

# Master Spécialisé Sciences de l'eau ماستر متخصص في علوم الماء

#### Mémoire de Fin d'Etudes

Pour l'Obtention du Diplôme de Master

Apport de la modélisation événementielle à la simulation des apports hydrologiques extrêmes.

Cas des bassins versants du Zat et du Ghdat (Haut Atlas, Maroc).

# Par : BENKIRANE Myriam

Sous la direction de:

**Etablissement** 

Pr. Mohamed El Mehdi SAIDI

Faculté des Sciences et Techniques - Marrakech

### Soutenu le 04 Juillet 2017 Devant le Jury composé de :

#### **Etablissement**

Pr. A. BENKADDOUR Faculté des Sciences et Techniques – Marrakech (Examinateur)

Pr. N. LAFTOUHI Faculté des Sciences Semlalia-Marrakech (Examinateur)

Pr. M. M.SAIDI Faculté des Sciences et Techniques – Marrakech (Encadrant)







Faculté des Sciences Semlalia de Marrakech Laboratoire Mixte International TREMA

Faculté des Sciences et Techniques de Marrakech

Année Universitaire: 2016-2017.

Remerciements

 $C\'est\ avec\ \'enorme\ joie\ et\ reconnaissance\ que\ j\'adresse\ mes\ remerciements\ \grave{a}\ toutes\ personnes$ 

m'ayant aidée de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Je tiens tout d'abord à remercions ALLAH le tout puissant de m'avoir donné la foi et qui m'a

permis d'en arriver là.

Je voudrais adresser ma profonde gratitude et mes plus sincères remerciements à monsieur M.M.

SAIDI, mon encadrant, pour sa réactivité, sa disponibilité et ses précieux conseils et son appui

pendant toute la période du travail.

On réserve une pensée spéciale à tous les enseignants du Master spécialisé science de l'eau

(MSSE). Département de géologie de la faculté des sciences de Marrakech (FSSM), qui ont pu

nous donner une formation didactique et appréciable tout au long de notre cursus.

Tous mes estimes s'adressent à Monsieur N.LAFTOUHI, Professeur Hydrologue et responsable du

master d'avoir toujours été présent et à l'écoutes de mes demandes ainsi que pour ses précieux

conseils.

Je remercie l'équipe de l'Agence du bassin hydraulique de Tensift, en particulier Monsieur

B.BERJAMY ainsi que Madame M.BENGHANEM pour leurs conseils et leurs fructueuses

collaborations.

Je remercie également monsieur A.BENKADDOUR, Professeur Hydrologue pour son aide

précieux et son partage de connaissances.

J'adresse mes remerciements les plus sincères, aux membres du jury pour avoir accepté de jugé

mon travail.

Je remercie chaleureusement mes amis et mes collègues plus précisément mon confrère I.SALIK,

étudiant doctorant d'avoir partagé son savoir avec moi, et de m'avoir aidé et soutenu tout au long

de mon stage.

Je présente mes sincères et vifs remerciements à Mes Parents, que ce travail soit l'exaucement de

vos vœux tant formulés, de vos prières et le fruit de vos innombrables sacrifices.

2

Je remercie vivement mes sœurs **Fatima Zahra**, et **Zineb** et mon frère **Ghali**, pour leurs encouragements. Pour toutes les personnes dont je n'ai pas cité leurs noms, qu'elles soient toutes assurées de mes profondes gratitudes.

## **Sommaire**

Li	ste des Figures	6
Li	ste des Tableaux	9
Li	ste des abréviations	11
Ré	ésumé	12
Int	troduction	13
$\mathbf{C}$	hapitre I : Cadre général de la Zone d'étude	14
I.	Généralités	15
II.	Présentation de la zone d'étude cas des bassins versants du Ghdat et du Zat	16
	II.1. Situation géographique	
	II.2. Cadre géologique.	17
	II.3. Ressources en eau	21
III	I. Caractéristiques géométriques des bassins Ghdat et Zat	22
	III.1. Surface	
	III.2. Périmètre	23
	III.3. Indice de compacité	23
	III.4. Rectangle équivalent	23
	III.5. Courbes hypsométriques	24
	III.6. Altitudes caractéristiques	28
ΙV	Caractéristiques topographiques	30
	IV.1. Relief	30
	IV.2. Pente moyenne	31
	IV.3. Temps de concentration	32
	IV.4. Vitesse moyenne de ruissellement	33
	IV.5. Coefficient de ruissellement moyen interannuelle	33
V.	. Caractéristiques du réseau hydrographique	34
	V.1. Réseau hydrographique des bassins du Ghdat et du Zat	34
	V.2. Classifications des thalwegs	35
	V.3. Pente moyenne des cours d'eau	37
	V.4. Densités de drainage.	37

Chapitre II : Analyse des régimes pluviométriques et hydrologiques	39
I. Variations des précipitations et des débits à différentes échelles de temps	40
I.1. Variations des précipitations et des débits en amont du bassin versant Ghdat	40
I.1.1. Analyse des données pluviométriques au niveau de la station d'Adrar et de Tijdanct.	40
I.2. Variations des précipitations et des débits en aval des bassins Ghdat et Zat	45
I.2.1. Analyse des données pluviométriques au niveau de la station Sidi rahal et Taferiat	45
I.2.2. Analyse des données hydrologiques au niveau de la station Sidi rahal et Taferiat	51
Chapitre III : Bilans hydrologiques et relation entre les pluies et les débits	58
I. Bilan particuliers	59
I.1. Lames d'eau écoulée	59
I.2. Déficits d'écoulement	59
I.3. Coefficients d'écoulement	60
II. Bilans globaux	61
II.1. Lames d'eau écoulée	61
II.2. Déficits d'écoulement	61
II.3. Coefficients d'écoulement	62
III. Corrélation entre les précipitations et les débits à différentes échelles de temps	62
III.1. Corrélation entre les précipitations et les débits moyens mensuels	63
III.2. Corrélation entre les précipitations et les débits moyens saisonniers	64
III.3. Corrélation entre les précipitations et les débits moyens annuels	65
Chapitre IV : Etude des crues des oueds Ghdat et Zat	67
A- Analyses fréquentielles des débits et des pluies extrêmes pour l'estimation des évènements pointe à différentes périodes de retour	
I. Ajustement des lois à un échantillon des précipitations maximales annuelles	68
I.1. Méthode visuelle (analyse des graphes)	69
I.2. Méthode numérique (analyse statistique)	71
I.3. Estimation des précipitations maximales Annuelles	72
II. Ajustement des lois à un échantillon des débits maximal annuels	72
II.1. Méthode visuelle (analyse des graphes)	73
II.2. Méthode numérique (analyse statistique)	75
II.3. Estimation des débits de pointe pour différentes périodes de retour.	75
B- Etude dynamique des crues	77
I. Analyse des hydrogrammes des crues	77
I.1. les crues du Bassin versant Ghdat	78
I.2. les crues du Bassin versant Zat	82

Chapitre V : Modélisation hydrologique évènementielle des crues du Ghdat et			
du Zat (HEC-HMS)	86		
I. Présentation du logiciel HEC-HMS	87		
II. Préparation du modèle HEC-HMS	88		
II.1. Débit de base : modèle de Récession	88		
II.2. Fonction de production : SCS-Curve Number	89		
II.3. Fonction de transfert : Clark Unit Hydrograph	90		
II.4. Calibration du modèle	91		
III. Application du modèle HEC-HMS aux bassins versants du Ghdat et Zat	93		
III.1. Caractérisation des événements utilisés pour la modélisation	93		
III.2. Calage du modèle	94		
III.2.1. Calage des évènements de la station Sidi rahal.	94		
III.2.2. Calage des évènements de Taferiat.	98		
- Interprétations des figures 83 et 84 :	101		
III.3. Validation du modèle	102		
III.4. Evaluation de la qualité du modèle	103		
Conclusion	105		
Références bibliographiques	107		
Annexes	109		

## Liste des Figures

Figure 1: Situation géographique des bassins versants du Ghdat et Zat.	16
Figure 2: Carte géologique du bassin versant de l'oued Ghdat (Extraite de la carte géologique du	
Maroc).	17
Figure 3 : carte géologique du bassin versant de l'oued Zat (Extraite de la carte géologique du	
Maroc).	20
Figure 4 : Répartition des nappes du bassin Tensift El Haouz d'après les données de l'ABHT	22
Figure 5 : visualisation des rectangles équivalents du bassin Ghdat	24
Figure 6 : visualisation des rectangles équivalents du bassin Zat.	24
Figure 7 : Carte hypsométrique du bassin Ghdat	
Figure 8 : Courbe hypsométrique du bassin Ghdat	25
Figure 9 : Tranches d'altitude en fonction de la surface.	26
Figure 10 : Carte hypsométrique du bassin Zat	27
Figure 11 : Courbe hypsométrique du bassin Zat.	27
Figure 12 : Tranches d'altitude en fonction de la surface	
Figure 13 : Répartition des pentes du bassin versant Ghdat.	30
Figure 14 : Répartition des pentes à l'échelle du bassin versant de l'oued Zat	
Figure 15 : Réseau hydrographique du bassin Ghdat	34
Figure 16 : Réseau hydrographique du bassin Zat.	35
Figure 17 : Carte du réseau hydrographique classifié du bassin versant Ghdat	36
Figure 18 : Carte du réseau hydrographique classifié du bassin versant Zat	36
Figure 19 : Précipitations mensuelles interannuelles à la station Adrar de 2012/13 à 2015/16	40
Figure 20: Précipitations mensuelles interannuelles à la station Tijdant de 2012/13 à 2015/16	41
Figure 21: Variation des précipitations mensuelles interannuelles comparative des deux stations	de
2012/13 à 2015/16	42
Figure 22 : Variation saisonnière comparative des précipitations aux deux stations de 2012/13 à	
2015/16	42
Figure 23 : Précipitations annuelles au niveau de la station Adrar de 2012/13 à 2015/16	43
Figure 24 : Précipitations annuelles au niveau de la station Tijdant de 2012/13 à 2015/16	44
Figure 25 : Précipitations annuelles comparative au niveau des stations Adrar et Tijdant de 2012/	′13
à 2015/16	44
Figure 26 : Précipitations mensuelles interannuelles à la station Sidi rahal de 1982/83 à 2015/16.	45
Figure 27 : Précipitations mensuelles interannuelles à la station Taferiat de 1982/83 à 2015/16	46
Figure 28 : Variation des précipitations mensuelles interannuelles comparative des stations Sidi	
rahal et Taferiat de 1982/83 à 2015/16	47
Figure 29 : Dépendance entre les pluies et les débits moyens mensuels a la station Sidi rahal	47
Figure 30 : Rapport pluies et débits moyens mensuels a la station Taferiat	48
Figure 31 : Variation saisonnière comparative des précipitations aux deux stations de 1982/83 à	
2015/16	49

Figure 32 : Précipitations annuelles au niveau de la station Sidi rahal de 1982/83 à 2015.	/1650
Figure 33 : Précipitations annuelles au niveau de la station Taferiat de 1982/83 à 2015/1	650
Figure 34: Variation des précipitations Annuelle comparative des stations Sidi rahal et T	`aferiat de
1982/83 à 2015/16	51
Figure 35 : Variations moyennes mensuelles des débits du bassin versant du Ghdat de 19	980/81 à
2015/16	52
Figure 36 : Variations moyennes mensuelles des débits du bassin versant de Taferiat de	1980/81 à
2015/16	53
Figure 37 : Variation des débits moyen mensuelles comparative entre les stations Sidi ra	hal et
Taferiat de 1980/81 à 2015/16	53
Figure 38 : Variation saisonnière comparative des débits aux deux stations de 1980/81 à	2015/16.54
Figure 39 : Variation des débits moyens annuels de la station Sidi rahal de 1980/81 à 20	15/1655
Figure 40 : Variation des débits moyens annuels de la station Taferiat de 1980/81 à 2015	5/1656
Figure 41 : Variation comparative des débits moyens annuels entre les stations Sidi raha	l et Taferiat
de 1980/81 à 2015/16	56
Figure 42 : Corrélations entre les précipitations et les débits moyens mensuels à la statio	n Sidi
Rahal	63
Figure 43 : Corrélations entre les précipitations et les débits moyens mensuels à la statio	n Taferiat.
	63
Figure 44 : Corrélations entre les précipitations et les débits moyens saisonniers à la stat	ion Sidi
rahal	64
Figure 45: Corrélations entre les précipitations et les débits moyens saisonniers à la stati	on Taferiat.
Figure 46 : Corrélations entre les précipitations et les débits moyens annuels à la station	Sidi Rahal.
Figure 47 : Corrélations entre les précipitations et les débits moyens annuels à la station	Taferiat66
Figure 48 : Ajustements statistiques des précipitations maximales annuels à la station Si	
selon les lois de Gumbel, Log-normale, GEV, Gamma et Exponentielle	69
Figure 49 : Ajustements statistiques des précipitations maximales annuels à la station Ta	ıferiat selon
les lois Exponentielle, GEV, Log-normale, Gumbel, et Gamma	70
Figure 50: Ajustements statistiques des débits maximaux annuels à la station Sidi rahal s	selon les
lois Weibull, Exponentielle, GEV, Log-normale, et Gumbel.	
Figure 51 : Ajustements statistiques des débits maximaux annuels à la station Taferiat se	elon les lois
Exponentielle, Log-normale, Weibull, Gumbel et GEV	
Figure 52 : Hydrogramme de la crue du 18 Juin 2011.	
Figure 53 : Hydrogramme de la crue du 05 Avril 2013.	
Figure 54 : Hydrogramme de la crue du 18 Septembre 2013.	
Figure 55 : Hydrogramme de la crue du 21 Novembre 2014	
Figure 56 : Hydrogramme de la crue du 22 Novembre 2014	
Figure 57 : Hydrogramme de la crue du 22 Aout 2016	
Figure 58 : Hydrogramme de la crue du 27 Novembre 2016	
Figure 59 : Hydrogramme de la crue du 16 Décembre 2016.	
Figure 60 : Hydrogramme de la crue du 24 Novembre 2011	
Figure 61 : Hydrogramme de la crue du 18 Juin 2011	
Figure 62 : Hydrogramme de la crue du 13 Avril 2012.	
Figure 63: Hydrogramme de la crue du 21 Septembre 2014	84

Figure 64 : Hydrogramme de la crue du 09 Novembre 2014	84
Figure 65: Hydrogramme de la crue du 20 et 21 Novembre 2014	85
Figure 66: Hydrogramme de la crue du 22 et 23 Novembre 2014	85
Figure 67 : Paramètres introduits dans le modèle de récession	89
Figure 68 : Paramètres introduits dans le modèle SCS-CN	90
Figure 69 : Paramètres de l'Hydrogramme de Clark	91
Figure 70: Hydrogramme et calage de la crue du 18 Juin 2011	94
Figure 71: Hydrogramme et calage de la crue du 05 Avril 2013	95
Figure 72: Hydrogramme et calage de la crue du 18 Septembre 2013	95
Figure 73: Hydrogramme et calage de la crue du 21 Novembre 2014	96
Figure 74: Hydrogramme et calage de la crue du 22 Novembre 2014	96
Figure 75: Hydrogramme et calage de la crue du 22 Aout 2016	97
Figure 76: Hydrogramme et calage de la crue du 27 Novembre 2016	97
Figure 77 : Hydrogramme et calage de la crue du 16 Décembre 2016	98
Figure 78: Hydrogramme et calage de la crue du 24 Novembre 2011	98
Figure 79: Hydrogramme et calage de la crue du 18 Juin 2011	99
Figure 80 : Hydrogramme et calage de la crue du 13 Avril 2012	99
Figure 81: Hydrogramme et calage de la crue du 09 Novembre 2014	100
Figure 82: Hydrogramme et calage de la crue du (20-21) Novembre 2014	100
Figure 83: Hydrogramme et calage de la crue du 21 Septembre 2014	101
Figure 84: Hydrogramme et calage de la crue du (22-23) Novembre 2014	101
Figure 85 : Validation de l'épisode 5 et relation pluies – débits a la station Sidi rahal	102
Figure 86 : Validation de l'épisode 3 et relation pluies – débits a la station Taferiat	103

## Liste des Tableaux

Tableau 1 : représentation des pourcentages de la nature des sols d'après (ABHT 2007)	17
Tableau 2 : Pourcentages des surfaces du bassin Ghdat en fonction des taux d'infiltration	19
Tableau 3 : représentation des pourcentages de la nature des sols d'après (ABHT 2007)	19
Tableau 4 : Représentation des pourcentages des surfaces du bassin Zat en fonction des taux	
d'infiltration. ( Juillerat, 2004).	20
Tableau 5 : Présentation des surfaces des bassins versant.	22
Tableau 6 : Présentation des surfaces des bassins versant.	23
Tableau 7 : résultats des indices de compacité des Bassins versant du Ghdat et du Zat	23
Tableau 8 : résultats des longueurs des rectangles équivalents préalablement calculé en fonction	des
formules ci-dessus pour les deux bassins versant.	24
Tableau 9 : Représentation des altitudes Maximales et minimales des bassins versants du Ghdat	et
du Zatdu	29
Tableau 10 : Représentation des altitudes moyennes des bassins versants Ghdat et Zat	29
Tableau 11 : Représentation des altitudes médianes des bassins versants Ghdat et Zat	29
Tableau 12 : Pentes moyennes des bassins Ghdat et Zat.	31
Tableau 13 : Temps de concentration calculé par différentes formules	
Tableau 14 : Vitesse de ruissellement	33
Tableau 15 : Présentation de la pente moyenne du cours d'eau des oueds Ghdat et Zat	37
Tableau 16 : Présentation des résultats de la densité de drainage et de la constante de stabilité de	es
deux bassins versant.	38
Tableau 17 : Tableau récapitulatif des caractéristiques physiographiques des bassins versants	38
Tableau 18 : Présentation des lames d'eau écoulée au niveau du bassin Ghdat de l'année 2011/12	2 à
2015/16	59
Tableau 19: Déficit d'écoulement au niveau du bassin versant du Ghdat de l'année 2011/12 à	
2015/16	60
Tableau 20 : Coefficient d'écoulement du bassin versant du Ghdat	61
Tableau 21 : Lames d'eau écoulée du bassin versant Ghdat.	61
Tableau 22 : Déficits d'écoulement du bassin versant Ghdat.	62
Tableau 23 : Coefficients d'écoulement du bassin versant Ghdat.	62
Tableau 24 : Ajustements numériques des lois de Gumbel, Log-normale, GEV, Gamma et	
Exponentielle (Période 100 ans).	71
Tableau 25 : Ajustements numériques des lois Exponentielle, GEV, Log-normale Gumbel, et	
Gamma (Période 100 ans).	71
Tableau 26 : Estimation des précipitations maximales annuelles selon la loi de Gumbel	72
Tableau 27 : Estimation des précipitations maximales annuelles selon la loi Exponentiel	72
Tableau 28 : Ajustements numériques des lois Weibull, Exponentielle, GEV, Log-normale, et	
Gumbel. (Période 100 ans).	75
Tableau 29 : Ajustements numériques des lois Weibull, Exponentielle, GEV, Log-normale, et	
Gumbel. (Période 100 ans).	75
Tableau 30 : Estimation des précipitations maximales annuelles selon la loi Weibull	76
Tableau 31 : Estimation des précipitations maximales annuelles selon la loi Exponentiel	76

Tableau 32 : Caractéristiques de la crue du 18 Juin 2011	78
Tableau 33 : Caractéristiques de la crue du 05 Avril 2013.	79
Tableau 34 : Caractéristiques de la crue du 18 Septembre 2013	79
Tableau 35 : Caractéristiques de la crue du 21 Novembre 2014	80
Tableau 36: Caractéristiques de la crue du 22 Novembre 2014	80
Tableau 37 : Caractéristiques de la crue du 22 Aout 2016	81
Tableau 38 : Caractéristiques de la crue du 27 Novembre 2016	81
Tableau 39 : Caractéristiques de la crue du 16 Décembre 2016.	82
Tableau 40 : Caractéristiques de la crue du 24 Novembre 2011	82
Tableau 41 : Caractéristiques de la crue du 18 Juin 2011	83
Tableau 42 : Caractéristiques de la crue du 13 Avril 2012	83
Tableau 43 : Caractéristiques de la crue du 21 Septembre 2014	84
Tableau 44 : Caractéristiques de la crue du 09 Novembre 2014	84
Tableau 45 : Caractéristiques de la crue du 20 et 21 Novembre 2014	85
Tableau 46 : Caractéristiques de la crue du 22 et 23 Novembre 2014	85
Tableau 47 : Numérotation des événements, relatifes aux stations Sidi rahal et Taferiat, a pas de	
temps instantané	93
Tableau 48 : Evénements utilisés pour la validation de modèle aux niveaux des stations de Sidi	
rahal et Taferiat	.102
Tableau 49 : Critère de Nash pour les deux épisodes de validation	.104

## Liste des abréviations

**A.B.H.T**: Agence Bassin Hydraulique de Tensift El Haouz

**ABH:** Agence Bassin Hydraulique

KG: Indice de compacité

**USACE:** U.S. Army Corps of Engineers

**HEC:** Hydrologic Engineering Center

**HMS:** Hydrologic Modeling System

HDF: Hauteur-Durée-Fréquence

**CN:** Curve Number

**SCS:** Soil Conservation Service

**SMA:** Sol-Moisture Accounting

**ModClark**: modèle de CLARK

PWRMSE: Peak Weighted Root Mean Square Error « la racine de la pointe erreur quadratique

moyenne ».

**HU:** Hydrogramme unitaire

Tc: Temps de concentration

**St**: coefficient de stockage

Rc: Récession constante

Td: Seuil.

### Résumé

Le bassin versant de Tensift est situé au centre Ouest du Maroc entourant la région de Marrakech, les affluents drainés par l'oued Tensift qui font l'objet de cette étude sont l'oued Ghdat et l'oued Zat issus de la rive gauche.

Les bassins versants du Ghdat et du Zat couvrent des superficies respectives de 541 et 533 Km<sup>2</sup>, ils sont limités au Nord par la plaine du Haouz, au Sud par l'axe de la chaîne du haut Atlas, à l'Est par le bassin versant de Tessaout et à l'ouest par les bassins versants du Zat et Ourika de part et d'autre des deux bassins.

Ils sont caractérisées par un climat aride à semi-aride en plaines, et subhumide en montagnes, avec un couvert végétal peu développé.

Les régimes hydrologiques des stations Sidi Rahal et Taferiat situées au exutoire des bassins Ghdat et Zat se caractérisent par des régimes hivernaux. Le maximum des apports intervient depuis le mois de Novembre à Mars et le minimum est observé pendant les périodes estivales. Les régimes hydrologiques s'alimentent principalement par les précipitations accompagnées d'une légère chute de neige au sommet pendant l'hiver au niveau des deux bassins versants.

Par ailleurs l'influence des paramètres morphologiques et climatiques sur les bassins provoque des comportements hydrologiques variables et imprédictibles. Vu qu'ils donnent naissance à des crues soudaines et brèves qui causent souvent des dégâts importants.

A cet effet, la présente étude est la première étude de modélisation à pas de temps fin (dix minutes) effectuée sur ces deux bassins. Elle cible l'aspect qui présente la finalité de ce travail, à savoir l'élaboration d'un modèle prévisionnel pluie-débit, applicable pour la prévision météorologique des crues par le biais de la plateforme HEC-HMS.

Les résultats obtenus lors la validation des modèles ont été basés sur l'ajustement des paramètres de calages aux meilleurs critères Nash. Nous avons trouvé que les deux modèles prévisionnels présentent des critères Nash satisfaisant.

### Introduction

Au cours de ces dernières décennies l'eau est de plus en plus menacée par la rareté étant donné qu'au fil du temps, les besoins en eau ne cessent de s'accroître.

Cette précieuse ressource est soumise aux effets des changements climatiques qui s'avèrent comme causes principales des inondations, des sécheresses et de la désertification.

En effet la gestion de l'eau est donc d'une importance primordiale pour la continuité et le développement de l'espèce humaine, c'est pour cela que nous nous somme intéressé aux problèmes d'inondation et de la gestion des crues des oueds Ghdat et Zat.

La région étudiée est soumise dans l'ensemble à un climat aride à semi-aride, où interfèrent une sècheresse accrue en été et une grande variabilité spatiotemporelle des pluies pendant l'hiver et le printemps. Les débits des oueds sont généralement faibles, mais leurs crues sont souvent brutales, et de brève durée.

Le comportement non contrôlable des inondations, nous a poussés à établir des modèles préventifs, afin de lutter contre le pouvoir dévastateur des crues.

Les principales objectifs de cette étude sont dans un premier lieu de connaître les paramètres géomorphologiques, climatiques et hydrologiques à l'origine de ces crues, puis entreprendre une étude dynamiques et fréquentielles, pour achever une compréhension théorique complète de ces événements hydrologiques extrêmes, et enfin appliqué des modèles évènementiels prévisionnels pour les bassins versant du Ghdat et du Zat,

A cet effet, cette étude s'est articulée autour de trois principales parties

- La premier partie portera sur la présentation de la zone d'étude ainsi que l'analyse de la géomorphologie générale du bassin, suivie de l'étude hydropluviométrique en amont du bassin versant Ghdat, et en aval des deux bassins Ghdat et Zat, puis des bilans hydrologiques et la relation entre les pluies et les débits.
- La deuxième partie sera consacrée à l'utilisation des lois statistiques applicables aux précipitations et aux débits extrêmes pour l'estimation des débits de pointe à différentes périodes de retour, puis l'étude dynamique des crues historiques des oueds par l'analyse des hydrogrammes.
- La troisième partie consistera à appliquer un modèle hydrologique de simulation événementiel, dont le but est d'intégrer l'ensemble des données disponibles pour pouvoir optimiser les paramètres du modèle hydrologique choisi, et par la suite utiliser ce modèle comme outil de synthèse et de validation où la représentation doit être le plus conforme possible à la réalité.

Chapitre I : Cadre général de la Zone d'étude

#### I. Généralités

Le bassin versant de Tensift est situé au centre Ouest du Maroc entourant la région de Marrakech, Il occupe une superficie de 20450 km².

Ce large domaine continental est situé entre les latitudes 32° 10' et 30° 50' Nord et les longitudes 9° 25' et 7° 12' Ouest. Il est limité au Sud par la ligne de crête de la chaîne du Haut Atlas, au Nord par le massif de petites montagnes nommées « Jbilet » avec des altitudes inférieures à 1000 mètres, à l'Est par la ligne de partage des eaux, peu marquée séparant le bassin du Tensift de celui du Tessaout, affluant d'Oum R'bia et à l'Ouest par l'océan Atlantique où se situe son exutoire. Les altitudes sont donc très contrastées.

Elles varient de 0 m au niveau de son exutoire à 4167 mètres au Jbel Toubkal.

Géographiquement, le bassin peut être subdivisé en quatre domaines distincts :

- Le Haut Atlas au sud : zone de montagnes formant les plus hauts reliefs du royaume avec comme point culminant à 4167 m, le Jbel Toubkal.
- La plaine du Haouz et le bassin de Mejjate au centre : une dépression d'une superficie de 6000 Km², allongée de l'Est à l'Ouest et large de 40 Km, traversée par la majorité des affluents de la rive gauche de l'oued Tensift drainant les eaux de la chaîne atlasique.
- Les Jbilet au nord : formées de montagnes de faibles altitudes, émergeant au nord de la plaine du Haouz.
- Le bassin d'Essaouira-Chichaoua à l'ouest, constitué d'un vaste plateau à topographie tourmentée, créant la transition entre les plaines intérieures et le Haut atlas.

Administrativement, cette zone s'étend sur six préfectures et provinces, elle couvre totalement la préfecture de Marrakech et les provinces d'Al Haouz, de Chichaoua et d'Essaouira et partiellement les provinces d'El Kalaâ des Sraghna et de Safi.

L'Oued Tensift est alimenté de façon quasi exclusive par ces affluents rive gauche qui drainent les flancs nord de l'Atlas. Ces affluents installés sur un relief montagneux à structure et nature géologique hétérogènes ont des caractères torrentiels.

Ces principaux affluents sont : Oued Ghdat, Oued Zat, Oued Ghmat, Oued N'fis, Oued Rheraya, Assif El Mal, Oued Chichaoua, Oued Tiroula et Oued Talmost.

