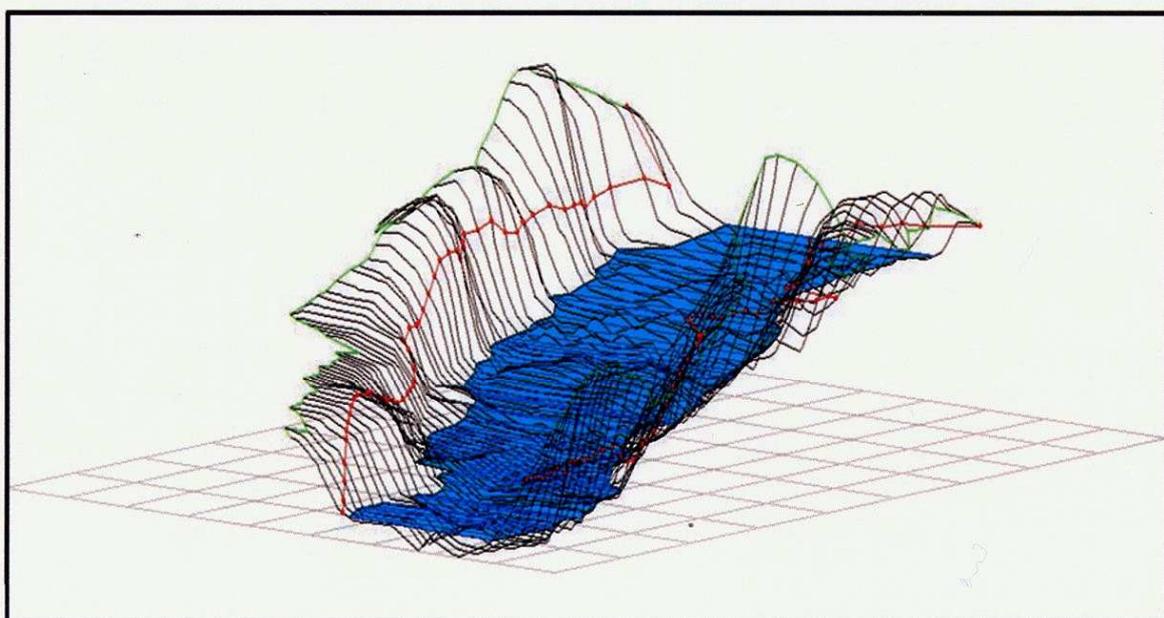


Département des Sciences de la Terre
Master Eau et Environnement
2013-2015

Mémoire de fin d'études intitulé :

**Les événements hydrologiques exceptionnels du Haut Atlas de Marrakech.
Analyse fréquentielle, simulation et application au cas de novembre 2014.**



Encadrées par :

SAIDI Mohamed El Mehdi

Elaboré par :

HIQUI Abdessamad

Soutenu le 15 juin 2015 devant le jury composé de :

Mr CHAFIKI Driss

Mr SAIDI Abdelatif

Mr SAIDI Mohamed El Mehdi

Sommaire

Listes des figures.....	4
Listes des photos.....	5
Listes des tableaux.....	5
Introduction :.....	7
Chapitre 1 : études morphométrique de la zones d'étude.....	8
A. Le Bassin versant de la Rhiraya :.....	8
1. Situation Géographique :.....	8
1. La morphologie :.....	9
2. Géologie et lithologie du bassin versant :.....	9
3. Hypsométrie :.....	10
4. Le climat global et la végétation :.....	10
5. Carte d'exposition des versants:.....	11
B. Le bassin versant d'Ourika.....	11
1. Situation Géographique :.....	11
2. La morphologie :.....	12
3. Géologie et lithologie du bassin versant :.....	12
4. Carte hypsométrique :.....	13
5. Le climat global et le couvert végétal :.....	14
6. Carte d'exposition :.....	15
C. Le Bassin versant du Zat :.....	16
1. Situation géographique :.....	16
2. La Morphologie :.....	16
3. Géologie et lithologie du bassin versant :.....	17
4. Hypsométrie :.....	18
5. Le climat global et la végétation :.....	18
6. La Carte d'exposition des versants :.....	19
D. Le Bassin versant de R'Dat :.....	19
1. Situation géographique :.....	19
2. Morphologie :.....	20
3. Géologie et lithologie du bassin versant.....	20
4. Hypsométrie :.....	22
5. Le climat global et la végétation :.....	22

1. Carte d'exposition :	23
Tableau Récapitulatif :	24
Les tableaux suivant englobe un ensemble des Paramètres morphométriques et hydrologiques des bassins Versants mise en études :	24
Chapitre 2 : Analyse des données (Pluviométrie et Hydrométrie)	25
1. Variation mensuelle :	25
2. Variation annuelle:	25
3. Corrélation pluie-débit :	26
4. Corrélation pluie-altitudes :	27
L'analyse fréquentielle :	28
1. Principe :	29
2. Ajustement de lois à un échantillon de pluie	29
A. Tahanaout :	29
I. Ajustement statique des lois sur les Pluies :	29
II. Ajustement statique des lois sur les débits :	31
B. Aghbalou :	32
I. Ajustement statique des lois sur les Pluie :	32
II. Ajustement statique des lois sur les débits :	33
C. Tafriatat :	35
I. Ajustement statique des lois sur les Pluies :	35
I. Ajustement statique des lois sur les débits :	36
D. Sidi Rahal :	37
I. Ajustement statique des lois Pluie :	37
II. Ajustement statique des lois sur les débits :	39
Conclusion :	40
CHAPITRE3 : ETUDE HYDRAULIQUE	41
Introduction :	41
1. Méthodologie :	41
2. Prétraitement des données sur Géo-Ras :	41
A. SIDI RAHAL	45
1. Résultats et interprétations :	45
B. Arbaat Tighedwin :	47
❖ Les événements de novembre 2014 :	49
A. Sidi Rahal	49

Chapitre 4 : modalisation Du Fonctionnement de L'Hydro-Système de bassin versant de Ghiraya au haut atlas :	54
1. Qu'est ce qu'un modèle mathématique ?	54
2. A quoi sert un modèle pluie-débit ?	55
3. Fonction de production SCS:	55
4. Fonction de Transfert Lag and route :	56
5. Calage du modèle :	57
6. Résultat :	58
7. Interprétation :	59
Conclusion :	59
Chapitre 5 : Recommandation des aménagements :	60
1. Pour la stabilisation des berges :	60
2. Pour la stabilité du lit de l'oued :	61
3. Mesures non structurelles :	61
Conclusion	63
Référence :	64

Listes des figures

Figure 1: localisation géographique des bassins Rhiraya, Ourika, Zat et R'Dat.....	8
Figure 2: Carte du Réseau Hydrographique de BV de Rhiraya.....	9
Figure 3 : carte Géologique du BV Rhiraya	9
Figure 4 : Carte Hypsométrique du BV de Rhiraya	10
Figure 5 : Carte de Végétation de BV de Rhiraya	10
Figure 6: exposition du BV de la Rhiraya	11
Figure 7:La carte d'exposition du BV de la Rhiraya	11
Figure 8 : carte du réseau hydrographique du BV d'ourika	12
Figure 9 : Carte Géologique du BV d'ourika.....	13
Figure 10 : carte Hypsométrique du BV d'ourika	14
Figure 11 : Carte de Végétation du BV d'ourika.....	15
Figure 12 : Carte d'exposition du BV d'ourika.....	15
Figure 13 : exposition du bassin versant d'ourika	16
Figure 14 : Carte de Réseau hydrographique de BV Zat.....	16
Figure 15:carte Géologique du BV Zat.....	17
Figure 16: carte Hypsométrique de BV Zat	18
Figure 17: Carte de Végétation de BV Zat	18
Figure 18: Carte d'exposition du BV Zat	19
Figure 19 : exposition du BV Zat	19
Figure 20: carte du réseau hydrographique de R'Dat	20
Figure 21: Carte géologique du BV R'Dat	21
Figure 22:Carte Hypsométrique du R'Dat	22
Figure 23: Carte de Végétation de R'Dat	23
Figure 24: Carte d'exposition de BV R'Dat	23
Figure 25: exposition de BV R'Dat	24
Figure 26: Variation mensuelle comparative des précipitations.....	25
Figure 27: Historique de pluie annuelle des 4 stations.....	26
Figure 28: Corrélation pluie débit des 4 stations	27
Figure 29:Relation entre précipitation et altitude.....	27
Figure 30:Carte de pluie de Zones d'études.....	28
Figure 31: schéma d'analyse fréquentielle	29
Figure 32: Graphe d'ajustement de loi Exponentielle et LogNormal sur les pluies de Tahanaout	30
Figure 33: Graphe d'ajustement de loi LogNormal et Weibull sur les débits de Tahanaout	31
Figure 34: Graphe d'ajustement de loi Normal et Gumbel sur les pluies d'Aghbalou	32
Figure 35: Graphe d'ajustement de loi LogNormal et Gumbel sur les débits d'Aghbalou	34
Figure 36: Graphe d'ajustement de loi LogNormal et exponentielle sur les pluies de Tafriat	35
Figure 37: Graphe d'ajustement de la loi de weibull et LogNormal sur les débits de Tafriat	36
Figure 38: Graphe d'ajustement de loi LogNormal et Gumbel sur les pluies de Sidi Rahal	38
Figure 39: Graphe d'ajustement de loi weibull et loi de Gamma sur les débits de Sidi Rahal	39
Figure 40: méthodologie de la spatialisation hydraulique par HEC-RAS.....	41
Figure 41: Carte d'installation de Cut Ligne au niveau d'oued R'Dat	42
Figure 42:L'Editeur Géométrique dans HEC-RAS.....	43
Figure 43:Visualisation de la géométrie des sections.....	44
Figure 44:Simulation de débit par le module SteadyFlowData.....	45
Figure 45: les Cartes de débit Simulé au niveau de Station Sidi Rahal	46
Figure 46: cartes des simulations hydrauliques de L'Arbaat Tighedwin.....	48

Figure 47: les 3 profils sur le long de oued R'Dat	51
Figure 48: Simulation de débit de 27 novembre 2014 au niveau de Village Tighedwin dans le bassin versant de Zat	53
Figure 49: Schéma présente la fonction de production	55
Figure 50: Schéma présente la fonction de production	56
Figure 51: interface de logiciel ATHYS	56
Figure 52: calage de la crue de 14 aout 2014 établie par Athys au niveau du bassin de Rhiraya	58
Figure 53: calage de la crue de 27 aout 2014 établie par Athys au niveau de BV de Rhiraya	58

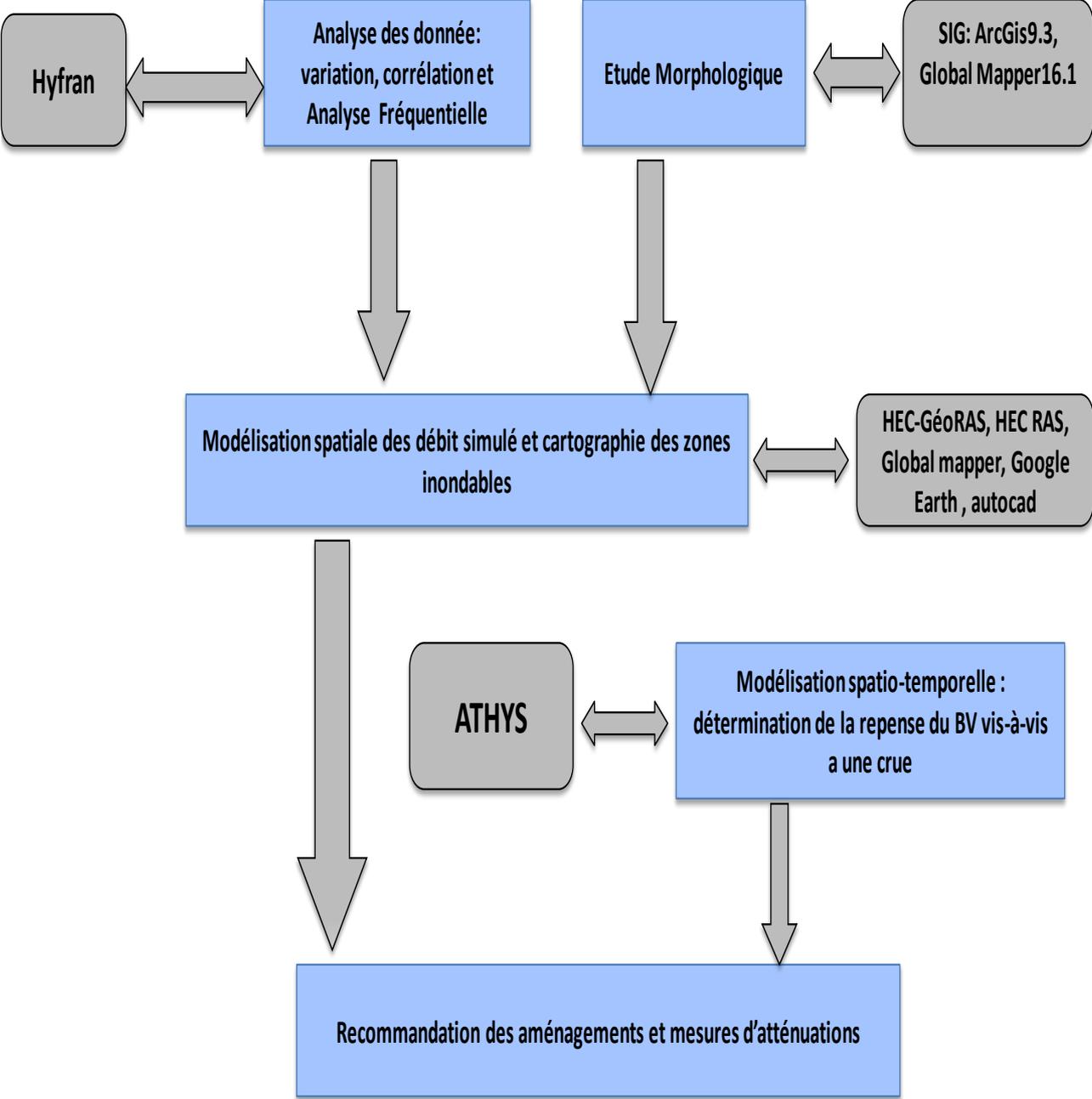
Listes des photos

Photo 1 : Confluence de Oued Imnene et Aït Mizaine	8
Photo 2: Extraction des matériaux de construction au niveau de lit l'oued	47
Photo 3: exploitation agricole de la rive de l'oued	52
Photo 4: Habitation aux bords de l'oued	52
Photo 5: Etranglement de l'écoulement à cause du charriage	54

Listes des tableaux

Tableau 2 : Tableau récapitulatif	24
Tableau 3 Les critères des différentes lois statistiques ajusté sur les pluies maximales	30
Tableau 4: L'estimation des périodes de retour des pluies de la station de Tahanaout	31
Tableau 5: Les critères des différentes lois statistiques ajusté sur les Débits maximales	31
Tableau 6: L'estimation des périodes de retour des débits de la station de Tahanaout	32
Tableau 7: Les critères des différentes lois statistiques ajusté sur les pluies maximales journalières	33
Tableau 8: L'estimation des périodes de retour des précipitations de la station d'Aghbalou	33
Tableau 9: Les critères des différentes lois statistiques ajusté sur les Débit maximales	34
Tableau 10: L'estimation des périodes de retour des débits de la station d'Aghbalou	34
Tableau 11: Les critères des différentes lois statistiques ajusté sur les pluies maximales	35
Tableau 12: L'estimation des périodes de retour des précipitations de la station de Tafriat	36
Tableau 13: Les critères des différentes lois statistiques ajusté sur les Débits maximales	37
Tableau 14: L'estimation des périodes de retour des débits de la station de Tafriat	37
Tableau 15: Les critères des différentes lois statistiques ajusté sur les pluies de Sidi Rahal	38
Tableau 16: L'estimation des périodes de retour des pluies de la station Sidi Rahal	39
Tableau 17: Les critères des différentes lois statistiques ajusté sur les débits de Sidi Rahal	40
Tableau 18: L'estimation des périodes de retour des débits de la station Sidi Rahal	40
Tableau 19: Coefficient de Manning	44
Tableau 20: résultat de la modélisation spatio-temporelle au niveau du bassin de Rhiraya	58

Schéma général du travail



Introduction :

Depuis la fin du siècle dernier, des événements qualifiés d'exceptionnels provoqués suite à un changement climatique de la terre ont donné naissance à des fortes précipitations sur tout le royaume. Cette situation paralyse un bon nombre des régions Marocaines, surtout le dernier événement de novembre 2014 qui a laissé derrière lui un ensemble de dégâts humains et matériels importants.

Les bassins versants du Haut Atlas situés dans un contexte semi-aride, leur environnement hydro-géomorphologique et pluviométrique favorise le déclenchement de crues éclair caractérisées par des grandes vitesses et des temps de montée assez courts.

Tous ses facteurs combinent pour donner la raison d'être à ce travail qui vise l'identification des causes par des études cartographiques et analytiques en plus de la modélisation spatiale et spatio-temporelle à l'aide d'un ensemble d'outils informatiques.

Ceci à fin de préconiser des mesures de protection et de prévention contre les inondations.

Compte tenu des objectifs de notre travail on a choisi de le présenter en Cinq chapitres :

Le premier sera consacré à la présentation géographique des bassins versants en étude ainsi que les paramètres qui influencent l'écoulement, notamment la morphologie, la géologie, l'hypsométrie, la végétation et l'exposition.

Les deuxième et troisième chapitres présenteront respectivement une étude hydrologique dynamique et statistique des bassins de Rhiraya, Ourika, Zat et R'Dat. Les résultats de cette dernière étude constituent les données de base pour la modélisation hydraulique.

Le quatrième chapitre présente une modélisation spatio-temporelle du bassin versant de la Rhiraya.

Le dernier chapitre abordera la présentation, les étapes et les résultats de la modélisation hydraulique, ainsi que les recommandations à suggérer.

Chapitre 1 : études morphométrique de la zones d'étude

A. Le Bassin versant de la Rhiraya :

1. Situation Géographique :

Le bassin versant de la Rhiraya est situé dans le Haut Atlas de Marrakech, entre les latitudes 30°10' et 30°20', et les longitudes 7°40' et 8° Ouest. Il est localisé à une quarantaine de kilomètres au sud de Marrakech, dans le massif de Toubkal (figure 1). Il comprend une grande partie des plus hauts sommets de l'Afrique du Nord, en particulier le plus élevé d'entre eux, le Jbel Toubkal (4165 m). Son exutoire principal situé à quelques Kilomètres au Sud de la ville de Tahanaout sur Oued Rhiraya qui résulte de conflit de deux oueds Assif imnene et Assif ait mizaine (photo 1)

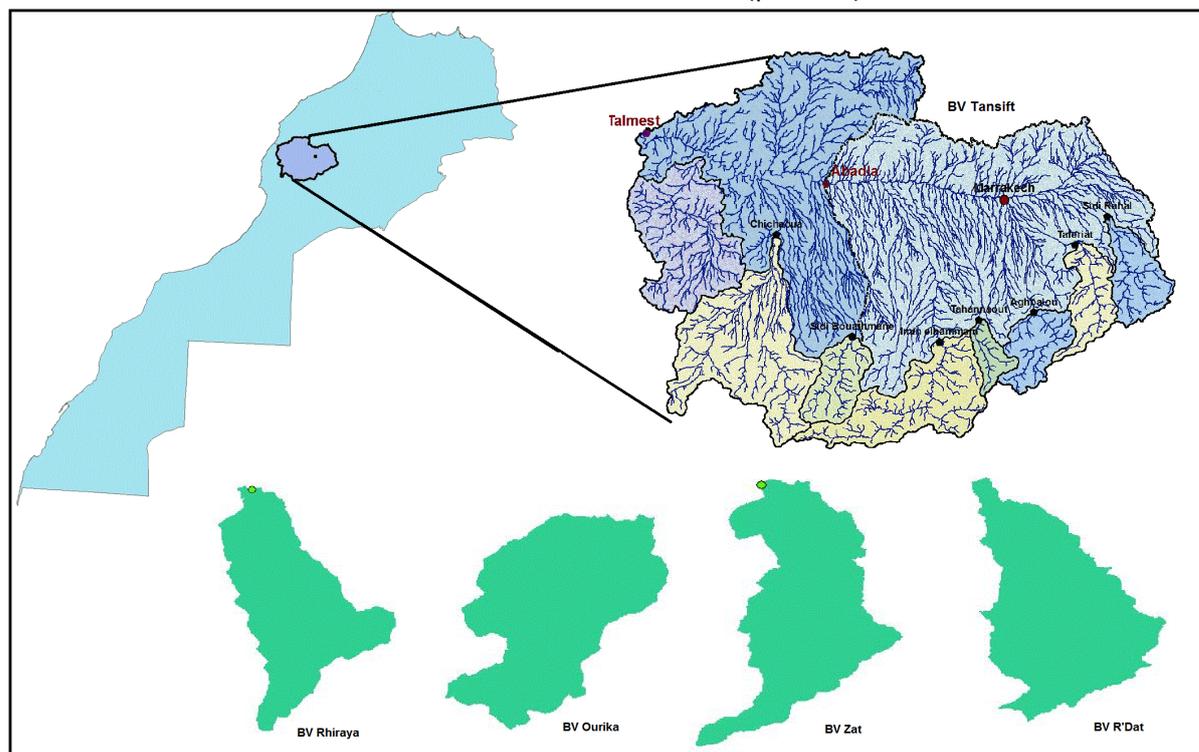


Figure 1: localisation géographique des bassins Rhiraya, Ourika, Zat et R'Dat



Photo 1 : Confluence de Oued Imnene et Aït Mizaine

Ce bassin versant est limité au Nord par la plaine du Haouz, au Sud par le bassin d'Assif Tifnout (Haut Souss), à l'Est par le bassin de l'Ourika et à l'Ouest par celui du N'fis.

1. La morphologie :

Le bassin du Ghiraya (figure 2) couvre une surface de **225 Km²**, avec un périmètre de **81,3 km**. Les altitudes y varient entre **1068 et 4098 m** avec une moyenne de 2165,8 m et une altitude médiane qui varie de 1750 à 2000 m, On peut expliquer l'infériorité de l'altitude médiane par rapport à celle moyenne par l'abondance de hauts reliefs en amont qui élèvent la moyenne globale.

D'autre part un réseau bien ramifié de 865,4 Km de longueur qui donne une densité de drainage de l'ordre 3,8 km /km².

Vu sa morphologie le bassin versant de Ghiraya a un temps de concentration assez court de l'ordre de 4h11min calculé à partir de la formule de Giandoht Alors que l'indice de compacité Kg pour ce bassin égale a 1,5 qui caractérise une forme allongé du bassin.

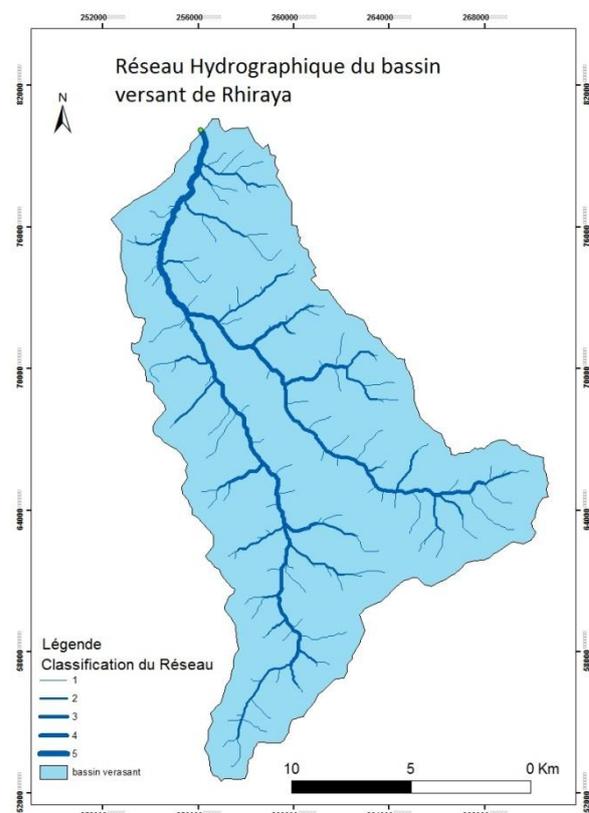


Figure 2: Carte du Réseau Hydrographique de BV de Rhiraya

2. Géologie et lithologie du bassin versant :

Le bassin du Rhiraya est situé dans le Haut Atlas central siliceux. (Figure 3)

Trois zones géologiques se distinguent :

La zone sub-atlasique couvre le tiers nord du bassin où elle est composée d'un socle rigide précambrien et paléozoïque grés-schisteux et calcaires, socle apparent dans les gorges de Moulay Brahim tout à fait au nord du bassin. Sur ce socle, une importante couverture mésozoïque au faciès détritique rouge fait de conglomérats, grès et siltstones du Trias est encore présente. C'est la roche tendre dans laquelle est creusé le bassin d'Asni actuel. Au nord et au sud du bassin d'Asni, un faciès carbonaté et marneux plus dur constitue les plateaux de Kik et Tihallatine. (Haddani, 2012)

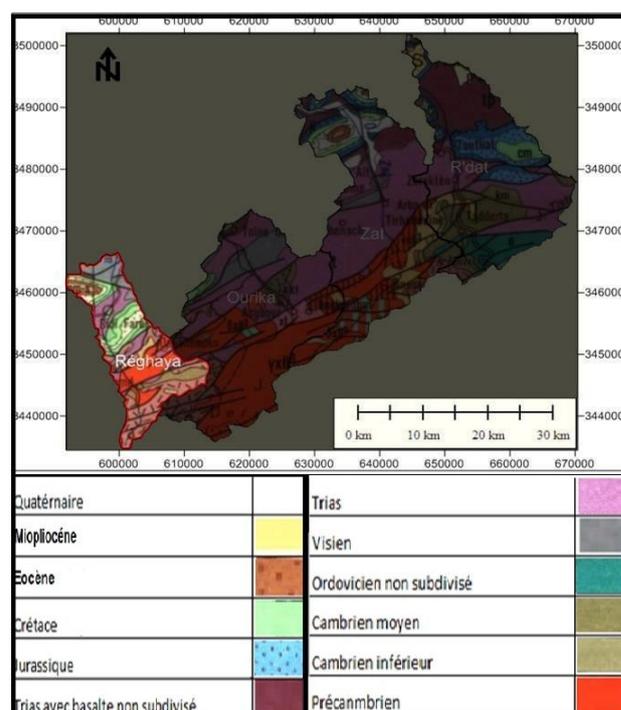


Figure 3 : carte Géologique du BV Rhiraya

3. Hypsométrie :

Dans le bassin de Rhiraya les tranches d'altitude sont comprises entre 1043 et 4111 m.

