z= 37m NGM

Le barrage aura une côte de retenue normale de 70m, une étendue de 147,5 ha et un volume de retenue d'environ 16,6 Mm3. (ABHSM : rapport Sidi Ifni (2007))



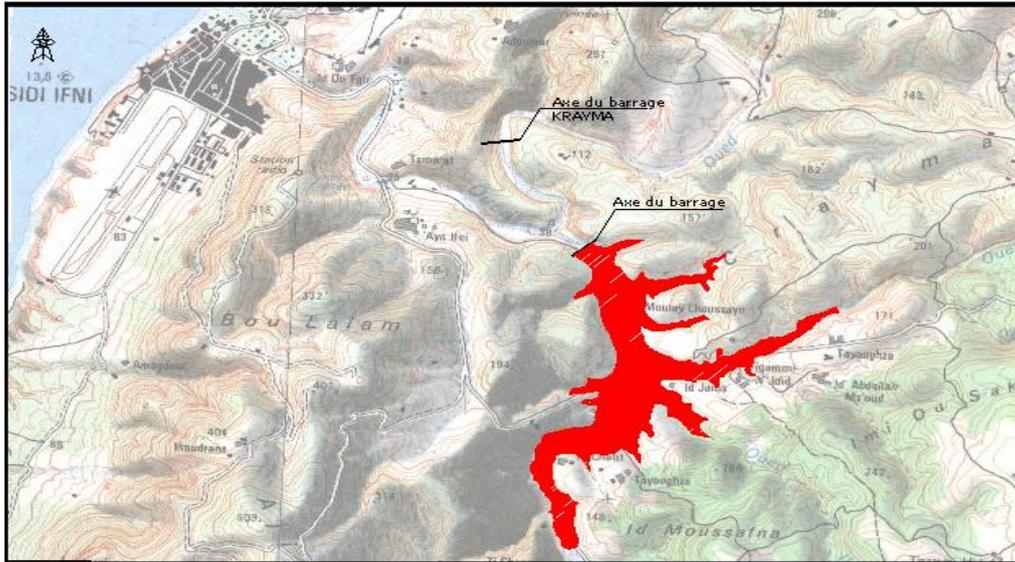


Figure 27: Situation du barrage proposé

L'impact de la réalisation du nouveau barrage proposé pour le laminage des eaux en provenance de l'Assif OUNDER, sur les PHE, et ce en supposant que ce dernier aura des débits d'écrêtement égaux à ceux du Barrage KRAYMA, et en prenant en considération l'existence de ces deux barrages