## II. Présentation de la zone d'étude cas des bassins versants du Ghdat et du Zat II.1. Situation géographique

#### Bassin versant de Ghdat

Il est situé au Sud-Est de Marrakech entre les latitudes 31°10' et 31°40' Nord et les longitudes 7°10' et 7°40' Ouest. L'Oued Ghdat est un affluent atlasique situé sur la rive gauche de l'oued Tensift et appartenant au versant Nord de la chaine du Haut Atlas.

Il draine un bassin versant de 541km<sup>2</sup>, et s'écoule sur une longueur de 55,86km depuis ses origines à plus de 3000m d'altitude jusqu'à l'exutoire Sidi Rahal, situé à une altitude de 693m. 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 le bassin de Tassaout et à l'Ouest par le bassin versant de Zat.

#### Bassin versant de Zat

Il est Situé au Sud-Est de Marrakech entre les latitudes 31°30' et 31°45' Nord et les longitudes 7°30' et 7°45'Ouest. L'Oued Zat est également un affluent atlasique situé sur la rive gauche de l'oued Tensift.

Il forme avec l'oued Ourika les deux bras principaux de l'oued Hadjar. Il draine un bassin versant de 533km². Il s'écoule sur une longueur de 61.47km depuis ses commencements a 3900m d'altitude jusqu'à la station Taferiat ou se situe l'exutoire du bassin Zat à une altitude de 760m.

Il est limité au Sud par la zone axiale du Haut atlas, au Nord par la plaine du Haouz, à l'Est par le bassin de Ghdat et à l'Ouest par le bassin de l'Ourika. Il fait partie de la zone la plus active, la plus pentue et la plus arrosée du bassin de Tensift.

Les altitudes maximales sont localisées à la périphérie Sud du bassin, alors que les altitudes les plus faibles se trouvent au centre et au Nord du bassin. L'érosion serait donc plus active à la périphérie Sud que dans le reste du bassin.

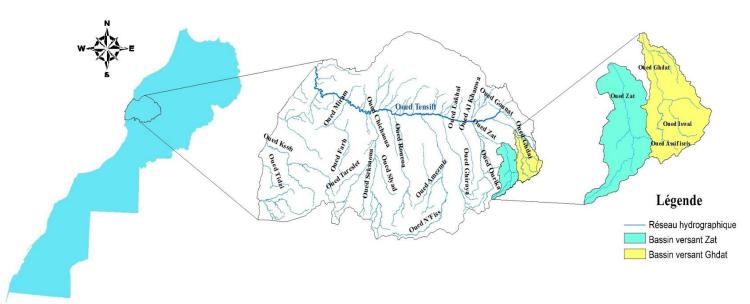


Figure 1: Situation géographique des bassins versants du Ghdat et Zat.

#### II.2. Cadre géologique.

#### Bassin versant de Ghdat

Sur le plan géologique le bassin est constitué de deux grands ensembles, le socle rigide d'âge Paléozoïque et précambrien situé au sud, et la couverture d'âge Mésozoïque à Cénozoïque qui se développe vers le Nord et le Nord-est. La relation entre ces deux ensembles est parfois en contact stratigraphique ou en contact anormal par failles (Moret 1930 et Proust 1962).

Dans l'ensemble, la lithologie du bassin du Ghdat 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, 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.

- Dans le haut du bassin, les terrains sont très peu perméables : formations métamorphiques ou éruptives imperméables (Primaire et Précambrien).
- Dans la partie aval, les formations calcaires perméables forment les principaux affleurements. (Crétacé, Eocène, Jurassique Primaire).

Tableau 1 : représentation des pourcentages de la nature des sols d'après (ABHT 2007).

Sols perméables	Sols semi-perméables	Sols imperméables
14%	56%	30%

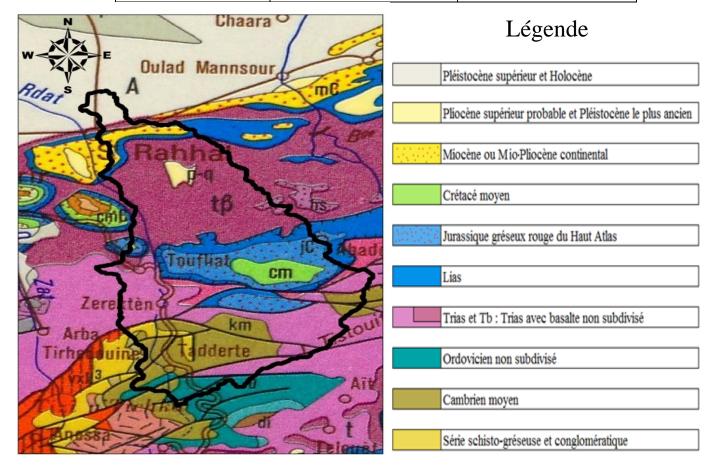


Figure 2: Carte géologique du bassin versant de l'oued Ghdat (Extraite de la carte géologique du Maroc).

Sur le plan lithologique le bassin versant du Ghdat offre deux grands aspects de faciès :

La partie amont, située à des altitudes supérieures à 2000m, est composée de faciès mésozoïques notamment des schistes et des quartzites.

La partie septentrionale, située à des altitudes inférieures à 2000 m, est constituée de dépôts permo-triasiques tendres notamment des grés, des argiles, et des conglomérats. Les formations du cénozoïque et quaternaire se distribuent aux alentours du piémont nord du Haut Atlas.

Elles sont formées de dépôts continentaux et d'autres marins tels que les marnes et les calcaires.

L'aspect morphologique du bassin versant du Ghdat dépend non seulement des évènements tectoniques, mais aussi de la nature lithologique hétérogène (roches magmatiques, sédimentaires et métamorphiques)

- le granite : c'est le matériel le plus ancien, ces affleurements sont visibles sur la partie sud du bassin de Ghdat, ces granites sont lardés par des filons de quartz.
- les laves anciennes : représentent des roches résistantes et sombres, elles ont donné aux hauts massifs un aspect imposant et austère portant les sommets les plus hauts et les pentes les plus fortes.

Ces laves sont des andésites variées, verdâtres à l'état normal, grisâtre ou rouge sombres quand elles sont altérées et des rhyolites brunes sombres dont la couleur varie en fonction de l'altération (brun clair). Ces laves s'organisent en bancs et sont souvent accompagnés de tufs. Nous les trouvons essentiellement dans le massif de l'Ouanoukrim et du Tazaghat.

Les géologues se sont longuement interrogés sur leur âge mais il n'a pas été certifié qu'elles appartiennent au cambrien.

- Les schistes : la plus grande partie du bassin versant est dominée par la série schisteuse. Elle donne des formes et des couleurs monotones qui contrastent avec celles des laves, plus vigoureuses. Elle date du cambrien moyen, du cambroordovicien, de l'ordovicien, de gothlandain le dévonien et de carbonifère. Les schistes du bassin versant sont dans l'ensemble résistants quoique de façon inégale, face aux agents érosifs.
- La formation permo-triasique : elle est constituée d'une part par des basaltes altérés, sombres ou verdâtres, et d'autre part, par un complexe rouge, grés marnes ou argiles salifères. Les grés sont plus ou moins cohérents, plus ou moins fins ou grossiers et présentent parfois une stratification d'une épaisseur considérable. Cette mosaïque lithologique multicolore est à l'origine de l'hétérogénéité des dépôts quaternaires constituant avec les affleurements marnogréseux de l'Oligo-Miocène et pliocène le piémont de l'atlas.

Cet amalgame de roches nous apporte, ainsi, de grandes informations hydrologiques : d'une part, l'existence d'un substratum fracturé, diaclase capable de retenir des nappes d'eau, d'autre part, l'hétérogénéité lithologique contribuant à la détermination de l'aspect du réseau hydrographique.

D'après ces données on constate que presque la totalité du bassin est constituée de faciès qui sont généralement perméables (Darif 2013).

Tableau 2: Pourcentages des surfaces du bassin Ghdat en fonction des taux d'infiltration

Taux	Taux	Taux	Taux	Taux	Taux
d'infiltration [0%- 5%]	d'infiltration [6%- 20%]	d'infiltration [21%- 35%]	d'infiltration [36%- 50%]	d'infiltration [51%- 65%]	d'infiltration [66%- 82%]
24.25 %	26.45 %	44.51%	0.51%	1.05 %	3.24

#### - Bassin versant de Zat

Le bassin est constitué d'une série sédimentaire bien conservée dans les deux tiers nord du bassin.

Elle se compose des schistes à Paradoxides du Cambrien, de l'Acadien et de l'Ordovicien dont les faciès sont à dominante schisteuse, du Tournaisien supérieur au Viséen avec des faciès à dominante calcaire, des grès et argiles du Permo-trias, des formations marno-calcaire du Cénomanien et du Sénonien ainsi que des formations de plaine IV et III (figure 3).

Les roches magmatiques sont localisées au sud du bassin et sont du Précambrien terminal, et dans la partie nord sont formé d'une fine bande de dolérites et du Trias. Les roches les plus anciennes sont du Précambrien intermédiaire. Ces roches sont des schistes métamorphisés.

Les failles sont de direction Nord-Est-Sud-Ouest.

Le bassin est constitué d'un socle rigide paléozoïque et précambrien où apparaît des terrains de couvertures secondaires et tertiaires qui se développent vers le Nord-Est (Haddani 2012).

Tableau 3: représentation des pourcentages de la nature des sols d'après (ABHT 2007).

Sol perméable	Sol semi-perméable	Sol imperméable
14%	40%	46%

La chaîne atlasique montre alors 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 (Rapport ABHT. Atlas des zones inondables).

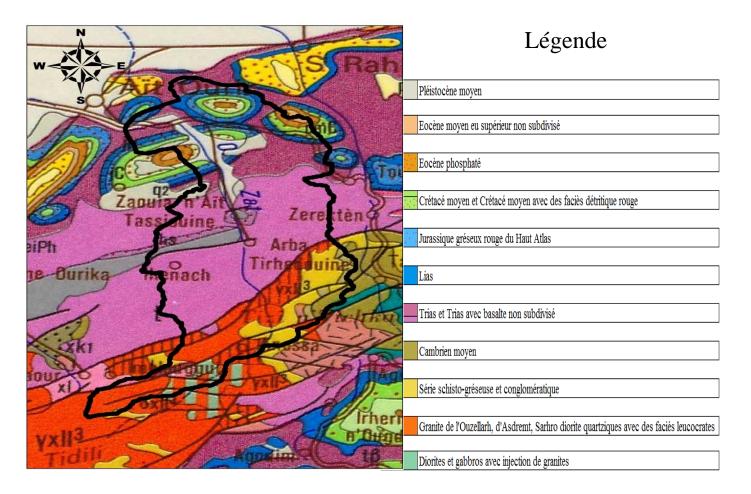


Figure 3 : carte géologique du bassin versant de l'oued Zat (Extraite de la carte géologique du Maroc).

Dans l'ensemble, la lithologie du bassin du Zat est constituée de 46 % de terrains imperméables, à 40 % de terrains semi perméables et 14 % de terrains perméables (Pascon 1977). Par conséquent, ces formations géologiques favorisent un écoulement superficiel remarquable et éventuellement le développement d'importantes crues en cas de pluies conséquentes.

Tableau 4 : Représentation des pourcentages des surfaces du bassin Zat en fonction des taux d'infiltration. ( Juillerat, 2004).

Taux	Taux	Taux	Taux	Taux	Taux
d'infiltration	d'infiltration	d'infiltration	d'infiltration	d'infiltration	d'infiltration
[0%-5%]	[6%-20%]	[21%- 35%]	[36%- 50%]	[51%- 65%]	[66%- 82%]
34.52%	45.7%	5.44%	6.62%	5.68 %	2.04

#### II.3. Ressources en eau

De façon générale on distingue deux types d'aquifères. Un aquifère formé par les eaux superficielles et un autre par les eaux souterraines.

#### - Les eaux superficielles

Les ressources en eau de surface sont très irrégulières et inégalement réparties.

Le Haut Atlas constitue le château d'eau des écoulements de surface, puisque les oueds les plus importants y prennent naissance, alors que la plaine est une zone de transition et d'utilisation de l'eau. Les ruissellements à caractère torrentiel, qui se produisent suite aux orages ou aux précipitations intenses, sont collectés par le réseau hydrographique du Tensift qui les évacue vers l'Océan.

La région étudiée appartient à la première zone du cours amont de l'oued Tensift, dont les affluents de sa rive gauche qui constituent la partie hydrologique la plus active du bassin.

Ainsi, les apports moyens annuels en eau de surface disponible au niveau des bassins Ghdat et Zat sont respectivement : 77.2Mm<sup>3</sup>,113 Mm<sup>3</sup>.

#### - Les eaux souterraines

En ce qui concerne les ressources en eaux souterraines, les réservoirs dans lesquels s'accumulent ou transitent les eaux pluviales infiltrées sont, eux aussi, d'inégale importance et leur répartition géographique dans la région est quasi analogue à celle des eaux de surface.

Concernant les bassins Ghdat et Zat, nous remarquons d'après la figure ci-dessous ils appartiennent aux zones montagneuses du haut atlas, sauf que toutes leurs eaux s'écoulent pour alimenter la nappe du Haouz-Mejjate.

#### - La nappe phréatique du Haouz-Mejjate

La nappe du Haouz-Mejjate et sa bordure occidentale est limitée par la chaîne atlasique au Sud et les chaînons des Jbilet au Nord. Elle s'étend d'Est en Ouest entre les reliefs des Jbilet et l'Oued Chichaoua sur une superficie de 6.000 km² avec une largeur moyenne de 40 km.

Les écoulements souterrains s'établissent dans les alluvions plio-quaternaires et les formations du Néogène dont la puissance globale varie entre 50 et 80 m peut atteindre localement 120 m.

La surface libre de la nappe s'établit en moyenne à 30 m sous le niveau du sol et varie de 10à plus de 80m le long du piémont de l'Atlas.

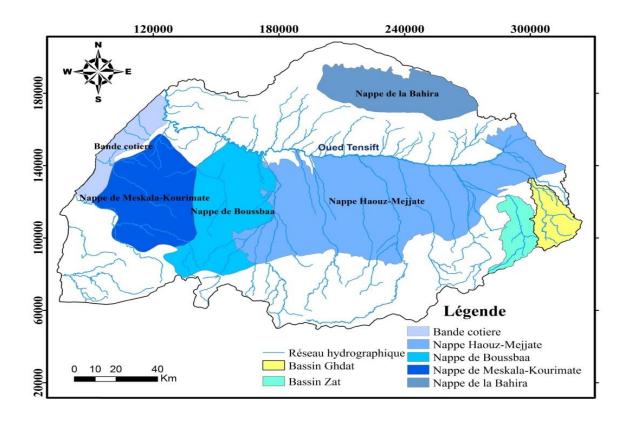


Figure 4 : Répartition des nappes du bassin Tensift El Haouz d'après les données de l'ABHT.

#### III. Caractéristiques géométriques des bassins Ghdat et Zat

Toute approche du milieu naturel doit s'aborder pour fournir des indications chiffrées permettant de caractériser le milieu étudié.

Ces informations essentiellement descriptives, nous sont indispensables pour la compréhension du fonctionnement des bassins versants Ghdat, Zat.

#### III.1. Surface

Les bassins versant Ghdat, et Zat étant les aires de réception des précipitations et d'alimentation des cours d'eau, les débits vont être en partie reliés à sa surface.

La surface du bassin versant, est exprimée en km², a été calculée à partir d'un modèle numérique du terrain (MNT) de 30m de résolution et à l'aide du logiciel de SIG.

Tableau 5 : Présentation des surfaces des bassins versant.

Bassins	Surfaces
Ghdat	541,35 Km <sup>2</sup>
Zat	533 Km <sup>2</sup>

#### III.2. Périmètre

Les périmètres des bassins versant représentent toutes les irrégularités des contours ou les limites des bassins versant exprimée en km.

Les bordures des bassins sont constituées par une ligne rejoignant tous les points les plus élevés d'une région donnée, les périmètres ont été calculés à l'aide du logiciel de SIG.

Tableau 6 : Présentation des surfaces des bassins versant.

Bassins	Périmètres
Ghdat	142,23 Km
Zat	148 Km

#### III.3. Indice de compacité

L'indice de compacité ou de Gravelius (Kg) donné par l'équation ci-dessous renseigne sur la forme du bassin versant qui a une influence primordiale sur les écoulements globaux du cours d'eau et surtout sur l'allure des hydrogrammes à l'exutoire des bassins résultant d'une pluie donnée. (ROCHE, 1963).

$$Kg = \frac{P}{\sqrt{\pi * A}} = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Avec

Kg: l'indice de compacité de Gravelius ;

A: surface du bassin versant (km<sup>2</sup>);

P: périmètre du bassin km.

Tableau 7 : résultats des indices de compacité des Bassins versant du Ghdat et du Zat.

Bassins	Kg
Ghdat	1,7
Zat	1,8

Les deux bassins ont une forme allongée, Vu que leurs Kg sont de 1.7 pour le bassin Ghdat et 1.8 pour le bassin Zat.

Ainsi on peut dire que le bassin Ghdat est sept fois plus long que large, et le bassin Zat à son tour est huit fois plus long que large.

#### III.4. Rectangle équivalent

Les rectangles équivalent des bassins versant ou rectangles de Gravelius, Servent à comparer des bassins versants entre eux du point de vue de l'influence de leurs caractéristiques sur l'écoulement, données par les longueurs et les largeurs des rectangles des superficies équivalentes aux deux bassins versant.

Ils sont calculés par les équations suivantes :

$$1+\sqrt{1-\left(\frac{1.12}{\mathrm{Kg}}\right)^2}$$

$$1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{\text{Kg}}\right)^2}$$

Avec

Kg: indice de Gravelius;

A : surface du bassin versant en km<sup>2</sup>.

Tableau 8 : résultats des longueurs des rectangles équivalents préalablement calculé en fonction des formules ci-dessus pour les deux bassins versant.

	Ghdat	Zat
L	62	66
l	9	8

- Bassin versant Ghdat



Figure 5 : visualisation des rectangles équivalents du bassin Ghdat.

- Bassin versant Zat



Figure 6 : visualisation des rectangles équivalents du bassin Zat.

#### III.5. Courbes hypsométriques

- Bassin versant Ghdat

La répartition altimétrique du bassin versant s'échelonne dans une fourchette comprise entre 3553m en amont et 693m dans sa partie aval, son altitude moyenne est de l'ordre de 2644m.

- Carte hypsométrique.

La carte hypsométrique présente une succession des zones de hautes altitudes et des étendues planes peu élevées.

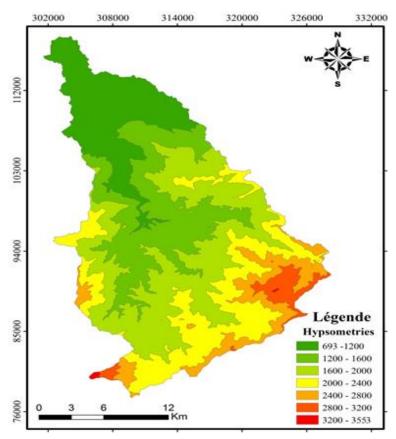
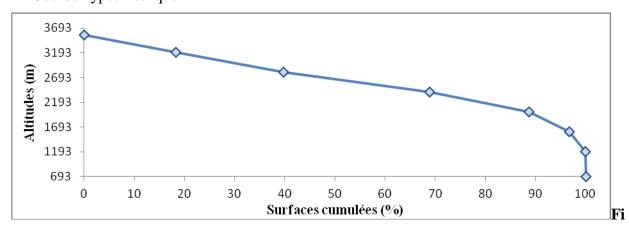


Figure 7 : Carte hypsométrique du bassin Ghdat.

#### - Courbe hypsométrique



gure 8 : Courbe hypsométrique du bassin Ghdat.

La courbe hypsométrique montre un relief important avec une pente raide dans la zone où l'altitude dépasse les deux milles mètres on remarque par ailleurs une importante fréquence de la tranche d'altitude comprise entre 693 et 2000m.

- Répartition des tranches d'altitude en fonction des surfaces du bassin Ghdat.

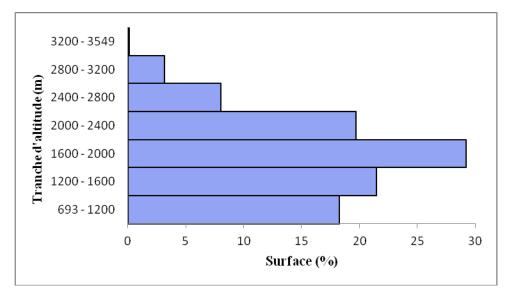


Figure 9: Tranches d'altitude en fonction de la surface.

La répartition des tranches d'altitude en fonction de la surface est illustré dans la (figure 9).

Deux tranches d'altitudes importantes apparaissent sur le graphique ci-dessus.

Les tranches d'altitude faibles qui sont inférieure à 2491m représentent, 24.36% de la superficie totale du bassin.

Les tranches d'altitudes fortes supérieures à 2791 m présentent 75.64 % de la superficie totale.

Ce bassin versant est donc soumis à des conditions de basse et de moyenne montagne et, par conséquent, peu impliqué par les précipitations neigeuses en hiver.

#### - Bassin versant Zat

La distribution des altitudes du bassin Zat s'étend sur un intervalle compris entre 3911m en amont et 758m en aval, son altitude moyenne est de l'ordre de 2561,24m.

- Carte hypsométrique.

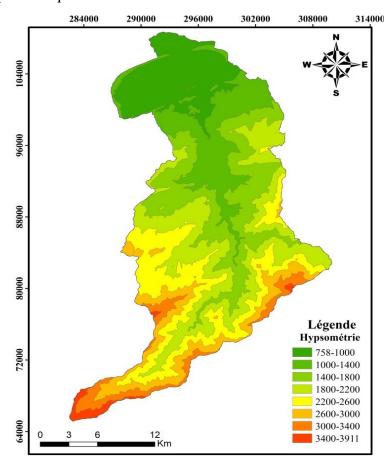


Figure 10 : Carte hypsométrique du bassin Zat.

- Courbe hypsométrique

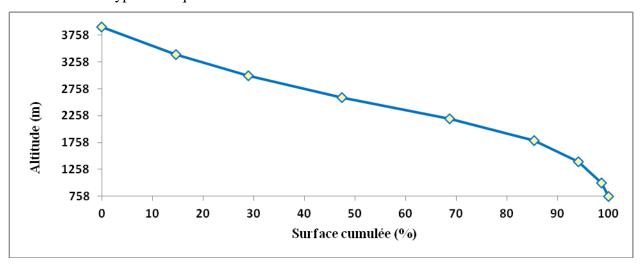


Figure 11 : Courbe hypsométrique du bassin Zat.

La courbe hypsométrique montre un relief important avec une pente raide dans la zone où l'altitude dépasse les deux milles mètres on remarque par ailleurs une importante fréquence de la tranche d'altitude comprise entre 758 et 2200.

- Répartition des tranches d'altitude en fonction des surfaces du bassin Zat

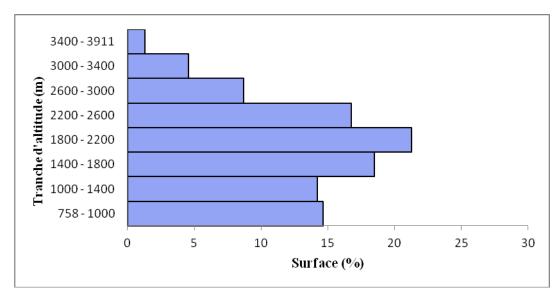


Figure 12: Tranches d'altitude en fonction de la surface

La répartition des tranches d'altitude en fonction de la surface est illustrée dans la (figure 12).

Trois tranches d'altitudes importantes apparaissent sur le graphique ci-dessus.

Les tranches d'altitude faibles qui sont inférieure à 1800m représentent, 14,60% de la superficie totale du bassin.

Les tranches d'altitudes moyennes entre 2200et 3000m présentent 56.5% de la superficie totale qui indique la surface la plus étendu.

Les tranches d'altitudes fortes qui sont supérieures à 3400 m présentent 28.9% de la superficie totale.

Ce bassin versant est donc soumis à des conditions de basse et de moyenne montagne et, par conséquent, peu impliqué par les précipitations neigeuses en hiver.

#### III.6. Altitudes caractéristiques

Les altitudes présentes sur un bassin versant, nous renseignent sur la morphologie de ce bassin. L'altitude joue un rôle non négligeable sur l'intensité et sur la nature des précipitations ayant par conséquent un lien avec le débit à l'exutoire du bassin.

#### - Altitudes maximales et minimales

Elles sont obtenues directement à partir des modèles numériques du terrain. L'altitude maximale représente le point le plus élevé du bassin tandis que l'altitude minimale considère le point le plus bas, généralement à l'exutoire.

Tableau 9 : Représentation des altitudes Maximales et minimales des bassins versants du Ghdat et du Zat.

Bassins	Altitude Max (m)	Altitude Min (m)
Ghdat	3552,9	693
Zat	3911	758

#### - Altitude moyenne

L'altitude moyenne se déduit directement de la courbe hypsométrique

On peut la définir comme suit :

$$Hmoy = \sum \Box \frac{Ai * hi}{A}$$

Avec

Hmoy: altitude moyenne du bassin (m);

Ai : aire comprise entre deux courbes de niveau (Km²);

hi : altitude moyenne entre deux courbes de niveau (m) ;

A: superficie totale du bassin versant (Km²).

Tableau 10 : Représentation des altitudes moyennes des bassins versants Ghdat et Zat.

Bassins	Altitudes moyennes (m)
Ghdat	2644,05
Zat	2561,24

#### - Altitude médiane

L'altitude médiane correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 50% de la surface totale du bassin, sur la courbe hypsométrique.

Cette grandeur se rapproche de l'altitude moyenne, dans le cas où la courbe hypsométrique du bassin concerné présente une pente régulière.

Tableau 11 : Représentation des altitudes médianes des bassins versants Ghdat et Zat.

Bassins	Altitudes médianes (m)
Ghdat	2693
Zat	2558

#### IV. Caractéristiques topographiques

#### IV.1. Relief

C'est une caractéristique importante qui renseigne sur la topographie du bassin versant. La pente des cours d'eau détermine la vitesse avec laquelle l'eau se rend à l'exutoire du bassin et donc le temps de concentration.

Elle influence sur l'état d'écoulement du cours d'eau au niveau du bassin versant.

En effet, la pente peut se traduire par l'infiltration de l'eau (pour des pentes faibles) ou au contraire un ruissellement de nature torrentielle (pour des pentes fortes) suivant la lithologie des roches rencontrées (Juillerat, 2004).

#### - Bassin versant Ghdat

Les pentes de ce bassin sont comprises entre 0° et 61°, les pentes moyennes sont de 19,8°. Les pentes faibles à nulles sont de 0° à 8° correspondent, pratiquement au réseau hydrographique du bassin. Ceci implique que ce réseau est creusé dans d'étroites vallées où l'érosion est importante à la limite du bassin.

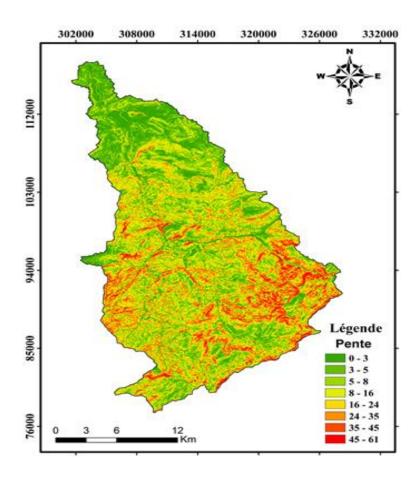


Figure 13 : Répartition des pentes du bassin versant Ghdat.

#### - Bassin versant Zat

La pente maximale est de 65°, la pente minimale de 0°, et la pente moyenne de 21.52°. Nous pouvons voir que les pentes maximales se situent dans la moitié Sud du bassin Zat.

Le réseau hydrographique est donc plus gravé à cet endroit, traduisant une forte érosion. Les pentes les plus faibles variant de 0° à 16° sont localisées le long du réseau hydrographique dans les parties Sud centrales et le Nord du bassin.

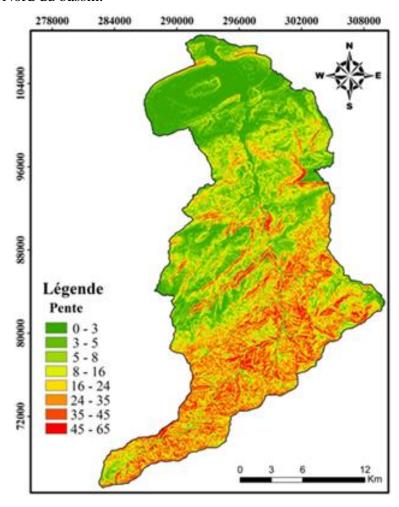


Figure 14 : Répartition des pentes à l'échelle du bassin versant de l'oued Zat.