Ces altitudes sont visiblement influencées par la forme en « Y » du réseau hydrographique .Les altitudes les plus dominantes sont les moyennes et les faibles occupants ainsi environ 70 % de la surface.

Pour les pentes, elles varient de 0° sur **les terrasses aménagés** sur les lits des Oueds en aval, jusqu'à 45,9° sur les versants en amont surtout ceux entourant l'Oued Imlil, parfois même en aval sous forme de falaise. La carte permet de reconnaître la zone aval, débutante après la confluence des deux branches, comme étant potentiellement à haut risque d'inondations.

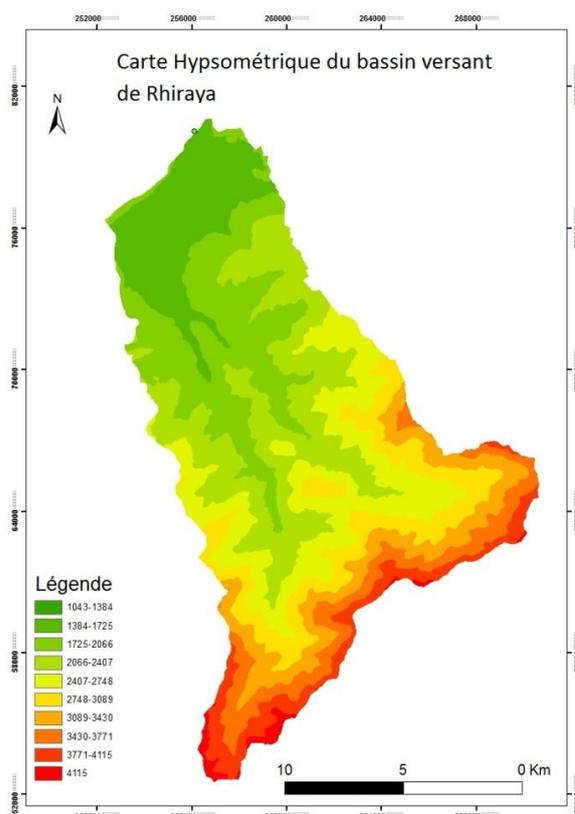


Figure 4 : Carte Hypsométrique du BV de Rhiraya

4. Le climat global et la végétation :

Au niveau du bassin versant de la Ghiraya il y a une rareté de mesure des paramètres climatologiques. La température moyenne par exemple est prise au niveau du barrage de Lala Takerkoust (18,6 °C), tout comme la hauteur moyenne annuelle évaporée (1833,7 mm sur le bac Colorado).

Globalement, le climat est semi-aride a subhumide en amont. La végétation naturelle au niveau du bassin versant de la Ghiraya est constituée essentiellement de prairies, et de forêts naturels. Les formations arborées sont constituées principalement de rétam, adénocarpe et de xérophytes épineux qui sont en coussinet. (Ouagga, 2005).

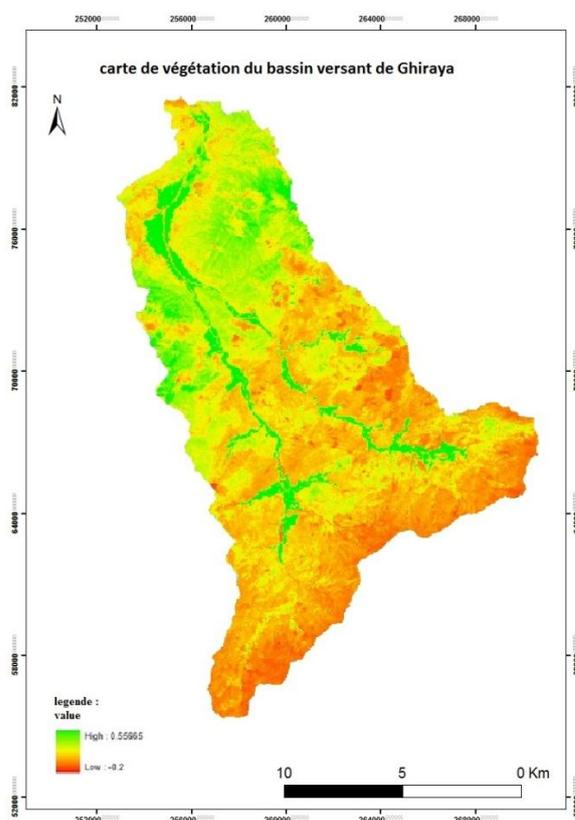


Figure 5 : Carte de Végétation de BV de Rhiraya

La végétation naturelle est constituée Schématiquement de la forêt naturelle de thuya en basse altitude, et laisse place à des chamephytes épineux en altitude (la forêt originelle de genévrier thurifère est très dégradée). La distribution spatiale de ces formations végétales est due d'une part à l'effet de l'exposition et d'autre part à la nature des sols. L'état clairsemé de ces formations laisse deviner l'impact des actions anthropiques (coupes de bois vif, pâturage, carbonisation et labour) (Ouagga, 2005).

On retrouve les cultures irriguées le long des deux bras de Rhiraya (figure 5) alors que les cultures à sec sont souvent observées de part et d'autres de l'oued dans les basses altitudes.

5. Carte d'exposition des versants:

L'analyse de la carte des expositions (figure7) montre que 62% sont orientés vers les flux humides du nord et d'ouest qui sont l'origine des hauteurs de précipitations importantes, alors qu'ils sont moins exposés aux rayonnements solaires, ce qui accentue davantage l'humidité.

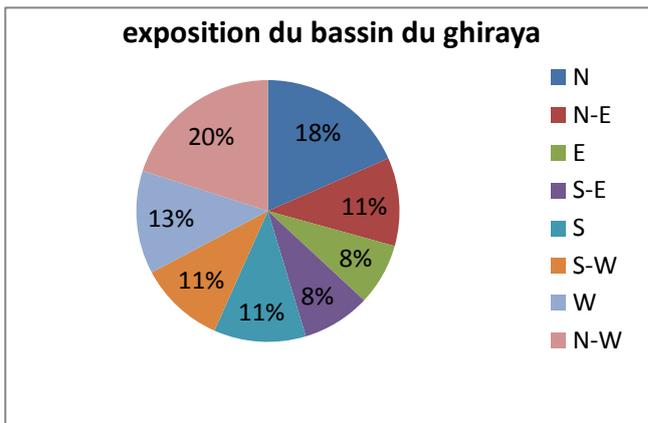


Figure 6: exposition du BV de la Rhiraya

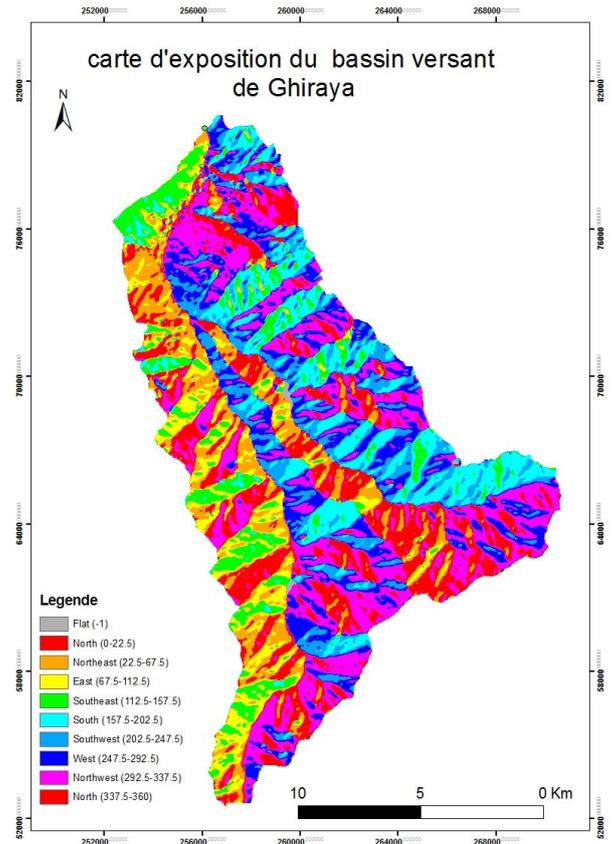


Figure 7: La carte d'exposition du BV de la Rhiraya

B. Le bassin versant d'Ourika

1. Situation Géographique :

La vallée de l'Ourika située à 35 Km de Marrakech se trouve entièrement dans le Haut Atlas de Marrakech entre les bassins versants de la Rhiraya et du Zat. C'est un bassin montagneux situé entre les latitudes 31° et 31°21' Nord et les longitudes 7°30' et 7°60' Ouest.

Le bassin de l'Ourika est situé sur le flanc Nord de l'Atlas de Marrakech (figure 1). Il a l'aspect d'un grand escalier dont les marches matérialisent les rejets verticaux d'accidents majeurs (3000 à 3500 pour la faille du Meltséne). Ces marches se traduisent géomorphologiquement par des entités

bien distinctes favorisant le découpage de la région en zones .Ces zones (unités structurale) sont d'importance variable et contiennent des bassins versants plus au moins importants à vallées généralement ramifiées et encaissées de l'aval vers l'amont. (Biron, 1982).

2. La morphologie :

Le bassin versant de l'Ourika (figure 8) couvre une superficie de 502,6 Km² avec un périmètre de 117,1 km.

D'autre part le bassin est assez compact, avec un indice de forme de **1,3** et un réseau hydrographique assez dense et bien ramifié égale a **1550,6 km**, cette ramification a participé à la réduction du temps de concentration des eaux (**5h20min**) et favorise le **déclanchement des crues brutales**.

Les altitudes varient de 1070 m à l'exutoire d'Aghbalou au point culminant situé à 4001 m et l'altitude moyenne est de l'ordre de 2500 m.

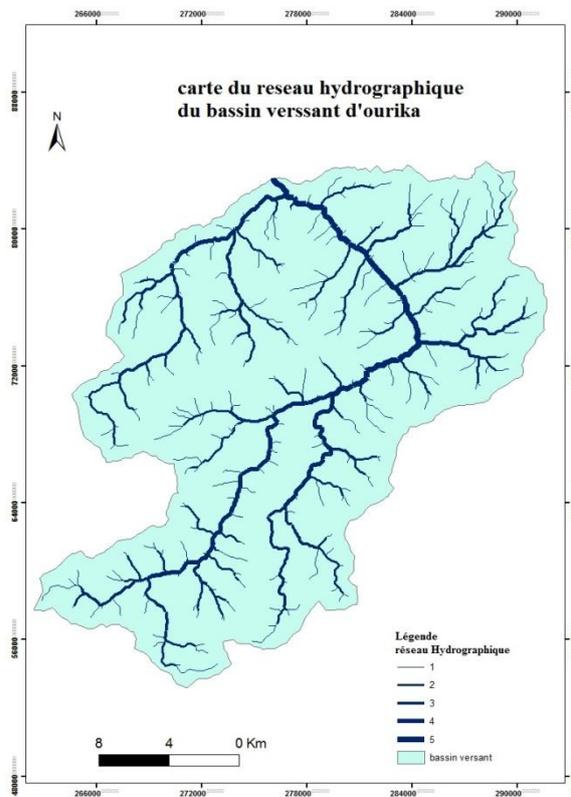


Figure 8 : carte du réseau hydrographique du BV d'ourika

3. Géologie et lithologie du bassin versant :

Sur le plan géologique, le bassin versant offre deux grands types de faciès :

- une partie amont, située à des altitudes supérieures à 2 000 m, constituée de roche magmatiques et métamorphiques, qui constituent le socle de la chaîne atlasique.

On y rencontre des roches plutoniques (notamment des granites et granodiorites), des roches volcaniques (andésites, rhyolites, etc.) et des faciès métamorphiques (gneiss et migmatites). Cette mosaïque cristalline est propice à un ruissellement immédiat des eaux de pluie ;

- une partie septentrionale, située à des altitudes inférieures à 2 000 m, composée de dépôts permo-triasiques et quaternaires plus tendres. La lithologie du Permo-trias est composée d'un faciès nord, subatlasique, formé de conglomérats, grès et siltites, et d'un faciès sud des hauts plateaux, formé essentiellement de siltites argileuses et localement de grès massifs.

La source des blocs et des galets charriés par l'Ourika proviendrait essentiellement du socle qui constitue la partie axiale de la chaîne atlasique. Quant aux matériaux latéraux plus tendres en provenance des versants, leurs entrées au niveau des drains principaux sont très variées : matériaux alluviaux (contact avec les cônes de déjection et les confluences des tributaires) et matériaux non alluviaux (cônes d'éboulis et glissements de terrain). Toutefois, l'environnement géomorphologique est marqué par la dominance de deux groupes de formes et de dépôts : les cônes de déjection et les terrasses fluviotorrentielles.

Ces deux unités sont intimement liées dans le temps et dans l'espace. (Saidi et al, 2003)

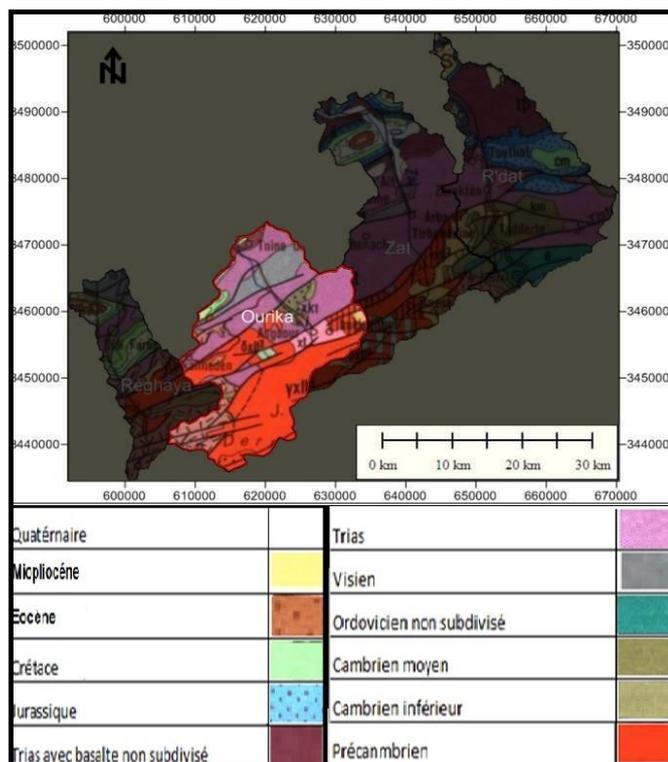


Figure 9 : Carte Géologique du BV d'ourika

4. Carte hypsométrique :

La carte hypsométrique met en lumière une répartition différentielle des tranches d'altitudes qui varie d'environ 4000 m au point le plus haut du bassin jusqu'à 1070 m à l'exutoire (Aghbalou). Généralement le bassin est caractérisé par des pentes. Tous ses paramètres se confinent pour donner un environnement propice aux pulsations brutales des cours d'eau et par conséquent les risques d'inondation (figure10).

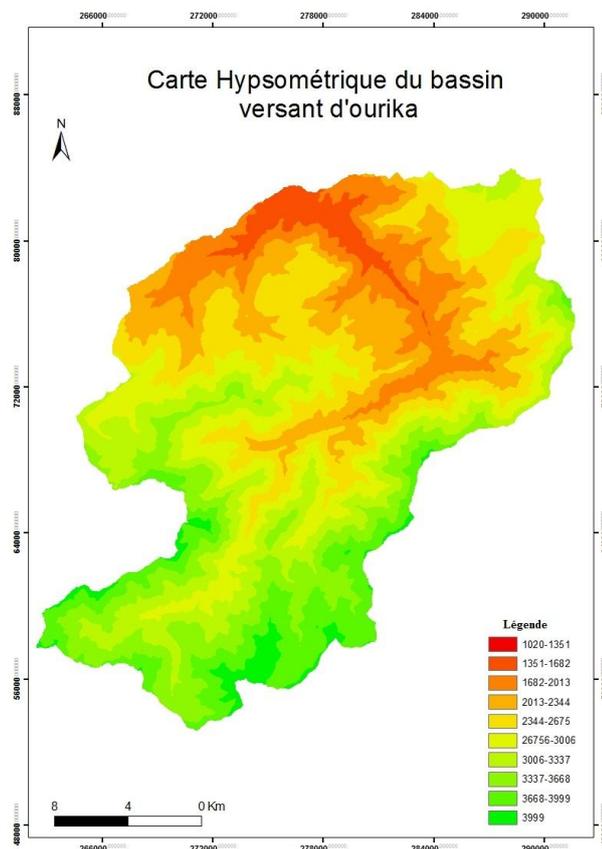


Figure 10 : carte Hypsométrique du BV d'ourika

5. Le climat global et le couvert végétal :

Le climat de la région est de type semi-aride, avec des amplitudes thermiques importantes entre l'hiver et l'été. Par ailleurs il est influencé par l'existence des vents Secs et chauds. Le chergui souffle de l'Est, généralement en août et septembre (Saidi M. E., Agoussine M. et Daoudi L., 2006).

D'autre part à cause de terrains accidentés avec des reliefs imposants et des formations lithologiques cristallines qui affleurent sur une grande partie du bassin, la végétation est limitée à quelques secteurs sous forme des forêts, essentiellement du Chênes verts. On peut aussi citer l'existence des Vergers de pommiers et de noyers qui se trouvent le long de la vallée en colonisant les terrasses alluviales (haddani, 2012).

On se basant sur l'indice de NDVI (The normalized difference vegetation index) calculé à partir des images satellitaires land-Sat 2014 capté au mois de mai 2014, à cette période ou on cartographie seulement la végétation permanente.

On a pu établir une carte de végétation du bassin versant par ailleurs un autre traitement SIG a montré que la couverture végétale couvre 23.11% du surface Total du bassin versant.

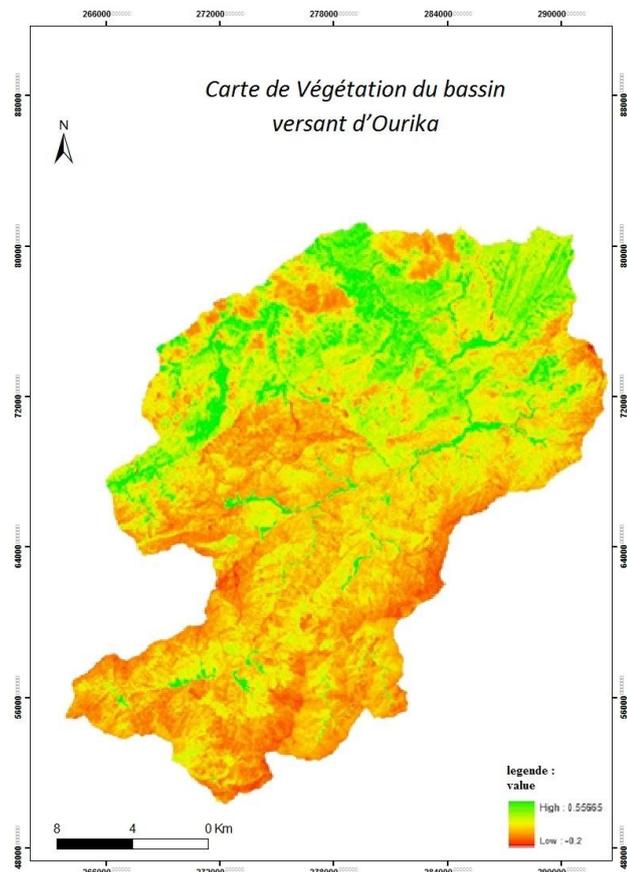


Figure 11 : Carte de Végétation du BV d'ourika

6. Carte d'exposition :

Les bassins versants du Haut Atlas orienté vers le nord et vers l'ouest sont exposés aux flux humides du Nord-Ouest. Il en résulte des hauteurs de précipitations beaucoup plus importantes et ils font des adrets moins exposés aux rayonnements solaires, ce qui accentue davantage l'humidité. Les versants opposés ont un contraste dans la durée de l'ensoleillement et dans l'intensité calorifique des radiations reçues au sol par unité de surface. Ceci est d'autant plus accusé que les pentes des versants sont importantes. (Abdelghani Boudhar, 2009)

Selon la carte d'exposition du bassin versant (figure 5) on déduit que 56% des versants sont orientés vers le nord et vers l'ouest (figure 6c) sont des zones de réception des masses humides.

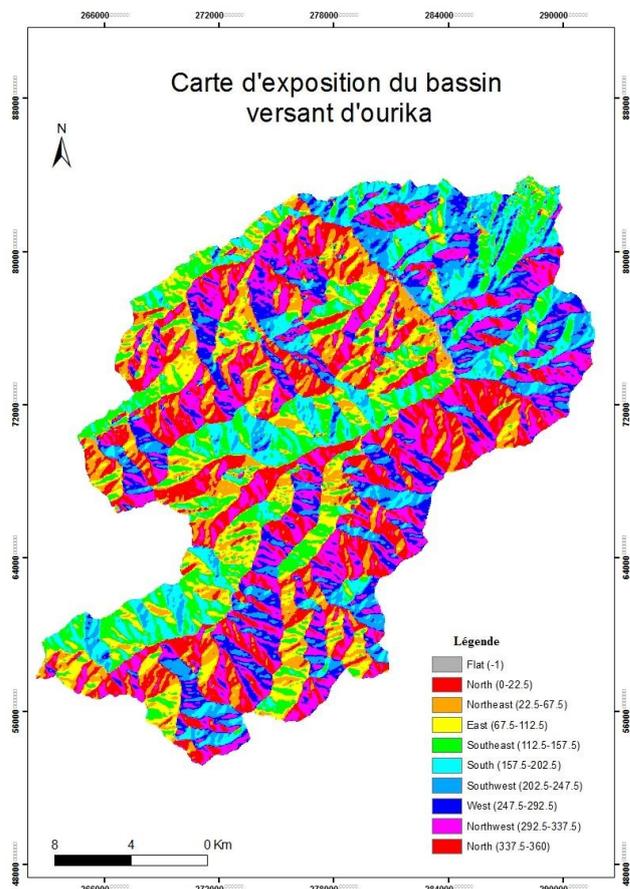


Figure 12 : Carte d'exposition du BV d'ourika

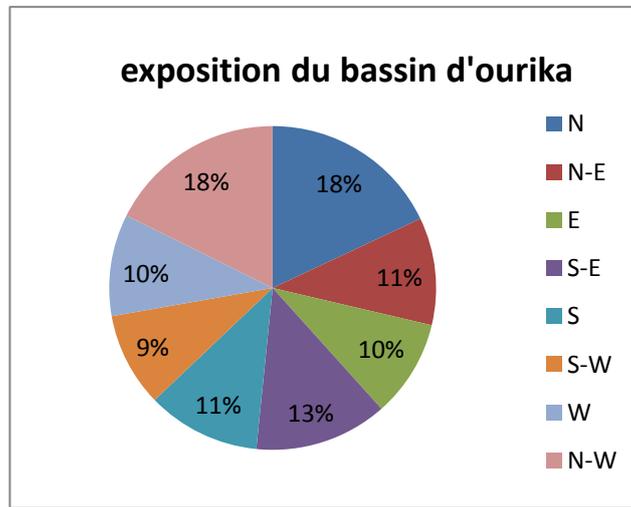


Figure 13 : exposition du bassin versant d'ourika

C. Le Bassin versant du Zat :

1. Situation géographique :

Le bassin versant de Zat est située à 50 Km au Sud-est de Marrakech Entre les latitudes 31°.30 et 31°45 et les longitudes 7°.30 et 7°.45 Il est limité au Nord par la plaine du Haouz, au Sud par la zone axiale du Haut Atlas, à l'Ouest par l'Oued Ourika et à l'Est par l'oued R'Dat (figure1).

2. La Morphologie :

L'oued Zat est un affluent atlasique rive gauche de l'oued Tensift qui draine un bassin versant (figure14) d'une superficie de 530 Km² et un périmètre de 143 km à Tafriat. Il constitue l'un des bassins les plus actif et pentus du bassin de Tensift.

Concernant l'indice de compacité ($K_c = 0,28P/S$) qui est égale à 1,73, le bassin à une forme allongé qui aura un impact sur les écoulements observés à l'exutoire. Le cours d'eau principale à une longueur de 62 km et le réseau hydrographique est bien ramifié. Il donne une densité de drainage de l'ordre de 3,2 km/km² marqueur d'une forte densité qui va aboutir aune collecte aisée des eaux de pluie et un acheminement important des ruissellements vers l'exutoire.