4. Présentation des résultats de simulation en présence et absence de deux barrages pour la crue de 10ans et 100ans.

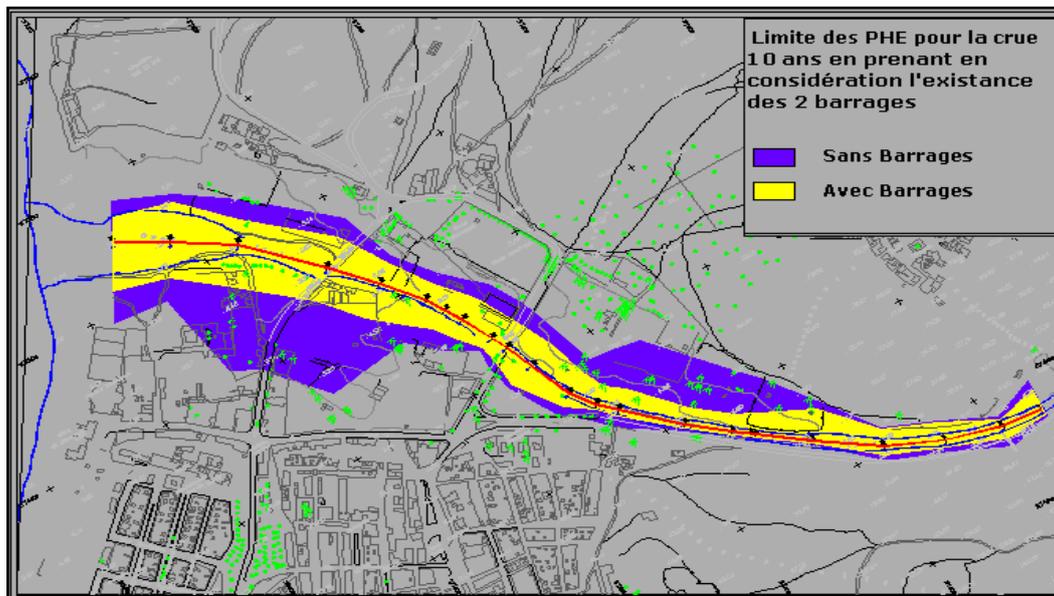


Figure 28: Limite des PHE pour la crue de 10 ans, en prenant en considération les 2 barrages

D'après la simulation, l'existence du nouveau barrage sera très efficace pour la crue de fréquence décennale, elle épargnera la grande majorité des infrastructures, ainsi, le parc zoo ;

la route vers Guelmim et le stade municipal, donc d'une part le barrage de Kraymaqui est implanté à l'amont de l'Oued joue un rôle important dans l'abaissement des hauteurs d'eau ainsi que le débit par l'effet de laminage et comme résultat le débit sortant sera inférieur au débit entrant, d'autre part le barrage de Ounder assure la protection contre les crues ainsi que l'abaissement des hauteurs d'eau et le débit donc l'existence de ces deux barrages tout au long le tronçon de Oued de Sidi IFNI sera très efficace pour lutter contre le débordement des eaux ainsi que la protection de la ville contre ce problématique.

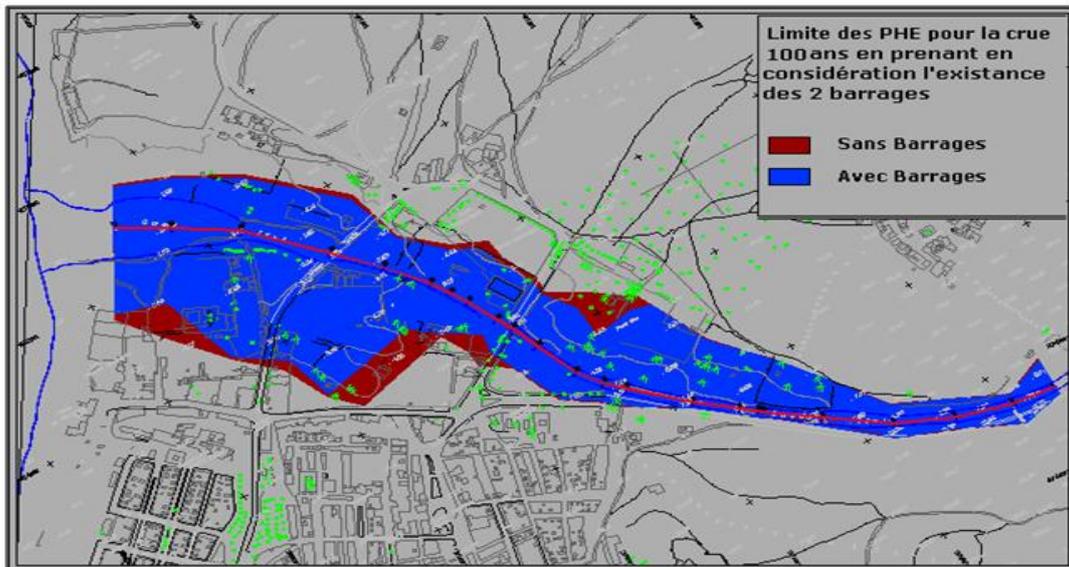


Figure 29 : Limite des PHE pour la crue de 100 ans, en prenant en considération les 2 barrages

Pour la crue centennale on remarque un très fort débordement même avec l'existence des deux barrages, le risque existera toujours pour la majorité des constructions donc dans ce cas les deux barrages seront inefficace pour la crue centennale

5. Résultat et interprétation

Le tableau nous montre le débit de pointe pour chaque période de retour en présence de barrages et absence de barrage, on remarque que on présence de barrage la valeur de débit diminue donc On constate que les deux barrages jouent un rôle principale dans la protection de la ville de SIDI IFNI contre les crues d'oued IFNI, la recharge de la nappe et l'irrigation.