#### IV.2. Pente moyenne

La pente moyenne donne une bonne indication sur le temps de parcours du ruissellement direct donc sur le temps de concentration et s'influence directement sur le débit de pointe lors d'une averse.

Tableau 12 : Pentes moyennes des bassins Ghdat et Zat.

Bassins	Pente moyenne %	Pente moyenne m/m
Ghdat	36	0.36
Zat	39	0.39

#### IV.3. Temps de concentration

Le temps de concentration Tc (heures) reflète le temps nécessaire à l'eau pour s'écouler depuis le point le plus éloigné du bassin jusqu'au point de calcul. Ce paramètre est déterminé par les formules empiriques qui sont présentées ci-après (ALKHIBRA, 2010).

#### **Giandotti**

$$Tc = \frac{4\sqrt{S} + 1.5L}{0.8\sqrt{(Hmoy - Hmin)}}$$

Avec

S: Superficie du bassin (Km²);

L: Longueur du thalweg principal (Km);

Hmoy: Altitude moyenne (m);

Hmin: Altitude minimale (m).

#### **Ventura**

$$Tc = 0.13 * \left( \sqrt{\frac{S}{I}} \right)$$

Avec

S: Superficie du bassin (Km²);

I : Pente en (m/m).

#### **Kirpich**

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

Avec

L: Longueur du thalweg principal (m);

I : Pente en (m/m).

#### **Formule Californienne**

$$Tc = 60 * 0.1452 * \left(\frac{L}{I^{0.5}}\right)^{0.77}$$

Avec

L: Longueur du thalweg principal (Km);

I: Pente en (m/m).

#### Formule de US Corps

$$Tc = 16.682 * \left(\frac{L}{I^{0.25}}\right)^{0.77}$$

L: Longueur du thalweg principal (Km);

I : Pente en (m/m).

Les temps de concentration retenu pour le bassin est la moyenne des temps de concentration calculés par les formules empiriques.

Tableau 13 : Temps de concentration calculé par différentes formules

	Giandotti	Ventura	Kirpich	Californienne	US Corps	Moyennes des Tc
Tc Ghdat	5,00	4,93	2,15	4,76	7,50	5,06
(Heures)	3,00	1,75	2,13	1,70	7,50	3,00
Tc Zat (Heures)	5,43	4,70	2,24	4,97	7,95	4,87

#### IV.4. Vitesse moyenne de ruissellement

$$\mathbf{Vr} = \frac{L}{Tc}$$

L: Longueur du thalweg principal (Km);

Tc: Temps de concentration (h).

Tableau 14 : Vitesse de ruissellement

Bassins	Vitesse de ruissellement
Ghdat	12,61 Km/h
Zat	13,36 Km/h

#### IV.5. Coefficient de ruissellement moyen interannuelle

Pour caractériser la capacité d'un bassin versant à ruisseler un indice est très souvent utilisé en hydrologie de surface : le coefficient de ruissellement (Cr).

Ce coefficient est défini comme suit :

$$\mathbf{Cr} = \frac{H}{Pt}$$

H: Lame d'eau moyenne annuelle écoulé (mm);

Pt: Précipitation moyenne annuelle (mm).

- Le Coefficient de ruissellement au niveau du bassin Ghdat à la station Sidi Rahal est de 0,3.

- Concernant le bassin Zat nous n'avons pas pu trouver un coefficient de ruissellement conforme à ce bassin vue que les débits au niveau de la station Taferiat sont surestimés.

#### V. Caractéristiques du réseau hydrographique

#### V.1. Réseau hydrographique des bassins du Ghdat et du Zat.

#### - Oued Ghdat

L'oued Ghdat draine un bassin versant d'une superficie de 541,32 km<sup>2</sup> au niveau de la station d'observation de Sidi Rahal. Le bassin versant de l'oued Ghdat est compris entre les isohyètes 400 et 700 mm. La pluviométrie moyenne à l'exutoire de Sidi rahal est de 27.1mm.

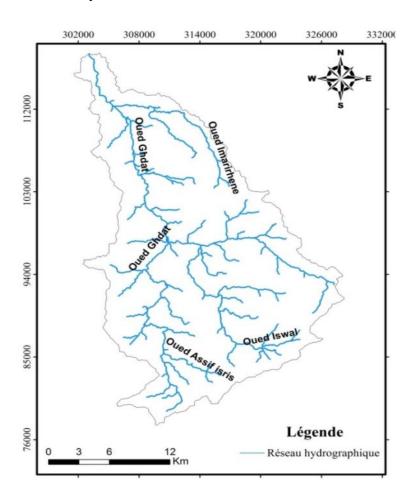


Figure 15 : Réseau hydrographique du bassin Ghdat.

#### - Oued Zat

L'oued Zat draine un bassin versant d'une superficie de 533 km² à la station d'observation hydrologique de Taferiat. IL forme avec l'oued Ourika les 2 bras principaux de l'oued Hadjar. L'oued Zat prend naissance à 3911 m d'altitude, Il se classe ainsi comme l'oued le moins pentu des oueds atlasiques.

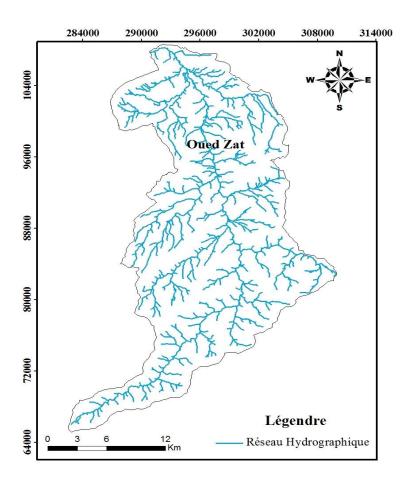


Figure 16 : Réseau hydrographique du bassin Zat.

#### V.2. Classifications des thalwegs

La mise en place du réseau hydrographique et son aspect actuel ont été disposés par les effets orogéniques qui ont imposé au cours d'eau à s'encaisser, à percer les anticlinaux ou à couler sur les synclinaux de même qu'il dépend de la nature lithologique : Dans la première phase, le réseau s'est enfoncé dans les lignes de failles, érodant les secteurs broyés.

#### - Oued Ghdat

La figure 17 représente cette hiérarchie en classant les ordres des affluents selon la méthode de SHUMM- STRAHLER. Le nombre affecté au cours principal de Oued Ghdat au niveau de son exutoire Sidi rahal est de l'ordre de 4 et désigne donc le nombre maximal d'embranchements de tous ordres c'est une indication sur l'importance du cours principal.

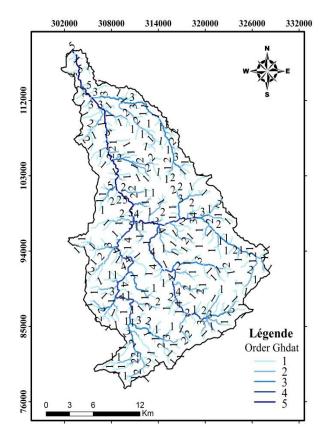


Figure 17 : Carte du réseau hydrographique classifié du bassin versant Ghdat.

#### - Oued Zat

La figure 18 représente cette hiérarchie en classant les ordres des affluents selon la méthode de SHUMM- STRAHLER. L'ordre d'Oued Zat au niveau de son exutoire Taferiat est de 5 et désigne donc le nombre maximal d'embranchements de tous ordres.

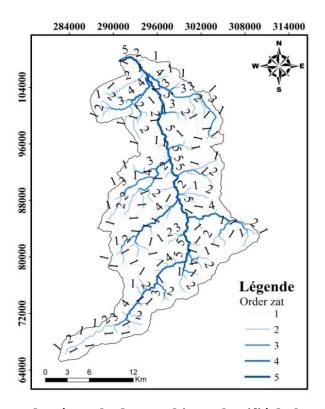


Figure 18 : Carte du réseau hydrographique classifié du bassin versant Zat.

## V.3. Pente moyenne des cours d'eau

La pente moyenne d'un cour d'eau détermine la vitesse avec laquelle l'eau se rend à l'exutoire du bassin donc le temps de concentration. Cette variable influence le débit maximal observé. Une pente abrupte favorise et accélère l'écoulement superficiel, tandis qu'une pente douce ou nulle donne à l'eau le temps de s'infiltrer, entièrement ou en partie, dans le sol.

Le calcul des pentes moyennes et partielles du cours d'eau s'effectue à partir du profil longitudinal du cours d'eau principal et de ses affluents. La méthode la plus fréquemment utilisée pour calculer la pente longitudinale du cours d'eau consiste à diviser la différence d'altitude entre les points extrêmes du profil par la longueur totale du cours d'eau.

$$P moy = \frac{DH max}{L}$$

Avec

P moy: Pente moyenne du cours d'eau (m/m);

D Hmax : Dénivellation maximale de la rivière (m) (différence d'altitude entre le point le plus éloigné et l'exutoire) ;

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

Tableau 15 : Présentation de la pente moyenne du cours d'eau des oueds Ghdat et Zat.

	Alt max (m)	Alt min (m)	Long du CP (Km)	P moy (m/m)
Oued Ghdat	3552,9	693	55860	0,0512
Oued Zat	3911	758	61470	0,0513

# V.4. Densités de drainage.

La densité de drainage, introduite par Horton, est la longueur totale du réseau hydrographique par unité de surface du bassin versant autrement dit c'est le rapport de la longueur des canaux d'écoulement à la superficie du bassin.

$$Dd = \frac{\Sigma L}{A}$$

Avec

Dd: densité de drainage (km<sup>-1</sup>);

Li: longueur des cours d'eau (km);

A: surface du bassin versant (km<sup>2</sup>).

La densité de drainage dépend de la géologie (structure et lithologie) des caractéristiques topographiques du bassin versant et, dans une certaine mesure, des conditions climatologiques et anthropiques.

Selon Schumm, la valeur inverse de la densité de drainage, **C=1/Dd**, s'appelle « constante de stabilité du cours d'eau ». Physiquement, elle représente la surface du bassin nécessaire pour maintenir des conditions hydrologiques stables dans un vecteur hydrographique unitaire.

Tableau 16 : Présentation des résultats de la densité de drainage et de la constante de stabilité des deux bassins versant.

	Long des cours d'eau (Km)	Surface (Km <sup>2</sup> )	<b>Dd</b> (km <sup>-1</sup> )	Constante de stabilité
Oued Ghdat	1365.2	541,32	2.52	0.39
Oued Zat	1660.9	533	3.12	0.32

La densité de drainage au niveau d'oued Ghdat est égale à 2.52 km<sup>-1</sup>, et pour Oued Zat elle est égale à 3.12 km<sup>-1</sup>.

#### Conclusion

Grâce au tableau ci-dessous et à l'étude établie tout au long de ce chapitre, nous pouvons constater que les deux bassins versants en la plus part des caractéristiques similaire.

Les bassins versants du Ghdat et du Zat sont caractérisés par des bas altitudes par rapport aux altitudes des autres bassins du Haouz.

Tableau 17 : Tableau récapitulatif des caractéristiques physiographiques des bassins versants.

Bassins	Surface	Périmètre	Altitude max	Altitude moy	Altitude min	Pente
versants	(Km <sup>2</sup> )	(Km)	( <b>m</b> )	(m)	( <b>m</b> )	moy (%)
<b>Bassin Ghdat</b>	541,35	142,23	3553	2644	693	36
Bassin Zat	533	148	3911	2561,24	758	39
	Indice de	Long rectangle	Larg rectangle	Long du CP	Long totale des	Dd
	compacité	équivalent	équivalent		cours d'eau	
	Kg	(Km)	(Km)	(Km)	(Km)	(Km <sup>-1</sup> )
<b>Bassin Ghdat</b>	1,7	9	62	55860	1365.2	2.52
Bassin Zat	1,8	8	66	61470	1660.9	3.12

Chapitre II : Analyse des régimes pluviométriques et hydrologiques

# I. Variations des précipitations et des débits à différentes échelles de temps

Les données hydro-pluviométriques nous ont été fournies par l'ABHT. Nous avons à notre disposition, les données de deux stations hydrologiques en amont du bassin Sidi Rahal qui sont Adrar et Tijdant, ainsi que deux autres stations Sidi Rahal et Taferiat localisées respectivement aux exutoires des bassins versants du Ghdat et du Zat.

Pour l'analyse de ces données hydro-pluviométriques, il a été choisi de travailler à différents pas de temps pour établir des comparaisons à l'échelle mensuelle, saisonnière et annuelle des précipitations et des débits aux stations étudiées. Cette analyse à différents pas de temps permet de mieux comprendre les mécanismes régissant les précipitations et les débits à l'exutoire de chaque bassin versant.

Dans un premier lieu nous avons procédée par un traitement préalable des données pour les deux bassins, avant de commencer à établir les graphes et a les interpréter.

# I.1. Variations des précipitations et des débits en amont du bassin versant Ghdat

Les Stations Adrar et Tijdant sont situées à l'amont du bassin versant Ghdat.

L'ABHT nous a fourni uniquement des pluies instantanées à pas de temps de 10min de ces stations vue qu'elles sont dotées que d'un pluviomètre, la période sur laquelle nous avons travaillé est de 4 ans allant de (2012-13) à (2015-16).

# I.1.1. Analyse des données pluviométriques au niveau de la station d'Adrar et de Tijdanct

- Précipitations moyenne mensuelles interannuelles

Elles ont été obtenues par le calcul des moyennes arithmétiques des précipitations moyennes mensuelles interannuelles de toute la série d'années.

#### - Station Adrar

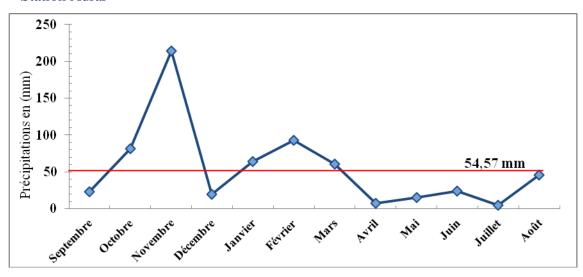


Figure 19 : Précipitations mensuelles interannuelles à la station Adrar de 2012/13 à 2015/16.

La moyenne des précipitations mensuelles interannuelle est de l'ordre 54.57mm.

Les mois au-dessus de la moyenne sont les mois d'Octobre, Novembre, Janvier, Février, et Mars. Alors que les mois au-dessous de la moyenne sont les mois d'Avril, Mai, Juin, Juillet, Aout, Septembre et Décembre.

Le mois de Novembre reçoit le maximum des précipitations c'est le mois le plus pluvieux de l'année avec une valeur de l'ordre de 214.3mm, tandis que le minimum est enregistré au niveau du mois de juillet avec une hauteur de pluie de l'ordre de 4.7 mm.

## - Station Tijdant

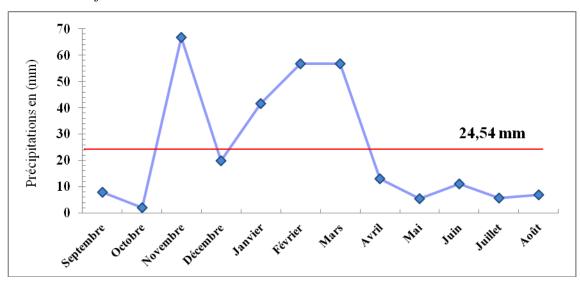


Figure 20: Précipitations mensuelles interannuelles à la station Tijdant de 2012/13 à 2015/16.

Au niveau de la station Tijdant la valeur moyenne des précipitations mensuelles interannuelle est de l'ordre 24.54mm.

Les mois en haut de la barre de la moyenne sont les mois de Novembre, Janvier, Février, et Mars. Alors que les mois au-dessous cette barre sont les mois d'Avril, Mai, Juin, Juillet, et Aout, Septembre, Octobre, et Décembre.

Le mois de Novembre reçoit principalement le maximum de précipitations c'est le mois le plus arrosée de l'année avec une valeur maximale de l'ordre de 66.85mm, tandis que le minimum est enregistré au niveau du mois d'Octobre, avec 2.05 mm. Il est dit le mois le plus aride de l'année.

 Variation des précipitations mensuelles interannuelles comparative entre la station Adrar et Tijdant.

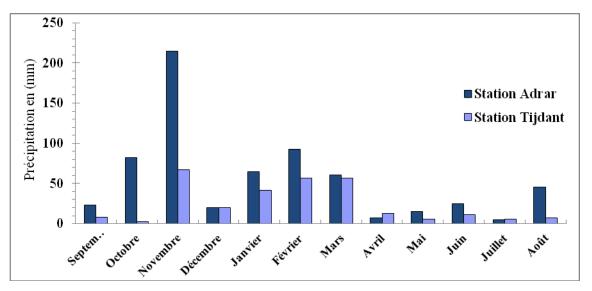


Figure 21: Variation des précipitations mensuelles interannuelles comparative des deux stations de 2012/13 à 2015/16.

La représentation graphique des variations mensuelles interannuelles des précipitations, durant la période 2012/13 - 2015/2016, montre que les histogrammes de la figure 21 présentent une allure générale presque similaire, les plus fortes valeurs sont enregistrées au niveau de la station Adrar.

- Variations moyennes saisonnières des précipitations

Les précipitations saisonnières ont été calculées à partir des données mensuelles.

- \* Les précipitations d'automne sont la somme des moyennes des mois de septembre, octobre et novembre.
- \* Les précipitations en hiver sont la somme des moyennes des précipitations des mois de décembre, janvier et février.
- \* Les précipitations du printemps sont la somme des moyennes des précipitations des mois de mars, avril et mai.
- \* Les précipitations d'été sont la somme des moyennes des précipitations des mois de juin, juillet et août.

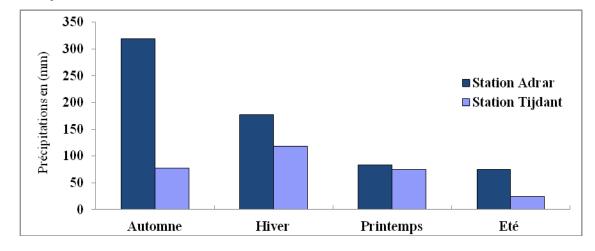


Figure 22 : Variation saisonnière comparative des précipitations aux deux stations de 2012/13 à 2015/16.

La figure 22 montre la répartition saisonnière des précipitations aux deux stations. Nous pouvons constater que les précipitations sont les plus abondantes en automne pour les stations Adrar et en hiver pour la station Tijdant.

D'après la figure ci-dessus la station Adrar reçois le maximum de précipitation pendant l'autonome, suivit de l'hiver, puis le printemps, et finalement l'été qui est la saison la plus sèche de l'année.

Tandis que pour la station Tijdant l'hiver est la saison la plus pluvieuse, suivie du printemps, et de l'autonome, alors que la saison d'été représente la saison la plus asséchée de toute l'année.

- Variations annuelles des précipitations.

Les précipitations annuelles ont été obtenues par sommation des moyennes mensuelles de chaque année pour les stations Adrar et Tijdant sur une période allant de 2012/13 à 2015/16.

Les histogrammes des (figures 23 et 24) montrent l'évolution annuelle des précipitations.

En ce qui concerne la station Tijdant, on signale un manque de données pendant l'année 2015/16.

#### - Station Adrar

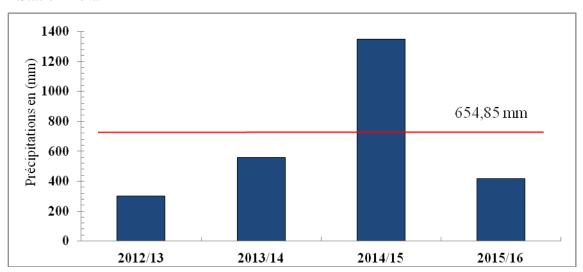


Figure 23: Précipitations annuelles au niveau de la station Adrar de 2012/13 à 2015/16.

La variation des précipitations d'une année à l'autre se fait d'une manière irrégulière La pluviométrie moyenne annuelle de la station Adrar est de 654.85mm. La valeur maximale a été enregistrée en 2014/15 avec une valeur de 1346.8mm, tandis que la valeur minimale a été enregistrée en 2012/13 avec une valeur de l'ordre de 300mm.

# - Station Tijdant

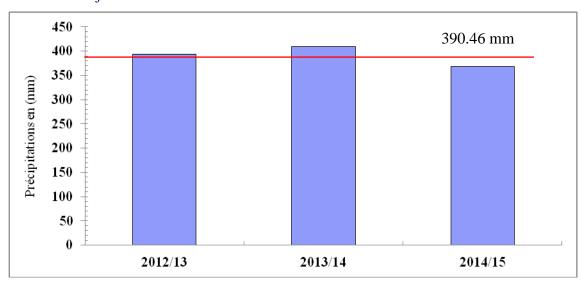


Figure 24 : Précipitations annuelles au niveau de la station Tijdant de 2012/13 à 2015/16.

La variation des précipitations d'une année à l'autre se fait d'une façon régulière. La pluviométrie moyenne de la station Tijdant est de 390.46mm. La valeur maximale a été enregistrée en 2013/14 avec une valeur de 409mm, tandis que la valeur minimale a été enregistrée en 2014/15 avec une valeur de l'ordre de 369mm.

• Variation des précipitations annuelles comparative entre la station Adrar et Tijdant.

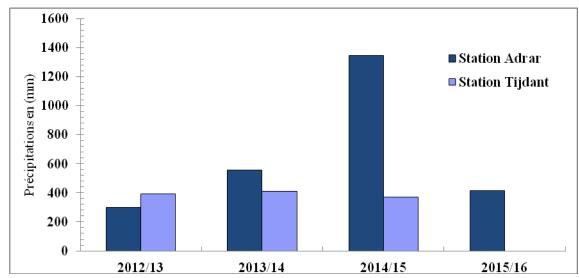


Figure 25 : Précipitations annuelles comparative au niveau des stations Adrar et Tijdant de 2012/13 à 2015/16.

La représentation graphique des précipitations annuelles comparative des deux stations de la (figure 25), s'étale sur une période allant de 2012/13 à 2015/2016.

Les plus fortes valeurs de pluies annuelles sont enregistrées au niveau de la station Adrar, celle-ci a atteint un maximum de 1346.8mm pendant l'année 2014/15 et un minimum de 300mm en 2012/13 elle montre une variation irrégulière durant ces quatre années.

Alors que les valeurs faibles sont enregistrées au niveau de la station Tijdant, qui a enregistré à son tour un maximum de 409mm en 2013/14 et un minimum de 369mm en 2014/15 tout en notant une lacune de donnée au niveau de l'année 2015/16.

# I.2. Variations des précipitations et des débits en aval des bassins Ghdat et Zat

Les Stations Sidi rahal et Taferiat sont situées respectivement en aval des bassins versant du Ghdat et du Zat.

Nous avons travaillé sur les pluies et les débits de ces stations sur une période de 34 ans en allant de 1982/83 à 2015/16.

## I.2.1. Analyse des données pluviométriques au niveau de la station Sidi rahal et Taferiat

- Précipitations moyennes mensuelles interannuelles

Elles ont été obtenues par le calcul des moyennes arithmétiques des précipitations mensuelles interannuelles de toute la série d'années.

#### - Station Sidi rahal

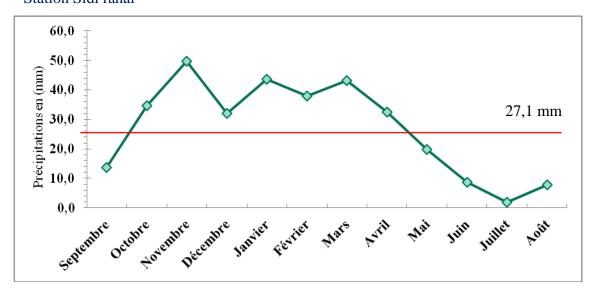


Figure 26 : Précipitations mensuelles interannuelles à la station Sidi rahal de 1982/83 à 2015/16.

Le graphe ci-dessus illustre une augmentation de précipitations continue en allant du mois de Septembre au mois de Novembre, en suite une variation dendritique en hiver jusqu'au debut du printemps, et finalement une diminution brutal pendant l'été, la station de Sidi Rahal a une moyenne mensuelle de précipitations de l'ordre de 27.1 mm.

Les mois en dessus de la moyenne sont les mois: d'Octobre, Novembre, Décembre, Janvier, Février, Mars, et Avril. Tandis que les mois en dessous de la moyenne sont les mois de : Mai, Juin, Juillet, Aout, et Septembre.

Les fortes valeurs sont enregistrées dans une période hivernale entre les mois novembre et Mars avec un maximum de 49.6mm en mois de Novembre, tandis que les faibles valeurs sont enregistrées dans période Estivale entre les mois juin et septembre avec un minimum de 2mm en juillet.

## - Station Taferiat

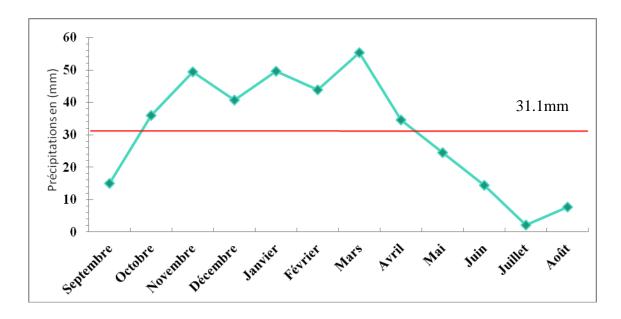


Figure 27 : Précipitations mensuelles interannuelles à la station Taferiat de 1982/83 à 2015/16.

L'analyse des données des précipitations moyennes mensuelles interannuelle de la station Taferiat montre une augmentation de précipitations continue pendant l'automne, suivie d'une variation dendritique de l'hiver au début du printemps, puis une diminution en été.

La station de Taferiat a une moyenne mensuelle de précipitations de l'ordre de 31.1 mm.

Les mois en dessus de la moyenne sont les mois: d'Octobre, Novembre, Décembre, Janvier, Février, Mars, et Avril. Tandis que les mois en dessous de la moyenne sont les mois de : Mai, Juin, Juillet, Aout, et Septembre.

Les fortes valeurs sont enregistrées dans une période hivernale entre les mois novembre et Mars avec un maximum de 55.5mm en mois Mars, quant aux plus faibles valeurs elles sont enregistrées dans période Estivale entre les mois juin et septembre avec un minimum de 2.2mm en juillet.

• Variation des précipitations mensuelles interannuelles comparative entre la station Sidi rahal et Taferiat.

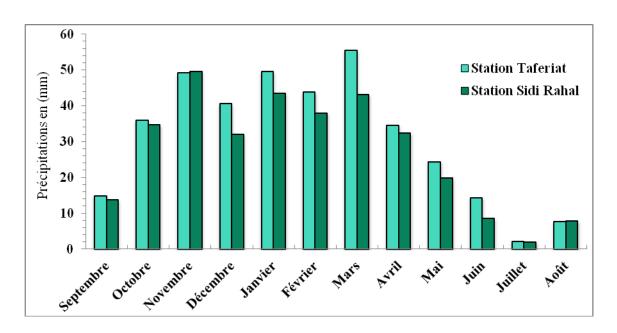


Figure 28 : Variation des précipitations mensuelles interannuelles comparative des stations Sidi rahal et Taferiat de 1982/83 à 2015/16.

Les histogrammes montrent la répartition de la pluie tout au long des mois de l'année, la série analysée est de trente-quatre ans.

Les deux histogrammes de la (figure 28) présente une allure générale à peu près similaire, les plus fortes valeurs sont fréquemment enregistrées au niveau de la station Taferiat.

• Relation pluies débits mensuelle au niveau des bassins versants du Ghdat et du Zat Ce rapport entre les pluies et les débits va nous permettre de déterminer la nature du régime hydrologique ainsi que la probabilité d'existence des neiges dans les deux bassins versants.