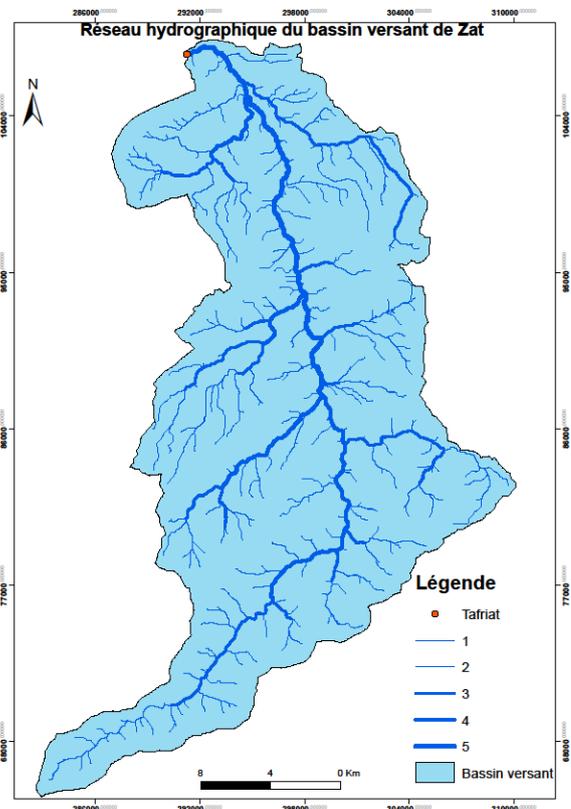


Figure 14 : Carte de Réseau hydrographique de BV Zat

3. Géologie et lithologie du bassin versant :

Le bassin est constitué d'un socle rigide Paléozoïque et précambrien au sud et des terrains de couvertures secondaires et tertiaires qui se développent vers le nord et le nord-est.

La chaîne atlasique montre suivant une direction nord-est, sud-ouest deux zones distinctes:

- A l'amont, la zone axiale de la chaîne à hautes altitudes où n'affleure que le socle.

- A l'aval, la zone sub-atlasique septentrionale où la couverture post-hercynienne constitue l'essentiel des affleurements.

Dans l'ensemble, la lithologie du bassin du Zat est constituée à 46 % de terrains imperméables, à 40 % de terrains semi perméables et à 14 % de terrains perméables. (P.pascon ,1977)

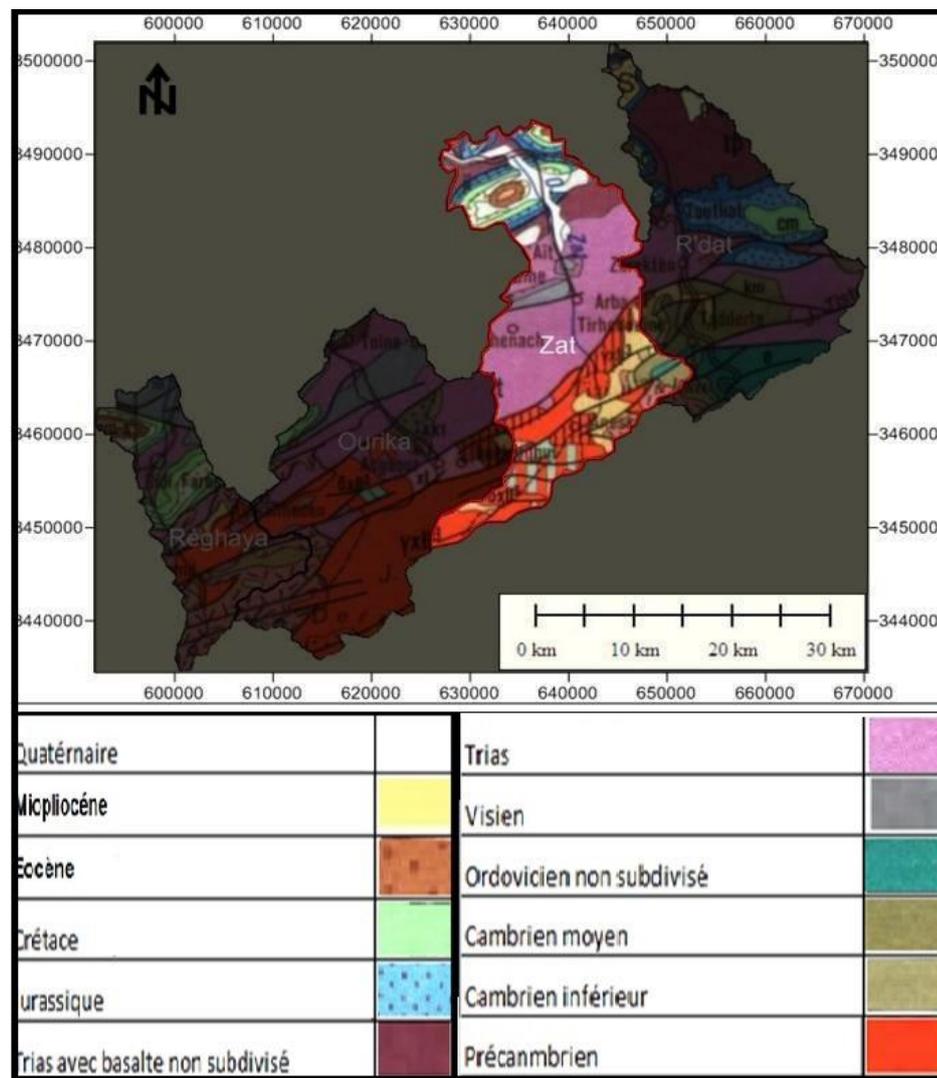


Figure 15:carte Géologique du BV Zat

4. Hypsométrie :

L'analyse de la carte hypsométrique du bassin de Zat montre que le bassin est constitué généralement de terrains de hautes altitudes avec une prédominance des terrains entre 1000 et 2000 m représentant 70 % de la surface ce totale du bassin. La moyenne est de l'ordre de 1880 m et on note aussi que le point culminant du bassin est situé à 3896 m alors que le point le plus bas, celui de l'exutoire à Tafriat (760m).

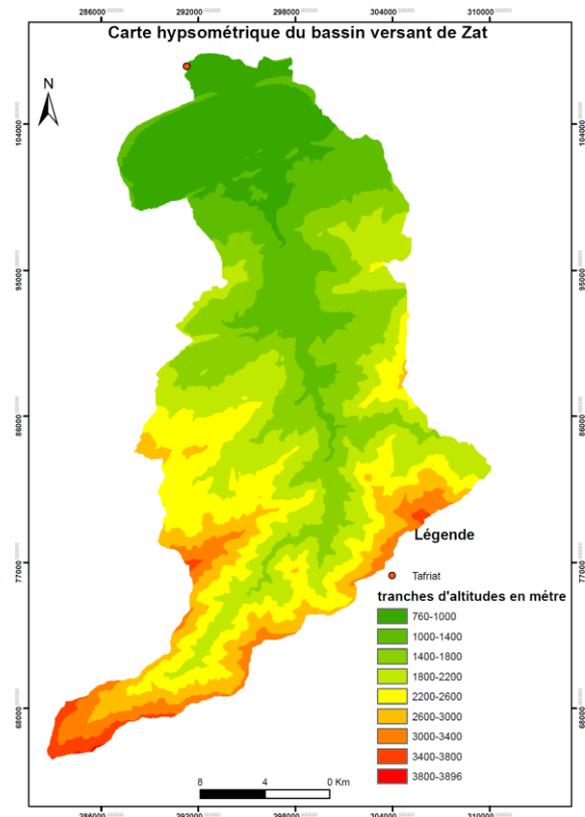


Figure 16: carte Hypsométrique de BV Zat

5. Le climat global et la végétation :

En observant la carte de végétation du bassin Zat on remarque que la végétation pousse sur les berges de l'oued Zat grâce à la disponibilité des ressources hydriques en plus de la fertilité du sol, d'autre part en aval il y a des terrains qui sont occupés par des forêts (carte topographique, Arbaat Tighedwin).

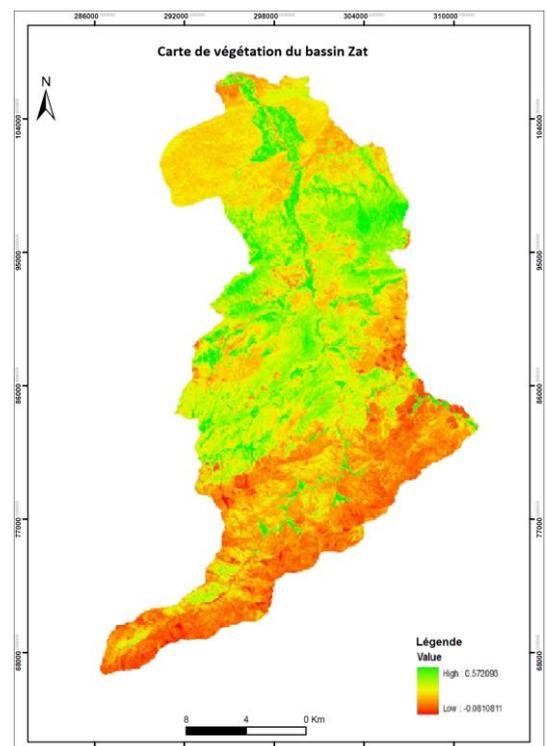


Figure 17: Carte de Végétation de BV Zat

6. La Carte d'exposition des versants :

La carte d'exposition montre que 61% du bassin est orienté vers le Nord et l'ouest, ce qui favorise l'apport en masses humide qui apportent des précipitations dans la région. Ces masses humides venu rencontrent une zone à altitudes élevée et y donnent naissance à des pluies importantes.

Tous ces facteur se combinent pour nous donnent un milieu propice a des pulsations brutale qui peuvent causer des dégâts inattendus.

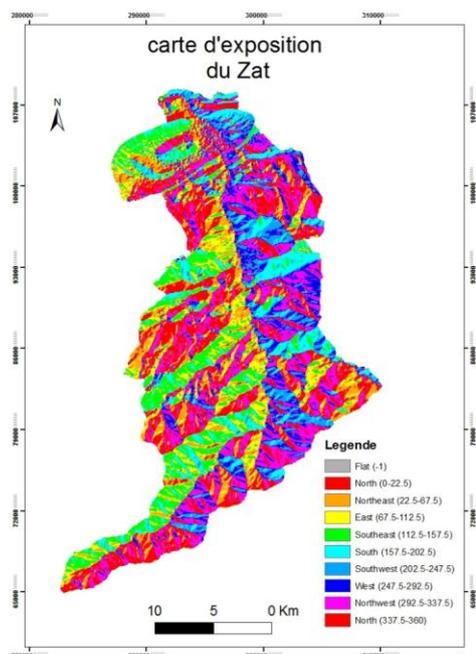


Figure 18: Carte d'exposition du BV Zat

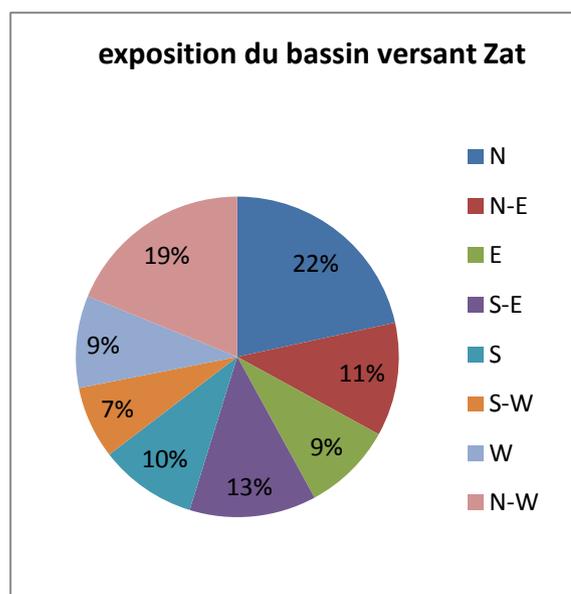


Figure 19 : exposition du BV Zat

D. Le Bassin versant de R'Dat :

1. Situation géographique :

Il est situé au Sud-Est de Marrakech entre les latitudes 31°10' et 31°40' Nord et entre les longitudes 7°10' et 7°40' Ouest.

L'exutoire du bassin du R'Dat (Sidi Rahal) est situé à une altitude de 690 m. C'est un bassin de forme dissymétrique qui appartient au versant Nord Atlasique. Il est limité au Nord par les Jbilet, au Sud par la ligne des crêtes du Haut Atlas, à l'Est par la ligne de partage des eaux du bassin de Tassaout et à l'Ouest par le bassin versant de Zat.

2. Morphologie :

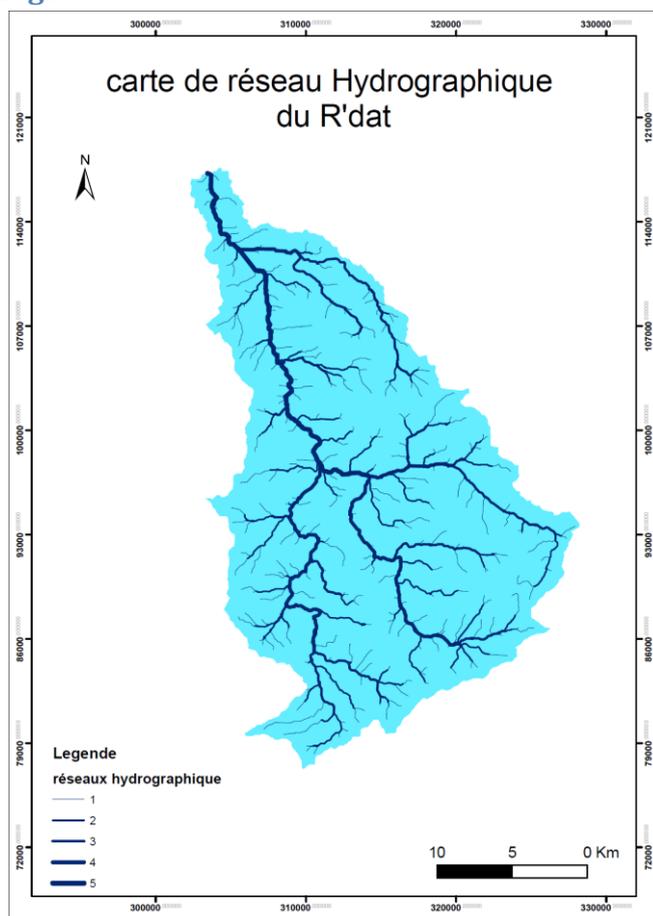


Figure 20: carte du réseau hydrographique de R'Dat

L'oued R'Dat est un affluent atlasique du Tensift, Ses principaux affluents sont Assif-N-Tichka qui est à l'origine de l'oued R'Dat, Oued Imizer formé par la confluence de l'oued Imarighne et de l'Oued Tihizat., Assif-Nifraden et Oued Tissert. (RAMROMI Adnane, 2007)

A l'aide de l'outil informatique SIG on a pu établir des cartes morphométriques du bassin R'Dat qui draine une surface de **532km²** avec un périmètre de **130km**.

Le bassin de R'Dat a un réseau hydrographique bien ramifié (1374.8Km) (figure 19) Cette ramification facilite la collecte des eaux pour les conduire à l'exutoire. L'indice de compacité est de l'ordre de **1.54**. Il confère également à ce bassin une forme allongée qui aura un impact sur le temps de concentration et le rassemblement des écoulements vers l'exutoire qui est de l'ordre de **7h**. Les dimensions du rectangle équivalent étant : 10 Km pour la largeur et 50 Km pour la longueur. Ces dimensions confirment la forme allongée du bassin versant.

3. Géologie et lithologie du bassin versant

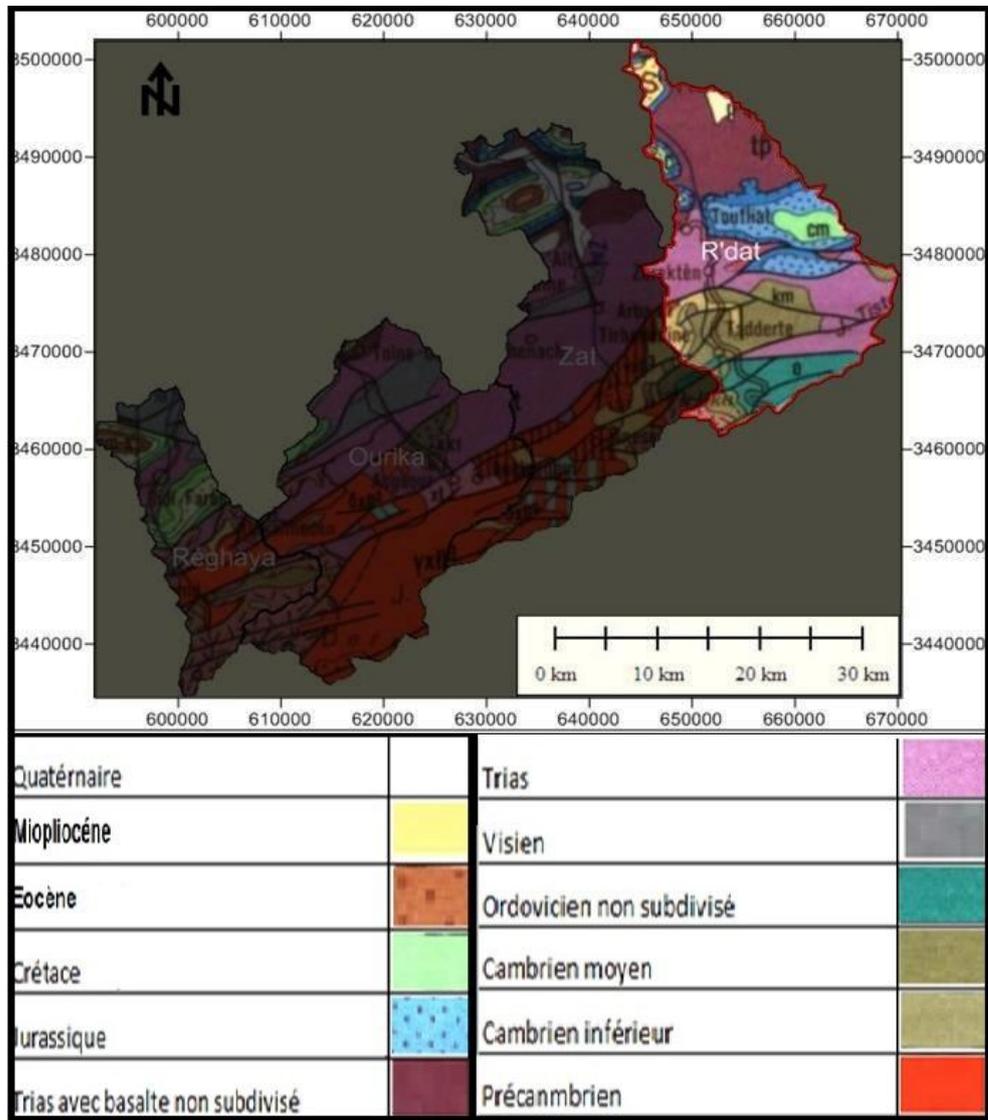


Figure 21: Carte géologique du BV R'Dat

- Géologie :

Sur le plan Le bassin est constitué de deux grands ensembles : d'une part un socle rigide d'âge Paléozoïque et précambrien situé au sud, et une couverture d'âge Méso à Cénozoïque qui se développent vers le Nord et le Nord-est. La relation entre ces deux ensembles est parfois en contact stratigraphique ou en contact anormale par failles. **(Moret 1930 et Proust 1962)**

- La lithologie :

Dans l'ensemble, la lithologie du bassin du R'Dat est constituée de 30% de terrains imperméables, 56% de terrains semi perméables et 14 % de terrains perméables (P. Pascon 1977). La plus importante caractéristique de ces formations géologiques, c'est qu'elles sont en majeure partie imperméables, ce qui favorise l'écoulement superficiel et éventuellement la naissance de crues importantes en cas de pluies conséquentes.

4. Hypsométrie :

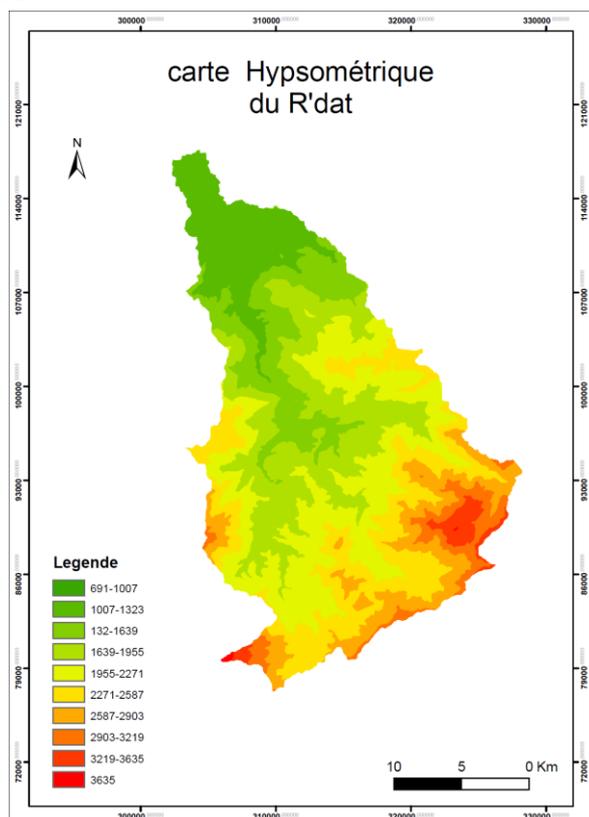


Figure 22: Carte Hypsométrique du R'Dat

Sur le plan altitudinal, la carte hypsométrique met en lumière une répartition différentielle des tranches d'altitudes. Avec une altitude maximale de l'ordre de 3535 m et valeur minimale de 691 m. Les altitudes les plus dominantes sont les altitudes moyennes [1639-1955] et [1955-2271] qui représentent 44% de la surface du bassin.

D'autre part, cette dissection du territoire a donné un temps de concentration assez long de 7h. Ce dernier est amplifié par des pentes pointues en amont du bassin pour atteindre des valeurs de l'ordre de 39% jusqu'à 0 pour des terrasses aménagées en aval du bassin versant.

5. Le climat global et la végétation :

Dans l'absence de précipitations, les affluents de R'Dat sont asséchés et les ressources en eau se font rares. La végétation ressent désagréablement cette sécheresse et attend impatiemment l'arrivée des précipitations et des écoulements. C'est pourquoi sur la carte de végétation on observe une répartition calée sur le réseau hydrographique, alors qu'au milieu du bassin on a des terrains exploités par la population de la région. Cette répartition joue un rôle primordial dans la protection contre les inondations et le ralentissement de la vitesse des crues d'une part et une augmentation du taux d'infiltration d'autre part.

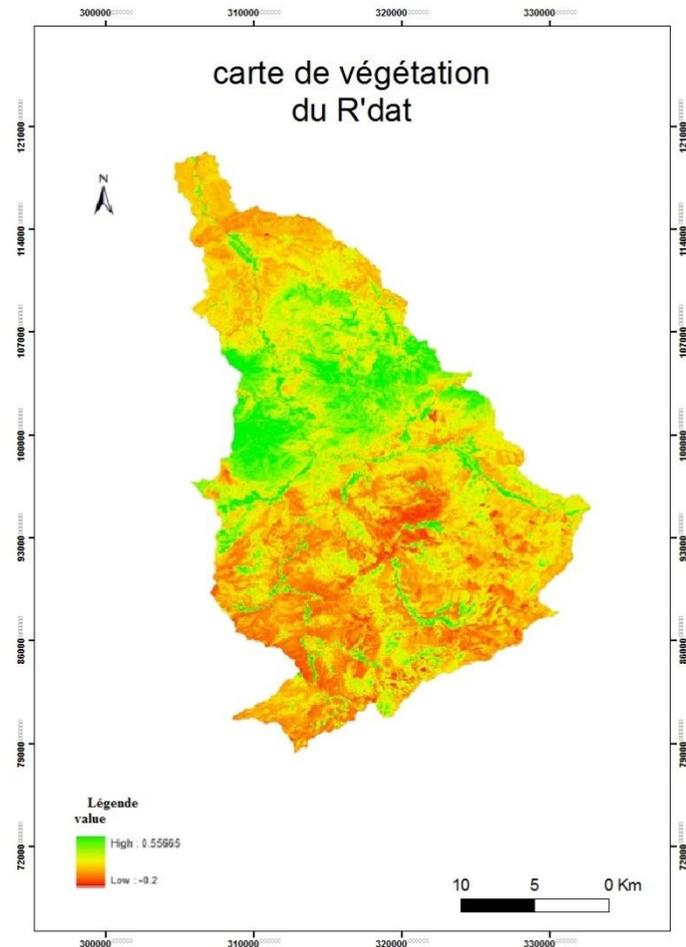


Figure 23: Carte de Végétation de R'Dat

1. Carte d'exposition :

La carte d'exposition montre que 57% du bassin est orienté vers le Nord et le ouest. Comme pour les autres sous bassins précédents, beaucoup de versants font face aux masses d'air humides en provenance du Nord, du Nord-ouest et de l'ouest, c'est qui provienne du large de l'océan.