Tableau 22 : Débit de crue en prenant en considération l'existence des deux barrages

T ans	Q sans barrages [m3/s]	Q avec les 2 barrages [m3/s]
10	584,7	137.33
100	857,2	737.35

Le tableau nous montre le débit de pointe pour chaque période de retour en présence de barrages et absence de barrage, on remarque que en présence de barrage la valeur de débit diminue donc On constate que les deux barrages jouent un rôle principale dans la protection de la ville de SIDI IFNI contre les crues d'oued IFNI, la recharge de la nappe et l'irrigation.

La méthodologie suivie ; étudier l'écoulement sans les deux barrages et les zones inondées , puis avec barrage krayma mais sans l'autre barrage , puis avec les deux barrages et confronter à chaque fois les zones inondées de l'étape en cours avec ceux de l'étape précédente

Une fois on connaît le débit réduit grâce au barrage on l'injecte dans la simulation au lieu du débit total lorsque le barrage n'existait pas puis on donne le profil en long et la vue en plan afin de voir les zones inondables et critiquer l'utilité de l'aménagement pour la protection

Conclusion générale

Les inondations de la ville de Sidi Ifni ont un caractère violent et destructeur, la crue de 2014 a causé des dégâts grave, dans ce cas il est nécessaire d'effectuer un diagnostic de la situation existante qui nous a permis de comprendre la problématique posée par les crues de l'oued de sidi IFNI.

Notre projet de fin d'étude s'articulait autour d'une étude hydraulique détaillée et qui va évaluer toutes les paramètres fondamentaux, le débit, la géométrie, les conditions au limites. Ces paramètres vont nous aider à réaliser un modèle hydraulique en se basant sur des logiciels spécifiés, ainsi pour connaître les hauteurs d'eau d'une part et d'autre part définir les zones de débordement.

L'aménagement pour la protection de la ville de sidi IFNI contre les inondations est un processus qui a été entamé il y a plus d'un demi-siècle (creusement de l'oued, protection des berges par de la maçonnerie, etc.)

Pour lutter contre cette problématique l'Agence hydraulique de Sous Massa Draa a réalisé récemment deux barrages : barrage de KRAYMA et barrage OUNDER qui jouent un rôle majeur dans la protection contre les crues ainsi que l'abaissement des hauteurs d'eau et l'irrigation de la nappe.

La protection contre les crues ne passera pas seulement par les travaux de l'aménagement mais il faut faire des mesures de prévention telle que la cartographie des zones à risques d'inondations, l'occupation des sols.

Liste des références

- ABHSMD (Agence du Bassin Hydraulique de SOUSS MASSA DRAA), (2012)- investigation préliminaire et diagnostic de la situation actuelle LES BASSINS DE MASSA, TIZNIT ET IFNI, 88pages.
- ABHSMD (Agence du Bassin Hydraulique de SOUSS MASSA DRAA), (2010)- les missions d'études relatives à l'étude de protection contre les inondations de la ville de GUELMIM, 48 pages
- ABHSMD (Agence du Bassin Hydraulique de SOUSS MASSA DRAA), (2007)- missions relatives à l'étude de protection contre les inondations de la ville de Sidi IFNI et de la commune rurale de Sidi Ahmed Ou Moussa dans la province de TIZNIT.
- Duband, D,(1982)- Hydrologie statistique approfondie. Ecole national supérieure d'hydraulique de Grenoble. pp. II-11.
- Meylan, P. and Musy, A. (1999), - Hydrologie fréquentielle. Office fédéral de l'éducation et de la science/suisse (n 96.01). pp 181, 251, 275, 305, 371.
- <https://fr.wikipedia.org/wiki/Laminage>
- DUBREUILPierre, (1966)- les caractères physiques et morphologiques des bassins versants leur déterminationavec une précision acceptable,31, OFFICE de la RECHERCHE SCIENTIFIQUE et TECHNIQVE OUTRE-MER