

Département des Sciences de la Terre

Licence en Sciences et Techniques Eau & Environnement

Mémoire de projet de fin d'études

Conséquences hydrologiques de la variabilité pluviométrique sous climat semi -aride. Cas du bassin versant du ZAT (Haut Atlas, Maroc)

Réalisé par : KARKAR Abdellah & SOUIHEL Rime

Soutenu le 3 juillet 2020, devant la commission d'examen composée de :

- ❖ Pr. Mohamed El Mehdi SAIDI, FSTG Marrakech (Encadrant)
- ❖ Pr. Abdelfattah BENKADDOUR, FSTG Marrakech (Examineur)

Année Universitaire 2019-2020

Remerciements

Avant d'entamer les différentes parties de ce rapport, nous voudrions adresser un petit mot de reconnaissance à travers lequel nous remercions très fortement tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

*Nous tenons tout d'abord à exprimer notre gratitude et nos sincères remerciements à notre Professeur et Encadrant Monsieur **Mohamed El Mehdi Saidi**, pour la disponibilité dont il a fait preuve en notre faveur, pour ses efforts déployés afin de nous assurer un très bon encadrement, ainsi que pour ses encouragements et ses conseils.*

Nos vifs remerciements vont également à l'ensemble du corps enseignant du Département des Sciences de la Terre à la FST de Marrakech.

Nos chaleureux remerciements à nos très chers parents pour leurs sacrifices matériels et moraux qu'ils nous ont accordés le long de nos années d'études.

Sommaire

Introduction générale	7
Chapitre 1 : Généralités sur le bassin versant d'OUED ZAT	
I- Introduction.....	8
II- Situation géographique et contexte géologique.....	8
II.1. Situation géographique	8
II.2. Contexte géologique et lithologique	9
III – les ressources en eau.....	10
III.1. Eaux souterraines	10
III.2. les eaux de surfaces.....	11
IV-Caractéristiques géométriques et topographiques	11
IV.1. Surface du bassin	11
IV.2. Périmètre.....	12
IV.3. Indice de compacité.....	12
IV.4. Rectangle équivalent.....	12
IV.5. Altitude et courbe hypsométrique.....	12
IV.6. La Pente.....	15
IV.7. Temps de concentration.....	16
IV.8. Réseau hydrographique.....	16
Chapitre 2 : Analyse pluviométrique et hydrométrique du bassin versant d'OUED ZAT	
I- Le régime pluviométrique.....	17
I.1. Précipitation mensuelles.....	17
I.2. Précipitation saisonnières.....	18
I.3. Précipitation annuels	18
II- L'analyse des données de débit.....	19
II.1. Débits mensuels.....	19
II.2. Débits saisonniers.....	20
II.3. Débits annuelles	21
Chapitre 3 : Etude dynamique des crues et analyse des hydrogrammes	

I-Introduction.....	22
II- Etude des crues dans l'année hydrologique.....	22
III- Analyse des hydrogrammes des crues	23
III.1. La crue du 13 Août 1982.....	24
III.2. La crue du 01 novembre 1987.....	25
III.3. La crue du 09 mars 1990.....	26
III.4. La crue du 07 mars 1994.....	27
III.5. La crue du 17 Août 1995.....	28
III.6. La crue du 28 octobre 1999.....	29
III.7. La crue du 02 mai 2011.....	30
III.8. La crue du 23 novembre 2014.....	31
IV- Analyse fréquentielle des crues de l'oued ZAT.....	32
IV.1. Application de la loi de Gumbel.....	32
A/ Calcul des quantiles.....	34
B/ Intervalles de Confiance	35
IV.2. Application de logiciel d'analyse fréquentielle des crues	35
A/ Présentation du logiciel utilisé dans cette étude.....	35
B/ les lois de prédétermination des débits extrême.....	36
C/ Comparaisons visuelles (analyse des graphes)	36
D/ comparaison numérique (analyse des critères statistiques).....	37
E/ Estimation des débits de pointe de certaines périodes de retour.....	37
Conclusion générale.....	38
Références bibliographiques.....	39