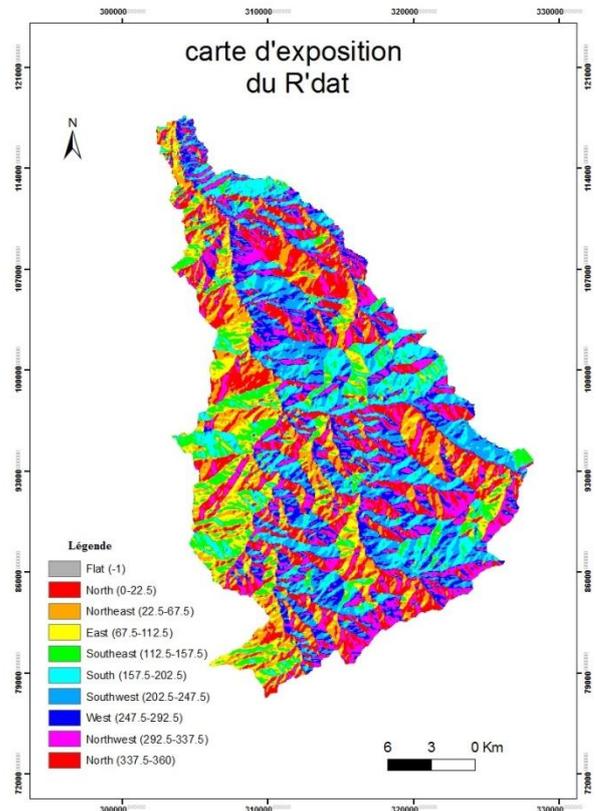


Figure 24: Carte d'exposition de BV

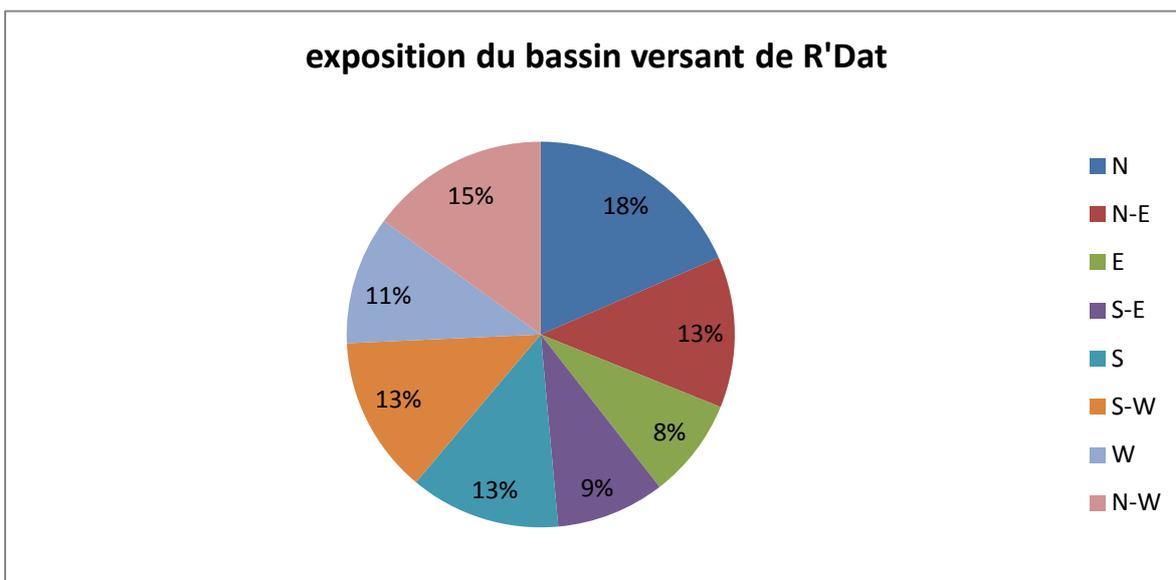


Figure 25: exposition de BV R'Dat

Tableau Récapitulatif :

Les tableaux suivant englobe un ensemble des Paramètres morphométriques et hydrologiques des bassins Versants mise en études :

bassin versant	Périmètre (P) en km	Surface (A) en km ²	Altitude max. en m	Altitude moy. en m	Altitude min. en m	Pente max.	Pente moy.	Pente min.
Rhiraya	81.3	225.3	4098	2165.8	1068	45.9	19.1	0
Ourika	117.1	502.6	3996	2444.5	1018	46.4	19.9	0.14
Zat	134.9	525.9	3847	1831.7	794	45.7	15.5	0
R'Dat	122.2	552	3476	1718.7	722	39.4	13.8	0

Bassin versant	Indice de capacité Kg	Dd (densité de drainage) (en km-1)	Temps de concentration	surface de rétention en Km2	Pourcentage de végétation	perméabilité (P. Pascon 1977).		
						impermeable	semi perméable	perméable
Rhiraya	1.5	3.8	4h11min	48	21.33	55%	39%	6%
Ourika	1.5	3.1	5h20min	116	23.11	59%	15%	26%
Zat	1.6	3.2	6h44min	196	37.33	46%	40%	14%
R'Dat	1.5	2.5	7h	144	26.09	30%	56%	14%

Tableau 1 : Tableau récapitulatif

Chapitre 2 : Analyse des données (Pluviométrie et Hydrométrie)

A la lumière des données de 4 stations hydropluviométrique à savoir Tahanaout, Aghbalou, Tafriat et Sidi Rahal nous avons réalisé des comparaisons à l'échelle mensuelle et annuelle des précipitations et des débits.

1. Variation mensuelle :

a partir des données enregistrées au niveau des 4 stations placés a l'aval des bassins versant mise en études , on a établi un graphique regroupe les moyennes d'une série de données de trente ans environ saufs pour la station de Tafriat où la période n'est que de 20 ans.

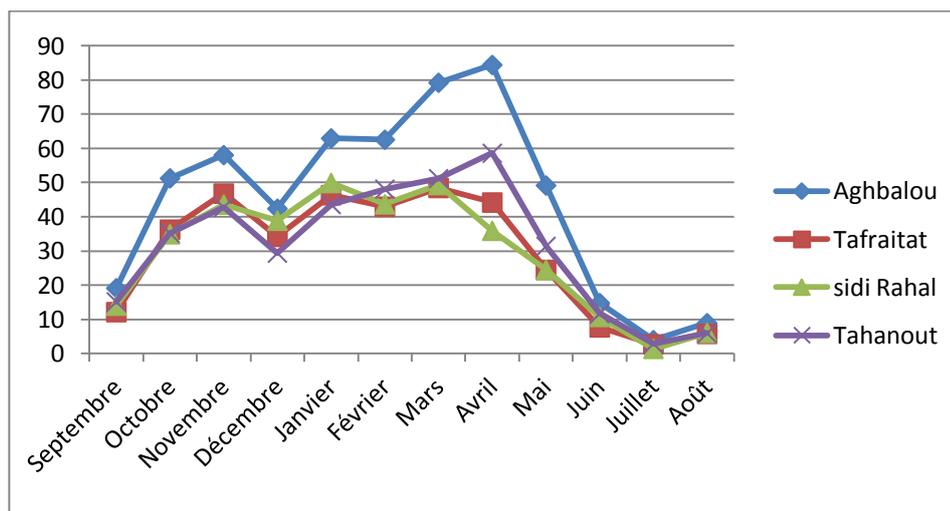


Figure 26: Variation mensuelle comparative des précipitations

L'analyse des données des précipitations mensuelles des bassins montre une variation irrégulière des précipitations entre les mois de l'année. Les fortes valeurs sont enregistrées dans une période hivernale entre les mois novembre et Avril avec un maximum de 84 mm en mois Avril (pour ourika), et les faibles dans période Estivale entre les mois juin et septembre avec un minimum de 1 mm en juillet.

2. Variation annuelle:

L'analyse des figures en bas des précipitations annuelles au niveau des 4 stations montre une hétérogénéité entre les années hydrologiques. Les précipitations annuelles présentent une grande variabilité temporelle. Les coefficients de étant pour Tahanaout, Aghbalou, Tafriat et Sidi Rahal.

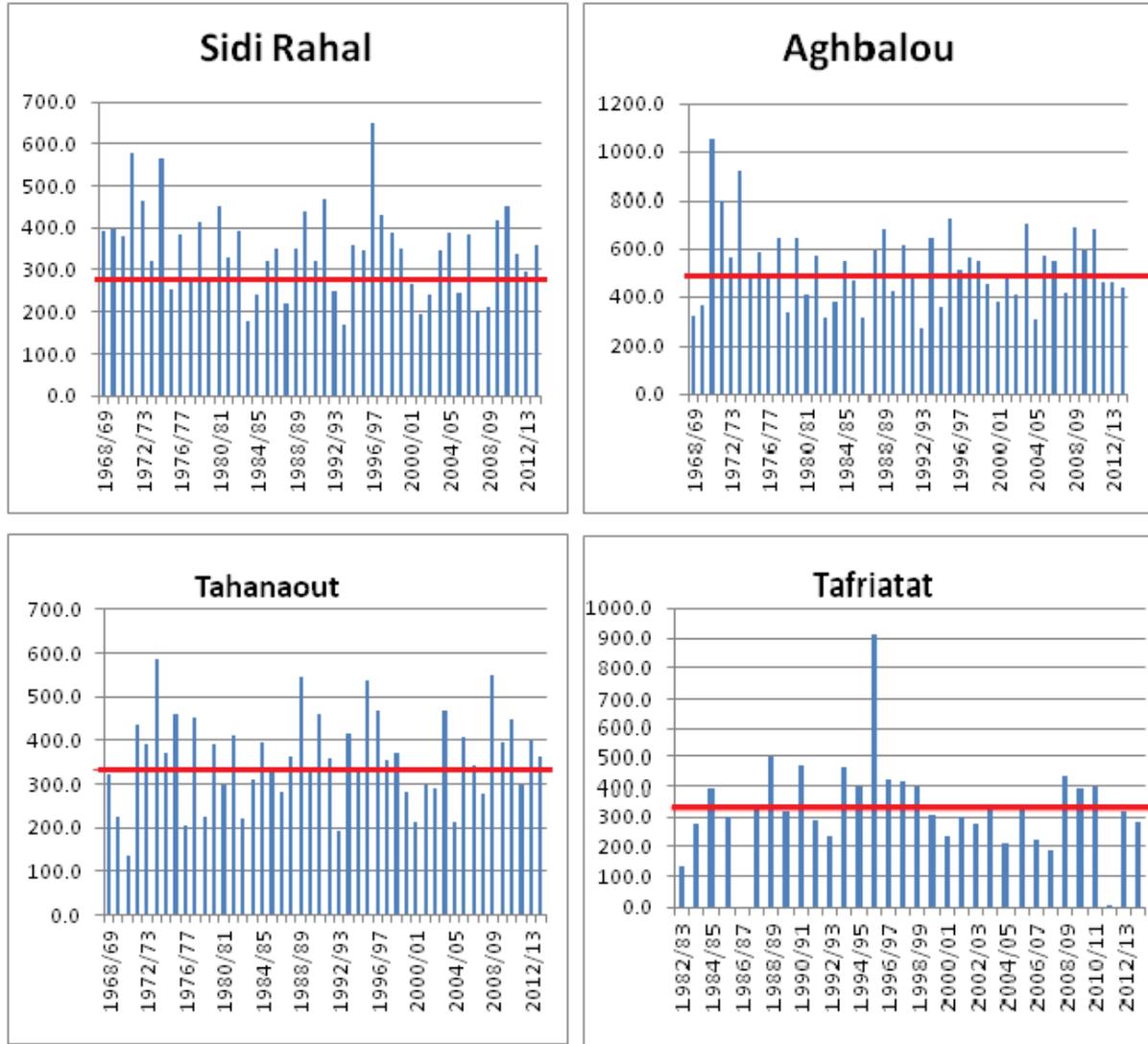
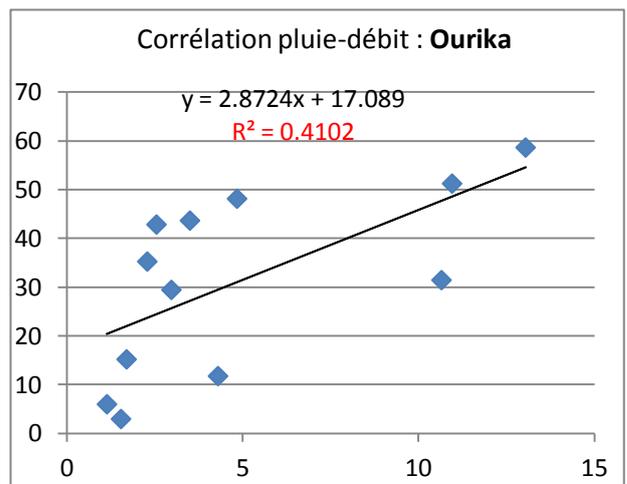
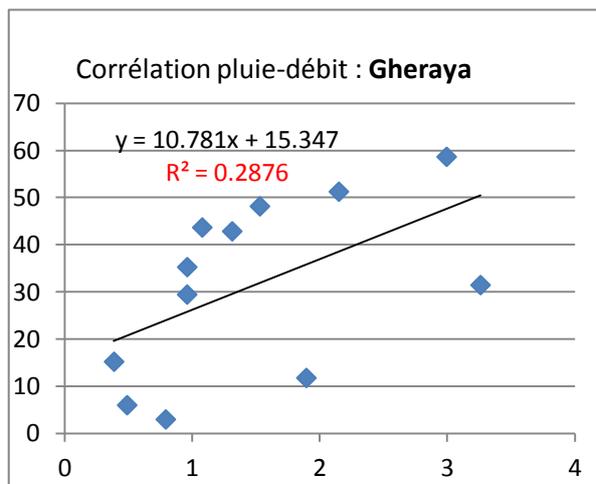


Figure 27: Historique de pluie annuelle des 4 stations

3. Corrélation pluie-débit :

La corrélation pluie-débit permet de juger le degré de liaison entre ces deux paramètres naturels.



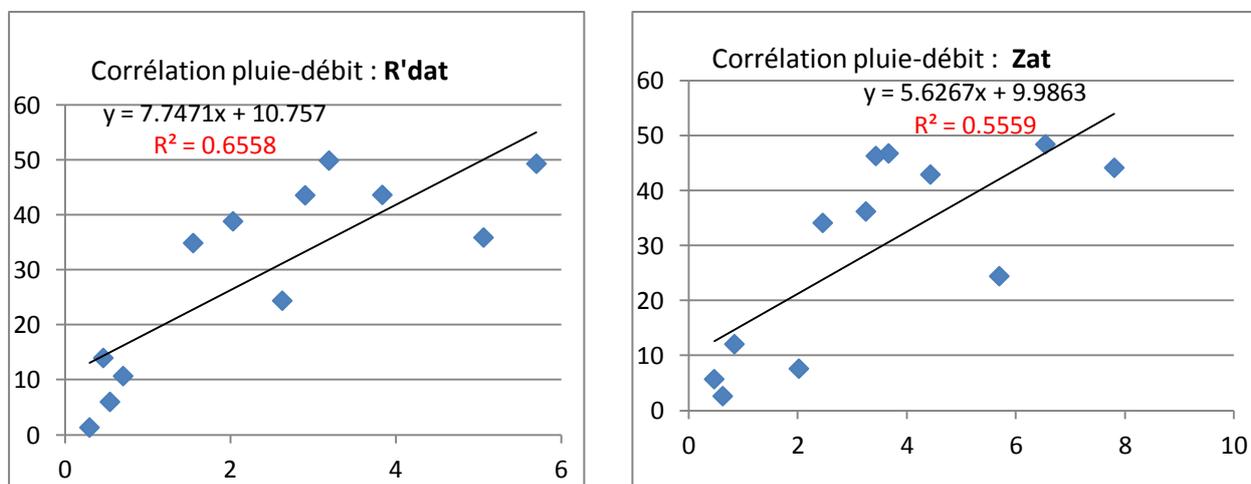


Figure 28: Corrélation pluie débit des 4 stations

Les graphes ci-dessus (figure28) présentent une corrélation linéaire entre les pluies et les débits moyens mensuels au niveau des quatre stations (Tahanaout, Aghbalou, Tafriat et R'Dat), On n'observe que deux stations avec des coefficients de corrélation relativement bons. Pour les stations Zat ($R = 0.74$ pour Tafriat) et de Sidi Rahal ($R = 0.80$ pour R'Dat). On déduit que les débits sont étroitement liés aux précipitations. Au niveau des stations d'Aghbalou et de Tahanaout les coefficients de corrélation sont faible et respectivement de 0,64 et de 0,53.

Pour ces deux bassin il y a une partie des précipitations d'automne et d'hiver, sont tombée sous forme nival qui ne s'écoulent qu'au printemps.

Les faibles valeurs de R pour les stations de Tahanaout et d'Aghbalou, sont principalement lier au régime pluvio-nival.

4. Corrélation pluie-altitudes :

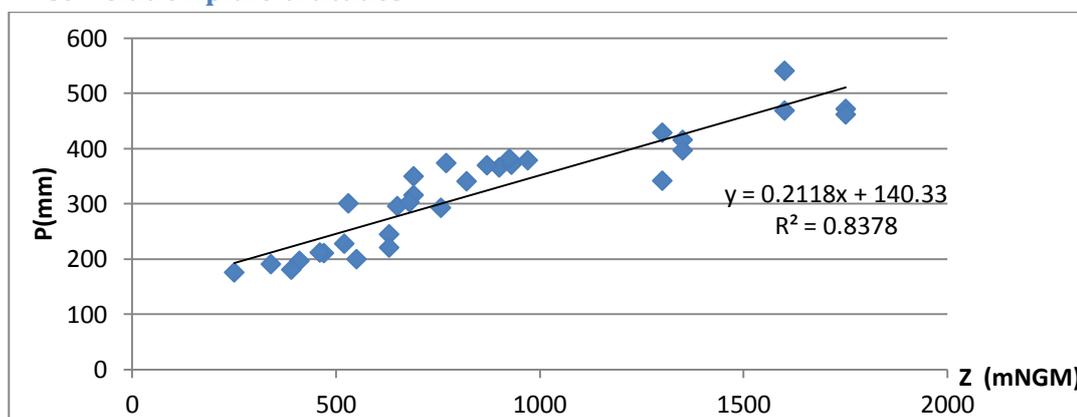


Figure 29: Relation entre précipitation et altitude

Après la collecte d'un ensemble des données de stations pluviométriques (31 station) nous avons établi une corrélation (figure 29) entre les altitudes et les pluies enregistrées au niveau de ces stations dispersés sur tout le bassin du Tansift. Le résultat obtenu montre l'existence d'une corrélation positive entre les altitudes et les pluies enregistrées. Cette corrélation qui est égale à 0.91 nous a encouragés à faire un traitement à l'aide d'un outil SIG qui a pour objectif la spatialisation des pluies calculé au niveau des stations pluviométriques. Ceci Pour sortir une carte de pluie (figure 29) qui montre les zones pluvieuses du bassin généralement placés en amont.

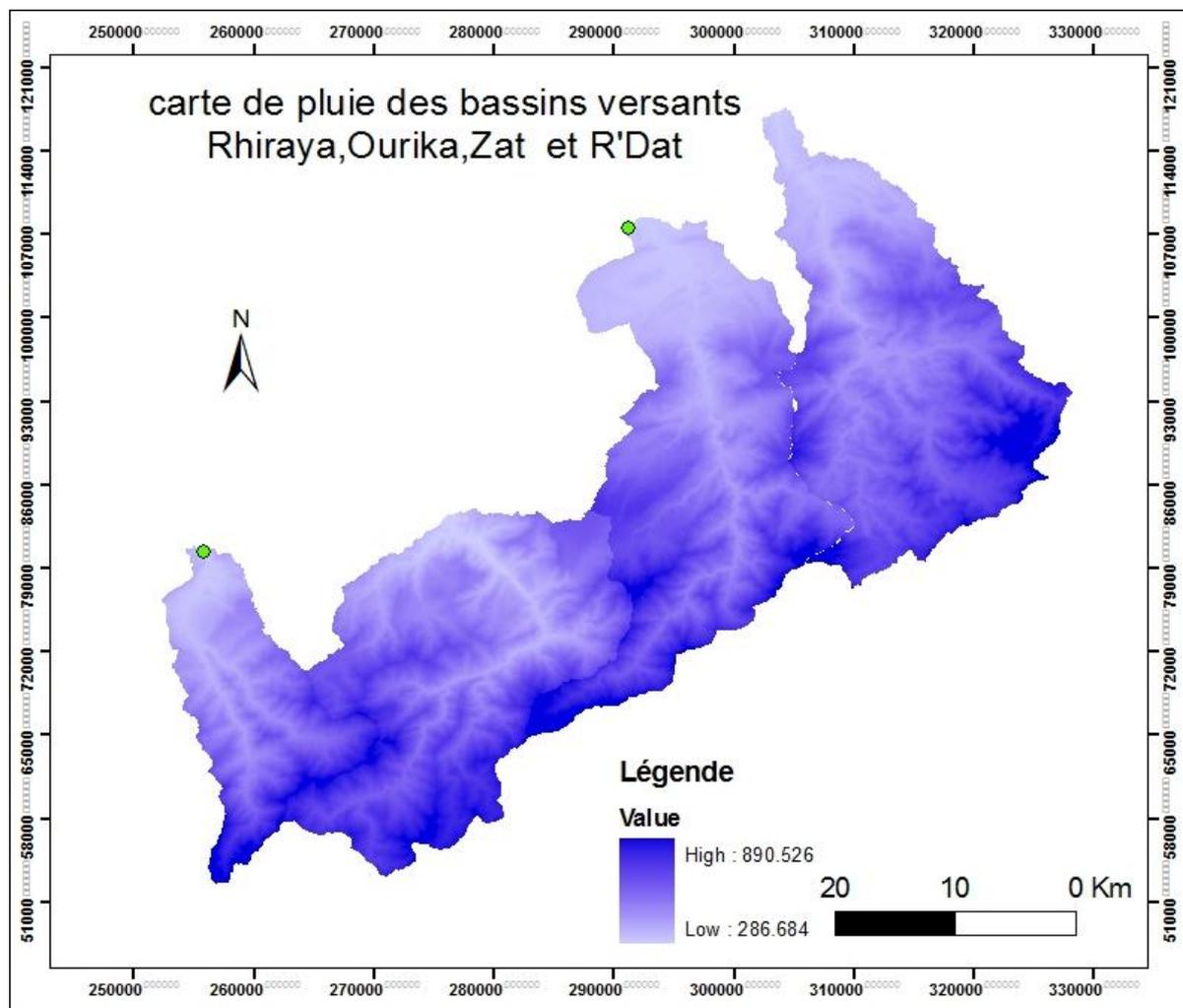


Figure 30: Carte de pluie de Zones d'études

L'analyse fréquentielle :

L'analyse fréquentielle permettra d'estimer le temps de retour d'une valeur soit de débit ou de précipitation. Par le traitement d'une longue série de débits et de précipitations maximal journaliers enregistrés au niveau des différentes stations (sidi Rahal, Tahanaout, tafriat, Aghbalou). Cette prédiction repose sur la définition et la mise en œuvre d'un modèle fréquentiel qui est une équation décrivant le comportement statistique d'un processus (par exemple dans ce chapitre, on va utiliser les différentes lois comme Gamma, weibull, log-normal...). Ces modèles décrivent la probabilité d'apparition d'un événement de valeur donnée (débit/précipitation). C'est à partir du choix de la loi de probabilité que dépendra la validité des résultats de l'analyse fréquentielle.

1. Principe :

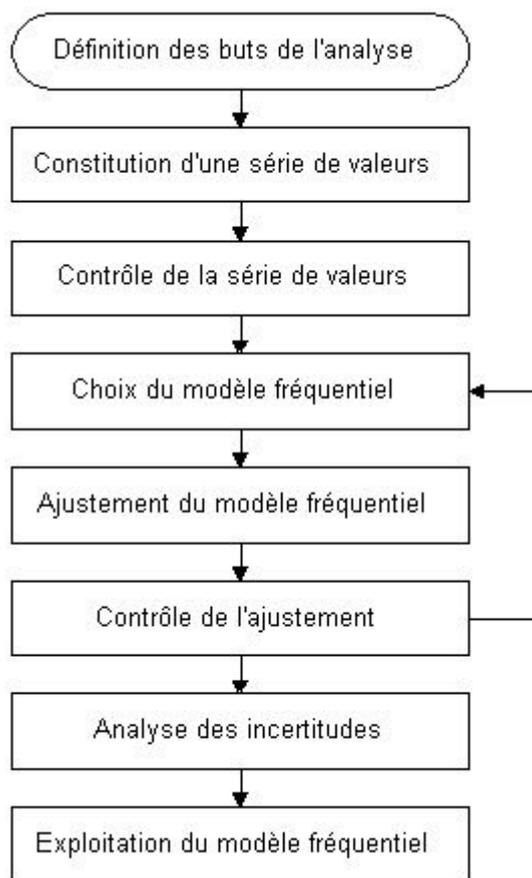


Figure 31: schéma d'analyse fréquentielle

2. Ajustement de lois à un échantillon de pluie

L'estimation des périodes de retour des valeurs extrêmes de pluie est l'un des problèmes majeurs posés aux concepteurs d'aménagements. Pour cela, on procède à l'analyse statistique des chroniques d'observation des pluies maximales journalières.

Notre étude porte sur l'ajustement des précipitations maximales journalières du bassin versant des Oued Rhiraya, Ourika, Zat et R'Dat sur une période d'observation de 42 ans (1970/71 - 2011/2012). Sauf pour Zat on dispose seulement de 32 années d'historique.

Les lois statistiques appliquées dans cette étude sont : loi de Gumbel, loi de Weibull, loi Normal, loi LogNormal, loi de Gamma et loi exponentielle.

Le test d'ajustement des répartitions empiriques et théoriques est fait par le test d'adéquation de χ^2 .

A. Tahanaout :

I. Ajustement statique des lois sur les Pluies :

➤ Analyse visuelle (graphes):

L'ajustement des lois sur les données hydrologiques donne une estimation des périodes de retour des valeurs extrêmes des pluies ou des débits ; celles-ci ont une grande importance dans le domaine des aménagements hydrauliques, ainsi que dans la prévision et protection contre les inondations.