#### - Station Sidi rahal

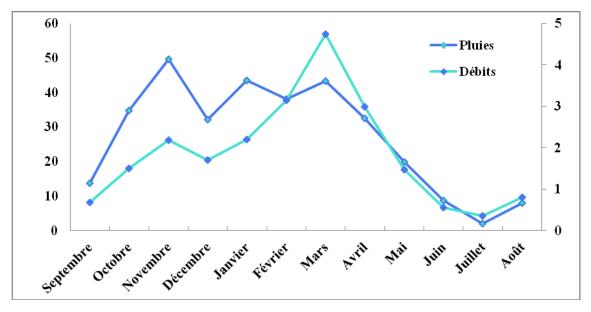


Figure 29 : Dépendance entre les pluies et les débits moyens mensuels a la station Sidi rahal.

La figure ci-dessus représente la relation entre les pluies et les débits moyens mensuels à l'aval du bassin versant du Ghdat.

On remarque que les pluies augments progressivement pendant les mois de Septembre et Octobre simultanément aux débits pour qu'elles atteignent la valeur maximale au mois de Novembre, suivi d'une variation des précipitations, puis une période estivale qui englobe les mois d'été.

Les débits moyens mensuels atteignent leurs maximums en mois de Mars, l'écoulement dans le bassin du Ghdat dépend des précipitations tombées ainsi qu'une légère tranche neigeuse qui se forme au sommet des montagnes pendant l'hiver.

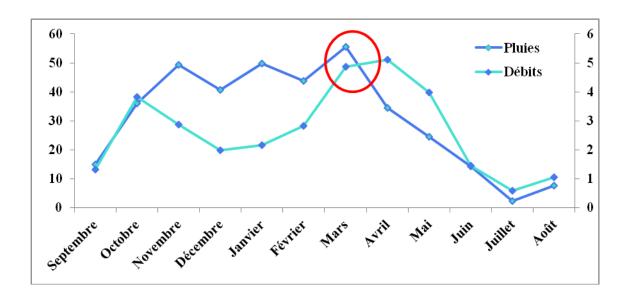


Figure 30 : Rapport pluies et débits moyens mensuels a la station Taferiat.

La figure 30 évoque la relation entre les pluies et les débits moyens mensuels à l'aval du bassin versant du Zat.

Les pluies augmentent progressivement pendant les mois de Septembre et Octobre simultanément aux débits, puis une variation des précipitations accompagnées d'une légère chute de neige au sommet des montagnes de l'Atlas pendant les mois d'hiver.

Les débits moyens mensuels atteignent leurs maximums en mois d'Avril et Mars ou le phénomène de la fonte des neiges intervient remarquablement, en suite la période estivale prend place pendant les mois d'été.

- Variations moyennes saisonnières des précipitations

Les précipitations saisonnières ont été calculées à partir des données mensuelles tout comme pour les stations en amont de la station de Sidi rahal, la répartition des saisons se fait ainsi :

\* Les précipitations d'automne sont la somme des moyennes des mois de septembre, octobre et novembre.

- \* Les précipitations en hiver sont la somme des moyennes des précipitations des mois de décembre, janvier et février.
- \* Les précipitations du printemps sont la somme des moyennes des précipitations des mois de mars, avril et mai.
- \* Les précipitations d'été sont la somme des moyennes des précipitations des mois de juin, juillet et août.

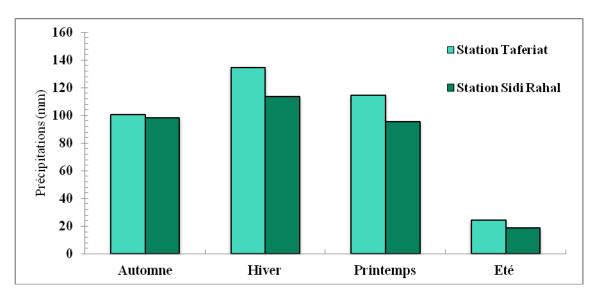


Figure 31 : Variation saisonnière comparative des précipitations aux deux stations de 1982/83 à 2015/16.

La figure 31 renseigne sur la répartition saisonnière des précipitations aux deux stations. Nous pouvons constater alors que la saison d'hiver reçoit le maximum de chutes de pluie suivie de celles du printemps, et de l'autonome, tandis que la saison d'été indique la saison la plus sèche.

Les histogrammes permettent de mettre en évidence un régime de précipitation au niveau des stations Sidi Rahal et Taferiat on peut dire qu'elles se caractérisent par un régime hivernal.

- Variations annuelles des précipitations.

Nous avons travaillé sur les pluies des exutoires des bassins Ghdat et Zat sur une période de 34 ans en allant de 1982/83 à 2015/16.

#### - Station Sidi rahal

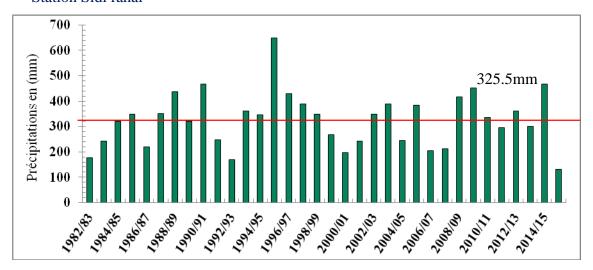


Figure 32: Précipitations annuelles au niveau de la station Sidi rahal de1982/83 à 2015/16.

L'analyse de l'évolution des précipitations à la station Sidi rahal, durant la période 1982/83-2015/16, montre que l'année 1995/96 est la plus arrosée avec une valeur de 648.2mm et l'année 1992/93 est la plus sèche avec une valeur de 167.7mm malgré que l'année 2015/16 enregistre une moyenne annuelle plus faible, nous soupçonnons la qualité de données pluviométrique pour cette année. C'est pour cela que nous avons préféré retenir l'année 1992/93 comme étant la plus sèche . Notons que la précipitation moyenne interannuelle s'évalue à 325.5mm (figure 32).

## - Station Taferiat

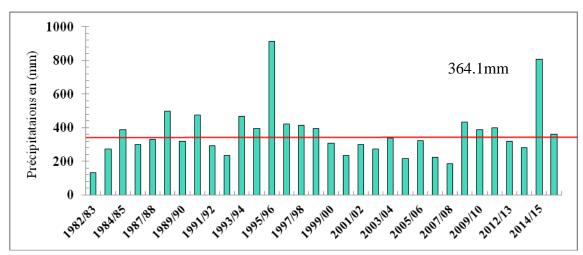


Figure 33: Précipitations annuelles au niveau de la station Taferiat de 1982/83 à 2015/16.

La figure 33 montres la variation des précipitations annuelles la station Taferiat enregistre une moyenne interannuelle de l'ordre 364.1mm. Pour la série d'années dépouillée de 1982/83 jusqu'à 2015/16, on trouve des années pluvieuses dont la hauteur dépasse largement la moyenne tel que l'année 1995/96 qui représente l'année la plus pluvieuse de la série suivi par 2014/15, tandis qu'il y a d'autres années de pluviosité très faible, tel que 1982/83.

Les précipitations montrent donc une irrégularité remarquable avec un maximum de 913.4mm et un minimum de 133.4mm.

• Variation des précipitations annuelles comparative entre la station Sidi rahal et Taferiat.

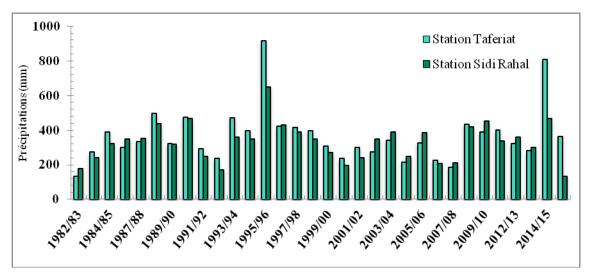


Figure 34: Variation des précipitations Annuelle comparative des stations Sidi rahal et Taferiat de 1982/83 à 2015/16.

Les histogrammes montrent l'évolution annuelle des précipitations. Nous pouvons voir que deux années ont été exceptionnellement pluvieuses à savoir (1995-96) et (2014-15). Les deux stations ont enregistrées, ces années-là, de fortes précipitations à plus de 913(mm) d'eau. Deux années ont été particulièrement sèches, ce sont les années (1982-83) et (1992-93) avec des précipitations inférieures à 167mm.

## I.2.2. Analyse des données hydrologiques au niveau de la station Sidi rahal et Taferiat

Le débit de surface ou le ruissellement par dépassement de la capacité d'infiltration parvient lorsque l'intensité de pluie est supérieure à la capacité d'infiltration instantanée du sol.

Ce ruissellement est à la fois fonction de la pluie, de l'état structural du sol et de son humidité.

Comme pour les données des précipitations, les données des débits sont représentées pour différents pas de temps, la période d'études a été définie afin de prendre en compte le maximum de données compatible au niveau de la station Sidi rahal et Taferiat cette période s'étend sur 36 ans en allant de 1980/81 à 2015/16.

#### Débits moyens mensuels

Les débits moyens mensuels aux deux stations ont été obtenus par le calcul de la moyenne arithmétique des données des débits mensuels de chaque année.

#### - Station Sidi rahal

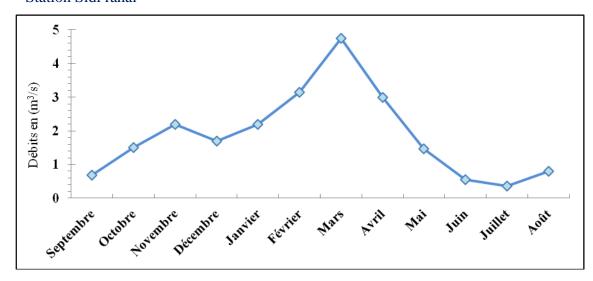


Figure 35 : Variations moyennes mensuelles des débits du bassin versant du Ghdat de 1980/81 à 2015/16.

Le graphe représente la variation des débits moyens mensuels couvrant la période qui s'étale de l'année 1980/81 à l'année 2015/16.

Ces débits varient dans la station de Sidi Rahal de 0.3 m<sup>3</sup>/s au mois du Juillet à 4.74m<sup>3</sup>/s au mois du Mars.

Ces débits sont généralement faibles avec un régime très irrégulier au cours de l'année.

Ils commencent à augmenter progressivement depuis le mois de Novembre et atteignent leur maximum pendant les mois de Mars en raison des chutes importante des précipitations durant ces mois et la légère fonte de neige des mois précédents.

Les mois de Juin, Juillet, Août, Septembre et Octobre sont les mois les plus secs de l'année.

D'après le graphe on constate que le régime d'oued Ghdat comprend deux périodes distinctes au cours de l'année :

- \* Une phase pluvieuse allant du mois de Novembre au mois de Mai période des hautes eaux ;
- \* Une phase sèche allant du Juin à Octobre période d'étiage.

#### - Station Taferiat

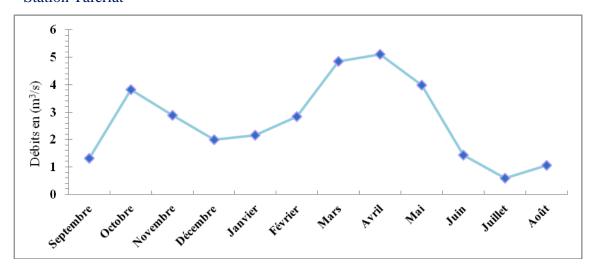


Figure 36 : Variations moyennes mensuelles des débits du bassin versant de Taferiat de 1980/81 à 2015/16.

Les débits moyens mensuels interannuels enregistrés à la station de Taferiat pour la période 1980/81 - 2015/16 montrent des débits maximaux aux mois de Mars et Avril respectivement de 4.86m<sup>3</sup>/s et 5.12m<sup>3</sup>/s.

Les débits minimums sont observés en Juillet de 0.59m³/s, en Août de 1.06m³/s, et Septembre de 1.32m³/s.

On se référant au graphe ci-dessus on remarque que le régime d'oued Zat comprend deux périodes distinctes au cours de l'année :

- \* Une phase pluvieuse allant du mois d'Octobre au mois de Mai période des hautes eaux ;
- \* Une phase sèche allant du Juin à Septembre période d'étiage.
- Variation des débits moyens mensuelles comparative entre la station Sidi rahal et Taferiat.

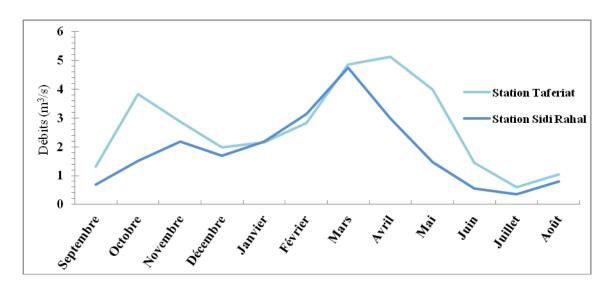


Figure 37 : Variation des débits moyen mensuelles comparative entre les stations Sidi rahal et Taferiat de 1980/81 à 2015/16.

La figure ci-dessus montre l'évolution mensuelle des débits au niveau des deux stations.

Nous pouvons voir que l'allure générale est plus au moins identique avec un le régime des oueds similaire, ce dernier comprend deux périodes distinctes au cours de l'année une période des hautes haut en allant du mois d'Octobre au mois de Mai, et une période d'étiage qui s'étend de Juin à Septembre.

# - Débits moyens saisonniers

Les débits moyens saisonniers ont été calculés à partir des données mensuelles, la répartition des saisons se fait ainsi :

- \* Les débits d'automne sont la somme des moyennes des mois de septembre, octobre et novembre.
- \* Les débits en hiver sont la somme des moyennes des précipitations des mois de décembre, janvier et février.
- \* Les débits du printemps sont la somme des moyennes des précipitations des mois de mars, avril et mai.
- \* Les débits d'été sont la somme des moyennes des précipitations des mois de juin, juillet et août.

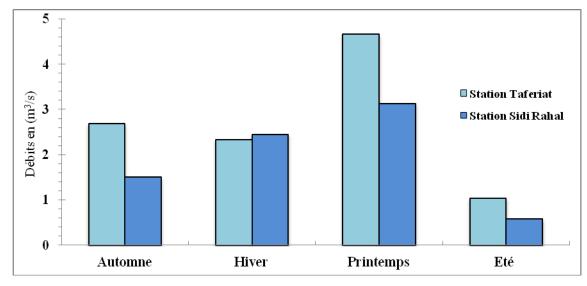


Figure 38 : Variation saisonnière comparative des débits aux deux stations de 1980/81 à 2015/16.

La figure 38 représente la variation saisonnière des débits aux stations étudiées, nous constatons deux régimes différents à l'exutoire.

Le premier qui concerne la station Taferiat se proclame par une petite diminution de l'automne à l'hiver, puis une forte augmentation au printemps, la chute de débits intervient entre le printemps et l'été.

Le deuxième régime concerne la station Sidi Rahal se manifeste par une augmentation constante de l'automne au printemps avec une diminution du printemps à l'été.

## - Débits moyens annuels.

#### Station Sidi rahal

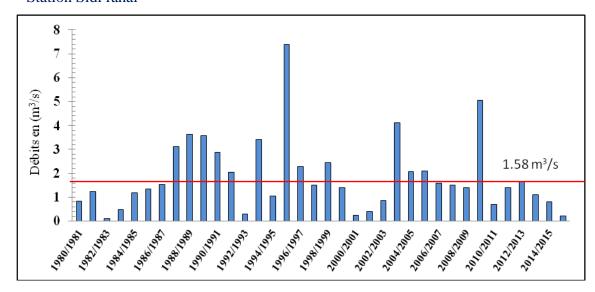


Figure 39 : Variation des débits moyens annuels de la station Sidi rahal de 1980/81 à 2015/16.

Au niveau de la station Sidi rahal nous avons des débits d'une période de 36 ans de 1980/81 à 2015/16.

La valeur moyenne de l'écoulement annuels pour la période considérée est de l'ordre de 1.85m<sup>3</sup>/s. les années qui ont une valeur inférieure à la moyenne sont plus nombreuses que celles qui la dépassent.

Les débits maximaux sont enregistrés en 1995/96 avec une valeur de l'ordre de 7.39m³/s, suivie de celui de l'année 2009/10 d'une valeur de 5.05m³/s, Ces deux années ont connu des précipitations importantes donc on peut constater que les débits suivent les variations des précipitations dans le temps pour ce bassin.

Les débits minimaux correspondent aux années suivantes : 1982/83 avec une valeur de 0.11m<sup>3</sup>/s, puis l'année 1992/93 une valeur de 0.2m<sup>3</sup>/s, ainsi que d'autres année illustrer sur la (figure 39) cidessus.

# - Station Taferiat

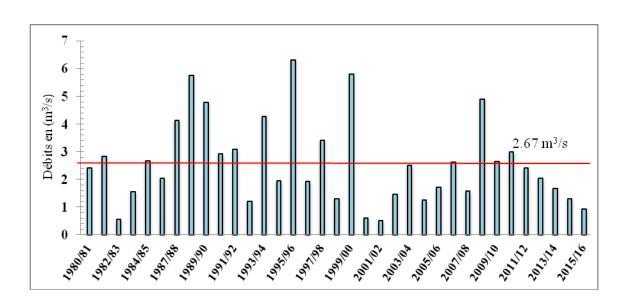


Figure 40 : Variation des débits moyens annuels de la station Taferiat de 1980/81 à 2015/16.

La figure 40 illustre des histogrammes de variation des débits moyens annuels au niveau de la station Taferiat, nous avons travaillé sur une période de 36 ans de 1980/81 à 2015/16.

La valeur moyenne de l'écoulement annuel pour la période analysée est de l'ordre de 2.67m3/s.

Les débits maximaux sont enregistrés en 1996/95 avec une valeur de l'ordre de 6.31m3/s, suivie de celui de l'année 1999/00 d'une valeur de 5.82m3/s.

Les débits minimaux conviennent aux années 2001/02 avec une valeur de 0.53m3/s, puis l'année 1982/83 une valeur de 0.56m3/s, ainsi que d'autres années représentées sur la figure 36 ci-dessus.

• Variation des débits moyens annuelles comparative entre la station Sidi rahal et Taferiat.

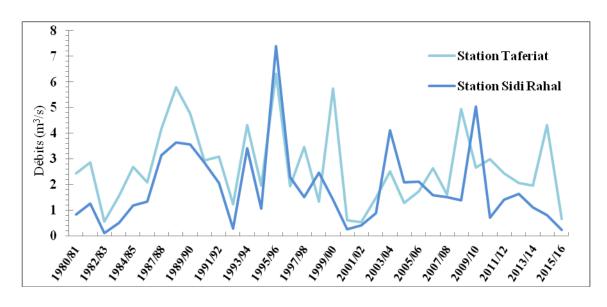


Figure 41 : Variation comparative des débits moyens annuels entre les stations Sidi rahal et Taferiat de 1980/81 à 2015/16.

La figure 41 présente les débits moyens annuels aux exutoires des deux bassins versants. Les mesures ont été prises pendant la période de 1980/81 à 2015/16. Ce graphique fait apparaître les années à fort débits et les années à faibles débits.

Nous constatons qu'il y a une certaine concordance dans les premières années, mais pas dans les années récente par ce que les sections des oueds on était très modifier par les crues.

Chapitre III : Bilans hydrologiques et relation entre les pluies et les débits

# I. Bilan particuliers

L'établissement d'un bilan hydrologique a pour but de comparer les entrées et les sorties d'eau dans un bassin versant, Pour ce faire trois paramètres sont à calculer :

#### I.1. Lames d'eau écoulée

La lame d'eau écoulée est donnée par la relation :

$$H = \left[ Q * \frac{(3600 * 24 * 365)}{S} \right] * 1000$$

Avec

H: lame d'eau écoulée en (mm);

Q: débits à l'exutoire en (m<sup>3</sup>/s);

S: surface du bassin versant en (m<sup>2</sup>).

La lame d'eau écoulée représente la hauteur d'eau écoulée à l'exutoire défini comme étant le rapport entre le débit et la surface du bassin versant en fonction du laps de temps considéré.

- Nous avons calculé la lame d'eau écoulée au niveau des deux bassins versants du Ghdat et du Zat, sauf qu'au niveau du bassin versants Zat les débits moyens sont surestimés c'est pour cela qu'on a retenu juste les lames d'eau écoulées du bassin Ghdat qui sont présenté dans le tableau ci-dessous.
- La surface du Ghdat est de 541,32 km<sup>2</sup>.

Tableau 18 : Présentation des lames d'eau écoulée au niveau du bassin Ghdat de l'année 2011/12 à 2015/16.

Années	Qm Sidi rahal (m³/s)	H (mm)
2011-12	1,40	81,41
2012-13	1,64	95,53
2013-14	1,47	85,71
2014-15	5,35	311,88
2015-16	0,43	25,34

# I.2. Déficits d'écoulement

Le déficit d'écoulement exprime la différence entre la hauteur d'eau reçu par un bassin versant et les écoulements superficiels issus de ce bassin pendant une même période. Il correspond théoriquement à la quantité d'eau évapotranspirée, et la quantité infiltrée vers les nappes souterraines, mais cette partie d'eau infiltrée pourra ultérieurement être drainée par l'oued et ressortir par des résurgences ou des sources, elle correspond donc à un écoulement différé pouvant être comptabilisé avec les débits. Ceci laisse supposer que le déficit d'écoulement correspond uniquement à l'évapotranspiration réelle théorique.

Le déficit d'écoulement est donné par la relation ci-dessous

$$D = P - H$$

Avec

D: le déficit d'écoulement en (mm);

P: les précipitations en (mm);

H: la lame d'eau écoulée en (mm).

- On a calculé le déficit d'écoulement à partir de la lame d'eau écoulée préalablement calculé au niveau du bassin versant du Ghdat.

Tableau 19: Déficit d'écoulement au niveau du bassin versant du Ghdat de l'année 2011/12 à 2015/16.

Années	P Sidi rahal (mm)	H (mm)	D (mm)
2011-12	300,4	81,41	218,99
2012-13	361	95,53	265,47
2013-14	196	85,71	110,29
2014-15	456,2	311,88	144,32
2015-16	132,2	25,34	106,86

## I.3. Coefficients d'écoulement

Le coefficient d'écoulement correspond au rapport entre la lame d'eau écoulée et les précipitations.

Il exprime en pourcentage la tranche d'eau précipitée qui ruisselle jusqu'à l'exutoire du bassin versant.

Ce coefficient est donné par la relation :

$$CE = \frac{H}{P}$$

Avec

CE: coefficient d'écoulement en (%);

P: les précipitations en (mm);

H: la lame d'eau écoulée en (mm).

Apres avoir calculé la lame d'eau écoulé et le déficit d'écoulement, on peut finalement établir un rapport entre les deux pour quantifier la tranche d'eau précipitée qui ruisselle jusqu'à l'exutoire du bassin Ghdat.

Tableau 20 : Coefficient d'écoulement du bassin versant du Ghdat.

Années	P Sidi rahal (m³/s)	H (m)	CE (%)
2011-12	300,4	81,41	27,10
2012-13	361	95,53	26,46
2013-14	196	85,71	43,73
2014-15	456,2	311,88	68,37
2015-16	132,2	25,34	19,17

# II. Bilans globaux

L'établissement d'un bilan hydrologique a pour but de comparer les entrées et les sorties d'eau dans un bassin versant de la même façon que le bilan particuliers, de se faire trois paramètres sont à calculer d'une manière globale.

#### II.1. Lames d'eau écoulée

La lame d'eau écoulée désigne la hauteur d'eau écoulée à l'exutoire, elle est expliqué comme étant la relation entre le débit et la surface du bassin versant en fonction de l'intervalle de temps contemplé.

- Comme pour le bilan particulier nous avons calculé la lame d'eau écoulée au niveau des deux bassins versants du Ghdat et du Zat, sauf qu'une fois de plus au niveau du bassin versants Zat les débits moyens sont surestimés c'est ce qui nous a poussés à retenir iniquement la lame d'eau écoulée du bassin Ghdat

$$H = \left[ Q * \frac{(3600 * 24 * 365)}{S * 10^6} \right] * 1000$$

Avec

H: lame d'eau écoulée en (m);

Q : débits à l'exutoire en  $(m^3/s)$ ;

S: surface du bassin versant en (m²).

Tableau 21 : Lames d'eau écoulée du bassin versant Ghdat.

Années	Q m Sidi rahal	H sr
2011/2016	1,47	85,64

#### II.2. Déficits d'écoulement

Le déficit d'écoulement exprime la différence entre la hauteur d'eau recueilli par un bassin versant et les écoulements superficiels qui appartiennent à ce bassin pendant une même durée.

Il est donné par la relation ci-dessous

$$D = P - H$$

Avec

D: le déficit d'écoulement en (mm);

P: les précipitations en (mm);

H: la lame d'eau écoulée en (mm).

Tableau 22 : Déficits d'écoulement du bassin versant Ghdat.

Années	P Sidi rahal (mm)	H (mm)	D (mm)	
2011/2016	289,16	85,64	203,52	

#### II.3. Coefficients d'écoulement

Le coefficient d'écoulement correspond au rapport entre la lame d'eau écoulée et les précipitations. Il exprime en pourcentage la tranche d'eau précipitée qui ruisselle jusqu'à l'exutoire du bassin versant.

Ce coefficient est donné par la relation

$$CE = \frac{H}{P}$$

Avec

CE: coefficient d'écoulement en (%);

P: les précipitations en (mm);

H: la lame d'eau écoulée en (mm).

Tableau 23: Coefficients d'écoulement du bassin versant Ghdat.

Années	P Sidi rahal (mm)	H (mm)	CE %	
2011/2016	289,16	85,64	29,62	

# III. Corrélation entre les précipitations et les débits à différentes échelles de temps

La corrélation a pour but de mettre en évidence la contribution des précipitations sur les débits afin en mieux comprendre les mécanismes intervenant et de comparer les deux bassins versants entre eux.

De ce faire, nous allons étudier les interactions entre les pluies et les débits a des pas de temps différents : mensuels, saisonnais et annuels sur une période allant de 1982/83 pour les précipitations et de 1980/81 pour les débits, ceci pour approuver nos hypothèses qui concerne l'intervention de la couche neigeuse sur les débits aux l'exutoire des bassins versants.

Les débits et les hauteurs de pluies forment un nuage de points sur les graphiques.

les droites de régression seront de la forme  $\mathbf{y} = \mathbf{a}\mathbf{x} + \mathbf{b}$ , avec le couple (x,y) représentant l'abscisse et l'ordonne de chaque point, a étant le coefficient directeur de la droite et b représentant l'ordonnée a l'origine.

Un coefficient de corrélation  $R^2$  est affecté à chaque droite, il montre la liaison qu'il y a entre les deux paramètres étudies.

# III.1. Corrélation entre les précipitations et les débits moyens mensuels

#### - Station Sidi rahal

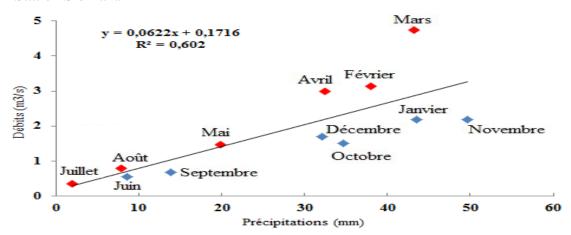


Figure 42 : Corrélations entre les précipitations et les débits moyens mensuels à la station Sidi Rahal.

La figure 42 montre le lien existant entre les précipitations et les débits moyens mensuels.

Nous pouvons remarquer que la droite de corrélation passe par le maximum de points autrement dit que les mois s'alignent sur une même droite, ce qui nous laisse dire que plus les précipitations augmentent quand les débits augmentent et cela de façon quasiment linéaire.

Le coefficient de corrélation est bon, Pour les stations de Sidi Rahal R = 0.77.

On peut alors conclure que les débits et les précipitations augmentent avec des coefficients de corrélation assez élevés, ceci indique l'écoulement dans le bassin du Ghdat dépendrait de la pluie ainsi que de la fraction de neigeuse qui est tombée sur ce bassin versant.

# - Station Taferiat

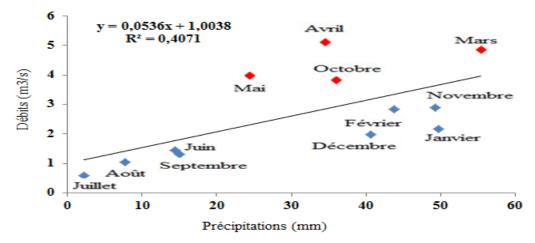


Figure 43 : Corrélations entre les précipitations et les débits moyens mensuels à la station Taferiat.

Le graphe ci-dessus représente le lien existant entre les précipitations et les débits moyens mensuels à la station Taferiat.