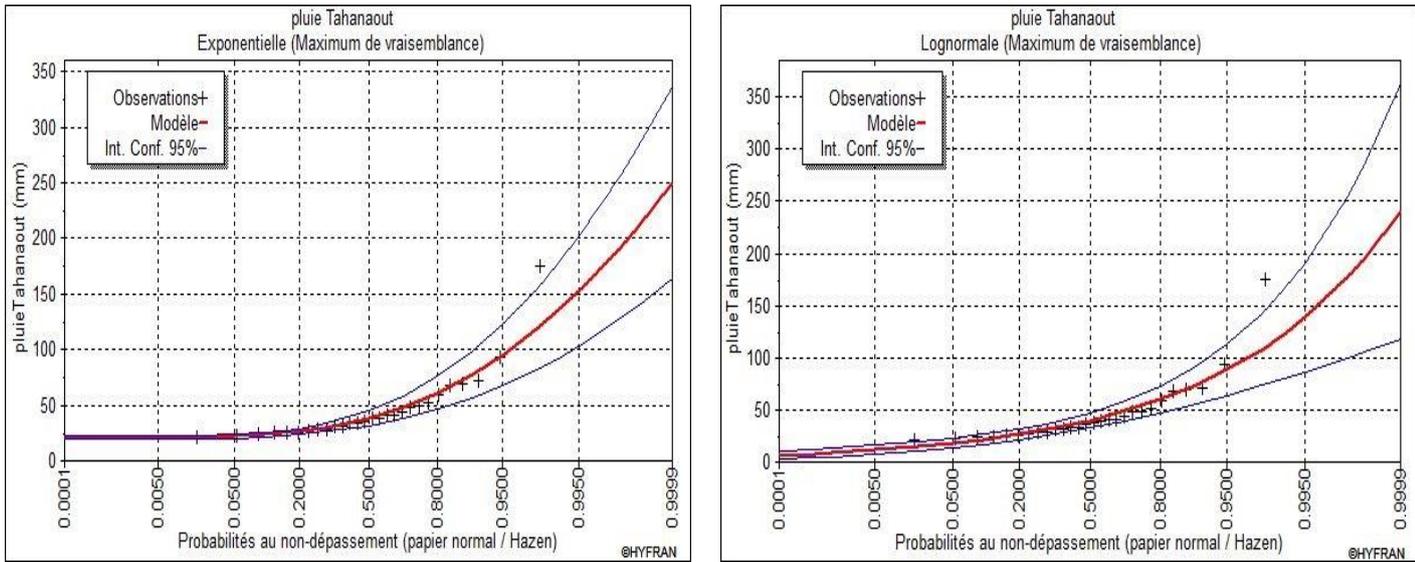


Figure 32: Graphe d'ajustement de loi Exponentielle et LogNormal sur les pluies de Tahanaout

D'après les graphes d'ajustement (figure32) des lois statistiques sur les données des pluies maximales journalières annuelles, les deux lois **Exponentielle** et **LogNormal** restent les mieux adapté.

➤ *Analyse numérique (statistique) :*

	BIC	AIC
Exponentielle (Maximum de vraisemblance)	242.522	239.857
LogNormal (Maximum de vraisemblance)	250.818	248.153
Gumbel (Maximum de vraisemblance)	254.775	252.111
Gamma (Maximum de vraisemblance)	257.177	254.513
Weibull (Maximum de vraisemblance)	263.995	261.331
Normale (Maximum de vraisemblance)	276.993	274.328

Tableau 2 Les critères des différentes lois statistiques ajusté sur les pluies maximales

Les résultats montrent que **la loi Exponentielle** présente une faible valeur de BIC et AIC. Ceci implique qu'elle s'ajuste la mieux aux données de notre zone d'études.

➤ *Estimation des périodes de retour des précipitations maximales journalières :*

L'estimation des périodes de retour se base sur la loi Gamma puisque c'est la loi la mieux adaptée.

T	Exponentielle	Gumbel	weibull	normal	log normal	Gamma
1000	192	144	160	141	177	152
200	152	118	137	125	138	127
100	135	107	127	117	123	116
50	118	96.4	115	109	108	105
20	95.3	81.7	98.4	96.3	88.4	89.4
10	78.1	70.3	84.4	85.2	74.2	76.9
5	60.9	58.5	68.4	71.6	60	63.3

2	38.1	40.5	41.8	45.7	40	41.9
---	------	------	------	------	----	------

Tableau 3: L'estimation des périodes de retour des pluies de la station de Tahanaout

II. Ajustement statique des lois sur les débits :

➤ Analyse visuelle (graphes):

Les graphes en bas représentent les probabilités empiriques et théoriques des distributions des différents ajustements des lois statistiques sur les données de débits maximaux instantanés. Nous avons constaté que la loi la mieux adaptée aux données pour ensuite analyser les périodes de retour est la loi log Normal suivie par la loi weibull, les autres lois présentent un mauvais ajustement.

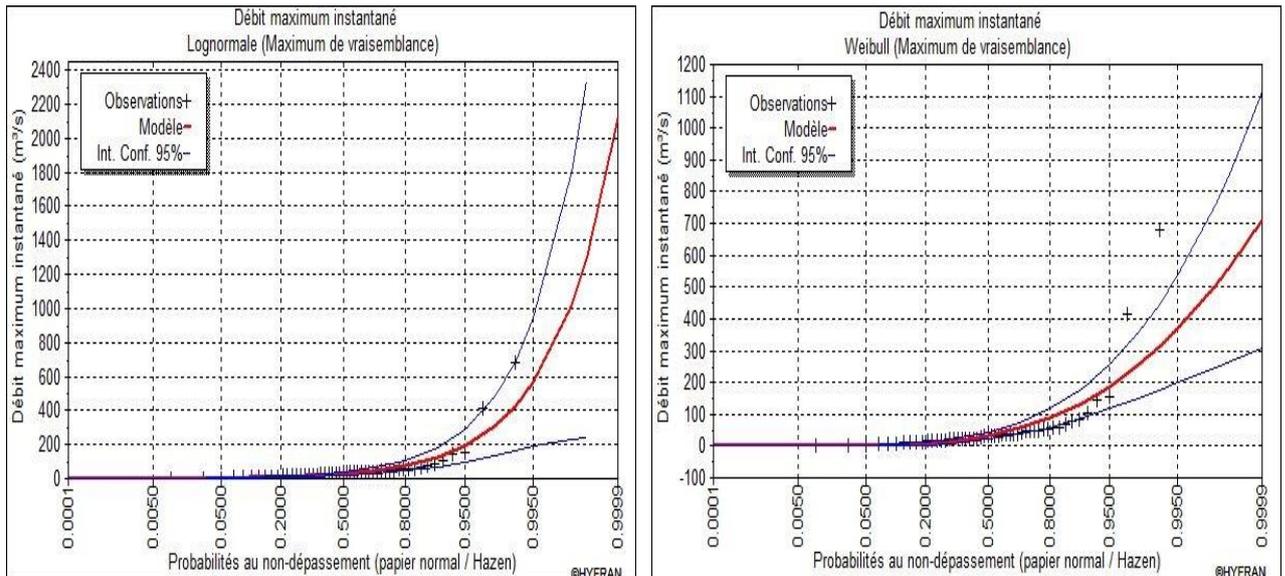


Figure 33: Graphe d'ajustement de loi LogNormal et Weibull sur les débits de Tahanaout

D'après les graphes d'ajustement (figure 33) des lois statistiques sur les données des débits maximaux instantanés annuelles, les deux lois **LogNormal** et **weibull** restent les mieux adaptés.

➤ Méthode numérique (Analyse statistique) :

Le tableau en dessous montre les valeurs observées des critères d'information bayésien (BIC) et d'Akaike (AIC). Ces critères permettent de comparer le degré d'ajustement. Les meilleurs ajustements correspondent aux plus faibles valeurs de ces statistiques.

	BIC	AIC
LogNormal (Maximum de vraisemblance)	508.43	504.567
Weibull (Maximum de vraisemblance)	518.082	514.218
Gamma (Maximum de vraisemblance)	521.206	517.342
Exponentielle (Maximum de vraisemblance)	523.021	519.158
Gumbel (Maximum de vraisemblance)	552.804	548.94
Normale (Maximum de vraisemblance)	629.211	625.348

Tableau 4: Les critères des différentes lois statistiques ajusté sur les Débits maximaux

Le meilleur résultat d'ajustement visuel est trouvé pour la loi **LogNormal** en première position, suivi par la loi de weibull.

➤ *Estimation des périodes de retour des débits maximaux :*

Les résultats d'ajustement numérique et l'analyse visuelle des données convergent vers l'adaptation de la loi LogNormal suivie par Weibull pour l'estimation des débits maximaux affichés au niveau de tableau en bas :

T	Exponentielle	Gumbel	weibull	normal	log normal	gamma
1000	396	273	505	391	1020	435
200	304	216	368	335	563	329
100	264	191	311	308	422	284
50	224	167	256	279	308	239
20	172	134	186	235	192	180
10	132	108	136	195	126	136
5	91.9	81.9	88.6	148	75.6	92.7
2	39.3	41.9	32.4	56.9	28.6	36.8

Tableau 5: L'estimation des périodes de retour des débits de la station de Tahanaout

B. Aghbalou :

I. Ajustement statique des lois sur les Pluies :

➤ *Analyse visuelle (graphes):*

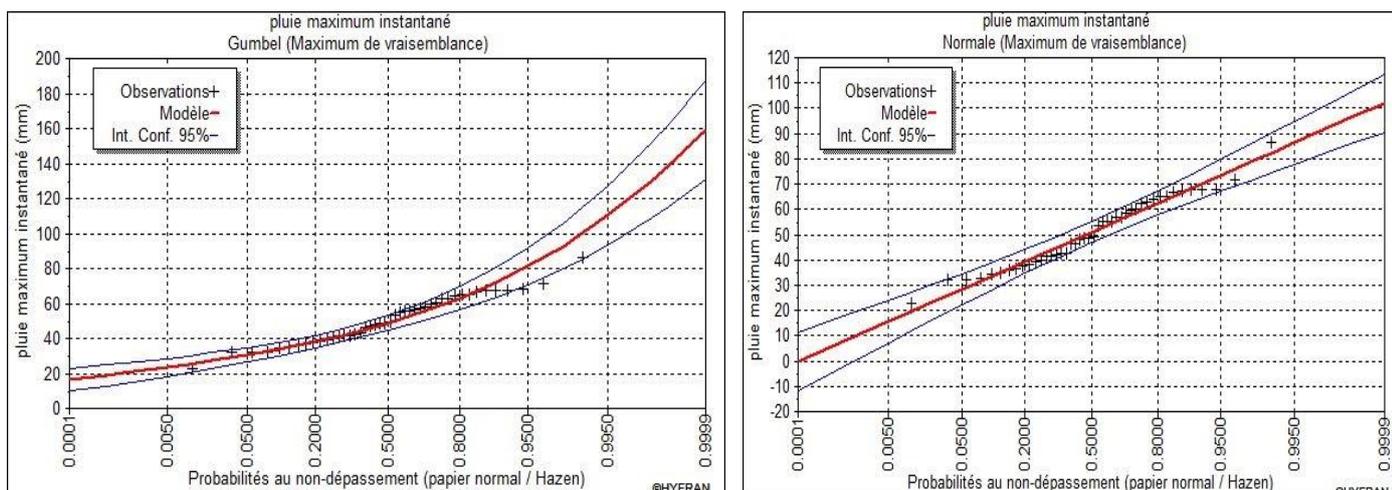


Figure 34: Graphe d'ajustement de loi Normal et Gumbel sur les pluies d'Aghbalou

D'après les graphes d'ajustement des lois statistiques sur les données de précipitations maximales journalières annuelles, les deux lois **Gumbel** et **Normale** restent les mieux adaptées.

➤ *Analyse numérique (statistique) :*

L'analyse numérique des différents critères caractérisant les lois statistiques : Weibull, Normal, Gamma, Log normal et Gumbel et exponentielle à 2 paramètres.

Le tableau ci-dessous présente la comparaison des critères des différentes lois statistiques sur les pluies maximales journalières.

	BIC	AIC
Gamma (Maximum de vraisemblance)	361.545	357.977
Normale (Maximum de vraisemblance)	362.005	358.437
Weibull (Maximum de vraisemblance)	362.239	358.671
LogNormal (Maximum de vraisemblance)	362.694	359.125
Gumbel (Maximum de vraisemblance)	363.868	360.3
Exponentielle (Maximum de vraisemblance)	391.565	387.997

Tableau 6: Les critères des différentes lois statistiques ajusté sur les pluies maximales journalières

La loi ayant la plus faible valeur de BIC et AIC a une probabilité à priori plus élevée, et donc elle s'ajuste la mieux à la série traitée. Les résultats de cette application montrent que la loi Gamma est donc la mieux ajustée.

➤ *Estimation des périodes de retour des précipitations maximales journalières :*

L'estimation des périodes de retour se basera sur la loi gamma puisque c'est la loi la mieux adapté.

T	expo	Gumbel	weibull	normal	log normal	gamma
1000	222	130	89.7	93.4	117	105
200	175	110	84.1	86.3	102	93.6
100	155	102	81.3	82.9	94.6	88.6
50	135	92.9	78.1	79.2	87.6	83.3
20	109	81.2	73.2	73.5	78.1	75.7
10	88.6	72.3	68.7	68.5	70.4	69.3
5	68.5	62.9	63	62.5	62.2	62.1
2	42.1	48.8	51.3	50.9	49.1	49.7

Tableau 7: L'estimation des périodes de retour des précipitations de la station d'Aghbalou

II. Ajustement statique des lois sur les débits :

➤ *Analyse visuelle (graphes):*

Les graphes ci-dessous (figure 37) représentent les probabilités empiriques et théoriques des distributions des différents ajustements des lois statistiques sur les données de débits maximaux journaliers. On a constaté que la loi la mieux adaptée aux données pour ensuite analyser les périodes de retour est la **loi log Normal** suivie par la **loi weibull**, les autres lois présentent un mauvais ajustement.

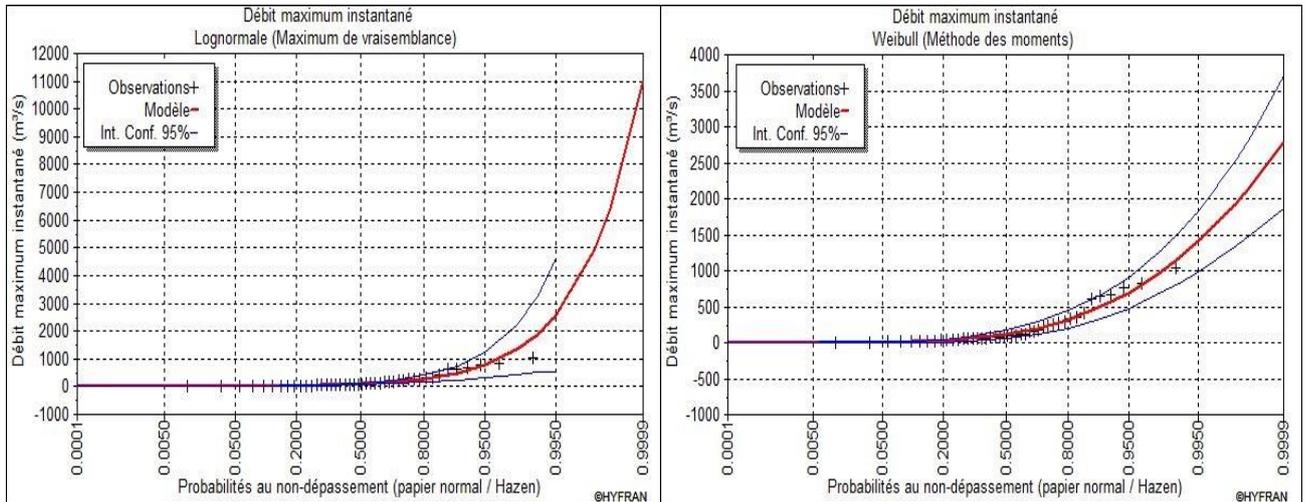


Figure 35: Graphe d'ajustement de loi LogNormal et Gumbel sur les débits d'Aghbalou

➤ *Méthode numérique (Analyse statistique) :*

Le tableau ci-dessous montre les valeurs observées des critères d'information bayésien (BIC) et d'Akaike (AIC). Ces critères permettent de comparer le degré d'ajustement. Les meilleurs ajustements correspondent aux plus faibles valeurs de ces statistiques.

	BIC	AIC
LogNormal (Maximum de vraisemblance)	555.702	552.133
Weibull (Méthode des moments)	560.203	556.634
Exponentielle (Maximum de vraisemblance)	560.608	557.04
Gamma (Maximum de vraisemblance)	560.988	557.419
Gumbel (Maximum de vraisemblance)	591.085	587.517
Normale (Maximum de vraisemblance)	617.412	613.843

Tableau 8: Les critères des différentes lois statistiques ajusté sur les Débit maximales

Le meilleur résultat d'ajustement visuel est trouvé pour la loi log Normal en première position, suivi par la loi de weibull.

➤ *Estimation des périodes de retour des Débit maximales :*

Les résultats d'ajustement numérique et l'analyse visuelle des données convergent vers l'adaptation de la loi Log Normale suivi par loi weibull pour l'estimation des débits maximaux affichés au niveau du tableau en bas :

T	expo	Gumbel	weibull	normal	log normal	gamma
1000	1370	1060	1950	974	4950	1570
200	1050	839	1400	846	2580	1190
100	912	742	1180	783	1880	1020
50	775	645	965	715	1330	861
20	595	515	694	613	790	646
10	458	415	501	522	498	486
5	321	311	322	411	285	328
2	140	153	114	201	97.7	127

Tableau 9: L'estimation des périodes de retour des débits de la station d'Aghbalou

C. Tafriat :

I. Ajustement statique des lois sur les Pluies :

➤ Analyse visuelle (graphes):

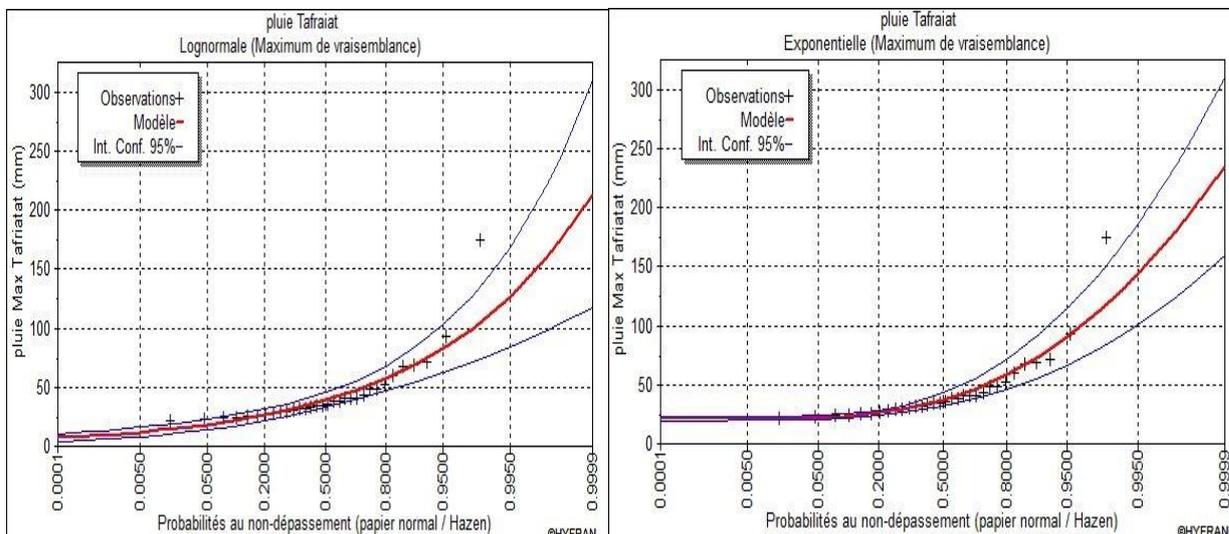


Figure 36: Graphe d'ajustement de loi LogNormal et exponentielle sur les pluies de Tafriat

D'après les graphes d'ajustement des lois statistiques sur les données de précipitations maximales instantanées annuelles, les deux lois **LogNormal** et **Exponentielle** restent les mieux adaptés.

➤ Analyse numérique (statistique) :

	BIC	AIC
Exponentielle (Maximum de vraisemblance)	272.024	269.092
LogNormal (Maximum de vraisemblance)	281.116	278.185
Gumbel (Maximum de vraisemblance)	284.856	281.924
Gamma (Maximum de vraisemblance)	288.922	285.991
Weibull (Maximum de vraisemblance)	297.74	294.809
Normale (Maximum de vraisemblance)	312.319	309.387

Tableau 10: Les critères des différentes lois statistiques ajustées sur les pluies maximales

Les résultats montrent que la loi **Exponentielle** est la mieux adaptée.

➤ Estimation des périodes de retour des précipitations maximales journalières :

L'estimation des périodes de retour se base sur la loi **Exponentielle**

T	Gumbel	weibull	Exponentielle	log normal	gamma	normal
1000	133	152	181	160	160	134
200	110	130	144	127	127	119
100	100	120	128	113	113	112
50	90	110	112	99.8	99.8	104
20	76.7	94.1	90.4	82.8	82.8	92
10	66.4	80.9	74.4	70.1	70.1	81.4
5	55.6	65.9	58.3	57.4	57.4	68.7
2	39.4	40.6	37.1	39.1	39.1	44.2

Tableau 11: L'estimation des périodes de retour des précipitations de la station de Tafriat

I. Ajustement statique des lois sur les débits :

➤ Analyse visuelle (graphes):

Les graphes en bas représente les probabilités empiriques et théoriques des distributions des différents ajustements des lois statistiques sur les données de débits maximaux instantanés nous avons constaté que la loi la mieux adaptée aux données pour ensuite analyser les périodes de retour est la loi weibull suivie par la loi log Normal, les autres lois présentent un mauvais ajustement.

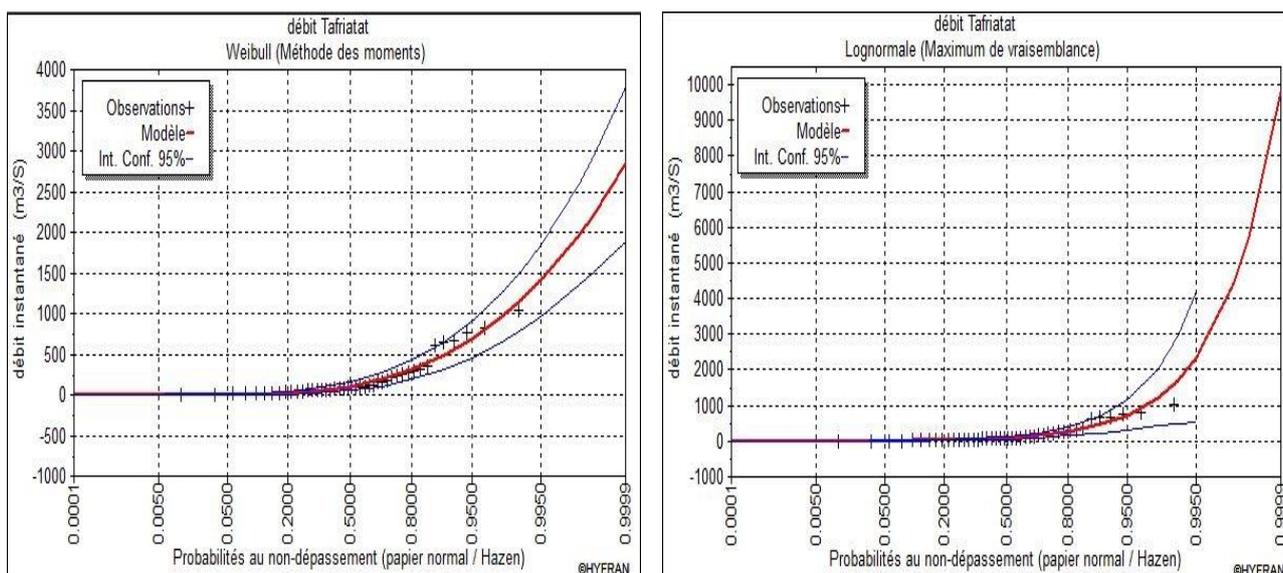


Figure 37: Graphe d'ajustement de la loi de weibull et LogNormal sur les débits de Tafriat

➤ Méthode numérique (Analyse statistique) :

Le tableau en dessous montre les valeurs observées des critères d'information bayésien (BIC) et d'Akaike (AIC). Ces critères permettent de comparer le degré d'ajustement. Les meilleurs ajustements correspondent aux plus faibles valeurs de ces statistiques.

	BIC	AIC
LogNormal	551.165	547.597
weibull	556.925	553.357
Exponentielle	556.971	553.403
Gamma	557.591	554.023
Gumbel	587.829	584.26
normale	616.65	613.082

Tableau 12: Les critères des différentes lois statistiques ajusté sur les Débits maximales

Le meilleur résultat d'ajustement visuel est trouvé pour la loi Log normale en première position, suivi par la loi de weibull.

➤ *Estimation des périodes de retour des débits maximaux :*

Les résultats de l'ajustement numérique et l'analyse visuelle des données convergent vers l'adaptation de la loi LogNormal suivi par Weibull pour l'estimation des débits maximaux affichés au niveau de tableau en bas :

T	Exponentielle	Gumbel	weibull	Gamma	normal	log normal
1000	1310	1010	1970	1510	960	4460
200	1010	799	1400	1140	832	2350
100	875	707	1170	981	770	1720
50	744	614	954	825	703	1230
20	571	491	679	619	601	736
10	440	395	486	466	511	468
5	308	296	308	315	402	270
2	135	146	105	123	193	94.5

Tableau 13: L'estimation des périodes de retour des débits de la station de Tafriat

D. Sidi Rahal :

I. Ajustement statique des lois Pluie :

➤ *Analyse visuelle (graphes):*

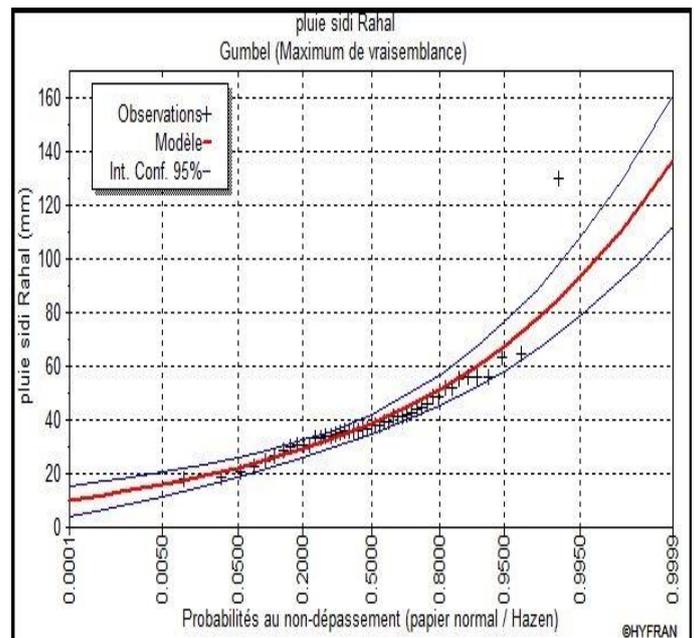
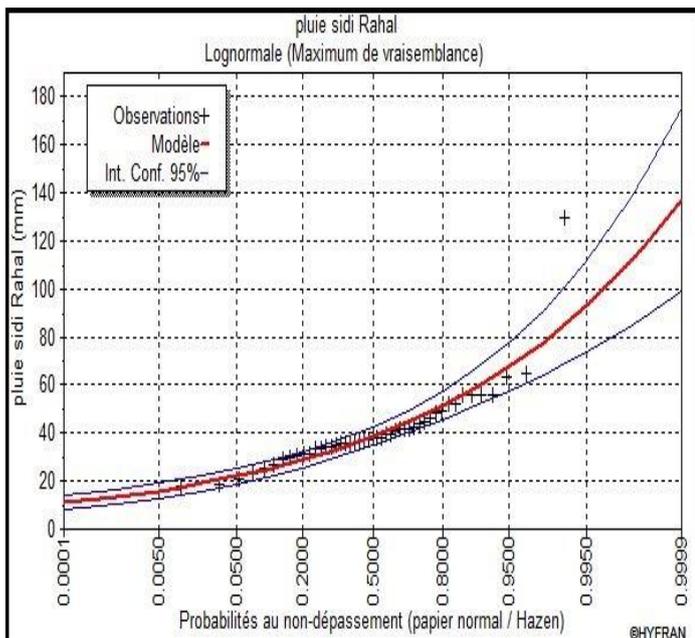


Figure 38: Graphe d'ajustement de loi LogNormal et Gumbel sur les pluies de Sidi Rahal

D'après les graphes d'ajustements des lois statistiques des données de précipitations maximales journalières annuelles, les deux lois **log Normale et Gumbel** restent les mieux adaptées.