Nous pouvons constater que les mois représentés par des points bleus s'alignent plus au moins sur une même droite, quand les précipitations augmentent les débits augmentent. Alors que les mois représenté en points rouge s'alignent sur une autre droite faisant augmenter les débits plus forts qu'avec la droite précédente avec de faibles précipitations

Le coefficient de corrélation de la station Taferiat est de R = 0,63.

La courbe représentée par l'alignement des points bleus pourrait correspondre au régime d'écoulement issu essentiellement des précipitations alors que la deuxième droite, représenté par l'alignement des points rouges correspondrait à l'influence de la fonte des neiges produisant une augmentation du débit à l'exutoire.

## III.2. Corrélation entre les précipitations et les débits moyens saisonniers



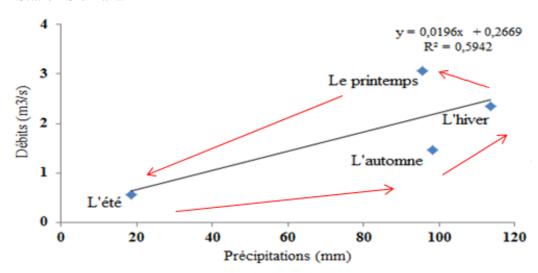


Figure 44 : Corrélations entre les précipitations et les débits moyens saisonniers à la station Sidi rahal.

Les résultats de la corrélation saisonnière montrent que le nuage de points adopte une forme en raquette.

En effet la relation entre les deux paramètres semblent linéaire, avec un coefficient de corrélation R= 0.76 qui confirme le résultat obtenu graphiquement. Il y a alors une étroite liaison entre les débits et les précipitations saisonnières.

Comme pour les débits mensuels, le printemps se distingue par son débit important, justifié par la rétention nival en hiver et sa fonte au printemps.

#### - Station Taferiat

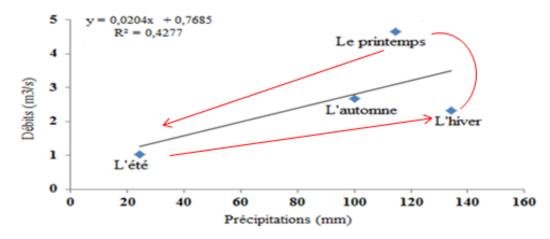


Figure 45: Corrélations entre les précipitations et les débits moyens saisonniers à la station Taferiat.

D'après le graphe on voit que le nuage de points a pris une forme d'ellipse inclinée.

Comme pour Sidi rahal la relation entre les deux paramètres est partiellement linéaire, les trois saisons en dessous de la droite de corrélation (été, automne, et hiver) sont bien corrélées vue que l'augmentation des précipitations engendre l'augmentation des débits tandis que le printemps se manifeste par une augmentation des débits et une légère diminution des précipitations.

Le coefficient de corrélation et une fois de plus inférieur à celui de la station de Sidi rahal, R= 0.64 c'est ce qu'il confirme le résultat obtenu graphiquement,

Cette faible corrélation est influencée par la fraction de neige plus importante qui tombe en hiver et qui se traduit par une augmentation des débits qui ne s'écoulent qu'au printemps.

# III.3. Corrélation entre les précipitations et les débits moyens annuels

#### - Station Sidi rahal

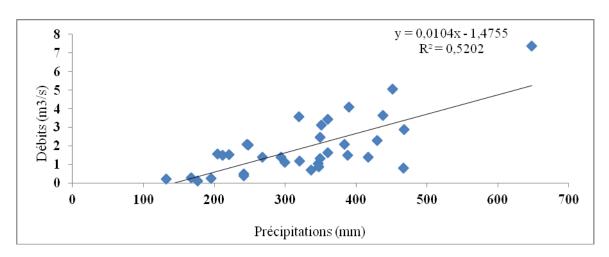


Figure 46 : Corrélations entre les précipitations et les débits moyens annuels à la station Sidi Rahal.

La figure 46 montre le lien existant entre les précipitations et les débits moyens annuels à la station Sidi rahal.

Nous pouvons remarquer que cette stations a un coefficient de corrélation R=0,72, on peut alors dire que les précipitations annuelles sont liées aux débits.

L'écoulement de l'oued Ghdat proviendrait principalement de la pluie, par conséquent les débits croient avec les précipitations a l'exception du point de 1995/96, pour la station Sidi rahal les pluies sont sous-estimé et ne reproduisent pas la pluie du bassin versant plus arrosée.

#### - Station Taferiat

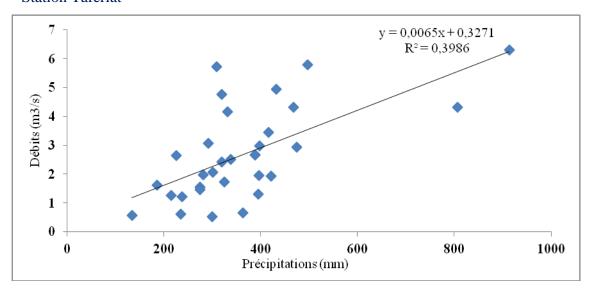


Figure 47 : Corrélations entre les précipitations et les débits moyens annuels à la station Taferiat.

D'après le graphe on voit que le nuage de points a pris une forme très dispersée par rapport à la droite de corrélation ce qui permet de dire que nos deux paramètres sont mal corrélés.

Le coefficient de corrélation est de R= 0.62. Ceci peut se justifier par la façon dont la pluie tombe, Plus celle-ci est intense, plus l'écoulement est important, et quand la pluie tombe de façon douce et régulière, l'évaporation et l'infiltration l'emportent devant le ruissellement et les débits à l'exutoire sont faibles.

Chapitre IV : Etude des crues des oueds Ghdat et Zat

# A- Analyses fréquentielles des débits et des pluies extrêmes pour l'estimation des évènements de pointe à différentes périodes de retour

L'analyse fréquentiel va nous permettre d'estimer les temps de retour des précipitations et des débits à long terme. Cette prédiction repose sur la mise en œuvre d'un modèle fréquentiel qui est une équation décrivant le comportement statistique d'un processus.

Ces modèles décrivent la probabilité d'apparition d'un événement de valeur donnée (débit / pluie). C'est à partir du choix de la loi de probabilité que dépendra la validité des résultats de l'analyse fréquentielle.

# Présentation du logiciel utilisé

Dans cette étude nous avons travaillé à l'aide du logiciel HYFRAN-PLUS, celui-ci permet d'ajuster un nombre important de distributions statistiques à une série de données qui vérifient les hypothèses d'indépendance, d'homogénéité et de stationnarité.

#### Critères d'information

Pour discriminer les différents ajustements on peut en outre utiliser les deux critères suivants disponibles dans HYFRAN-PLUS (Ehsanzadeh, El Adlouni and Bobée, 2010) :

- Critère d'information d'Akaike (AIC)
- Critère d'information bayésien (BIC)

Ces deux critères utilisés consécutivement (AIC puis BIC) permettent de construire un classement de modèles statistiques tenant compte du principe de parcimonie. Les meilleurs ajustements correspondent aux plus faibles valeurs de ces critères.

## I. Ajustement des lois à un échantillon des précipitations maximales annuelles

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 annuelles.

Notre étude porte sur l'ajustement des précipitations maximales annuelle des bassins versants Ghdat et Zat, et ce, sur une période d'observation de 46 ans qui s'étend de 1967/1968 à 2010/2011 au niveau de la station Sidi Rahal, et une autre de 26 ans allant de 1983/1984 à 2010/2011 au niveau de la station Taferiat.

Les lois statistiques appliquées pour cette étude sont :

- Exponentiel;
- GEV (Generalized Extreme Value);
- Log normal;
- Gumbel;
- Gamma.

# I.1. Méthode visuelle (analyse des graphes)

## - Station Sidi rahal

La figure 48 montre des graphiques qui présentent les probabilités empiriques et théoriques des distributions des lois de Gumbel, Log-normale, GEV, Gamma, Exponentielle, sur un papier normal de probabilité.

Visuellement on remarque que les lois Gumbel, Log-normale qui présentent les meilleurs ajustements de la variable précipitations maximales annuelles.

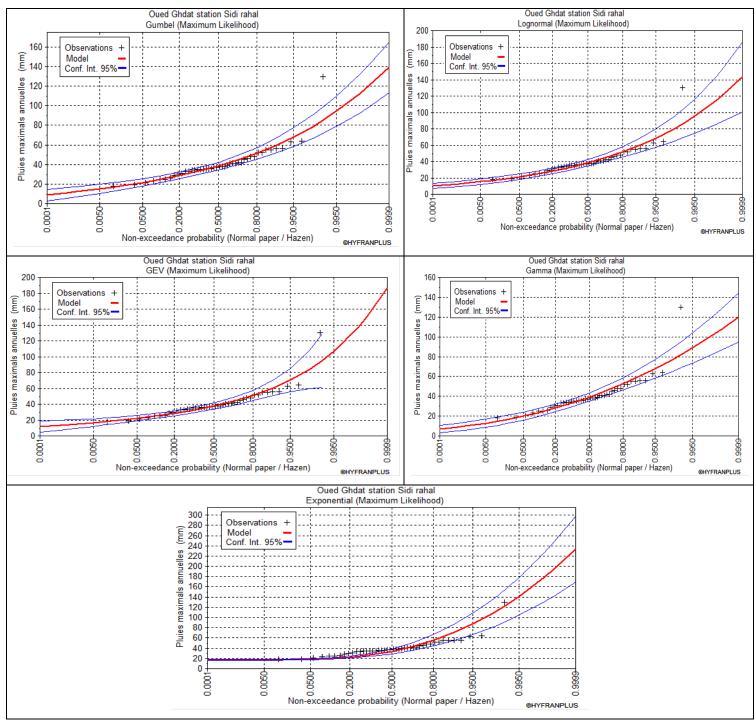


Figure 48 : Ajustements statistiques des précipitations maximales annuels à la station Sidi rahal selon les lois de Gumbel, Log-normale, GEV, Gamma et Exponentielle.

#### Station Taferiat

Les graphiques ci-dessous présentent les probabilités empiriques et théoriques des distributions des lois d'ajustement statistique préalablement utilisé au niveau de la station Sidi rahal, sur un papier normal de probabilité.

Visuellement on remarque que la loi exponentielle est la plus adaptées pour l'ajustement de la variable précipitations maximales annuelles.

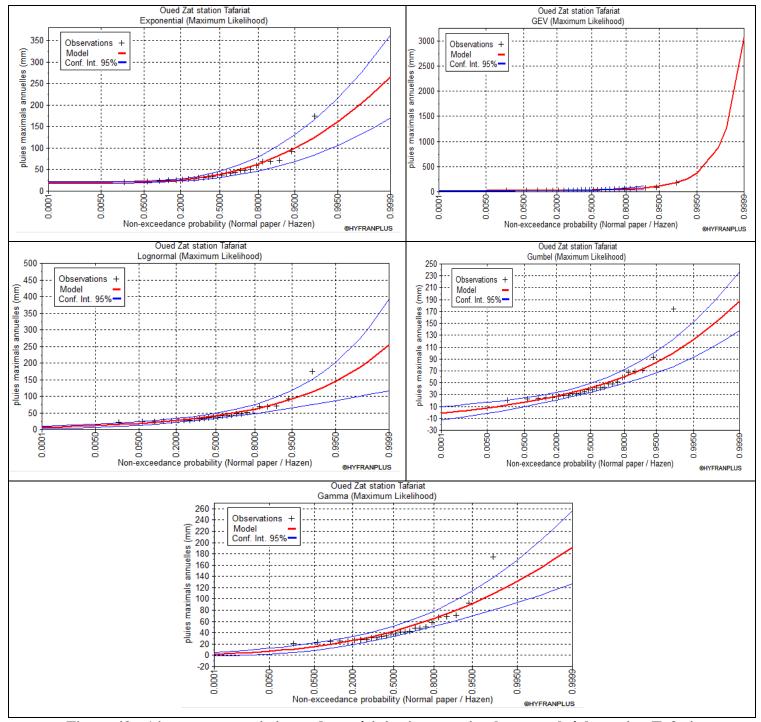


Figure 49 : Ajustements statistiques des précipitations maximales annuels à la station Taferiat selon les lois Exponentielle, GEV, Log-normale, Gumbel, et Gamma.

# I.2. Méthode numérique (analyse statistique)

Les tableaux ci-dessous montrent les valeurs observées des critères d'information bayésien (BIC) et d'Akaike (AIC) au niveau des bassins versant du Ghdat et du Zat.

Ces critères permettent de comparer le degré d'ajustement. Les meilleurs ajustements correspondent aux plus faibles valeurs de ces statistiques.

• Station Sidi rahal

Les meilleurs résultats d'ajustement visuel sont trouvés pour la loi Gumbel en première position, suivi par la loi de Log-normale.

Aussi bien, pour les résultats d'ajustement numérique obtenus on trouve que la loi Gumbel est la mieux adaptée pour l'estimation des précipitations maximales annuelles.

Tableau 24 : Ajustements numériques des lois de Gumbel, Log-normale, GEV, Gamma et Exponentielle (Période 100 ans).

Modèles	Nb de paramètres	BIC	AIC
Gumbel (Maximum de vraisemblance)	2	360,87	357,3
Log normal (Maximum de vraisemblance)	2	360,95	357,38
GEV (Maximum de vraisemblance)	3	363,33	357,98
Gamma (Maximum de vraisemblance)	2	365,54	361,97
Exponentiel (Maximum de vraisemblance)	2	372,99	369,42

• Station Taferiat

Le meilleur résultat d'ajustement visuel est trouvé pour la loi Exponentielle.

Aussi bien, pour les résultats d'ajustement numérique obtenus on trouve que la loi Exponentielle est la mieux adaptée pour l'estimation des précipitations maximales annuelles.

Tableau 25 : Ajustements numériques des lois Exponentielle, GEV, Log-normale Gumbel, et Gamma (Période 100 ans).

Modèles	Nb de paramètres	BIC	AIC
Exponentiel (Maximum de vraisemblance)	2	229,28	226,76
GEV (Maximum de vraisemblance)	3	231,78	228,01
Log normal (Maximum de vraisemblance)	2	235,14	232,63
Gumbel (Maximum de vraisemblance)	2	238,96	236,44
Gamma (Maximum de vraisemblance)	2	240,78	238,26

# I.3. Estimation des précipitations maximales Annuelles.

Les tableaux présentent les estimations des précipitations maximales annuelles calculées pour les différentes périodes de retour au niveau des deux bassins versants

• Station Sidi rahal

La comparaison graphique et les critères statistiques d'ajustement obtenus nous permettent de conclure que la loi la mieux adaptée pour l'estimation des précipitations maximales annuelles est la loi de Gumbel.

Tableau 26 : Estimation des précipitations maximales annuelles selon la loi de Gumbel.

	Périodes de retour					
Modèle	5 ans 10 ans 20 ans 50 ans 100ans					
Gumbel	51,2	59,7	67,9	78,5	86,5	

• Station Taferiat

L'approche graphique ainsi que les critères statistiques d'ajustement obtenus nous ont permis de conclure que la loi la mieux adaptée pour l'estimation des précipitations maximales annuelles est la loi Exponentiel.

Tableau 27 : Estimation des précipitations maximales annuelles selon la loi Exponentiel.

	Périodes de retour				
Modèle	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100ans
Exponentiel	62,9	81,4	99,9	124	143

# II. Ajustement des lois à un échantillon des débits maximal annuels

L'évaluation des périodes de retour des débits extrêmes est l'un des problèmes primordiaux posés aux promoteurs d'aménagements. Pour cela, on procède à l'analyse statistique des chroniques d'observation des débits maximales annuelles.

Notre étude porte sur l'ajustement des débits maximales annuelles des bassins versants Ghdat et Zat, et ce, sur une période d'observation de 53 ans qui s'étend de 1963/1964 à 2015/2016 au niveau de la station Sidi Rahal, et une autre de 54 ans allant de 1962/1963 à 2015/2016 au niveau de la station Taferiat.

Les lois statistiques appliquées pour cette étude sont :

- Exponentiel;
- GEV (Generalized Extreme Value);
- Log normal;
- Gumbel;
- Weibull.

## II.1. Méthode visuelle (analyse des graphes)

• Station Sidi rahal

La figure 50 montre les graphiques des résultats obtenus, ces dernier représentent les probabilités empiriques et théoriques des distributions Weibull, Exponentielle, GEV, log-normal, et Gumbel sur papier normal de probabilité.

Visuellement, on peut conclure que les lois Weibull et loi Exponentielle présentent les meilleurs ajustements de la variable débit maximal annuelles.

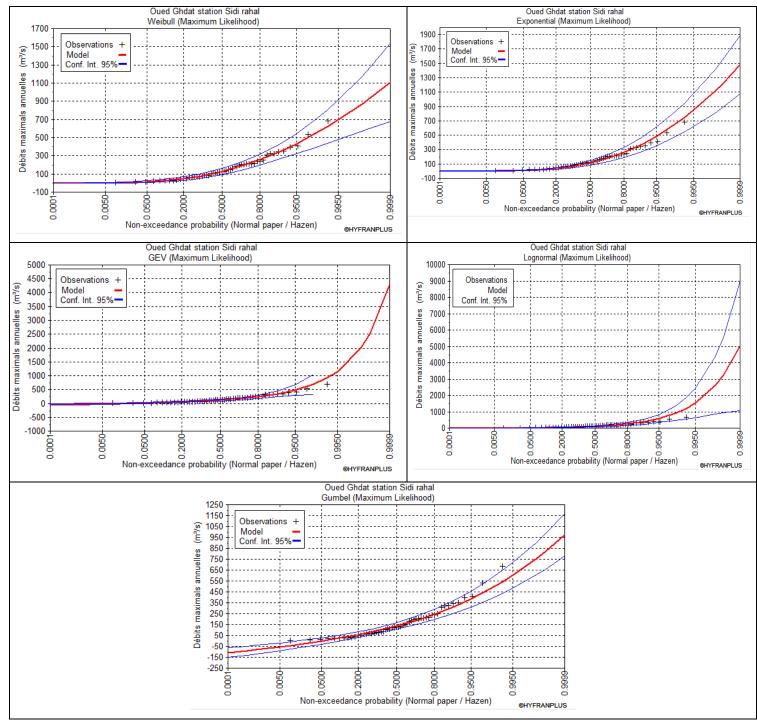


Figure 50: Ajustements statistiques des débits maximaux annuels à la station Sidi rahal selon les lois Weibull, Exponentielle, GEV, Log-normale, et Gumbel.

#### Station Taferiat

La figure 51 montre les graphiques des résultats obtenus après les ajustements statistique appliqué aux jeux de données, ces dernier représentent les probabilités empiriques et théoriques des distributions Exponentielle, log-normal, Weibull, Gumbel, et GEV, sur papier normal de probabilité.

Visuellement, on peut conclure que les lois log-normal et loi Exponentielle présentent les meilleurs ajustements de la variable débit maximal annuelles.

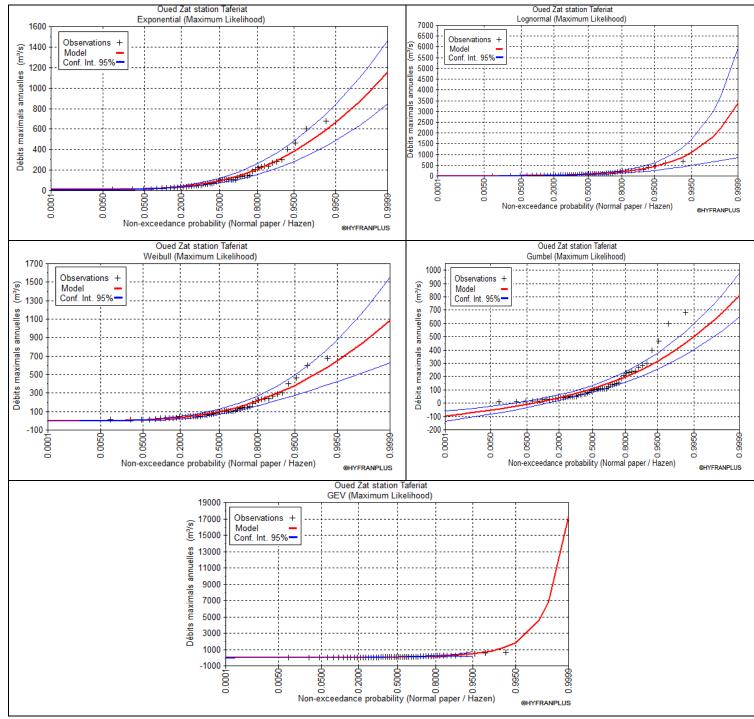


Figure 51 : Ajustements statistiques des débits maximaux annuels à la station Taferiat selon les lois Exponentielle, Log-normale, Weibull, Gumbel et GEV.

#### II.2. Méthode numérique (analyse statistique)

Le tableau présente les valeurs observées des critères d'information bayésien (BIC) et d'Akaike (AIC) au niveau des deux stations.

- Station Sidi rahal

Le tableau 28 présent les débits estimés pour quatre périodes de retour à partir des paramètres calculés précédemment pour les cinq lois de probabilité.

D'après les résultats numériques obtenus, la loi Weibull est le meilleur ajustement de la variable débit maximal annuels.

Tableau 28 : Ajustements numériques des lois Weibull, Exponentielle, GEV, Log-normale, et Gumbel. (Période 100 ans).

Modèles	Nb de paramètres	BIC	AIC
Weibull (Maximum de vraisemblance)	2	650,96	647,02
Exponentiel (Maximum de vraisemblance)	2	652,21	648,27
Log normal (Maximum de vraisemblance)	2	656,43	652,49
GEV (Maximum de vraisemblance)	3	660,32	654,41
Gamma (Maximum de vraisemblance)	2	661,39	657,45

- Station Taferiat

Les résultats d'ajustement numérique fournis par le logiciel montre que la loi Exponentiel est la loi la plus adaptée pour l'ajustement et l'estimation des débits maximaux annuels puisqu'elle a les plus faibles valeurs enregistrées des critères AIC et BIC pour différentes périodes de retour.

Tableau 29 : Ajustements numériques des lois Weibull, Exponentielle, GEV, Log-normale, et Gumbel. (Période 100 ans).

Modèles	Nb de paramètres	BIC	AIC
Exponentiel (Maximum de vraisemblance)	2	636,6	632,62
Log normal (Maximum de vraisemblance)	2	638,69	634,71
Weibull (Maximum de vraisemblance)	2	644,24	640,26
GEV (Maximum de vraisemblance)	3	645,49	639,53
Gumbel (Maximum de vraisemblance)	2	660,96	656,98

#### II.3. Estimation des débits de pointe pour différentes périodes de retour.

Les tableaux ci-dessous représentent les débits estimés pour quatre périodes de retour à partir des paramètres calculés précédemment pour les cinq lois de probabilité au niveau des deux stations.

#### Station Sidi rahal

Le tableau suivant donne les débits estimés pour cinq périodes de retour : 5,10, 20, 50, et 100ans.

On remarque que les résultats estimés pour les grandes périodes de retour sont très variables alors que pour les faibles périodes de retour leurs variations sont minimes.

Tableau 30 : Estimation des précipitations maximales annuelles selon la loi Weibull.

	Périodes de retour				
Modèles	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100ans
Weibull	257	347	433	541	620

- Station Taferiat

On remarque que les résultats estimés des débits pour cinq périodes de retour : 5,10, 20, 50, et 100ans, varient de 209 à 581 m<sup>3</sup>/s.

On peut remarquer aussi, que les résultats estimés pour les grandes périodes de retour sont très variables alors que pour les faibles périodes de retour leurs variations sont faibles.

Tableau 31: Estimation des précipitations maximales annuelles selon la loi Exponentiel.

	Périodes de retour				
Modèles	5 ans 10 ans 20 ans 50 ans 100ans				
Exponentiel	209	295	381	495	581

#### Conclusion

L'analyse fréquentielle des débits et des pluies maximales annuels a un rôle tés important dans l'estimation du risque d'apparition d'une crue donnée pour une période de retour. Ainsi, on peut dire que les lois de Gumbel et Exponentiel sont la mieux adaptée pour l'estimation des précipitations maximales annuels respectivement pour les bassins versent du Ghdat et du Zat.

Les lois Weibull et Exponentiel sont la mieux adaptée pour l'estimation des débits maximales annuels respectivement au niveau des bassins versent du Ghdat et du Zat.

## **B-** Etude dynamique des crues

## I. Analyse des hydrogrammes des crues

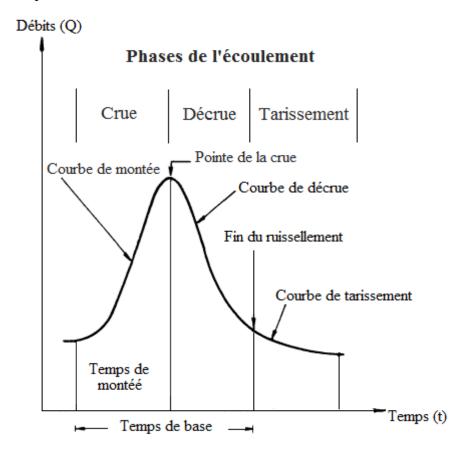
- Définition d'une crue

Une crue est un phénomène hydrologique qui correspond à une augmentation rapide et temporaire du débit d'un cours d'eau. Elle est décrite à partir de trois paramètres :

- Le débit ;
- La hauteur d'eau;
- La vitesse du courant.

En fonction de l'importance des débits, une crue peut être contenue dans le lit ordinaire, lit mineur, ou déborder dans son lit moyen ou majeur.

Elle se caractérise par son hydrogramme qui représente la variation des hauteurs d'un cours d'eau en fonction du temps.



Hydrogramme de crue explicative.

La forme de l'hydrogramme de crue se caractérise par :

- La courbe de montée de crue ou de concentration ;
- La pointe de crue, ou crête de l'hydrogramme ;
- La courbe de décrue ;
- La courbe de tarissement.

Nous allons nous attarder ici sur les crues les plus importantes de notre série de données aux deux bassins versant du Ghdat et du Zat.

Nous n'avons pas réussi à obtenir les données d'un même évènement pour les deux stations Sidi rahal et Taferiat pour pouvoir les comparer, par ailleurs nous avons choisi de travailler sur 15 crues dont 8 crues ont eu lieu à la station Sidi rahal, et les 7 autres crues se sont occurrées à la station Taferiat sur une période allant de 2011 à 2016.

## I.1. les crues du Bassin versant Ghdat

- La crue du 18 Juin 2011
- La crue du 05 Avril 2013
- La crue du 18 Septembre 2013
- La crue du 21 Novembre 2014
- La crue du 22 Novembre 2014
- La crue du 22 Aout 2016
- La crue du 27 Novembre 2016
- La crue du 16 Décembre 2016

## \* La crue du 18 Juin 2011

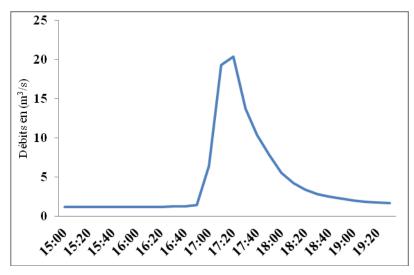


Tableau 32 : Caractéristiques de la crue du 18 Juin 2011.

Caractéristiques de la crue		
Date début	18/06/2011 à 15h00	
Date fin	18/06/2011 à 19h30	
Débit de pointe (m <sup>3</sup> /s)	20,40	
Débit max moyen (m <sup>3</sup> /s)	7,74	
Débit base avant (m <sup>3</sup> /s)	6,43	
Débit base après (m³/s)	4,22	
Volume (m <sup>3</sup> )	32536,10	
Temps de base (H)	1h10min	
Temps de montée (H)	20min	
Coefficient de pointe	2,63	

Figure 52: Hydrogramme de la crue du 18 Juin 2011.

La figure 52 et le tableau 32 montrent que la montée des eaux s'est faite en 20 min.

Le débit est passé, de 6.43m<sup>3</sup>/s avant la crue à 20.40m<sup>3</sup>/s, elle a duré environ 1h10 min c'est une crue simple avec un seul pic.

## \* La crue du 05 Avril 2013.

Tableau 33 : Caractéristiques de la crue du 05 Avril 2013.

Caractéristiques de la crue		
<b>Date début</b> 05/04/2013 à 02h <sup>2</sup>		
Date fin	06/04/2013 à 13h	
Débit de pointe (m³/s)	23,49	
Débit max moyen (m³/s)	11,10	
Débit base avant (m³/s)	1,34	
Débit base après (m³/s)	4,67	
Volume (m <sup>3</sup> )	779872,90	
Temps de base (H)	19h30min	
Temps de montée (H)	9h50min	
Coefficient de pointe	2,115	

Figure 53: Hydrogramme de la crue du 05 Avril 2013.

La figure 53 et le tableau 33 montrent que la montée des eaux s'est faite en 9h50 min.

Le débit est passé, de 1.34m³/s avant la crue à 23.49m³/s, elle a duré environ 19h30 min c'est une crue simple avec un seul pic.

## \* La crue du 18 Septembre 2013

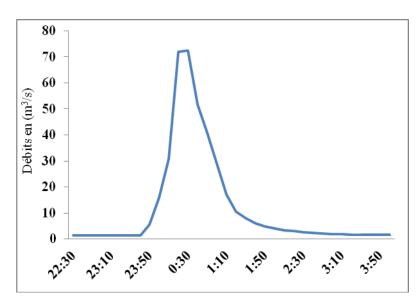


Tableau 34 : Caractéristiques de la crue du 18 Septembre 2013.

Caractéristiques de la crue		
Date début	17/09/2013 à 22h30	
Date fin	18/09/2013 à 04h	
Débit de pointe (m³/s)	72,34	
Débit max moyen (m³/s)	26,34	
Débit base avant (m³/s)	5,59	
Débit base après (m³/s)	4,08	
Volume (m <sup>3</sup> )	205458,68	
Temps de base (H)	2h10min	
Temps de montée (H)	40min	
Coefficient de pointe	2,746	

Figure 54: Hydrogramme de la crue du 18 Septembre 2013.

La figure 54 et le tableau 34 montrent que la montée des eaux s'est faite en 40 min.

Le débit est passé, de 5.59m³/s avant la crue à 72.34m³/s, elle a duré environ 2h10 min c'est une crue simple avec un seul pic.

## \* La crue du 21 Novembre 2014.

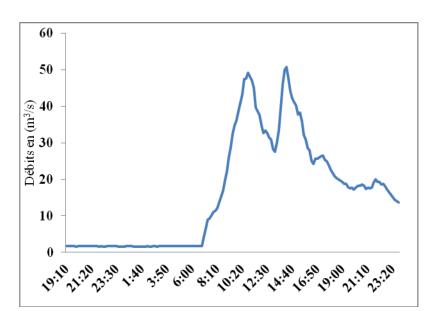


Tableau 35 : Caractéristiques de la crue du 21 Novembre 2014

Caractéristiques de la crue		
Date début	20/11/2014 à 19h10	
Date fin	21/11/2014 à 23h50	
Débit de pointe (m³/s)	50,72	
Débit max moyen (m³/s)	26,45	
Débit base avant (m³/s)	4,194	
Débit base après (m³/s)	13,70	
Volume (m <sup>3</sup> )	1602899,40	
Temps de base (H)	16h50min	
Temps de montée (H)	7h10min	
Coefficient de pointe	1,918	

Figure 55: Hydrogramme de la crue du 21 Novembre 2014.

La figure 55 et le tableau 35 montrent que la montée des eaux s'est faite en 7h10 min.

Le débit est passé, de 4.19m³/s avant la crue à 50.72m³/s, elle a duré environ 16h50 min c'est une crue complexe avec deux pics.

## \* La crue du 22 Novembre 2014.

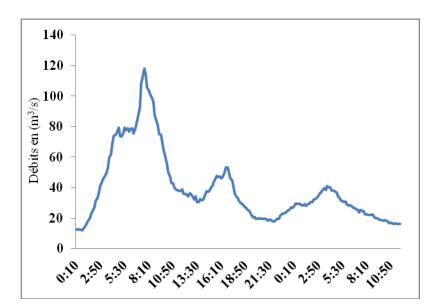


Tableau 36: Caractéristiques de la crue du 22 Novembre 2014

Caractéristiques de la crue		
<b>Date début</b> 22/11/2014 à 00h10		
Date fin	23/11/2014 à 11h50	
Débit de pointe (m³/s)	118,07	
Débit max moyen (m³/s)	39,28	
Débit base avant (m³/s)	12,655	
Débit base après (m³/s)	19,643	
Volume (m <sup>3</sup> )	2899278,13	
Temps de base (H)	20h30min	
Temps de montée (H)	7h10min	
Coefficient de pointe	3	

Figure 56: Hydrogramme de la crue du 22 Novembre 2014.

La figure 56 et le tableau 36 montrent que la montée des eaux s'est faite en 7h10 min.

Le débit est passé, de 12.65m<sup>3</sup>/s avant la crue à 118.07m<sup>3</sup>/s, elle a duré environ 20h30 min c'est une crue complexe avec plusieurs pics.

## \* La crue du 22 Aout 2016.

Figure 57 : Hydrogramme de la crue du 22 Aout 2016.

Tableau 37 : Caractéristiques de la crue du 22 Aout 2016.

Caractéristiques de la crue		
<b>Date début</b> 22/08/2016 à 15h		
Date fin	22/08/2016 à 22h40	
Débit de pointe (m3/s)	21,18	
Débit max moyen (m3/s)	6,23	
Débit base avant (m3/s)	2,88	
Débit base après (m3/s)	2,79	
Volume m3 ?(10^6)	41151,52	
Temps de base (H)	1h50min	
Temps de montée (H)	40min	
Coefficient de pointe	3,39	

La figure 57 et le tableau 37 montrent que la montée des eaux s'est faite en 40 min.

Le débit est passé, de 2.88m<sup>3</sup>/s avant la crue à 21.18m<sup>3</sup>/s, elle a duré environ 1h50 min c'est une crue simple avec un seul pic.

## \* La crue du 27 Novembre 2016

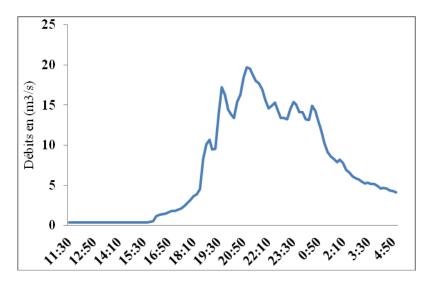


Tableau 38 : Caractéristiques de la crue du 27 Novembre 2016.

Caractéristiques de la crue		
Date début	27/11/2016 à 11h30	
Date fin	28/11/2016 à 05h00	
Débit de pointe (m3/s)	19,67	
Débit max moyen (m3/s)	10,9	
Débit base avant (m3/s)	1,81	
Débit base après (m3/s)	4,08	
Volume m3	470884,51	
Temps de base (H)	12h	
Temps de montée (H)	4h	
Coefficient de pointe	1,80	

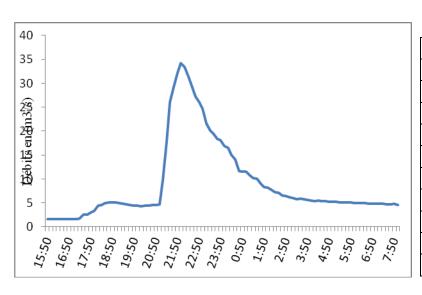
Figure 58: Hydrogramme de la crue du 27 Novembre 2016

La figure 58 et le tableau 38 montrent que la montée des eaux s'est faite en 4h.

Le débit est passé, de 1.81m<sup>3</sup>/s avant la crue à 19.67m<sup>3</sup>/s, elle a duré environ 12h c'est une crue complexe avec plusieurs hausses et plusieurs baisses.

## \* La crue du 16 Décembre 2016

Tableau 39 : Caractéristiques de la crue du 16 Décembre 2016.



Caractéristiques de la crue		
Date début	16/12/2016 à 15h50	
Date fin	17/12/2016 à 08h00	
Débit de pointe (m3/s)	34,25	
Débit max moyen (m3/s)	10,07	
Débit base avant (m3/s)	3,39	
Débit base après (m3/s)	4,61	
Volume m3	163145,62	
Temps de base (H)	4h30min	
Temps de montée (H)	1h10min	
Coefficient de pointe	3,40	

Figure 59 : Hydrogramme de la crue du 16 Décembre 2016.

La figure 59 et le tableau 39 montrent que la montée des eaux s'est faite en 1h10 min.

Le débit est passé, de 3.39m³/s avant la crue à 34.25m³/s, elle a duré environ 4h30 min c'est une crue simple avec un seul pic.

#### I.2. les crues du Bassin versant Zat

- La crue du 24 Novembre 2011
- La crue du 18 Juin 2011
- La crue du 11 Avril 2012
- La crue du 21 Septembre 2014
- La crue du 09 Novembre 2014
- La crue du 20 et 21 Novembre 2014
- La crue du 22 et 23 Novembre 2014

## \* La crue du 24 Novembre 2011

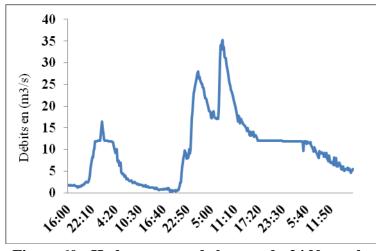


Tableau 40 : Caractéristiques de la crue du 24 Novembre 2011.

Caractéristiques de la crue	
Date début	22/11/2011 à 16h00
Date fin	25/11/2011 à 17h30
Débit de pointe (m³/s)	35,21
Débit max moyen (m³/s)	10,11
Débit base avant (m³/s)	2,03
Débit base après (m³/s)	5,25
Volume (m <sup>3</sup> )	728073,85
Temps de base (H)	20h
Temps de montée (H)	11h10min
Coefficient de pointe	3,48

Figure 60 : Hydrogramme de la crue du 24 Novembre 2011.

La figure 60 et le tableau 40 montrent que la montée des eaux s'est faite en 11 h10 min.

Le débit, à Taferiat, est passé de 2,03 m³/s avant la crue à 35.21 m³/s, la crue a duré environ 20 heures c'est une crue multi-pics.

## \* La crue du 18 Juin 2011

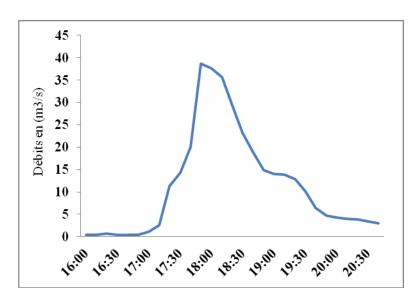


Tableau 41 : Caractéristiques de la crue du 18 Juin 2011

Caractéristiques de la crue		
Date début	18/06/2011 à 16h00	
Date fin	18/06/2011 à 21h10	
Débit de pointe (m³/s)	38,67	
Débit max moyen (m³/s)	14,25	
Débit base avant (m³/s)	1,17	
Débit base après (m³/s)	4,66	
Volume (m <sup>3</sup> )	188224,53	
Temps de base (H)	3h40	
Temps de montée (H)	50min	
Coefficient de pointe	2,71	

Figure 61 : Hydrogramme de la crue du 18 Juin 2011

La figure 61 et le tableau 41 montrent que la montée des eaux s'est faite en 50 min.

Le débit, à Taferiat, est passé de 1,17 m<sup>3</sup>/s avant la crue à 14.25 m<sup>3</sup>/s, la crue a duré environ 3h 40 min c'est une crue simple à un seule pic.

#### \* La crue du 13 Avril 2012

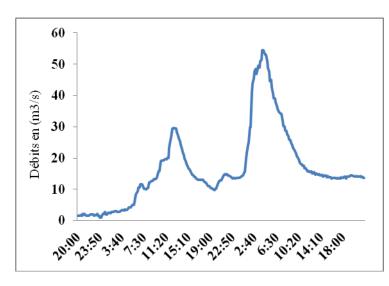


Tableau 42 : Caractéristiques de la crue du 13 Avril 2012

Caractéristiques de la crue	
Date début	11/04/2012 à 20h00
Date fin	13/04/2012 à 21h40
Débit de pointe (m³/s)	54,52
Débit max moyen (m³/s)	19,74
Débit base avant (m³/s)	4,11
Débit base après (m³/s)	15,78
Volume m <sup>3</sup>	2204005,48
Temps de base (H)	1j7h (31h)
Temps de montée (H)	22h40min
Coefficient de pointe	2,76

Figure 62 : Hydrogramme de la crue du 13 Avril 2012.

La figure 69 et le tableau 42 montrent que la montée des eaux s'est faite en 22h40 min.

Le débit, à Taferiat, est passé de 4,11 m³/s avant la crue à 54.52 m³/s, la crue a duré environ 1jour 7h autrement dit 31h c'est une crue a deux pics.

## \* La crue du 21 Septembre 2014

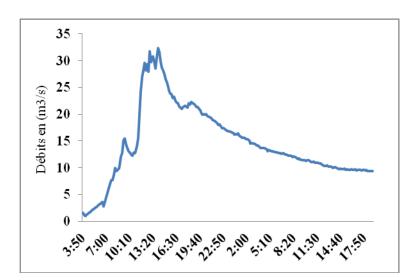


Tableau 43 : Caractéristiques de la crue du 21 Septembre 2014

Caractéristiques de la crue	
Date début	21/09/2014 à 03h50
Date fin	22/09/2014 à 19h00
Débit de pointe (m³/s)	32,36
Débit max moyen (m³/s)	14,54
Débit base avant (m³/s)	3,28
Débit base après (m³/s)	12,71
Volume (m <sup>3</sup> )	1046975,70
Temps de base (H)	20h
Temps de montée (H)	8h
Coefficient de pointe	2,22

Figure 63: Hydrogramme de la crue du 21 Septembre 2014

La figure 63 et le tableau 43 montrent que la montée des eaux s'est faite en 8h.

Le débit, à Taferiat, est passé de 3,28 m³/s avant la crue à 32.36 m³/s, la crue a duré environ 20h c'est une crue simple a un pic.

## \* La crue du 09 Novembre 2014

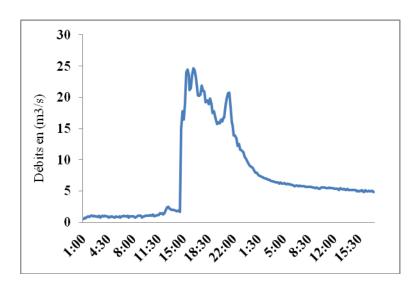


Tableau 44 : Caractéristiques de la crue du 09 Novembre 2014

Caractéristiques de la crue		
Date début	09/11/2014 à 01h00	
Date fin	10/11/2014 à 17h30	
Débit de pointe (m³/s)	24,61	
Débit max moyen (m³/s)	9,32	
Débit base avant (m³/s)	1,74	
Débit base après (m³/s)	7,59	
Volume (m <sup>3</sup> )	369111,37	
Temps de base (H)	11h	
Temps de montée (H)	2h10min	
Coefficient de pointe	2,64	

Figure 64: Hydrogramme de la crue du 09 Novembre 2014

La figure 64 et le tableau 44 montrent que la montée des eaux s'est faite en 2h10min.

Le débit, à Taferiat, est passé de 1,74 m³/s avant la crue à 24.61 m³/s, la crue a duré environ 11h.

## \* La crue du 20 et 21 Novembre 2014

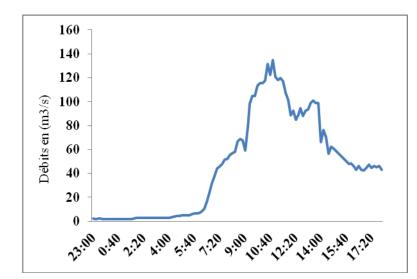


Tableau 45 : Caractéristiques de la crue du 20 et 21 Novembre 2014

Caractéristiques de la crue		
Date début	20/11/2014 à 23h00	
Date fin	21/11/2014 à 18h00	
Débit de pointe (m³/s)	134,64	
Débit max moyen (m³/s)	61,24	
Débit base avant (m³/s)	8,34	
Débit base après (m³/s)	42,82	
Volume (m <sup>3</sup> )	1763795,52	
Temps de base (H)	8h	
Temps de montée (H)	4h20min	
Coefficient de pointe	2,19	

Figure 65: Hydrogramme de la crue du 20 et 21 Novembre 2014

La figure 65 et le tableau 45 montrent que la montée des eaux s'est faite en 4h20min.

Le débit, à Taferiat, est passé de 8,34 m³/s avant la crue à 134.64m³/s, la crue a duré environ 8h c'est une crue a deux pics, et elle a continué dans le temps pendant les deux jours suivants.

#### \* La crue du 22 et 23 Novembre



Tableau 46 : Caractéristiques de la crue du 22 et 23 Novembre 2014

Caractéristiques de la crue		
Date début	22/11/2014 à 15h00	
Date fin	23/11/2014 à 12h00	
Débit de pointe (m³/s)	77,81	
Débit max moyen (m <sup>3</sup> /s)	37,27	
Débit base avant (m³/s)	16,67	
Débit base après (m³/s)	30,42	
Volume (m <sup>3</sup> )	1789398,99	
Temps de base (H)	13h20min	
Temps de montée (H)	9h20min	
Coefficient de pointe	2,08	

Figure 66: Hydrogramme de la crue du 22 et 23 Novembre 2014

La figure 66 et le tableau 46 montrent que la montée des eaux s'est faite en 9h20min.

Le débit, à Taferiat, est passé de 16,67 m<sup>3</sup>/s avant la crue à 77.81m<sup>3</sup>/s, la crue a duré environ 13h20min c'est une crue à multi-pics c'est la suite de la crues de (20-21) et (21-22)/Novembre 2014.

Chapitre V : Modélisation hydrologique évènementielle des crues du Ghdat et du Zat (HEC-HMS). Les problèmes liés à la gestion des bassins versants nécessitent une indentification ainsi qu'une résolution des ambigüités qui touchant les aménagements de grand calibre tel que les barrages et de ponts.

La prévision contre les risques d'inondations nécessite une parfaite connaissance des débits extrêmes et des périodes d'étiages des zone menacer.

Dans cette vision, l'utilisation d'un modèle de calcul des débits et d'estimation des quantités d'eaux reçus à l'échelle d'un bassin versant devient indispensable.

Ce chapitre est consacré à l'explication de la modélisation évènementielle dans les bassins versants du Ghdat et du Zat, par le biais de la plate-forme HEC-HMS.

## I. Présentation du logiciel HEC-HMS

HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System) est un modèle d'hydrologie développé par les ingénieurs de l'armée des Etats Unis pour modéliser les phénomènes hydrologiques dans les bassins versants.

Ce modèle hydrologique est à la fois déterministe et conceptuel a pendant longtemps été un modèle essentiellement appliqué à la simulation d'un événement donné. Les versions récentes permettent de simuler en continu sur une longue période grâce à l'intégration de modules de calculs des différents processus d'évapotranspiration, d'humidité du sol et d'accumulation/ fonte de neige.

Vu que c'est un modèle distribué qui permet alors de subdiviser un bassin versant en plusieurs sousbassins, qui sont considérés comme ayant chacun des caractéristiques homogènes.

Il est particulièrement bien adapté pour simuler le comportement hydrologique des bassins versants non urbanisés, et permet également de simuler et d'incorporer des réservoirs et des dérivations.

Il comprend une interface graphique conviviale, et a des capacités pour la manipulation des données, résultats et graphiques, un système spécifique de gestion et de stockage de données (DSS View), ainsi que des possibilités d'affichage et d'impression de résultats, et des outils de gestion.

Ce logiciel permet de calculer des hydrogrammes de crues pour plusieurs objectifs à savoir les études de drainage urbain, la prévision des crues, la conception des réservoirs et la réduction des effets des inondations.

Les modules modèles développés sous HEC-HMS permettent la prise en charge des quatre processus hydrologiques essentiels : Modèles pour le calcul des précipitations, du volume de ruissellement, du ruissellement direct et des écoulements souterrains.

Il est théoriquement adapté à n'importe quel type de climat notamment à celui des zones arides, et a la capacité de simuler aussi bien les pertes, l'écoulement de surface, l'écoulement souterrain et l'écoulement fluvial.

- La fiabilité des résultats obtenus lors de son application à des bassins versants américains nous a

encouragés à appliquer ce modèle à des bassins versants méditerranéens.

- L'avantage de ce modèle est la prise en compte de la complexité géographique des bassins

versants, et ce, par application de ce modèle dans un système intégré Télédétection-SIG-Modèle

hydrologique.

(http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/).

II. Préparation du modèle HEC-HMS

La modélisation pluie-débit événementielle des crues nécessite de considérer plusieurs composantes

de l'écoulement:

- Le débit de base,

- Les pertes et le transfert de l'écoulement des versants vers l'exutoire.

II.1. Débit de base : modèle de Récession

Le débit de base est la composante du débit qui retourne dans le cours d'eau depuis le stockage

souterrain et les aquifères.

La connaissance du débit de base est importante pour modéliser la récession de l'hydrogramme

après la pointe de débit, ainsi que pour estimer le volume de la crue.

HEC-HMS inclus trois modèles pour le débit de base :

- Le modèle contant mensuel est une approche très simple mais qui n'est pas adaptée au

contexte semi-aride, des variations importantes des conditions de saturation des bassins

peuvent être observées au cours d'un même mois.

- La méthode du réservoir linéaire peut être utilisée seulement avec un modèle de pertes de

type SMA continu.

- La méthode de récession est une approche qui utilise un modèle de récession exponentielle

du débit de base. Cette approche couramment utilisée est retenue dans le cadre de ce projet,

elle est adaptée pour les bassins où le volume des crues est fortement influencé par les

évènements pluvieux (USACE, 2010).

Dans le modèle de récession exponentielle, le débit de base Bt au pas de temps t est défini par :

$$\mathbf{B}_{t} = \mathbf{B}_{i} \mathbf{R}_{c}^{t}$$

Avec

Bi : Débit de base initial au temps t0;

Rc : Constante de décroissance exponentielle.

Les paramètres de la récession sont :

- Le débit de base initial, Bi (m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>);

- La constante de récession Rc ([0-1]);

- Le seuil, Td ([0-1]).

88

Le débit de base est le débit initial au début de la simulation. La constante de récession décrit le taux de décroissance du débit de base. C'est la part du débit de base au temps t par rapport au temps t<sup>-1</sup>. Le seuil est le point de l'hydrographe où le débit de base remplace le débit de ruissellement direct, il est exprimé en proportion du débit de pointe de la crue (USACE, 2010).

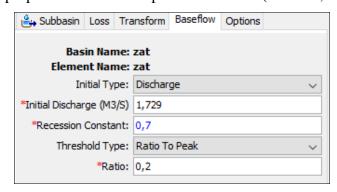


Figure 67 : Paramètres introduits dans le modèle de récession

#### **II.2. Fonction de production : SCS-Curve Number**

Dans le modèle HEC-HMS, la superficie du bassin peut être divisée en zones imperméables et en zones perméables. Dans les zones imperméables, l'eau s'écoule sans interception, évaporation, transpiration ou infiltration.

En zones perméables, l'écoulement est sujet à des pertes, HEC-HMS dispose de différentes méthodes pour les estimer : pertes initiales et constantes, déficit initial et constant, Green et Ampt, SCS et un modèle continu de l'humidité des sols SMA (USACE, 2001).

Le modèle SCS-CN estime les précipitations excédentaires en fonction des précipitations cumulées, de la couverture et de l'humidité initiale du sol. Pour cela est utilisée l'équation suivante :

$$Pe = \frac{(P - Ia)^2}{P - Ia + S}$$

Avec

P e : Excès de précipitations ;

P : Total des précipitations accumulées au temps t ;

I a : Pertes initiales ;

S: Potentiel maximum de rétention.

Nous avons par ailleurs la relation empirique ci-dessous, qui a étais développée à partir d'une analyse menée sur un ensemble de petits bassins versants expérimentaux qui donne I a (Pertes initiales) en fonction de S (Potentiel maximum de rétention).

$$I a = 0.2 S$$

P e devient alors comme suite

$$Pe = \frac{(P - 0.2 S)^2}{P + 0.8 S}$$

Le potentiel de rétention S, et les caractéristiques du bassin versant sont reliées par l'intermédiaire du nombre CN par :

$$S = \frac{254400 - 254 \text{ CN}}{\text{CN}}$$

Sur HEC-HMS on introduit les paramètres suivants :

- Numéro de courbe CN;
- Impérmeabilité en %.

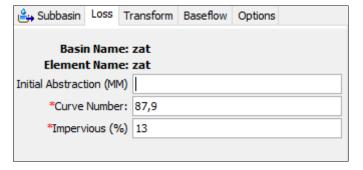


Figure 68 : Paramètres introduits dans le modèle SCS-CN

## II.3. Fonction de transfert : Clark Unit Hydrograph

Une fois que les précipitations en excès sont connues, elles sont transformées en ruissèlement direct. La plateforme HEC-HMS dispose de plusieurs fonctions de transfert : hydrogrammes unitaires de Clark, Snyder et SCS, hydrogrammes définis par l'utilisateur, transformation de Modclark et onde cinématique.

Parmi ces méthodes, l'hydrogramme unitaire de Clark est fréquemment utilisé pour une modélisation événementielle.

Cette méthode est particulièrement efficace pour reproduire des hydrogrammes complexes, dans des bassins présentant une topographie et une occupation des sols variés (Sabol, 1988).

La méthode de l'hydrogramme unitaire de Clark représente 2 processus :

- La translation: est basée sur un histogramme synthétique temps-surface avec un temps de concentration Tc. L'histogramme représente la superficie du bassin qui contribue à l'écoulement à l'exutoire en fonction du temps.
- **L'atténuation**: est modélisée par un réservoir linéaire, l'atténuation est modélisée par un réservoir linéaire. Le réservoir représente le stock à l'échelle du bassin, St.

Le débit sortant moyen du réservoir pendant une période t est donné par :

$$\mathbf{O}_{t} = \mathbf{C}_{A} \mathbf{I}_{t} + \mathbf{C}_{B} \mathbf{O}_{t-1}$$

Avec

 $I_t$ : Débit entrant dans le réservoir au temps t,  $C_A$ ,  $C_B$ , des coefficients calculés avec la relation :

$$CA = \frac{\Delta t}{St + 0.5 \Delta t}$$

Et

$$C_B = 1 - C_A$$

 $\Delta t$  est le pas de temps de calcul, ici 1 heure.

Les paramètres requis par la méthode de Clark sont donc :

- Le temps de concentration, Tc (heures)
- Le coefficient de stockage, St (heures)

Ces deux paramètres peuvent être estimés par calibration lorsque des enregistrements de pluie et débit sont disponibles.

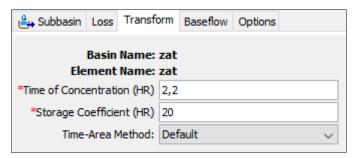


Figure 69 : Paramètres de l'Hydrogramme de Clark

#### II.4. Calibration du modèle

La calibration est un processus systématique d'ajustement des paramètres du modèle jusqu'à ce qu'il reproduise fidèlement les données observées. Klemeš (1986) a proposé un cadre conceptuel pour l'essai de modèles hydrologiques basé sur trois prémisses:

- Le modèle hydrologique est destiné à une application opérationnelle, et non pas pour la recherche scientifique (mais par exemple pour la planification, la conception d'ouvrages).
- Les critères pour l'évaluation de la performance du modèle sont définis par rapport aux tâches opérationnelles.
- Les critères sont calculés en comparant les estimations du modèle avec les observations.

La mesure quantitative du degré d'ajustement est donnée par la fonction objective.

Dans la modélisation pluie-débit, cette fonction mesure la différence entre un hydrogramme observé et celui simulé par le modèle.

Différentes fonctions objectives sont disponibles dans HECHMS, la somme du carré des résidus, l'erreur en pourcentage sur le volume ou le débit maximum.

La fonction par défaut, la racine de l'erreur quadratique moyenne pondérée pour les fortes valeurs (peak-weighted root mean square error) présente l'avantage de considérer à la fois la magnitude et la synchronisation temporelle de la crue.

Elle utilise un facteur de pondération, qui donne plus de poids aux valeurs de débit supérieures à la moyenne des débits de l'épisode considéré.

$$PWRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{N} (Q_0 (t) - Q_M(t))^2 \frac{Q_0 (t) + Q_A}{{}_2Q_A}}{N}}$$

Et

$$\mathbf{Q} \mathbf{A} \frac{\mathbf{1}}{N} \sum_{t=1}^{N} \square \ Q \mathbf{0}$$
 (t)

Avec:

Q0: Débit observé;

QM : Débit simulé au pas de temps t ;

QA: Débit moyen observé.