➤ *Analyse numérique (statistique) :*

Le tableau ci-dessous englobe la comparaison des critères des différentes lois statistiques sur les pluies maximales journalières à la station:

	BIC	AIC
Gumbel (Maximum de vraisemblance)	381.994	378.294
LogNormal (Maximum de vraisemblance)	382.37	378.67
Gamma (Maximum de vraisemblance)	387.26	383.56
Exponentielle (Maximum de vraisemblance)	397.725	394.025
Weibull (Maximum de vraisemblance)	403.071	399.371
Normale (Maximum de vraisemblance)	407.068	403.368

Tableau 14: Les critères des différentes lois statistiques ajusté sur les pluies de Sidi Rahal

Les résultats de cette application montrent que la **loi Gumbel** est donc la mieux ajustée.

➤ *Estimation des périodes de retour des précipitations maximales journalières :*

La comparaison des lois permet également de faire une estimation des périodes de retour les plus élevées pour différents intervalles de temps.

A partir de cette comparaison nous optons pour la loi de Gumbel.

T	Exponentielle	Gumbel	weibull	normal	log normal	Gamma
1000	179	111	103	93.9	111	99.6
200	141	93.1	92.5	85.1	92.9	87.1
100	125	85.4	87.3	80.9	85.3	81.4
50	109	77.7	81.5	76.2	77.7	75.4
20	87.6	67.4	72.9	69.2	67.6	67
10	71.4	59.4	65.3	63	59.7	60.1
5	55.2	51.1	56.2	55.4	51.4	52.3
2	33.9	38.5	39.5	41	38.6	39.4

Tableau 15: L'estimation des périodes de retour des pluies de la station Sidi Rahal

II. Ajustement statique des lois sur les débits :

➤ Analyse visuelle (graphes):

Les graphes en bas représentent les probabilités empiriques et théoriques des distributions des différents ajustements des lois statistiques sur les données de débits maximaux instantanés. On a constaté que la loi la mieux adaptée aux données pour ensuite analyser les périodes de retour est la loi weibull suivie par la loi Gamma, les autres lois présentent un mauvais ajustement.

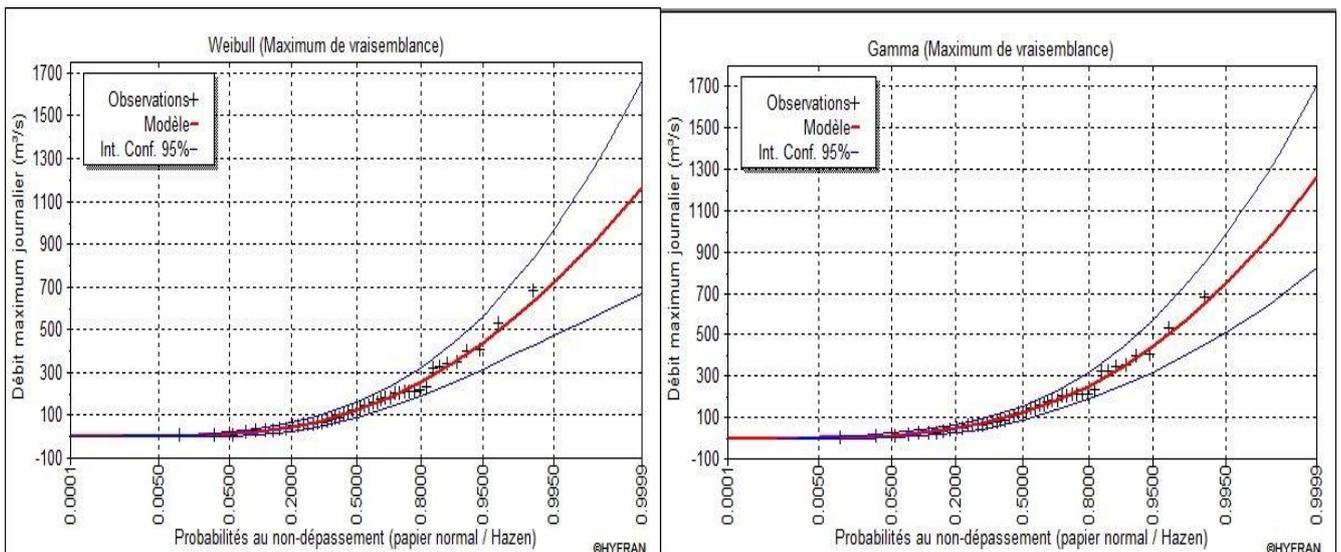


Figure 39: Graphe d'ajustement de loi weibull et loi de Gamma sur les débits de Sidi Rahal

➤ Méthode numérique (Analyse statistique) :

Le tableau en dessous montre les valeurs observées des critères d'information Bayésien (BIC) et d'Akaike (AIC). Ces critères permettent de comparer le degré d'ajustement. Les meilleurs ajustements correspondent aux plus faibles valeurs de ces statistiques.

Lois	AIC	BIC
Expo	570.6752	572.5038
Normal	589.9104	593.5677
L.Normal	575.4398	579.097
Cauchy	596.7055	600.3628
Gamma	568.8321	572.4894
Weibull	568.7047	572.3619
Logis	586.2831	589.9404
Gumbel	575.2505	578.9078

Tableau 16: Les critères des différentes lois statistiques ajusté sur les débits de Sidi Rahal

Le meilleur résultat d'ajustement visuel est celui de la loi de Weibull, suivi par la loi de Gamma.

➤ *Estimation des périodes de retour des Débit maximales :*

Les résultats d'ajustement numérique et l'analyse visuelle des données, convergent vers l'adaptation de la loi Weibull suivi de la loi Gamma (Tableau 18)

T	LogNormal	Gamma	Normal	Cauchy	Weibull	Exponentielle	Gumbel	Logis
1000	2573.2	972.1	614.0	24336.0	873.7	1228.9	796.8	679.9
500	2087.8	883.9	584.1	12235.8	804.2	1105.6	728.6	627.8
100	1211.9	677.0	506.2	2555.2	635.7	819.3	569.7	506.2
50	926.3	586.7	467.7	1344.3	559.4	696.0	501.0	453.4
20	619.0	465.5	410.0	615.9	453.8	533.0	409.3	382.2
10	432.7	371.9	358.8	369.9	369.2	409.6	338.5	326.0
5	280.4	275.6	296.7	240.6	278.8	286.3	264.6	265.1
2	122.3	139.8	177.9	135.9	144.0	123.3	153.1	160.9

Tableau 17: L'estimation des périodes de retour des débits de la station Sidi Rahal

Conclusion :

A partir des résultats obtenu des analyses fréquentielles on déduit qu'il a y une hétérogénéité au niveau des lois (Gumbel, LogNormal et exponentielle) qui gèrent l'estimation des périodes de retour des pluies malgré l'emplacement des zones étudiées.

Alors que les débits sont généralement ajustés par loi LogNormal sauf pour les données de Sidi Rahal qui sont mieux ajustés par loi de weibull.

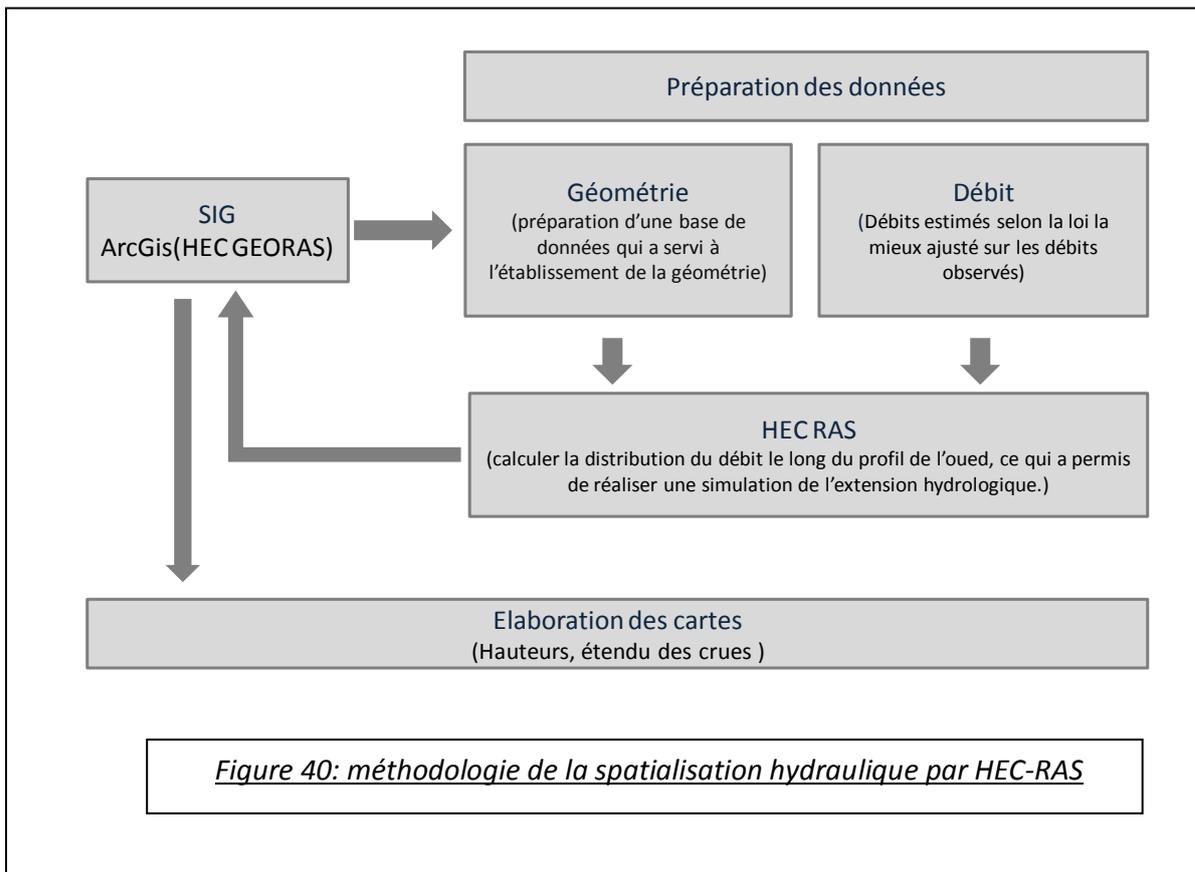
Donc l'analyse fréquentielle reste donc une méthode fiable dans la prise de décision par les décideurs pour lutter contre les inondations. D'autre part la prise en compte de ces résultats lors de la construction des aménagements (barrage, infrastructure, ...) est souhaitable.

CHAPITRE3 : ETUDE HYDRAULIQUE

Introduction :

Dans ce chapitre on va faire une simulation de l'écoulement sur un ensemble des tronçons au niveau des différentes stations de la zone d'étude. Le processus de modélisation établi de ce fait, a fait appel à deux logiciels: Géo-Ras et HEC-RAS, qui ont pour but de simuler les écoulements des eaux et calculer les hauteurs d'eau pour des crues de différentes périodes de retour, et les interpoler afin de cartographier la plaine d'inondation.

1. Méthodologie :



2. Prétraitement des données sur Géo-Ras :

➤ Les élévations du terrain

Suite au manque des données topographiques à haute résolution dans la région (Sidi Rahal), on a utilisé un Modèle Numérique du Terrain d'une résolution de 30 m issu du Satellite ASTER qui a été importé sur Géo-Ras.

Le modèle DEM importé a été converti en format TIN (Triangulation Interpolation Numérique) pour pouvoir extraire les élévations à l'aide d'un ensemble de section représentées au niveau de la carte en bas :

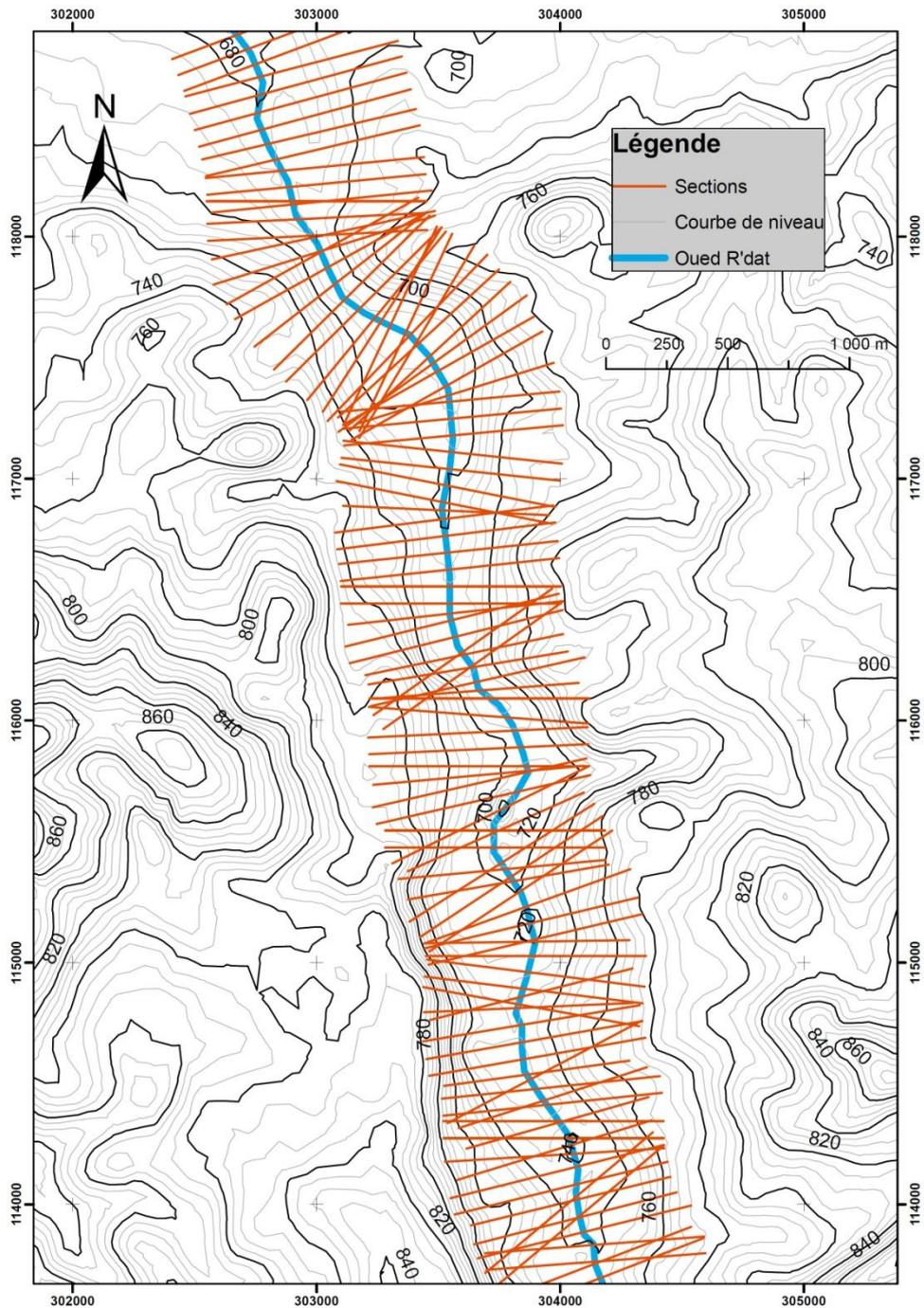


Figure 41: Carte d'installation de Cut Ligne au niveau d'oued R'Dat

➤ *Préparation du Modèle hydrologique Conceptuel :*

Avant de créer le modèle HEC-RAS, il a fallu créer un modèle conceptuel sur le logiciel Géo-Ras : Centerline (l'oued principale), Bank line (les berges), Flow Path Centerline, XS cut line (Cross Section : profil en travers).

➤ *Présentation du HEC-RAS :*

HEC-RAS est un logiciel intégré pour l'analyse hydraulique qui permet de simuler les écoulements à surface libre. Il a été conçu par le Hydrologic Engineering Center de l'U.S Army Corps of Engineers. Il s'agit d'une nouvelle version d'un modèle hydraulique auparavant nommé HEC-2, qui

comporte maintenant une interface graphique permettant d'éditer, modifier et visualiser les données d'entrée, de même qu'observer les résultats obtenus. Il est présentement utilisé dans plusieurs firmes d'ingénierie et organismes gouvernementaux. La dernière version 4.0 de HEC-RAS permet de simuler les écoulements permanents et non permanents, le transport de sédiments et certaines fonctions facilitant la conception d'ouvrages hydrauliques. (HEC-RAS, 2008.)

➤ *Un aperçu de HEC-RAS :*

HEC-RAS utilise le concept de Projet afin de réaliser une simulation du comportement hydraulique d'un cours d'eau. Tel que défini par HEC-RAS, un projet est un ensemble de fichiers permettant de simuler le comportement hydraulique d'un cours d'eau pour diverses conditions. La notion de Projet comprend également un ensemble d'autres termes qui lui sont associés et ceux-ci sont expliqués à la première section. Par la suite, l'environnement de HEC-RAS est présenté brièvement, soit les principales fenêtres et les menus (HEC-RAS, 2008.)

➤ *Étapes de la modélisation :*

Cette partie présente les principales étapes de la modélisation hydraulique à commencer la création du profil de l'oued sur Géo-Ras. Ensuite nous passons à la simulation mathématique des débits via HEC-RAS. Le retour en fin de compte à Géo-Ras dans le cadre de la spatialisation des étendu d'eau.

➤ *La géométrie du projet*

La fenêtre de la géométrie éditeur data permet de voir la géométrie du cours d'eau modélisé sur HEC-GeoRAS avec les différentes sections et le sens d'écoulement. Le résultat obtenu est présenté dans la figure suivante :

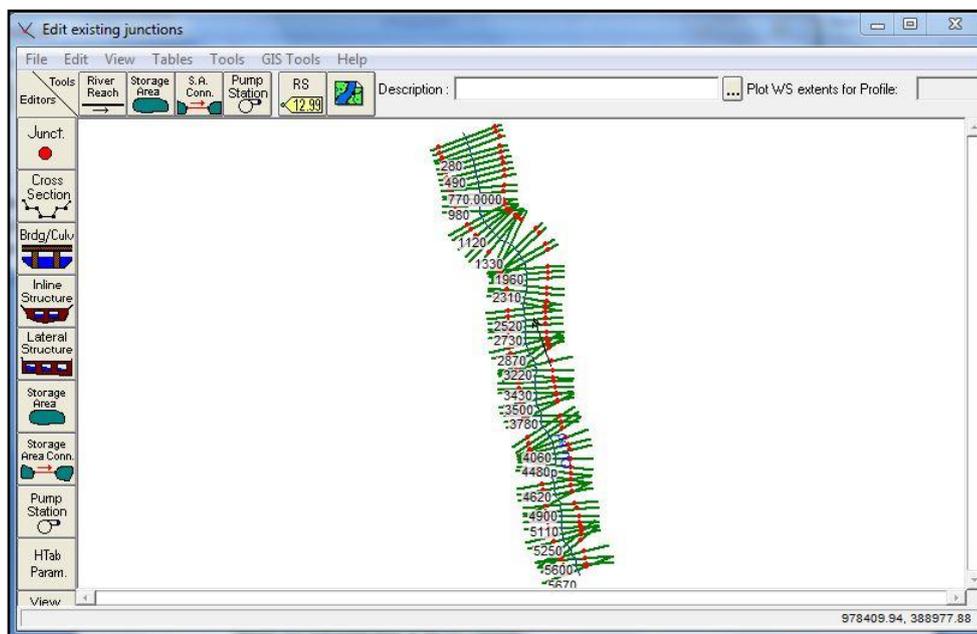


Figure 42: L'Editeur Géométrique dans HEC-RAS.

Coefficient de Manning :

Le coefficient de rugosité de Manning est l'un des paramètres principaux du modèle hydraulique puisqu'il définit la réaction de l'écoulement de la rivière vis-à-vis des terrains parcourus, en influençant sur la vitesse.

Pour notre cas, les valeurs de Manning sont de l'ordre de :

zone	berge gauche	milieu	berge droit	justification
Sidi Rahal	0.03	0.04	0.03	terrain nu
Arbaat Tighedwin	0.04	0.04	0.04	Végétation sur les berges

Tableau 18: Coefficient de Manning

En suite nous visualisons n'importe quelle section sur tout le parcours de l'oued et sa caractéristique à l'aide de la fonction cross section Data (figure 43) :

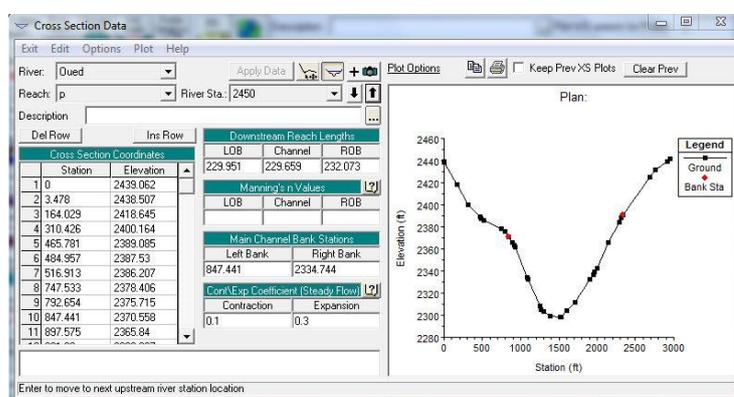


Figure 43: Visualisation de la géométrie des sections

➤ Débits et Conditions limites du modèle:

L'étape suivante de la modélisation hydraulique avec HEC-RAS est de spécifier les débits utilisés pour calculer les profils d'écoulement. En utilisant le module SteadyFlowData, on spécifie les débits du projet et les conditions limites du modèle.

Dans cette étude on a eu recours aux débits des crues des périodes : 10ans, 50ans, 100ans, 200ans, obtenus par les résultats des calculs dans le chapitre précédent.

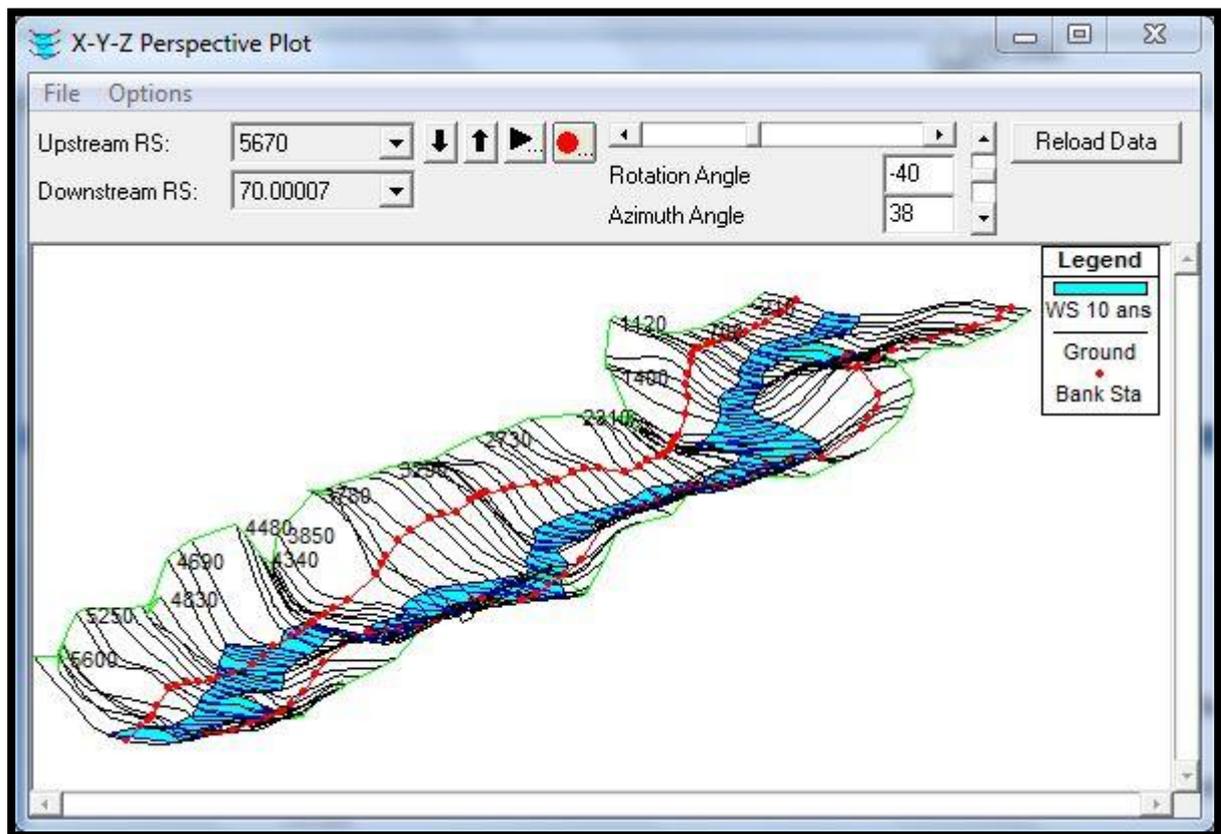


Figure 44: Simulation de débit par le module SteadyFlowData

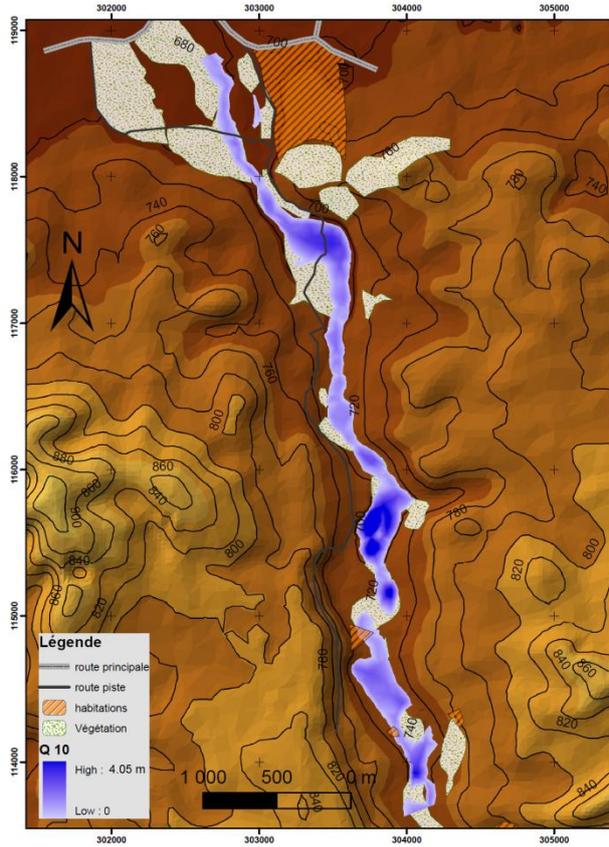
En suite une simulation 3D est visualisé au niveau de profil de l'oued pour chaque periode de retour estimé.

A. SIDI RAHAL

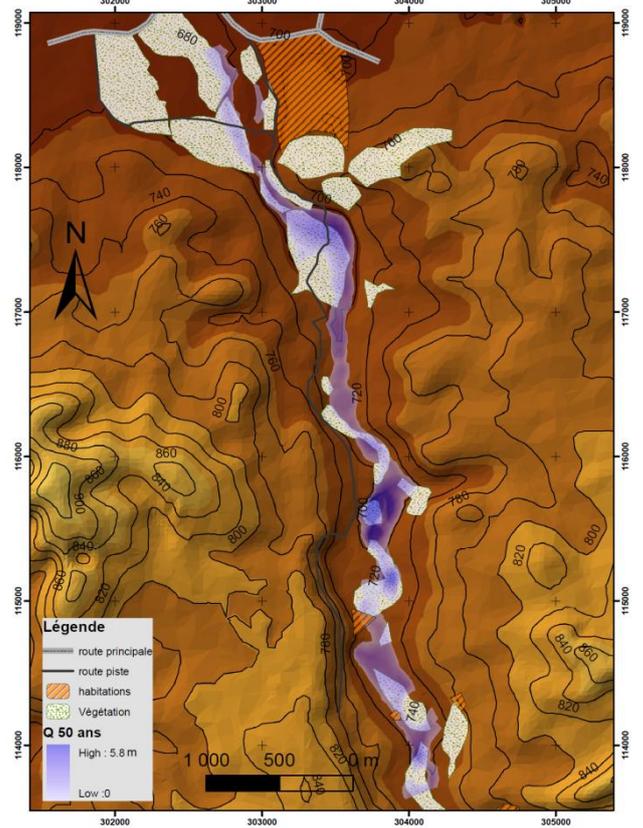
1. Résultats et interprétations :

En se référant à la carte de propagation des crues, des cartes d'aléa sur Arcgis ont été tracé pour montrer les zones menacées par la crue au niveau du tronçon simulé avec différent débit correspondant à des périodes de retour de 10 ans, 50ans, 100 ans et 200ans.

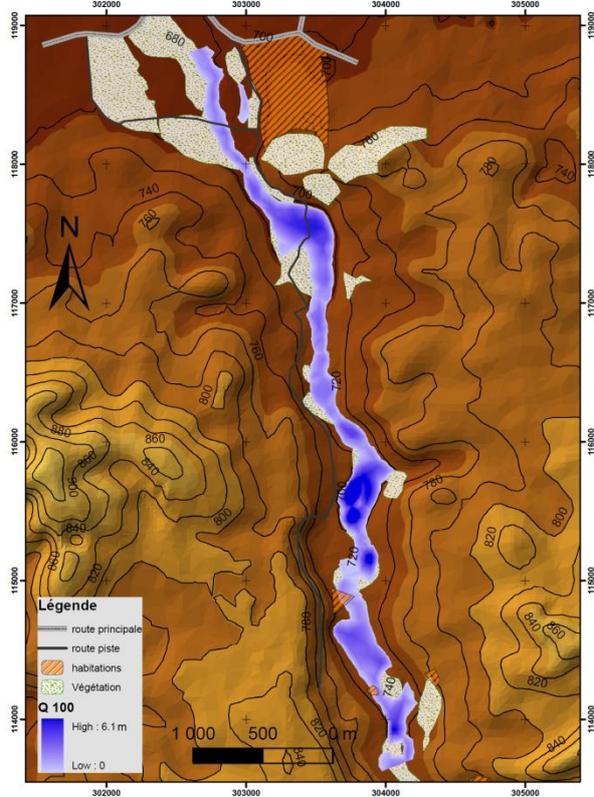
Simulation et spatialisation de la crue de 10 ans par HEC-RAS



Simulation et spatialisation de la crue de 50 ans par HEC-RAS



Simulation et spatialisation de la crue de 100 ans par HEC-RAS



Simulation et spatialisation de la crue de 200 ans par HEC-RAS

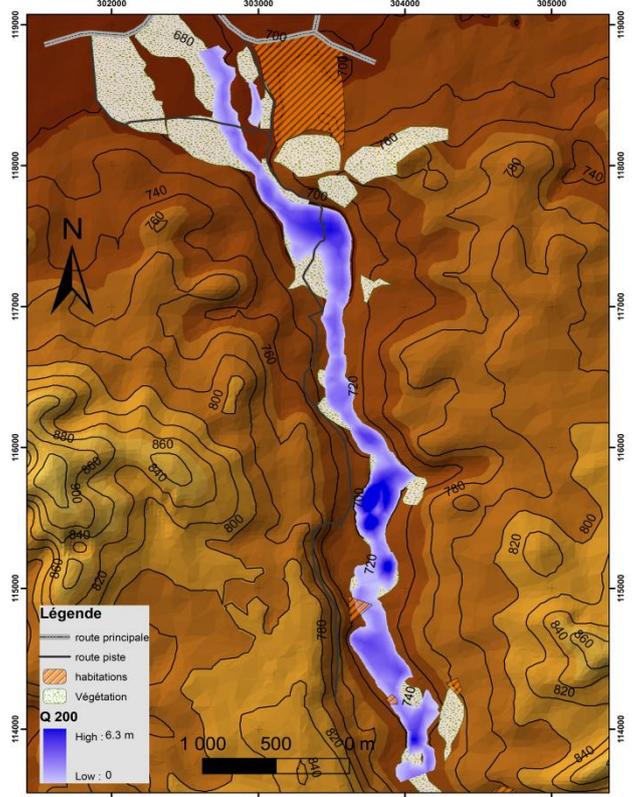


Figure 45: les Cartes de débit Simulé au niveau de Station Sidi Rahal

A la lumière des résultats de la spatialisation calés sur les cartes topographiques élaborées à partir des cartes MNT on peut dire que le village de sidi Rahal ne rentre pas dans la zone

à risque d'inondation contrairement aux terrains agricoles voisins en plus d'une petite partie de douar AIT ATTROUCHE situé en amont et des habitats dispersés au bord de l'oued R'Dat .

D'autre part en cas d'inondation comme précisé par le modèle, deux routes secondaires liant le village d'AIT ATTROUCHE à SIDI RAHAL traversant respectivement les villages de TAZEMOURT et ZAOUIA seront coupées. Dans les cas extrêmes même la route principale N8 peut être bloquée. Cette dernière n'a pas pu être modélisée vu la résolution de 30m qui ne nous donne pas beaucoup de détails au niveau de la plaine et donc on ne peut pas tracer le réseau hydrographique.

En conclusion, on constate que les problèmes causés par les crues sont:

- L'inondation d'une partie de douar AIT ATTROUCHE
- L'inondation des terres agricoles
- sapement des berges.
- Coupure de deux routes secondaires qui amènent vers Sidi Rahal.

B. Arbaat Tighedwin :

Le bassin ZAT est jaugé par la station TAFERIAT au droit de laquelle, le bassin versant a une superficie de 525 km².

Dans son cours amont, Oued ZAT fait partie de la zone la plus menaçante du bassin du Tensift vu que cette partie Sud du bassin est la plus active, les pentes sont fortes en amont et la pluviométrie est relativement importante.

Dans son cours amont et intermédiaire, Oued ZAT est exploité pour l'extraction des matériaux de construction. Alors qu'en cours aval, les berges de l'oued sont exploitées à des fins agricoles sous forme de petites parcelles.

• Problématique :

- Des prises d'eau en béton armé ou en terre, sont construites sur les deux rives de l'oued pour dévier les eaux de l'oued à des fins d'irrigation.
- Charriage grossier dans le lit de l'oued photo xx
- Hauteur insuffisante du pont existant
- Position géographique : le village de Tighedwin est placé entre l'oued ZAT et le pied d'une montagne.



Photo 2: Extraction des matériaux de construction au niveau de lit l'oued

❖ **Les événements de novembre 2014 :**

Le Maroc a connu depuis le 20 novembre 2014 jusqu'à 01 décembre 2014 une dépression importante dont le centre se déplaçait des îles-Canaries de Sud-ouest et d'ouest successivement donnant lieu à des précipitations très importantes dépassant les 100 mm en 24h sur la région de Marrakech.

Ces précipitations ont causé des crues généralisées sur tout le bassin de Tensift, avec des débits généralement importants faisant rappeler des épisodes de la fin des années 60 (1966 et 1967), et impliquant une nette amélioration, voire le remplissage de la réserve d'eau au niveau des retenues des barrages. Toutefois, ces crues ont provoqué des dégâts matériels importants au niveau des infrastructures ainsi que l'enclavement de plusieurs douars, voire de centres pour des périodes allant jusqu'à 24 H, en plus de submersions de maisons en pisé et de terrains agricoles, aggravés principalement par l'existence de prises d'eau au niveau des lits des oueds et d'empiétements sur le domaine public hydraulique. (Rapport de conjoncture Événement hydro pluviométrique du 20 /11/2014 au 01/12/2014)

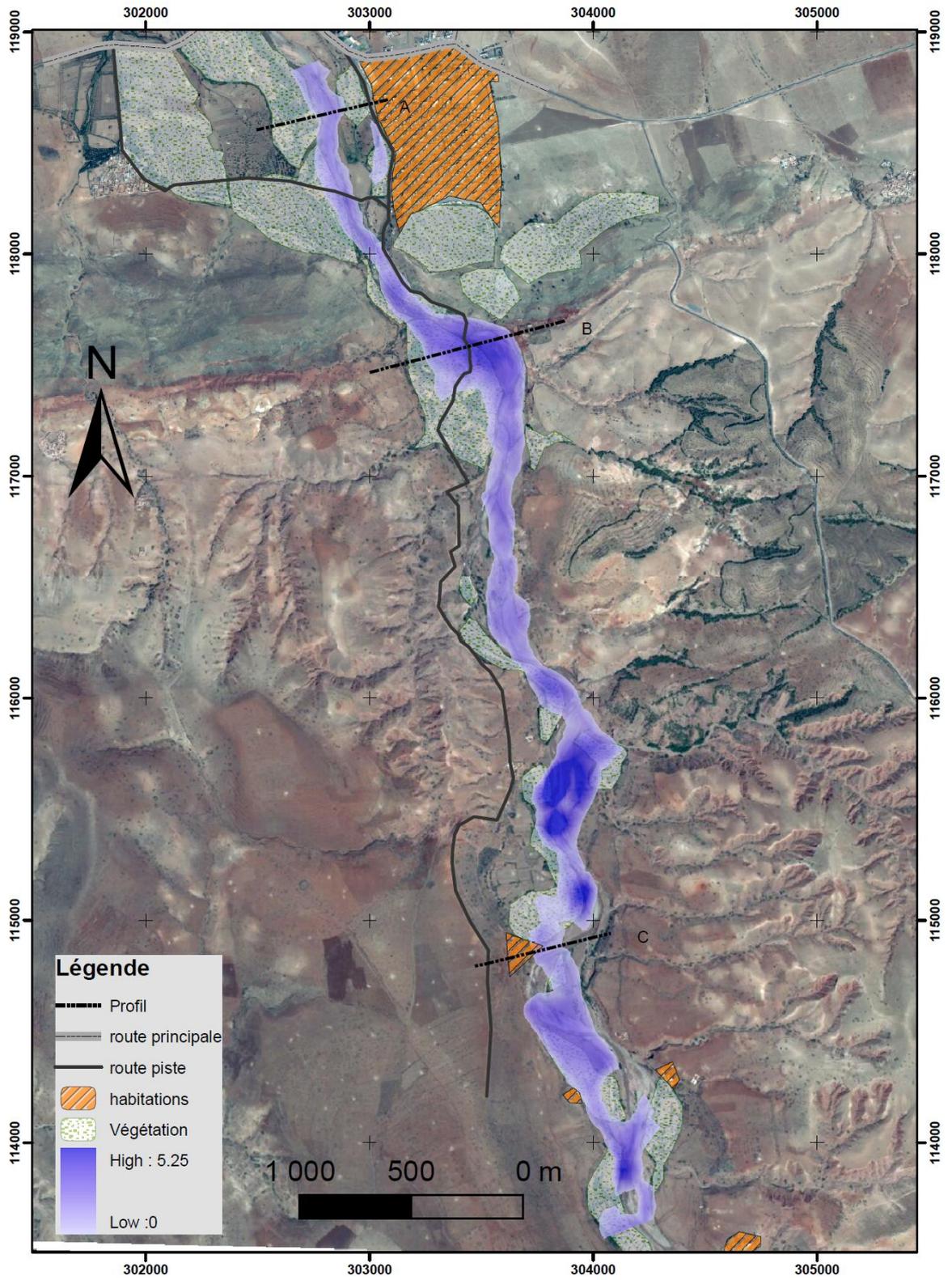
- **Simulation de débit de novembre 2014 par HEC-RAS :**

A. Sidi Rahal

Au niveau de station Sidi Rahal on a enregistré un débit de l'ordre de $340 \text{ m}^3/\text{s}$ ce qui classe cette crue dans les crues centennales alors que ces événements ont causé des dégâts humains et matériels très importants.

Ce débit calé sur une image de Google earth de la zone d'études en plus de 3 sections A, B et C de l'aval vers l'amont de village Sidi Rahal.

Simulation et spatialisation de la crue de Novembre 2014 par HEC-RAS au niveau de L'amont de SIDI RAHAL



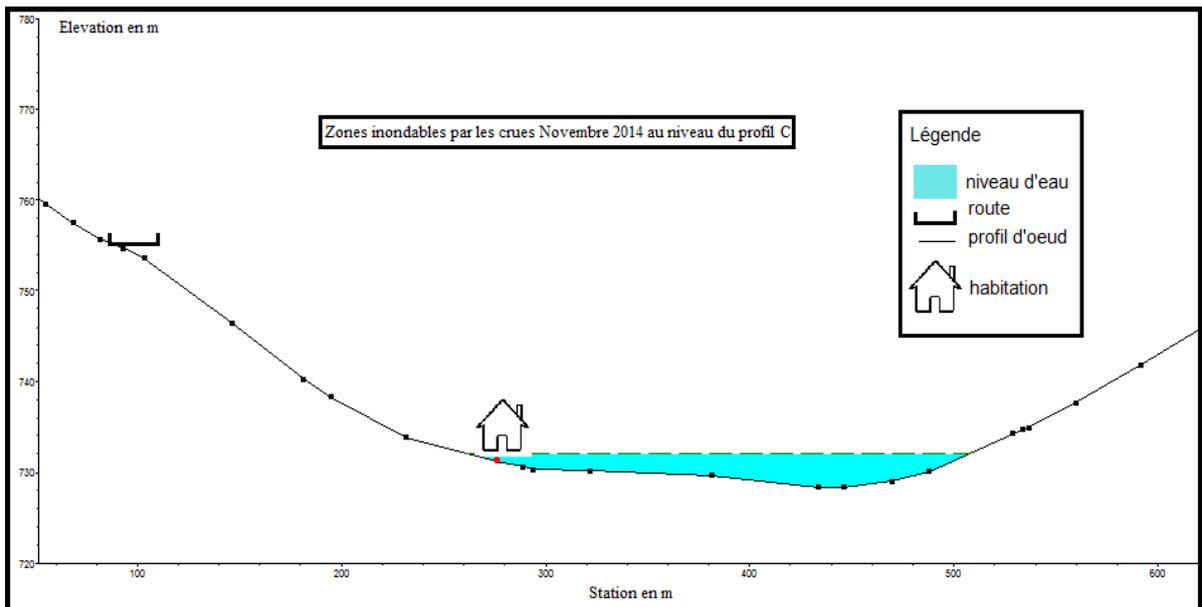
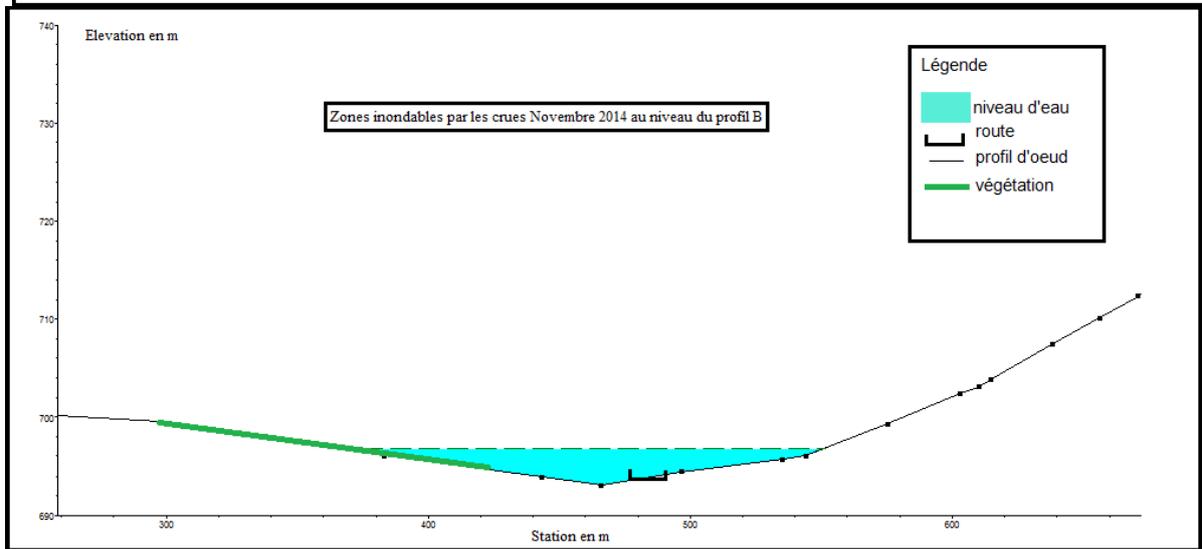
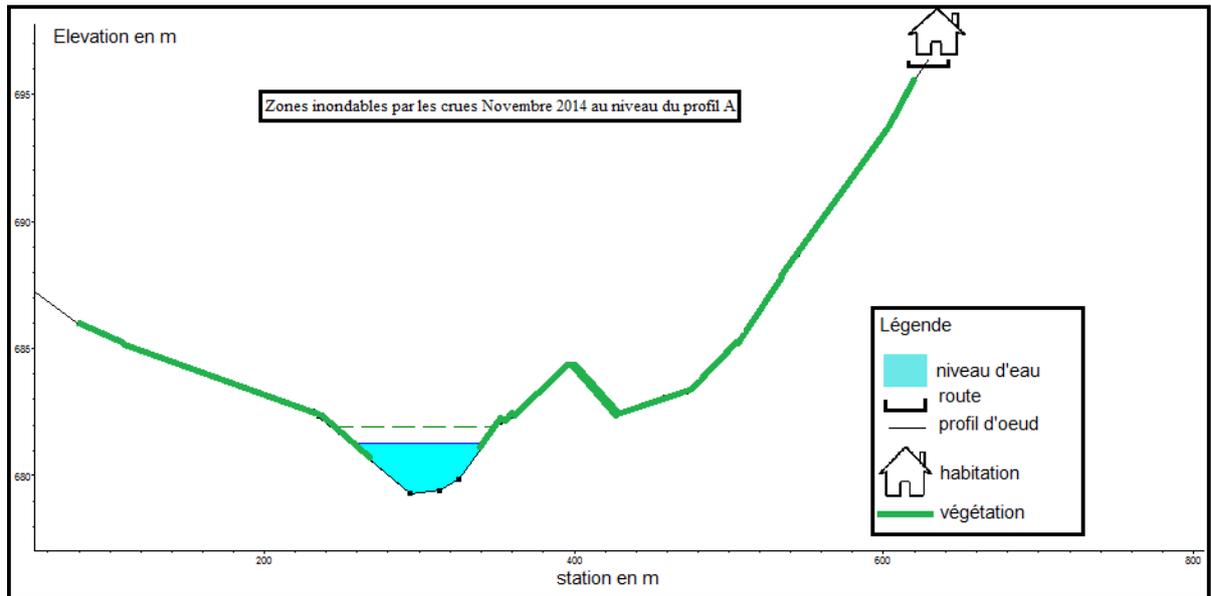


Figure 47: les 3 profils sur le long de oued R'Dat

Pour bien visualiser les zones à risque d'inondation on a établi 3 profils sur le long du tronçon étudié :

Profil A : En aval du tronçon à l'ouest de village Sidi Rahal, une partie des terrains agricoles (photo 2) est affecté par le débordement de l'oued R'Dat lors des événements de novembre 2014.



Photo 3: exploitation agricole de la rive de l'oued

Profil B : Au niveau de ce profil ce sont les terrains agricoles de la rive gauche qui sont affecté, d'autre part on a la submersion d'un route secondaire qui travers oued R'Dat.

Profil C : une partie du Douar AIT ATTROUCHE est aussi affecté par les inondations vu sa proximité sur la rive gauche de oued.



Photo 4: Habitation aux bords de l'oued

Nous concluons que les dégâts matériels les plus fâcheux sont notés aux bords de l'oued. Ceci peut être expliqué par le fait que les hommes ont tendance à exploiter les terrains les plus fertiles et moins coûteux (disponibilité des ressources hydriques). D'autre part, le blocage des 2 routes secondaires oblige les gens de faire tout un détour pour atteindre le village de Sidi Rahal. En plus de cela, le risque d'inondation du douar AIT ATTROUCHE reste le plus important car il peut même atteindre des pertes humaines.

Arbaat Tighedwin :

Au niveau de village de Tighedwin les événements de novembre ont provoqués des dégâts matériels très importants au niveau des maisons, des magasins. L'analyse de la carte modélisée par HEC-RAS montre qu'un ensemble des terrains agricoles labourés sur les berges de l'oued ont été endommagés et une route reliant les 2 berges a été bloquée malgré la présence d'un ancien pont en bois.