Le processus de calibration vise à trouver les paramètres optimaux pour minimiser la fonction objective.

Deux méthodes de calibration automatiques sont disponibles dans HECHMS :

- La méthode du gradient univariée, qui permet d'ajuster un paramètre à la fois en tenant les autres constants.
- La méthode de Nelder et Mead, qui utilise l'approche du Simplex pour optimiser tous les paramètres simultanément.
- II.5. Coefficients d'Evaluations de la qualité des simulations

#### a. Critère de Nash-Sutcliffe

C'est un critère de référence pour les hydrologues. Une simulation est souvent jugée satisfaisante pour un critère supérieur à 80%.

Il s'exprime par l'équation suivante :

$$Nash = 1 - \frac{((Qobs - Q calc)^2)}{((Qobs - Q m)^2)}$$

Avec

Qobs: Débits observés;

Q<sub>calc</sub>: Débits simulés ;

Q<sub>m</sub>: Moyenne des débits observés.

## III. Application du modèle HEC-HMS aux bassins versants du Ghdat et Zat.

Notre étude s'articule sur les événements des crues qu'a subit les bassins versant du Ghdat et du Zat.

Les données de mesure des précipitations et des débits ont été récupérées auprès de l'Agence du Bassin Hydraulique du Tensift (ABHT).

Elles sont à pas de temps instantané (dix minutes). Les stations hydro-pluviométriques ayant subi le traitement sont aux nombres de deux, la station Sidi rahal à l'aval du bassin versant de Ghdat, et la station Taferiat à l'aval du bassin versant du Zat.

Tandis qu'une les données pluviométriques se situent uniquement à l'amont du bassin versant du Ghdat plus précisément au niveau des stations Adrar et Tijdant.

L'extraction manuel des données a permis de relever 15 épisodes aux niveaux des deux stations Sidi rahal et Taferiat.

L'importation des données nécessaire à la simulation consiste à les mettre sous le format approprié accepté par HEC- HMS.

Le format de données accepté par HEC-HMS est de type DSS pour les enregistrer dans ce format adéquat, nous avons utilisé le programme HEC-DSSVue.

#### III.1. Caractérisation des événements utilisés pour la modélisation

Les données de précipitations et de débits sont disponibles pour plusieurs évènements, 8 épisodes ont était traiter à Sidi rahal et 7 autres à Taferiat entre les années 2011 et 2016, la grande majorité de ces évènements en eu lieu dans la période hivernale entre octobre et février.

Tableau 47 : Numérotation des événements, relatifes aux stations Sidi rahal et Taferiat, a pas de temps instantané.

Nom de la station	ID	Fonction	Episodes	Evénement
	1	Calage	18/06/2011	18/06/11 à 15h00, 18/06/11 à 19h30
=	2	Calage	05/04/2013	05/04/13 à 02h40, 06/04/13 à 13h00
aha	3	Calage	18/09/2013	17/09/13 à 22h30, 18/09/13 à 04h00
idi	4	Calage	21/11/2014	20/11/14 à 19h10, 21/11/14 à 23h50
Station Sidi rahal	5	Calage	22/11/2014	22/11/14 à 00h10, 21/11/14 à 11h50
tatic	6	Calage	22/08/2016	22/08/16 à 15h20, 22/08/16 à 22h40
Š	7	Calage	27/11/2016	27/11/16 à 11h30, 28/11/16 à 05h00
	8	Calage	16/12/2016	16/12/16 à 15h50, 17/12/16 à 8h00
	1	Calage	24/11/2011	22/11/11 à 16h00, 25/11/11 à 17h30
iat	2	Calage	18/06/2011	18/06/11 à 16h00, 18/06/11 à 21h10
afer	3	Calage	13/04/2012	11/04/12 à 20h00, 13/04/12 à 21h40
n Te	4	Calage	21/09/2014	21/09/14 à 03h50, 22/09/14 à 19h00
Station Taferiat	5	Calage	09/11/2014	09/11/14 à 01h00, 10/11/14 à 17h30
	6	Calage	(20-21)/11/2014	20/11/14 à 23h00, 21/11/214 à 18h00
	7	Calage	(22-23)/11/2014	22/11/14 à 15h00, 23/11/14 à 12h00

Les précipitations sont interpolées par la méthode de l'inverse distance afin de produire une pluie moyenne à l'échelle des bassins versant de Ghdat et du Zat.

## III.2. Calage du modèle

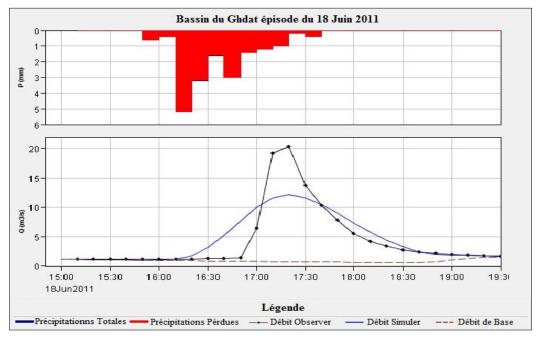
Le modèle choisi pour mener les simulations est la méthode SCS-CN pour le modèle d'infiltration, la méthode de l'hydrogramme unitaire de Clark pour le modèle du ruissellement et le modèle de récession pour le débit de base.

#### III.2.1. Calage des évènements de la station Sidi rahal.

Sidi rahal est une station hydro-pluviométriques située à l'exutoire du bassin versant Ghdat, les données qui nous était fournis par l'ABHT ont étaient extrait de la base de donnée de spack, qui est doté d'un capteur qui permet de mesuré la hauteur d'eau, cette dernière commet par moments des erreurs ou peut même cessé de fonctionner lors des évènements intense, c'est pour cela que nous avons complété nos données par les données de deux station située à l'amont du bassin versant du Ghdat qui son Adrar et Tijdant par contre on ne possède que les données des précipitations de ces stations vue qu'elle procèdent uniquement un pluviomètre.



## Episode du 18 Juin 2011

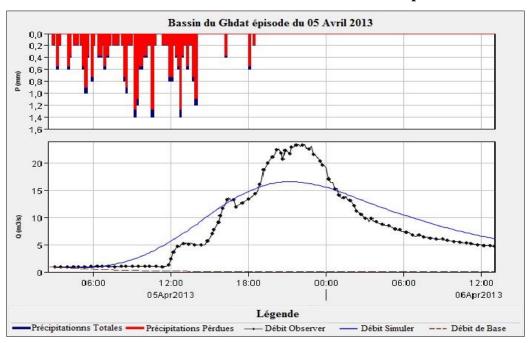


Paramètres du calage		
CN	35	
IMP	0,6	
TC	1,1	
St	0,4	
CR	0,01	
RATIO	0,16	
Qi	1,17	
Q max	20,40	
V obs	71.4	
V sim	73.4	
Nash	0,728	
Nash%	72,8	

Figure 70 : Hydrogramme et calage de la crue du18 Juin 2011.

D'après la figure 70 on remarque que la courbe des débits simulés reproduit assez bien la monté de la crue, et parfaitement bien la descente, mais n'atteint pas le débit de pointe, par contre la reproduction des volumes a bien été faite, ceci est dû à une perturbation pluvieuse de l'amont vers l'aval, vue que le pic pluviométrique serai produit en amont du bassin versant avant celui de Sidi rahal situé en aval, un coefficient Nash de 72.8%.

#### Episode du 05 Avril 2013



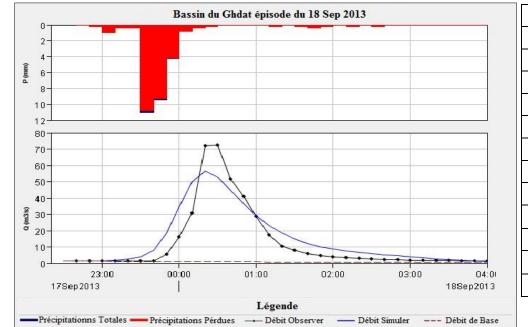
Paramètres du calage	
CN	55
IMP	9,4
TC	12
St	13
CR	0,01
RATIO	0,02
Qi	0,938
Q max	23,492
V obs	1037.9
V sim	1123.2
Nash	0,821
Nash %	82,1

Figure 71 : Hydrogramme et calage de la crue du 05 Avril 2013.

La figure 71 montre également que la courbe de débits simulés reproduit assez bien la montée et la descente de la crue. Bien que le débit de pointe n'a pas été atteint les volumes ont été bien reproduits, et globalement l'allure des deux courbes montrent un calage correct avec un coefficient Nash de 82.1%.

## c.

b.



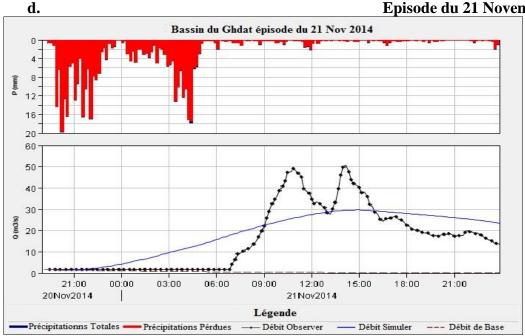
Episode du 18 Septembre 2013

Paramètres du calage		
CN	60	
IMP	1,7	
TC	0,7	
St	0,7	
CR	0,01	
RATIO	0,01	
Qi	1,353	
Q max	72,341	
V obs	242.2	
V sim	285.8	
Nash	0,848	
Nash %	84,8	

Figure 72 : Hydrogramme et calage de la crue du 18 Septembre 2013.

Pour cet évènement de septembre 2013, la figure 72 montre également que la courbe de débit simulés reproduit bien la monté et la descente de la crue. Là aussi le volume ruisselé a été bien reconstitué ce qui a donné un Nash important de l'ordre de 84.8%.





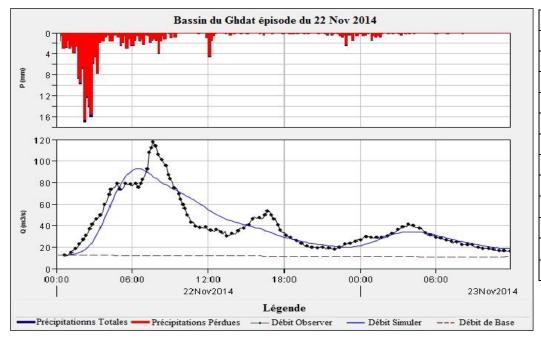
Paramètres du calage		
CN	13,49	
IMP	0,67	
TC	11	
CS	10	
CR	0,1	
RATIO	0,5	
Qi	1,64	
Q max	50,72	
V obs	1684.1	
V sim	1896.5	
Nash	0,634	
Nash%	63,4	

Figure 73 : Hydrogramme et calage de la crue du 21 Novembre 2014.

e.

La figure 73 montre que la courbe des débits simulés reproduit faiblement la monté et la descente de la crue, par ailleurs l'aspect des deux pics des débits de pointes n'ont pas été atteints, le décalage temporelle est trop élevé, malgré que la simulation des volumes semble correcte. Le décalage dans le temps est très élever, cela peut être expliqué par l'occurrence d'une averse précoce pour le modèle. Celle-ci à balayer le bassin versant de l'aval vers l'amont en arrosant d'abord l'exutoire, dans ce cas le coefficient Nash est de 63.4%.

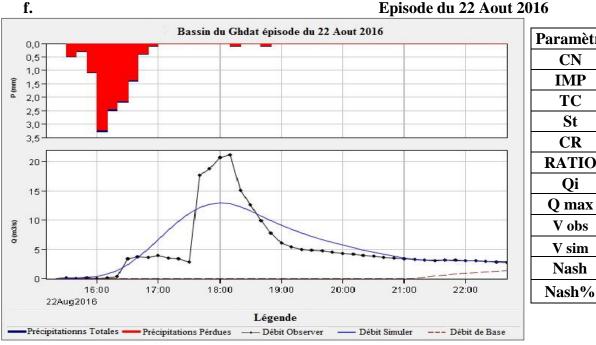
## Episode du 22 Novembre 2014



Paramètres du calage		
CN	23	
IMP	2,8	
TC	4,4	
St	4,2	
CR	0,9	
RATIO	0,2	
Qi	12,48	
Q max	118,00	
V obs	5059.2	
V sim	5003	
Nash	0,82	
Nash%	82	

Figure 74: Hydrogramme et calage de la crue du 22 Novembre 2014.

La figure 74 montre que la courbe des débits simulés reproduit bien l'hydrogramme que ce soit pour la montée ou la décrue, la simulation semble concordante avec le déroulement temporel des débits observés le coefficient Nash est de 82%.



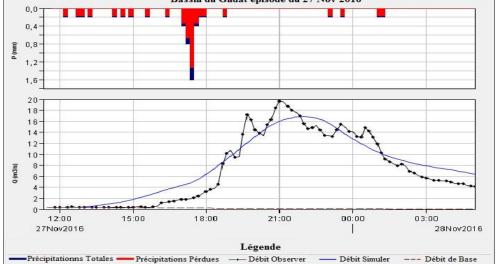
Paramètres du calage **CN** 38 **IMP** 2,3 TC 2 St 2 **CR** 0,2 **RATIO** 0,25 Qi 0,10 Q max 21,18 142 V obs 151.9 V sim Nash 0.68

68,7

Figure 75 : Hydrogramme et calage de la crue du 22 Aout 2016.

La figure 75 montre que la courbe des débits simulés reproduit passablement la monté et la descente de la crue, par contre le débit de pointe n'a pas été atteint, vue que la hauteur de pluie enregistrée a la station Sidi rahal ne reflète pas ce qui est tomber réellement sur tout le bassin versant ou la hauteur serait plus importante. C'est pour cela que le débit observé est plus important que le débit simulé. Le coefficient Nash est de 68.7%.



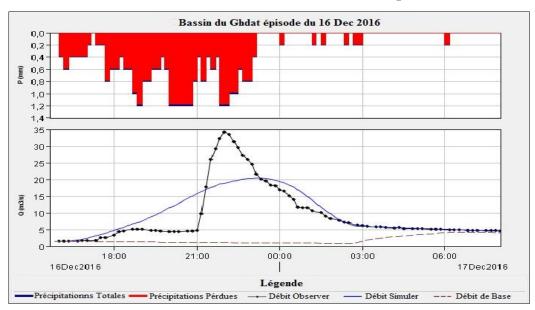


Paramètres du calage		
CN	60	
IMP	17	
TC	5,7	
St	4,1	
CR	0,1	
RATIO	0,1	
Qi	0,39	
Q max	19,67	
V obs	455.2	
V sim	500.6	
Nash	0,902	
Nash%	90,2	

Figure 76: Hydrogramme et calage de la crue du 27 Novembre 2016.

La figure 76 montre un calage satisfaisant, l'hydrogramme et globalement reproduit, le débit de pointe est presque atteint, la crue est très bien calée vue que le coefficient Nash est de 90.2%.

## Episode du 16 Décembre 2016



Paramètres du calage			
CN	55		
IMP	2,7		
TC	2,8		
St	1,4		
CR	0,25		
RATIO	0,3		
Qi	1,549		
Q max	34,254		
V obs	526.3		
V sim	556.3		
Nash	0,668		
Nash%	66,8		
·	·		

Figure 77 : Hydrogramme et calage de la crue du 16 Décembre 2016.

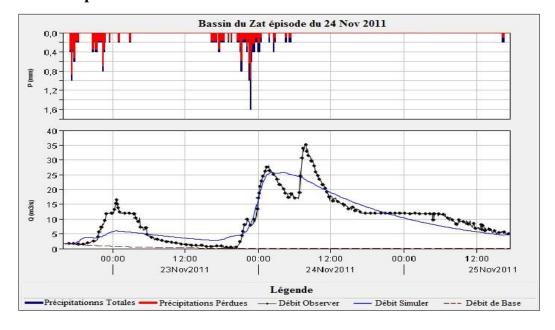
La figure 77 montre que la courbe des débits simulés reproduit assez bien la montée et très bien la descente de la crue. L'averse n'est pas concentrée dans le temps puisque cette dernière est étalée sur une dizaine d'heure c'est pourquoi l'hydrogramme simulé, est aussi étalé dans le temps avec des volumes un peu sous-estimé. Le coefficient Nash est de 66.8%.

#### III.2.2. Calage des évènements de Taferiat.

h.

Taferiat est une station hydropluviométrique située à l'exutoire du bassin versant Zat, les données qui nous étaient fournis par l'ABHT ont été extraits de la base de données de SPAK. C'est un capteur qui permet de mesurer la hauteur d'eau, cette dernière commet par moments des erreurs ou peut même cesser de fonctionner lors des évènements intenses.

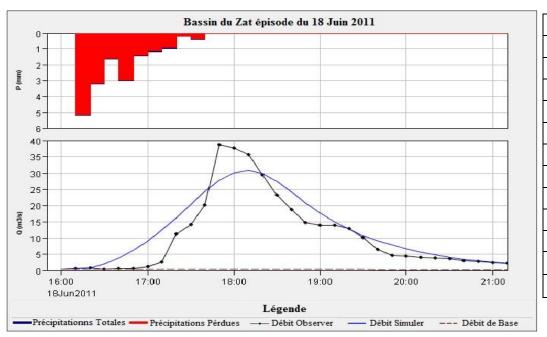
## a. Episode du 24 Novembre 2011



Paramètres du calage	
CN	87,9
IMP	13
TC	2,2
St	20
CR	0,1
RATIO	0,2
Qi	1,72
Q max	35,2
V obs	2679.6
V sim	2563.8
Nash	0,801
Nash %	80,1

Figure 78 : Hydrogramme et calage de la crue du 24 Novembre 2011

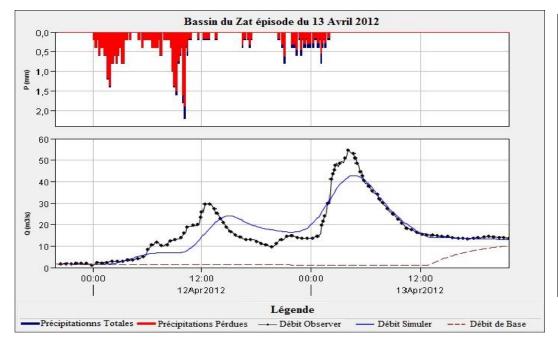
## b. Episode du 18 Juin 2011



Paramètres du calage		
CN	79	
%IMP	1,2	
TC	1,2	
CS	1	
CR	0,01	
RATIO	0,02	
Qi	0,40	
Qm	38,67	
V obs	202	
V sim	234.7	
Nash	0,85	
% Nash	85,2	

Figure 79 : Hydrogramme et calage de la crue du 18 Juin 2011.

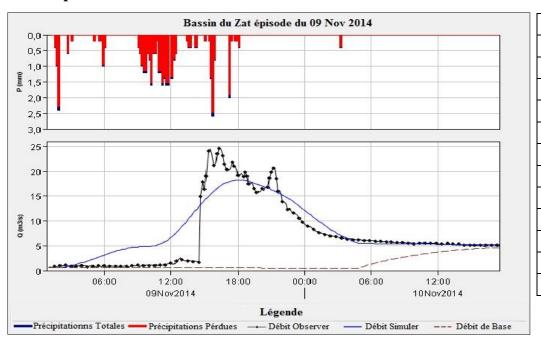
## c. Episode du 13 Avril 2012



Paramètres du calage		
CN	70	
IMP	2,5	
TC	5,5	
St	6	
CR	0,8	
RATIO	0,33	
Qi	1,55	
Q max	54,5	
V obs	2973.7	
V sim	2898.1	
Nash	0,831	
Nash %	83,1	

Figure 80 : Hydrogramme et calage de la crue du 13 Avril 2012

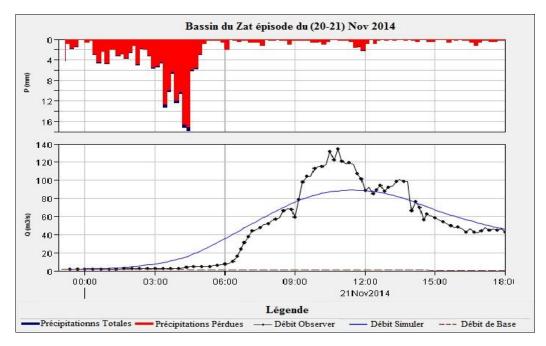
## d. Episode du 09 Novembre 2014



Paramètres du calage		
CN	50	
IMP	4,9	
TC	7,5	
St	5,5	
CR	0,9	
RATIO	0,3	
Qi	0,577	
Q max	24,612	
V obs	1031.7	
V sim	1154.6	
Nash	0,775	
Nash%	77,5	

Figure 81 : Hydrogramme et calage de la crue du 09 Novembre 2014.

## e. Episode du (20-21) Novembre 2014.



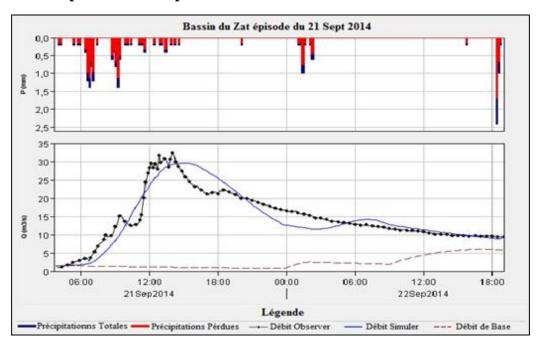
Paramètres du calage		
CN	20	
IMP	4	
TC	9,7	
St	5,8	
CR	0,2	
RATIO	0,3	
Qi	2,07	
Q max	134,6	
V obs	3149.1	
V sim	3253.3	
Nash	0,85	
Nash%	85,8	

Figure 82: Hydrogramme et calage de la crue du (20-21) Novembre 2014

- Interprétations des figures 78, 79, 80, 81 et 82.

Les figures ci-dessus montrent que les courbes des débits simulés reproduisent assez bien les montées et les descentes des crues. Bien que les débits de pointe n'aient pas été atteint les volumes ont été bien reproduits, et globalement l'allure des deux courbes montrent des calages corrects avec des coefficients Nash allant de 77.5 à 85.8%.

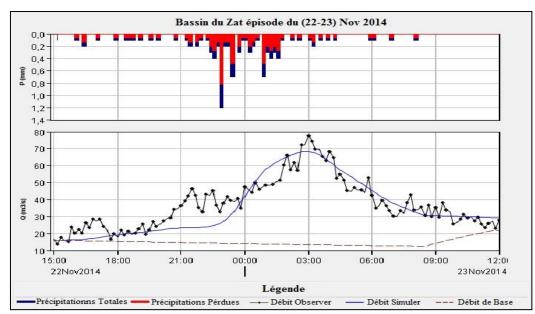
## f. Episode du 21 Septembre 2014



Paramètres du calage	
CN 80	
IMP	20
TC	7
St	6,7
CR	0,4
RATIO	0,43
Qi	1,58
Q max	32,4
V obs	2055.8
V sim	2024.7
Nash	0,85
Nash%	85,9

Figure 83 : Hydrogramme et calage de la crue du 21 Septembre 2014

## g. Episode du (22-23) Novembre 2014



Paramètres du calage	
CN	50
IMP	32
TC	2,5
St	3,3
CR	0,7
RATIO	0,45
Qi	16,07
Q max	77,8
V obs	2827.3
V sim	2692.7
Nash	0,736
Nash%	73,6

Figure 84 : Hydrogramme et calage de la crue du (22-23) Novembre 2014

- Interprétations des figures 83 et 84 :

Les évènements ci-dessus des figures 82 et 83 montrent des calages satisfaisants, les hydrogrammes sont globalement reproduit, le débit de pointe est presque atteint, les crues sont assez bien calée vue que le coefficient Nash varie de 73.6 à 85.9%.

#### III.3. Validation du modèle

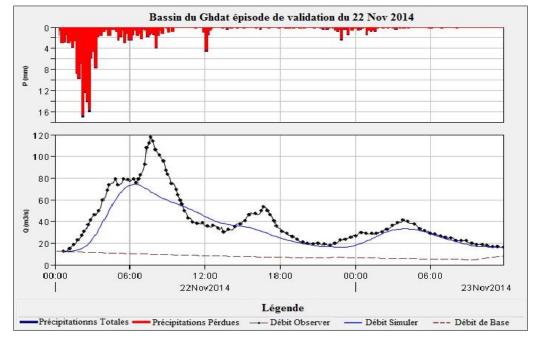
Cette étape consiste à vérifier la reproductibilité des résultats par le modèle et la représentativité des paramètres calés pour savoir la capacité du modèle à simuler les résultats. Son principe est de tester le modèle avec les paramètres obtenus (CN, Tc et St) au calage sur une série de données non utilisées dans la phase du calage.

Tableau 48 : Evénements utilisés pour la validation de modèle aux niveaux des stations de Sidi rahal et Taferiat

Noms des stations	ID	Fonction	Episodes	Evénement
Station Sidi rahal	5	validation	22/11/2014	22/11/14 à 00h10 ,21/11/14 à 11h50
Station Taferiat	3	validation	13/04/2012	11/04/12 à 20h00, 13/04/12 à 21h40

Afin de valider notre modèle, nous avons appliqué à la crue de l'épisode 5 de la station Sidi rahal, et a la crue de l'épisode 3 de la station Taferiat (Tableau 48) les paramètres CN, IMP, Tc, St, CR, et Ratio moyens.

- Station Sidi rahal



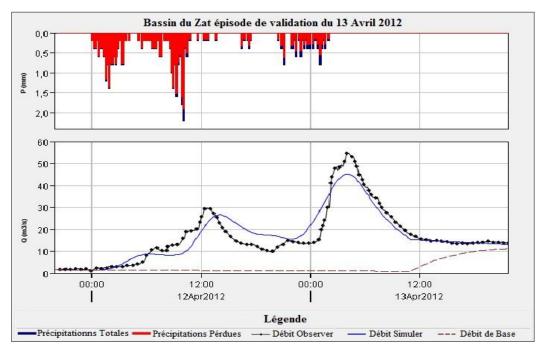
Paramètres moyens		
CN	23,83	
IMP	2,23	
TC	4,30	
St	4,15	
CR	0,45	
RATIO	0,23	

Figure 85 : Validation de l'épisode 5 et relation pluies – débits a la station Sidi rahal.

L'allure générale des deux courbes des débits simulé et observé est sensiblement la même.

D'après la (figure 85), il y a un lever décalage entre les mouvements de montée mais globalement l'hydrogramme semble reconstitué.

Station Taferiat



Paramètres	moyens
CN	69,48
IMP	3,15
TC	4,32
CS	5,46
CR	0,70
RATIO	0.34

Figure 86 : Validation de l'épisode 3 et relation pluies – débits a la station Taferiat.

La forme des deux courbes débits simulé et observé est sensiblement la même, on a remarqué que les deux hydrogrammes ont relativement la même allure, comme à Sidi rahal, on constate un léger décalage dans le temps de la premier montée. La décrue et le tarissement quant à eux sont bien simulés.

#### III.4. Evaluation de la qualité du modèle

Un modèle hydrologique est évalué par les critères d'évaluation de la qualité d'une simulation qui peuvent être parfois utilisé comme fonction objectif lors du calage du modèle, ou comme mesure d'évaluation de ses performances en validation.

Il n'existe pas de critère d'évaluation universel, dans notre étude, nous utilisons les critères numériques qui se basent sur le calcul de l'erreur du modèle, c'est-à-dire la distance (évaluée de différentes manières selon le critère utilisé) entre les débits observés et simulés.

Dans tout ce qui suit, nous évaluons nos simulations en validation par les critères de Nash et Sutcliffe (1970).

#### Critère de Nash-Sutcliffe

Pour mesurer le degré de fiabilité des simulations réalisées, nous procédons au calcul du critère de Nash pour les deux stations.

Le modèle élaboré avec les différentes paramètres CN, Tc et St calibrés pour chaque épisode, fournit des résultats, très satisfaisants et encourageants.

Le tableau ci-dessous représente les résultats de Nash pour les deux épisodes de validation au niveau de la station Sidi rahal et Taferiat.

Tableau 49 : Critère de Nash pour les deux épisodes de validation

Noms des stations	ID	Episodes	Nash %
Station Sidi rahal	5	22/11/2014	71,2
Station Taferiat	3	13/04/2012	87,3

On constate que les prouesses de validation sont presque semblables d'un épisode à l'autre.

Il semble que la simulation est satisfaisante puisque le critère de Nash des deux épisodes de validation varie entre 70 et 80%.