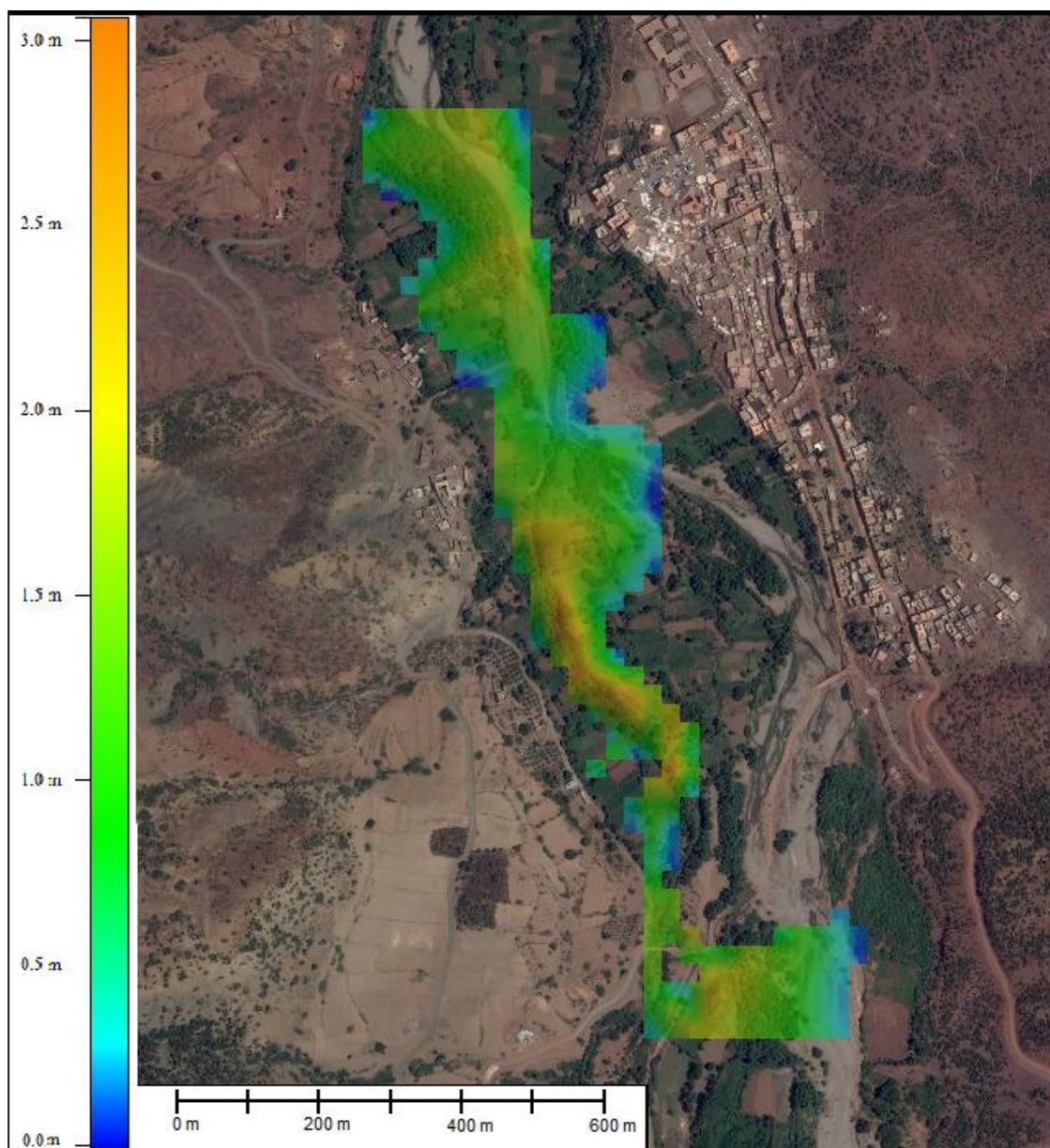


Figure 48: Simulation de débit de 27 novembre 2014 au niveau de Village Tighedwin dans le bassin versant de Zat

➤ *Inconvénient de méthode :*

La simulation hydraulique par HEC-RAS ne tient pas compte des paramètres de la végétation qui pousse au niveau des oueds et la charge solide transportée par le courant qui modifie généralement la section (photo 5), d'autre part il forme des barrages naturels, ses derniers qui cause le majeur dégât par le déclanchement des crues qu'on sous estimé par l'avance.



Photo 5: Etranglement de l'écoulement à cause du charriage

Pour cela une bonne connaissance géologique du domaine d'études en plus de la cartographie de la végétation par l'avance reste souhaitable.

Chapitre 4 : modalisation Du Fonctionnement de L'Hydro-Système de bassin versant de Ghiraya au haut atlas :

1. Qu'est ce qu'un modèle mathématique ?

"Ensemble d'équations rendant compte d'un phénomène complexe et permettant d'en décrire les caractères et d'en prévoir les évolutions".

Dans le cas d'un modèle pluie-débit, cet ensemble d'équations relie les variables d'entrée (ou variables de forçage, e.g. les pluies) aux variables de sortie (ou pronostiques, e.g. les débits), en tenant compte de variables d'état (ou variables internes, e.g. l'humidité du bassin, croissance de la végétation, niveau de remplissage des retenues...) du système. (Ahtys, 2014)

2. A quoi sert un modèle pluie-débit ?

Les débits des rivières sont des données relativement rares et difficiles à mesurer. Les pluies sont plus facilement mesurables et d'accès plus simple, en temps réel ou différé. Les modèles pluie-débit ont donc pour première fonction de simuler des débits à l'aide des valeurs de pluie disponibles ou vraisemblables. Par extension, un modèle pluie-débit pour fonction de simuler les débits des rivières dans toute situation qui échappe (le plus souvent) à l'observation:

- calcul des débits rares et extrêmes
- calcul des débits sur un bassin non jaugé
- prévision des débits à différents horizons
- impact sur les débits de modifications du climat ou du bassin (Athysse, 2014)

3. Fonction de production SCS:

La fonction de productions SCS permet une représentation de l'hydro-système bassin du bassin versant de Rhiraya.

Elle est constituée d'un réservoir de capacité maximale S (sol), Ce dernière possède un certain niveau d'eau initial H_0 qui peut être associé au degré de saturation de l'hydro-système en correspond début d'événement.

Au cours de l'événement, lorsqu'il pleut une quantité $i(t)$, ce réservoir se remplit par infiltration $f(t)$ et se vidange d'une certaine quantité $vid(t)$ comme le ferait l'hydro-système Une partie de cette vidange. $(1 - w) \cdot vid(t)$, percole en profondeur tandis qu'une autre part $w \cdot vid(t)$ participe de façon retardée aux écoulements de surface. Ces écoulements retard générés par le modèle peuvent Correspondre soit aux écoulements hypodermiques qui se déroulent dans les sols.

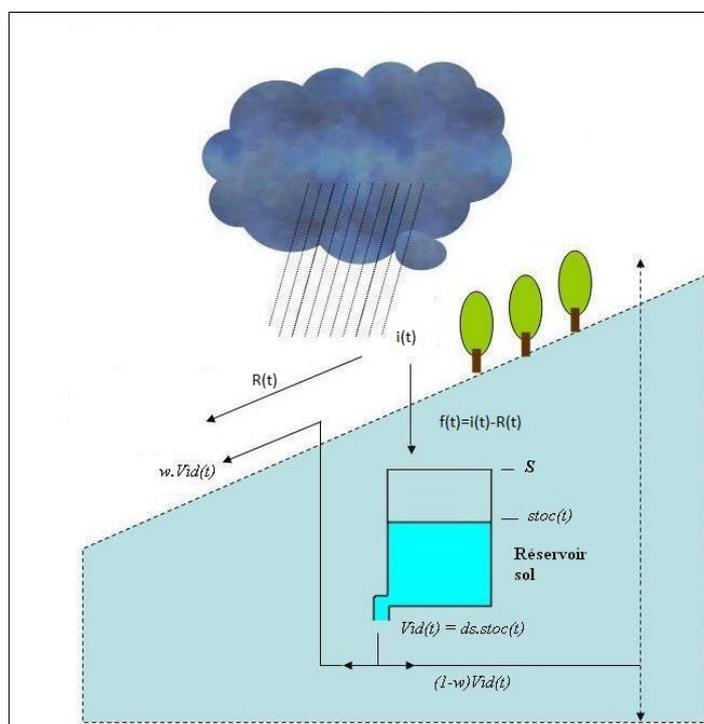
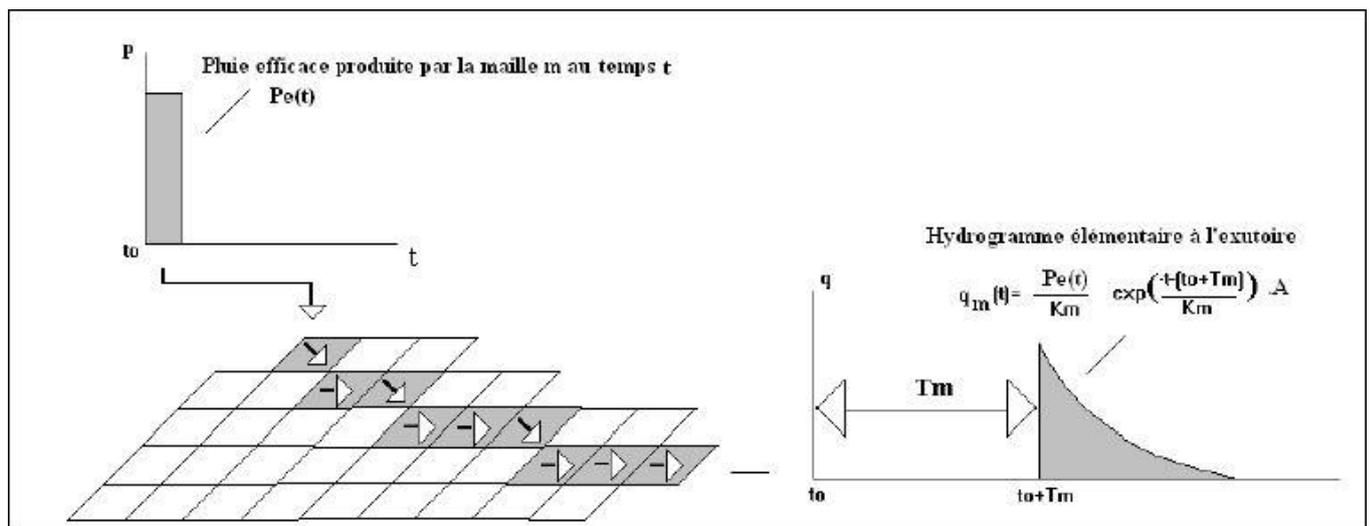


Figure 49: Schéma présente la fonction de production

4. Fonction de Transfert Lag and route :

La fonction de transfert lag and route achemine les volumes produits par chaque maille à l'exutoire. Les temps de transfert sont calculés en fonction de :

- la vitesse de transfert sur chaque maille, V_m .
- la diffusion de l'onde de crue, réalisée à l'aide d'un réservoir linéaire, de capacité K_m ; la diffusion est d'autant plus importante que la maille est éloignée de l'exutoire.



Après avoir transformé la pluie brute en pluie nette avec la fonction de production, il faut encore acheminer la pluie nette jusqu'à l'exutoire du bassin. C'est le rôle de la fonction de transfert.

MERCEDES dispose de 2 grands types de fonctions de transfert:



Figure 51: interface de logiciel ATHYS

Le transfert en mode mailles interactives où l'eau s'écoule maille à maille jusqu'à l'exutoire. Pour chaque maille, on tient compte dans ce cas des apports des mailles « amont » et des pertes possibles dans certaines mailles. Il s'agit là du modèle de l'onde cinématique, modèle à base physique mais demandant un grand nombre de données sur la géométrie et la rugosité du bassin versant.

Le transfert en mode mailles indépendantes où la pluie nette qui est produite sur la maille est transférée directement à l'exutoire sans s'écouler maille à maille. Le principe des mailles indépendantes est que chaque maille produit à chaque pas de temps un hydrogramme élémentaire à l'exutoire. Ce dernier est obtenu en décalant dans le temps la pluie nette produite par la maille, par une fonction de translation, et en l'amortissant par une fonction de stockage. La somme de tous les hydrogrammes élémentaires donne l'hydrogramme complet de la crue.

5. Calage du modèle :

La première phase consiste à trouver pour les épisodes étudiés un jeu de paramètres « V, K_0, S, α et ω » constant pour caler le pic de crue selon le temps et la courbe de tarissement en fonction de la hauteur (pour ω) et en fonction de la pente (pour α). S a été défini de façon à ce que le réservoir ne soit pas plein ($S = DS$) au début de chacun des épisodes.

Le second travail a été d'ajuster le paramètre dS pour chacun des 6 épisodes afin de caler le pic de crue calculé à la valeur du débit de pointe observé.

La qualité des simulations obtenues a été évaluée avec le critère de **Nash**.

$$\text{Critère de Nash} = 1 - \frac{\sum (X_i - Y_i)^2}{\sum (Y_i - \bar{Y})^2}$$

6. Résultat :

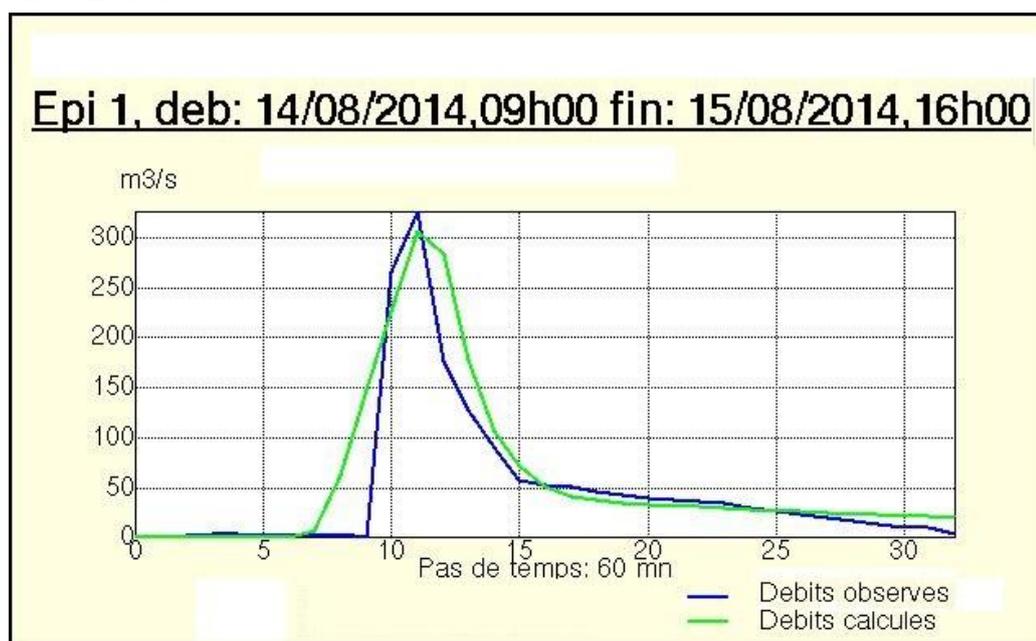


Figure 52:calage de la crue de 14 aout 2014 établie par Athys au niveau du bassin de Rhiraya

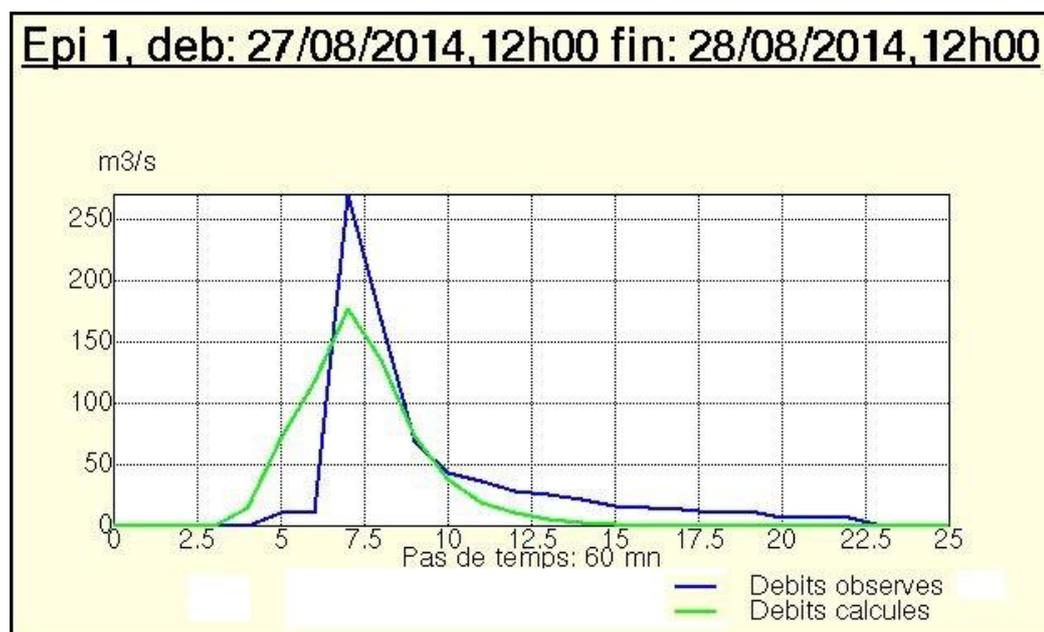


Figure 53:calage de la crue de 27 aout 2014 établie par Athys au niveau de BV de Rhiraya

	S	CN	ω	dS	V0	α	K0	K1	Nash
14/08/2014	28.12	0	0.1	1	2.13	0	0.3	0	0.87
27/08/2014	0	0	0.9	1	2.14	0	0.3	0	0.65
20/09/2014	10	0	0.9	1	4.78	0	1	0	0.75

Tableau 19:résultat de la modélisation spatio-temporelle au niveau du bassin de Rhiraya

S : capacité totale du réservoir sol, en mm

CN : curve numbere

ω : facteur de reprise de vidange, adimensionnel

dS : facteur de vidange, correspondant à un temps de ressuyage des sols, en $j-1$

V_0 : vitesse de transfert sur chaque maille. En m/s

K_0 : capacité la diffusion

α et k_1 : paramètre de géométrie généralement utilisée sous sa forme la plus simple, avec $\alpha = 0$ et $K_1 = 0$.

7. Interprétation :

L'objectif du travail est de définir le comportement du bassin versant de Rhiraya vis-à-vis de l'événement pluvial, en se basant sur les paramètres du tableau xx.

Les faibles valeurs de S qui varient de 28.12 à 0 mm sont dues principalement à la géologie du bassin versant vu qu'une grande partie est formée à partir des roches granitiques, ce qui y a abaissé la perméabilité du bassin versant (tableau1).

Le sécheresse du sol dans cette période explique la valeur élevée de S au niveau de 1^{ère} crue et la faible valeur de ω , ce pendant au niveau de la 2^{ème} crue les sols ont été encore sous l'effet de la 1^{ère} pour nous donner un ruissellement total de la masse d'eau tombée sur le bassin versant en plus d'une partie vidanger issue de la 1^{ère} crue.

Les vitesses de ruissellement sur le bassin versant varient entre 2.13 et 4.78 m/s ce qui expliqué par géomorphologie du bassin avec ses fortes pentes et l'absence de la couverture végétale sur une partie de 78% du bassin versant (tableau1)

Conclusion :

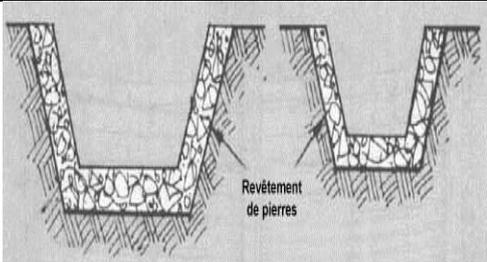
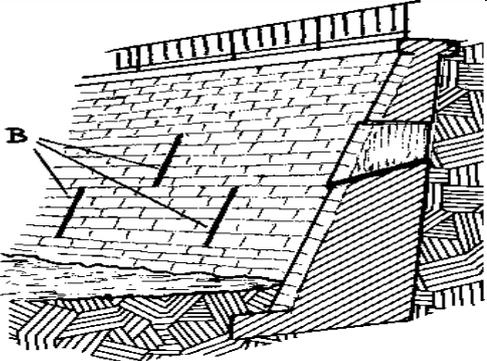
Si les résultats de cette simulation peuvent paraître peu satisfaisants, ceci s'explique par la mal dispersion des stations pluviométriques en plus de la qualité de leurs données (parfois douteuses). Ce pendant les valeurs obtenues restent représentatives vu les paramètres géologiques et morphologiques de la région.

Tout cela converge pour définir le bassin versant du Rhiraya comme un environnement propice aux pulsations brutales des cours d'eau. Une pluie intense, qui s'abat sur un bassin versant à pentes fortes et à substratum peu perméable et de faible pourcentage de végétation (tableau1), se traduit en écoulements de surface capables de provoquer des dégâts intense (exemple de novembre 2014).

Chapitre 5 : Recommandation des aménagements :

Pour résoudre les problèmes des inondations, on peut accéder à une protection de lit et des berges en recommandant quelques ouvrages hydrauliques tel que :

1. Pour la stabilisation des berges :

Ouvrages recommandé	Illustration
<ul style="list-style-type: none">➤ Mettre des murs en gabion au niveau des zones risqué.➤ Renforcement des berges et protection par gravier de grand diamètre.➤ Ménage de grandes Roches➤ Projection d'une digue sur la rive	
<ul style="list-style-type: none">➤ Mettre des murs du soutènement en béton armés ou maçonnerie.	
<ul style="list-style-type: none">➤ Mettre des revêtements de pierres	
<ul style="list-style-type: none">➤ L'ajoute des barbicanes aux murs	

Pour les murs de protections, il est préférable de procéder à l'aménagement par :
Les murs en gabion, en raison de:

- Minimum de dégâts face au phénomène de l'affaissement différentiel (le gabion est mieux souple par rapport à la maçonnerie).
- Meilleure résistance à la force dynamique dans la zone d'érosion.
- Ne nécessite pas une main d'œuvre très qualifiée comme la maçonnerie.
- Coût moins cher.
- Disponibilité de matériaux sur place.

Ces murs en gabion seront renforcés par les barbacanes pour éviter toutes surcharges accidentelles.

2. Pour la stabilité du lit de l'oued :

Tableau : Les ouvrages pour la stabilisation du lit de l'oued

Ouvrages recommandés	Illustration
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Augmentation de la résistance du lit par Excavation du lit de l'oued sur une longue distance pour assurer la capacité de débit nécessaire à l'écoulement lors de la crue. 	
<ul style="list-style-type: none"> ➤ fixation du lit par des traversées (seuils en pierres de taille, béton, des rampes de blocs). 	

3. Mesures non structurelles :

Certaines mesures non structurelles existent déjà comme le système d'annonce de crue au niveau d'Ourika. Ce système peut servir efficacement au niveau d'autres zones qui. Comme citée précédemment cette alerte des habitants a déjà épargné la perte de vie humaine lors de la crue de 1995.

D'autres mesures du genre peuvent être entreprises comme :

- La sensibilisation de la population pour le respect des zones inondables définies par l'ABHT en concertation avec les autres organismes concernés.
- La sensibilisation de la population vis-à-vis de l'exploitation du lit de l'oued (extraction des matériaux)

Conclusion

L'analyse de l'ensemble des paramètres morphométriques et hydrologiques de la zone d'étude, nous a permis de déduire que le bassin versant en question présente une vulnérabilité accrue aux inondations, alors que les conditions climatiques actuelles autrement dit liées au nouveau climat et à l'absence d'un couvert végétal important rendent notre zone un milieu propice à des pulsations brutales des oueds.

Et puisque on ne peut pas prédire la nature, nous avons essayé d'établir des scénarios à travers des analyses fréquentielles d'une série de données d'une quarantaine d'années. Ces scénarios devraient être pris en considération lors du dimensionnement des aménagements (pont, route, dalots, mur de soutènement ...).

Ses scénarios ont été la base d'une modélisation spatiale indiquant que généralement dans notre zone d'étude ce sont les terrains agricoles qui sont affectés au 1^{er} degré en plus des habitants et de leurs logements placés sur les berges de l'oued. S'ajoute à cela un ensemble de voies principales et secondaires endommagés (cas des événements de novembre).

Dans le but d'améliorer la qualité des résultats et bien évaluer le risque, on a procédé à une modélisation spatio-temporelle, qui a montré que le bassin du Rhiraya spécialement et notre zone en Général favorise le déclenchement des crues, vu la morphologie imperméable et les fortes pentes qui caractérisent le bassin versant en plus de ses hautes altitudes qui dominent la région.

A la fin de cette étude nous avons proposé un ensemble de recommandations en vue de remédier à ces catastrophes naturelles par l'installation des ouvrages de protections et de stabilité et l'entretien de lit de l'oued, mais il ne faut pas négliger le facteur anthropique par la sensibilisation des gens. Par ailleurs, la construction et le renforcement des barrages seraient de grande vigueur pour faire face à ce fléau naturel.

Référence :

Ahbari A. (2013), le bassin versant de Rhiraya : modélisation pluie-débit et prédiction du comportement hydrologique. Mémoire de fin d'études, Master eau et environnement. FSTG, Marrakech, 101p.

Agence du Bassin Hydraulique de Tensift, Rapport de conjoncture Evénement hydro pluviométrique du 20 /11/2014 au 01/12/2014. Note interne, Marrakech, 26p.

Boudhar A, 2009, Télédétection du manteau neigeux et modélisation de la contribution des eaux de fonte des neiges aux débits des oueds du haut atlas de Marrakech, Université Cadi Ayyad. Doctorat National.

Christophe Bouvier, Anne Crespy, Agnès Crès, François-Noel Crès, 2014. Modélisation pluie-débit distribuée avec le logiciel ATHYS. Application au Gardon à Anduze. Manuel de formation, HydroSciences Montpellier, 95 pages.

Fniguire F, Boukrim S, Etude dynamique et statistique des crues du Haut Atlas de Marrakech (Maroc), Cas des bassins versants du N'Fis, de la Ghiraya et de l'Ourika. Mémoire de fin d'études, Master eau et environnement. FSTG, Marrakech. 56p.

Hanich L, Simoneaux V., Boulet G. et Chehbouni AG., Hydrologie des bassins versants du Haut Atlas marocain. FSTG Marrakech, 20p

Ramromi A. (2007), Les crues en zone montagneuse semi aride le cas des bassins du R'dat et du Zat (Haut Atlas, Maroc). Mémoire de fin d'études, Maîtrise Es Sciences et Techniques d'Hydrogéologie. FSTG, Marrakech 60p.

Saidi M.E, Daoudi L., Aresmouk M.E.H. et Blali A. (), Rôle du milieu physique dans l'amplification des crues en milieu montagnard, exemple de la crue du 17 août 1995 dans la vallée de l'Ourika (Haut-Atlas, Maroc). *Sécheresse*, Volume 14-2, Paris, 2003, p. 107-114.

Saidi M.E, Alaoui A, SIMULATION ET SPATIALISATION DU RISQUE D'INONDATION DANS UNE VALLEE ANTHROPISEE. LE CAS DE LA VALLEE DE L'OURIKA (HAUT ATLAS, MAROC). *European Scientific Journal*, vol.10, No.17, 2014, p.210-223.

Saidi M.E., Daoudi L., Aresmouk M.E.H, Fniguire F., Boukrim S., Les crues de l'oued Ourika (Haut Atlas, Maroc): Événements extrêmes en contexte montagnard semi-aride. *Comunicações Geológicas*, t. 97, Lisbonne, 2010, pp. 113-128.

Pascon P, 1977. Le Haouz de Marrakech, thèse, Rabat, 693 p

US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, HEC-RAS River Analysis System, user's manual, 2010, 790 p.