Cette conclusion peut être faite à la lumière des calages et des validations des simulations précédemment présentées,

Bien que nous ayons trouvé des contraintes aux niveaux des données pluviométriques et hydrométriques, nous concluons que les modèles élaborés peuvent reproduire de manière crédible les prévisions des prochaines crues.

## **Conclusion**

Les bassins versants du Ghdat et du Zat offrent un environnement climatique et morphologique favorable aux écoulements superficiels et à la naissance des crues brutales et violentes. Ils sont caractérisés par un couvert végétal peu dense, des terrains peu perméables, de basses altitudes, des bassins de formes allongées, un temps de concentration de cinq heures, et une assez forte densité du réseau hydrographique.

Les précipitations des bassins versants sont variables dans le temps et dans l'espace, avec des moyennes annuelles d'environ 390 à 650 mm en amont de la station Sidi rahal plus précisément a la station d'Adrar et Tijdant.

En aval des bassins versants du Ghdat et du Zat les précipitations moyennes annuelles sont d'un ordre respectif de 325 à 364 mm. La valeur annuelle maximale a été enregistrée pendant l'année 1995/96 aux niveaux des stations Sidi rahal et Taferiat d'un ordre respective de 648 et 913 mm, tandis que les années les plus sèche ont étaient enregistrés en 1992/93 à la station Sidi rahal et 1982/83 à la station de Taferiat avec des valeurs comprise entre 133 et 167mm. Les variations mensuelles montrent que la période pluvieuse s'étend d'octobre à mai avec presque 90 % du total pluviométrique.

Les débits sont irréguliers durant l'année, avec un maximum au mois du Mars pour la station de Sidi rahal et en Mars et Avril pour la station Taferiat, tandis que les cours d'eau sont quasiment à sec pendant les périodes estivales, le régime hydrologique de bassin versant de Taferiat à l'aval n'est pas exclusivement lié aux pluies mais aussi à des chutes nivales dans sa partie amont ce qui engendre une augmentation de débits pendant le printemps. Les débits moyens annuels aux exutoires des deux bassins versants varient de 1.58 m³/s à Sidi rahal a 2.67 m³/s à Taferiat.

L'analyse fréquentielle des précipitations et des débits maximaux annuels a un rôle très important dans l'estimation de risque d'apparition d'une crue donnée pour une période de retour. A cet effet, le logiciel **Hyfran Plus** nous a permis de constater que les lois de Gumbel et Exponentiel sont les plus adapté pour l'estimation des pluies maximales annuelles pour les stations de Sidi rahal et Taferiat et les lois de Weibull et Exponentiel sont les plus adapté l'estimation des débits maximums annuelle aux niveaux des deux stations.

Au terme de ce travail, nous nous sommes intéressés à la modélisation hydrologique des bassins versants du Ghdat et du Zat. Nous avons donc eu recours à plusieurs outils hydrologiques qui ont contribué à la réalisation de notre étude.

Le modèle hydrologique HEC-HMS a été choisi comme étant l'outil principal de la modélisation pluie-débit événementielle des crues. Ainsi, pour mener des simulations, nous avons adopté le

modèle de récession pour le débit de base, la méthode de l'hydrogramme unitaire de Clark pour le modèle du ruissellement et la méthode SCS-CN pour le modèle d'infiltration.

Les bassins versant de Ghdat et Zat ont profité d'une application visant à la réalisation d'un modèle événementiel prévisionnelle pluie-débit.

En ce qui concerne les paramètres des modèles prévisionnels établis pour les deux bassins, nous avons retenu les paramètres moyens des crues précédemment calé, ensuite nous les avons appliqués sur deux épisodes de validation, pour enfin obtenir deux jeux de paramètre applicable aux bassins versant du Ghdat et du Zat.

En ce qui concerne les paramètres du modèle de récession, la constante de récession est de 0.45 à la station Sidi rahal et de 0.7 à Taferiat, le débit de base est très variable selon les épisodes il est de 12.49 m³/s pour la station Sidi rahal et 1.56 m³/s à la station Taferiat, quant au Ratio il est de 0.23 à Sidi rahal et 0.34 à Taferiat.

Les paramètres de l'hydrogramme unitaire de Clark ou autrement dit modèle de ruissellement, représentent les valeurs suivantes : des temps de concentrations varient respectivement entre 4h30 et 4h32, et les coefficients de stockage variant entre 4h15 et 5h46 aux niveaux des stations Sidi rahal et Taferiat.

En fin pour les modèles d'infiltrations, les valeurs du Curve Number varient de 23.83 à 69.48, et les pourcentages des zones imperméables sont entre 2.23% et 3.15% respectivement aux niveaux des deux stations.

Finalement l'évaluation de la qualité du modèle HEC-HMS semble satisfaisante puisque les critères de Nash sont de 71 % pour le bassin Ghdat et 87% au bassin Zat.

## Références bibliographiques

**AL KHIBRA** Etudes et Conseils (2010). Etude de conception et établissement des plans d'exécution du lac collinaire koudiat tamalout. Marché n°41/2009. Note hydrologique. Rapport définitif, 23p.,

**BENNANI Oumaima.** 2014, Les prévisions météorologiques et La modélisation hydrologique au niveau du bassin d'Aguenza, Mémoire de fin d'études de master, Faculté des sciences et techniques Fès, 80.,

**BERROUCH Hamza**. 2013, Apport des outils Hyfran Plus, WMS et HEC-HMS à la modélisation hydrologique du bassin du Mdouar (Oued El Makhazine), Maroc septentrional, Mémoire de fin d'études de master, Faculté des sciences et techniques Fès, 63 p.,

**DARIF Oumkaltoum.** 2013, Le fonctionnement hydrologique du bassin versant de R'dat ( Haut Atlas de Marrakech) et conséquences environnementales des crues de l'oued, mémoire de fin d'études de master, Faculté des sciences et techniques Marrakech, 85p.,

**EHSANZADEH E., S. El ADLOUNI et B. BOBEE**. (2010), Frequency analysis incorporating a Decision Support System (DSS) for hydro-climatic variables. Journal of Hydrologic Engineering, Vol 15:11, pp. 861-881.,

**HADDANI Hind**. 2012 - Etude du fonctionnement hydrogéologique des bassins versants de Rhéraya, Ourika et Zat (Tensift\_Marrakech, Maroc) : Hydrochimie isotopique. Mémoire de fin d'études de master, Faculté des sciences et techniques Marrakech 111p.,

**JUILLERAT Matthieu**. 2004, Etude hydrologique comparative de cinq bassins versants du Haut Atlas marocain, mémoire de fin d'études de maitrise, Université de franche-comté UFR sciences et techniques de Besançon 70p.,

MORABBI Ali. 2015, Modélisation Hydrologique des crues dans le bassin versant de l'Ourika (Haut Atlas, Maroc), Mémoire de fin d'études de master, Faculté des sciences et techniques Marrakech, 63p.,

**MORET Léon.** 1930, Recherches géologiques dans l'Atlas de Marrakech, Extrait des Notes et Mémoires du Service des Mines et de la Carte Géologique du Maroc, 1931. Professeur à l'Université de Grenoble, 251p.,

Pascon P. 1977 - Le Haouz de Marrakech. Thèse de Doctorat d'Etat, 2 tomes, Rabat.693 p,.

**Proust F.** 1962, Tectonique de socle par faille inverses, en liaison avec d'anciennes failles normales dans le haut Atlas (Maroc). CR somm Soc Géol fr 1962 : 9-10.

**Rapport ABHT** (agence de bassin hydraulique de Tensift). (2007), Atlas des zones inondables du bassin hydraulique de Tensift. Rapport interne, Marrakech, 162 p,.

**Riad, Souad.** 2003, Typologie et analyse hydrologique des eaux superficielles à partir de quelques bassins versants représentatifs du Maroc. Thèse en cotutelle, université des sciences et techniques de Lille et université Ibnou Zohr d'Agadir.

**RMICH, A., HAFOUD, N.** (2004), Relation entre les précipitations et les débits au niveau du bassin versant de la Rhéraya de 1962 à 2003. Faculté des sciences et techniques, Marrakech.

**ROCHE** Marcel.1963, Hydrologie de surface (livre) Gauthier-Villars ORSTOM, Paris 430 p.,

**SALIK Ismail**. 2015, Modélisation Hydrologique des crues de Novembre 2014 du Bassin de la Rhéraya, région de Marrakech, Mémoire de fin d'études de master, Faculté des sciences et techniques Fès, 66 p.,

**Tramblay Y.** 2012, Modélisation des crues dans le bassin du barrage Makhazine, Maroc, Rapport présenté dans la division hydrométéorologique de la direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau (DRPE), du Ministère de l'Energie, des Mines, de l'eau et de l'Environnement à Rabat, 34 p.,

**USACE**. 2010. Hydrologic Modeling System HEC-HMS. Technical reference manual version 3.5. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering center, Davis, CA.

## WEBOGHRAPHIE

http://www.esrifrance.fr/.

http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/.

http://echo2.epfl.ch/.

# **Annexes**

Annexe I : Données pluviométriques des bassins du Ghdat et du Zat.

## - Bassin Ghdat

Année	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Module annuel
1982/83	3,7	9,3	14,0	34,7	0,8	57,3	24,0	16,7	11,6	0,7	0,0	3,6	176,4
1983/84	5,3	3,7	59,4	13,4	16,6	2,2	49,1	29,9	54,3	1,7	1,3	4,5	241,4
1984/85	0,5	1,7	59,8	2,1	134,4	28,6	6,9	32,0	34,7	0,0	17,0	2,2	319,9
1985/86	1,6	23,7	35,6	40,3	72,0	50,9	47,0	9,5	48,9	18,1	1,0	0,6	349,2
1986/87	0,2	25,8	65,8	0,5	30,3	75,3	18,1	0,5	0,0	1,0	0,0	3,1	220,6
1987/88	17,7	24,5	56,6	44,1	105,2	50,3	33,0	5,8	12,3	0,9	1,0	0,0	351,4
1988/89	0,0	27,8	104,1	0,0	24,5	83,0	73,1	114,2	8,7	0,8	0,5	0,9	437,6
1989/90	4,7	68,7	51,8	40,6	52,9	0,0	44,1	24,1	10,1	17,0	1,6	4,0	319,6
1990/91	26,7	8,8	7,7	42,1	0,0	107,5	156,0	70,2	1,7	4,0	2,0	40,8	467,5
1991/92	23,0	18,4	0,2	8,9	0,0	34,1	28,7	66,3	8,9	42,6	9,6	7,2	247,9
1992/93	9,1	19,0	15,2	8,6	38,3	13,8	29,6	20,8	11,8	0,0	0,0	1,5	167,7
1993/94	0,0	14,8	132,1	11,0	57,5	87,9	45,0	0,4	2,0	0,4	1,5	7,3	359,9
1994/95	1,0	83,8	9,0	0,0	0,0	48,3	45,4	138,7	0,0	19,5	0,5	0,1	346,3
1995/96	6,1	131,4	22,0	75,2	136,3	64,0	117,9	8,3	37,5	49,5	0,0	0,0	648,2
1996/97	21,5	12,5	27,8	84,5	60,2	7,7	38,8	144,8	23,0	8,8	0,0	0,0	429,6
1997/98	39,6	33,7	48,5	95,1	5,9	29,8	25,3	14,6	27,3	21,2	0,0	47,5	388,5
1998/99	45,0	30,2	0,0	48,2	91,0	57,0	55,6	1,0	15,0	1,5	0,0	4,5	349,0
1999/00	2,5	68,0	37,4	32,5	20,1	0,0	4,0	38,7	64,4	0,0	0,0	0,5	268,1
2000/01	2,5	26,0	15,0	61,0	63,0	8,0	10,3	2,5	1,0	0,5	0,0	6,0	195,8
2001/02	1,5	2,0	11,5	56,0	0,5	5,0	72,0	65,0	21,0	1,3	0,5	5,0	241,3
2002/03	0,0	3,7	150,5	23,2	27,0	21,0	39,0	54,0	4,9	15,0	4,0	5,0	347,3
2003/04	3,5	66,0	84,0	69,5	1,0	20,5	55,5	23,0	54,0	12,7	0,0	0,0	389,7
2004/05	8,5	60,5	48,5	39,5	3,3	45,8	25,6	0,0	0,0	11,6	2,5		245,8
2005/06	0,0	45,5	29,8	22,7	109,5	83,1	0,0	36,0	44,9	12,0	0,0	0,0	383,5
2006/07	8,0	21,0	17,5	19,0	12,0	40,4	4,0	34,9	38,0	0,0	0,0	10,0	204,8
2007/08	0,0	63,5	53,0	12,0	37,0	16,0	0,0	0,0	30,5	0,0	0,0	0,0	212,0
2008/09	16,7	49,1	68,3	39,9	66,5	75,2	79,3	0,4	7,5	9,8	0,0	4,0	416,7
2009/10	71,7	21,0	12,1	60,1	111,2	79,1	31,2	4,6	12,0	11,8	10,6	26,3	451,7
2010/11	1,6	67,2	39,5	26,9	11,9	6,5	64,3	15,7	68,0	22,2	0,0	12,4	336,2
2011/12	0,0	40,3	105,5	0,2	29,3	5,3	38,3	72,4	0,3	0,0	1,5	1,0	294,1
2012/13	56,9	73,4	70,8	15,1	22,3	22,3	53,7	21,6	11,6	0,0	6,7	5,7	360,1
2013/14	66,8	0,1	21,2	25,1	87,8	17,2	39,6	36,3	4,6	0,6	0,0	1,0	299,3
2014/15	14,2	0,6	206,6	38,0	43,6	29,0	88,2	0,4	0,4	8,4	4,8	32,8	467,0
2015/16	9,4	34,0	6,8	0,0	7,8	20,2	26,4	0,2	4,2	0,6	0,2	22,4	132,2
moy	13,8	34,7	49,6	32,1	43,5	38,0	43,2	32,5	19,9	8,7	2,0	7,9	

Précipitations mensuelles du bassin Ghdat.

## - Bassin Zat

Année	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Module annuel
1982/83	ı	-	-	-	0,0	67,4	19,9	29,0	16,6	0,0	0,0	0,5	133,4
1983/84	0,0	8,5	58,3	29,3	19,7	0,0	68,1	24,9	65,5	0,0	0,0	0,0	274,3
1984/85	0,0	4,0	69,5	3,0	151,6	18,9	20,0	37,8	73,4	3,4	6,6	0,0	388,2
1985/86	14,2	9,2	39,0	44,3	97,0	57,3	39,3	1	-	-	_	-	300,3
1987/88	ı	1	44,3	54,7	108,6	54,1	44,0	6,8	13,7	0,0	5,4	0,0	331,6
1988/89	4,4	37,3	118,6	0,0	48,7	67,2	103,9	101,3	11,3	0,0	3,0	1,5	497,2
1989/90	14,1	65,9	28,0	59,7	48,4	0,0	38,6	14,7	29,7	7,2	0,0	13,7	320,0
1990/91	11,2	0,0	9,5	42,3	0,0	187,8	202,5	16,2	0,0	0,0	4,9	0,0	474,4
1991/92	21,8	20,1	9,2	2,0	0,0	35,4	57,5	43,3	48,6	38,9	4,2	10,5	291,5
1992/93	32,6	18,8	19,2	8,0	36,8	30,9	33,3	21,6	8,6	0,0	0,0	27,8	237,6
1993/94	0,0	21,2	178,4	17,9	85,0	87,6	72,8	0,4	1,3	0,0	0,0	3,5	468,1
1994/95	6,7	91,8	17,9	0,0	0,0	107,2	53,0	106,0	0,0	13,8	0,0	0,0	396,4
1995/96	8,0	176,7	32,3	123,2	194,4	111,6	147,5	4,4	37,5	77,8	0,0	0,0	913,4
1996/97	14,4	15,6	49,6	97,8	78,3	0,9	18,8	121,0	20,8	3,7	0,0	0,0	420,9
1997/98	53,5	54,1	91,9	82,4	10,6	25,2	20,6	14,7	45,2	6,2	5,6	5,9	415,9
1998/99	3,5	21,3	0,0	109,9	108,1	63,3	49,5	4,3	14,2	0,6	0,0	20,3	395,0
1999/00	1,3	61,8	46,9	72,2	18,7	0,0	0,6	49,7	55,3	1,8	0,0	0,0	308,3
2000/01	2,8	47,8	20,3	72,4	38,3	4,6	22,6	6,9	7,9	0,0	0,0	11,0	234,6
2001/02	4,2	0,0	12,8	55,7	0,0	2,8	54,2	154,4	8,0	7,0	0,0	0,0	299,1
2002/03	0,5	3,7	109,1	22,4	23,5	15,5	37,2	25,0	5,8	16,6	0,8	14,3	274,4
2003/04	0,2	76,2	56,1	44,0	0,6	27,3	41,4	24,4	50,5	17,6	0,0	0,0	338,3
2004/05	4,4	49,4	32,2	34,4	3,7	36,4	27,8	3,7	0,1	6,4	1,5	15,2	215,2
2005/06	0,0	41,8	17,8	21,4	110,1	57,9	3,4	26,8	32,6	9,0	0,3	3,0	324,1
2006/07	6,0	34,2	18,8	36,9	7,1	30,0	1,5	37,3	41,5	0,0	1,1	10,5	224,9
2007/08	1,0	13,6	59,4	16,6	34,4	25,8	1,9	3,5	29,3	0,0	-	0,0	185,5
2008/09	29,6	37,5	50,8	33,6	74,9	86,6	94,7	3,0	3,2	17,6	0,0	1,0	432,5
2009/10	96,7	7,0	2,1	44,8	73,4	66,0	46,5	10,9	10,3	7,8	3,4	19,7	388,6
2010/11	3,9	38,4	35,6	21,8	20,5	7,1	62,0	61,5	60,8	76,2	0,0	10,3	398,1
2012/13	43,2	55,8	66,8	9,5	21,2	23,2	60,3	29,7	8,5	0,0	0,9	0,8	319,9
2013/14	28,8	1,2	13,9	35,6	84,1	12,4	37,1	58,8	8,7	12,8	0,0	3,6	280,6
2014/15	13,6	0,6	206,8	65,2	74,0	27,6	190,0	2,4	19,8	120,0	26,0	60,8	806,8
2015/16	28,0	67,4	14,2	0,0	18,8	64,4	104,0	26,8	28,6	2,8	3,4	4,6	363,0
moy	15	36	49,3	40,7	49,7	43,8	55,5	34,6	24,4	14,4	2,2	7,7	

Précipitations mensuelles du bassin Zat.

Annexe II : Données hydrométriques aux stations Sidi rahal et Taferiat.

## - Station Sidi rahal

Année	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Module
1980/1981	0,231	1,542	3,056	0,143	0,135	1,225	1,324	1,603	0,189	0,366	0,042	0,012	0,822
1981/1982	0,002	0,178	0,000	0,105	1,027	1,248	0,314	4,104	4,968	0,704	0,309	2,014	1,248
1982/1983	0,022	0,035	0,076	0,141	0,062	0,408	0,190	0,084	0,089	0,079	0,075	0,076	0,111
1983/1984	0,308	0,159	0,350	0,140	0,128	0,119	0,951	0,184	3,510	0,040	0,000	0,000	0,491
1984/1985	0,000	0,000	0,081	0,002	7,191	2,634	0,937	0,351	2,938	0,122	0,034	0,000	1,191
1985/1986	0,000	0,103	0,043	0,207	2,713	5,990	5,930	0,500	0,347	0,140	0,032	0,054	1,338
1986/1987	0,185	0,261	1,556	0,034	1,828	13,315	0,619	0,059	0,127	0,408	0,031	0,009	1,536
1987/1988	0,060	11,379	11,400	3,989	5,305	2,283	2,697	0,076	0,253	0,004	0,020	0,002	3,122
1988/1989	0,018	0,036	7,028	1,822	0,414	2,171	6,470	21,360	3,885	0,425	0,065	0,022	3,643
1989/1990	0,041	5,267	6,445	9,102	3,448	1,047	14,262	1,188	1,493	0,307	0,136	0,071	3,567
1990/1991	0,357	0,073	0,052	0,449	0,052	3,855	14,753	11,907	2,022	0,158	0,476	0,252	2,867
1991/1992	0,492	0,522	0,196	6,501	0,298	0,476	2,302	12,208	1,319	0,228	0,011	0,006	2,046
1992/1993	0,004	0,021	0,196	0,122	0,035	0,098	2,924	0,020	0,007	0,004	0,004	0,002	0,286
1993/1994	0,002	1,018	5,662	2,286	1,972	10,733	15,144	2,729	0,660	0,323	0,188	0,327	3,420
1994/1995	0,392	0,863	0,490	0,107	0,096	1,033	1,207	6,649	0,288	0,049	0,002	1,436	1,051
1995/1996	0,325	1,021	0,455	2,793	12,312	13,029	46,294	4,749	3,341	3,707	0,359	0,332	7,393
1996/1997	0,455	0,422	0,725	4,124	4,949	0,530	0,907	13,280	1,748	0,138	0,113	0,064	2,288
1997/1998	1,451	1,006	1,544	1,367	0,817	6,885	3,414	0,217	0,161	0,153	0,090	0,825	1,494
1998/1999	1,492	1,850	1,493	1,743	5,316	3,067	5,929	2,169	1,836	1,671	1,539	1,336	2,453
1999/2000	1,341	5,427	3,141	3,104	2,362	0,010	0,017	1,290	0,139	0,000	0,003	0,003	1,403
2000/2001	0,002	0,217	0,013	0,901	1,857	0,014	0,002	0,002	0,005	0,001	0,002	0,002	0,252
2001/2002	0,001	0,002	0,000	0,121	0,002	0,003	0,479	4,085	0,137	0,006	0,004	0,004	0,404
2002/2003	0,208	0,116	2,881	1,936	1,005	0,000	1,258	1,653	0,135	0,817	0,024	0,382	0,868
2003/2004	2,248	3,847	9,516	6,355	1,624	5,454	3,855	1,969	11,749	2,380	0,177	0,104	4,107
2004/2005	1,397	2,498	4,242	3,941	1,364	1,471	5,289	1,000	1,009	0,979	0,881	0,824	2,075
2005/2006	1,939	2,863	1,109	0,963	3,190	3,815	3,824	1,632	2,657	1,070	1,198	0,972	2,103
2006/2007	1,560	4,780	1,419	2,134	0,630	5,668	0,522	1,265	0,568	0,201	0,200	0,084	1,586
2007/2008	0,513	2,181	4,706	0,720	4,356	3,357	0,687	0,611	0,431	0,205	0,200	0,019	1,499
2008/2009	0,159	0,113	0,264	0,617	1,461	3,301	7,539	2,734	0,183	0,196	0,024	0,047	1,386
2009/2010	2,982	1,216	0,070	1,820	8,088	15,333	14,262	0,070	0,416	0,070	1,892	14,380	5,050
2010/2011	-	-	-	-	-	-	1,279	1,426	2,129	1,407	0,955	1,104	0,692
2011/2012	1,041	1,073	2,004	1,376	1,357	1,278	1,377	2,406	1,190	1,192	1,383	1,078	1,396
2012/2013	1,995	1,361	1,831	2,060	1,661	1,385	1,821	2,428	1,319	1,298	1,249	1,226	1,636
2013/2014	1,463	1,570	-	-	1,771	1,760	1,212	1,449	0,928	0,928	0,940	1,274	1,108
2014/2015	1,849	1,046	6,687	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,798
2015/2016	-	-	-	-	-	-	0,743	0,296	0,838	0,146	0,227	0,371	0,218
moy	0,682	1,502	2,187	1,701	2,190	3,139	4,743	2,993	1,473	0,553	0,358	0,798	

Débit mensuelles à la station Sidi rahal.

## - Station Taferiat

Année	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Module
1980/81	0,445	2,33	3,92	1,31	0,746	3,95	4,89	6,50	3,31	1,03	0,392	0,436	2,42
1981/82	0,145	0,192	0,235	0,243	0,876	3,40	1,67	12,1	9,00	1,97	0,370	4,10	2,85
1982/83	0,128	0,413	0,799	0,968	0,436	1,12	1,11	0,776	0,534	0,188	0,178	0,097	0,56
1983/84	0,041	2,95	0,890	0,459	0,217	0,181	0,949	1,01	11,4	0,394	0,084	0,038	1,57
1984/85	0,028	0,029	0,673	0,883	10,4	4,66	3,03	3,40	7,48	1,25	0,221	0,072	2,67
1985/86	0,023	0,028	0,373	0,658	2,42	3,93	6,17	3,03	2,58	2,20	1,87	1,59	2,06
1987/88	0,246	8,76	12,1	3,19	2,89	5,37	7,32	3,54	4,53	1,43	0,378	0,154	4,15
1988/89	0,034	1,47	23,0	3,01	1,51	3,48	7,60	14,3	8,28	4,20	1,62	1,03	5,77
1989/90	0,959	6,63	3,81	6,63	5,64	4,06	17,2	4,44	5,24	2,10	0,433	0,152	4,80
1990/91	0,688	0,315	0,251	1,45	0,395	3,07	12,5	10,5	3,12	1,52	1,23	0,162	2,93
1991/92	0,352	0,904	0,328	10,2	1,05	1,10	3,73	9,74	6,08	2,33	0,491	0,570	3,09
1992/93	0,120	0,162	0,509	0,723	1,19	1,68	4,81	2,58	1,65	0,937	0,319	0,078	1,23
1993/94	0,075	1,20	3,88	2,80	3,06	9,96	16,1	7,64	4,84	1,93	0,222	0,182	4,29
1994/95	0,089	1,41	0,837	0,237	0,211	1,45	2,55	8,62	4,07	0,492	0,201	3,25	1,95
1995/96	8,50	5,07	0,349	2,70	7,69	4,92	17,7	12,3	9,54	6,14	0,624	0,122	6,31
1996/97	0,159	0,179	0,448	2,05	2,46	1,38	0,786	8,72	5,36	1,21	0,309	0,144	1,93
1997/98	1,83	1,33	1,74	2,00	1,36	5,64	2,06	9,08	6,79	4,32	2,78	2,50	3,43
1998/99	2,38	0,061	0,021	0,177	1,94	1,63	4,59	2,49	1,26	1,11	0,067	0,075	1,31
1999/00	0,020	56,7	3,80	2,33	1,13	0,147	0,093	4,20	0,286	0,110	0,031	0,015	5,82
2000/01	0,010	0,487	0,095	3,11	3,23	0,246	0,071	0,037	0,038	0,022	0,011	0,012	0,62
2001/02	0,010	0,010	0,036	0,117	0,034	0,043	0,181	4,77	0,848	0,342	0,027	0,010	0,53
2002/03	1,90	1,29	3,19	2,43	1,51	0,777	2,67	1,84	0,943	0,688	0,068	0,312	1,47
2003/04	0,042	1,07	4,27	4,22	1,41	1,31	3,27	3,53	8,94	1,91	0,056	0,049	2,52
2004/05	0,048	0,028	1,69	1,61	1,10	1,20	3,33	2,10	1,63	1,13	0,748	0,640	1,27
2005/06	0,619	1,11	0,826	0,882	1,65	2,51	3,15	3,37	3,62	1,85	0,597	0,481	1,72
2006/07	0,615	14,8	0,585	0,598	0,634	5,31	1,60	4,25	2,50	0,718	0,089	0,014	2,63
2007/08	0,056	0,096	2,57	1,05	4,13	6,47	2,09	1,32	1,18	0,311	0,055	0,030	1,58
2008/09	3,15	4,19	4,42	3,76	6,43	10,1	13,6	7,87	3,02	2,39	0,418	0,014	4,91
2009/10	2,70	1,10	0,089	2,43	4,84	5,35	9,84	1,56	2,15	1,00	0,215	0,666	2,65
2010/11	1,09	3,39	0,727	1,53	0,621	0,794	1,99	5,22	13,7	4,52	1,07	1,03	3,00
2011/12	0,011	0,076	1,07	2,60	2,14	2,15	6,19	10,7	3,67	0,331	0,094	0,029	2,42
2012/13	0,274	2,26	4,90	3,28	2,54	1,91	3,92	4,60	0,732	0,158	0,054	0,039	2,05
2013/14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,00	18,60	1,68
2014/15	19,24	14,10	18,38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,31
2015/16	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	3,261	2,865	0,983	0,281	0,290	0,248	0,94
moy	1,32	3,83	2,88	1,99	2,17	2,84	4,86	5,12	3,98	1,44	0,59	1,06	

Débit mensuelles à la station Taferiat.