Liste des figures

Figure1 : Vue sur la vallée de ZAT.....	8
Figure2 : Localisation géographique du bassin versant du ZAT.....	9
Figure3 : Carte géologique du bassin versant de l'oued ZAT.....	10
Figure4 : Les nappes du bassin hydraulique de Tensift(Maroc).....	11
Figure5 : Histogramme de la répartition des surfaces de chaque tranche d'altitude du bassin ZAT.....	13
Figure6 : Courbe Hypsométrique du bassin versant ZAT.....	14
Figure7 : Carte hypsométrique du bassin versant ZAT.....	14
Figure8 : Carte de pente du bassin versant ZAT.....	15
Figure9 : Carte du réseau hydrographique du bassin.....	16
Figure10 : Précipitations moyennes mensuelles interannuelles au niveau du bassin versant ZAT (1983 /84 à 2016/17).....	17
Figure11 : Les pluies moyennes saisonnières au niveau de ZAT.....	18
Figure12 : Les pluies moyennes annuelles au niveau du ZAT.....	19
Figure13 : les débits moyens mensuels interannuels au niveau du bassin versant ZAT (1962/1963 à 2016/17).....	20
Figure14 : Débits moyens saisonniers au niveau du bassin ZAT.....	20
Figure15 : Les débits moyens annuels du bassin ZAT.....	21
Figure16 : Diagramme en camembert de la répartition mensuelle des crues.....	23
Figure17 : Hydrogramme de la crue du 13/08/1982.....	24
Figure18 : Hydrogramme de la crue du 01/11/1987	25
Figure19 : Hydrogramme de la crue du 09/03/1990	26
Figure20 : Hydrogramme de la crue du 06/03/1994	27
Figure21 : Hydrogramme de la crue du 17/08/1995	28
Figure22 : Hydrogramme de la crue du 28/10/1999.....	29
Figure23 : Hydrogramme de la crue du 02/05/2011.....	30
Figure24 : Hydrogramme de la crue du 23 /11/ 2014.....	31
Figure25 : Ajustement de la loi de Gumbel aux crues de l'oued ZAT à Taferiat.....	34
Figure26 : Graphiques des ajustements des lois de débit maximal instantané de ZAT.....	36

Liste des tableaux

Tableau1 : la répartition des tranches d'altitudes du bassin de ZAT.....	13
Tableau2 : Nombre et pourcentages des crues mensuelles.....	22
Tableau3 : les caractéristiques de la crue de 13/08/1982	24
Tableau4 : Les caractéristiques de la crue de 11/02/1987.....	25
Tableau5 : Les caractéristiques de la crue de 09/03/1990.....	26
Tableau6 : Les caractéristiques de la crue de 06/03/1994.....	27
Tableau7 : Les caractéristiques de la crue de 17/08/1995.....	28
Tableau8 : Les caractéristiques de la crue de 18/10/1999.....	29
Tableau9 : Les caractéristiques de la crue de 02/05/2011.....	30
Tableau10 : Les caractéristiques de la crue de 23/11/2014.....	31
Tableau11 : Séries des débits annuels en m ³ /s et leurs paramètres de Gumbel.....	32
Tableau12 : les périodes de retour et leurs F, FND et γ	34
Tableau13 : les débits en m ³ /s en fonction de leurs périodes de retour.....	35
Tableau14 : les intervalles de confiance à 70 % des différentes périodes de retour.....	35
Tableau15 : Critères de comparaison des ajustements des lois aux débits de pointe à la station hydrologique TAFERIAT.....	37
Tableau16 : Estimation des débits de retour selon des différentes lois d'ajustement.....	37

Introduction générale

Le présent travail se propose de contribuer à l'étude hydro-pluviométrique du bassin versant de l'oued ZAT qui fait partie du versant nord de la chaîne du Haut Atlas. Nul ne met en doute le rôle de telles études comme élément de base fondamental pour de futurs projets de protection contre les risques naturels majeurs, notamment les inondations.

Le plan que nous allons suivre lors de cette étude s'articule en trois grands chapitres :

-Le premier consacré à l'étude générale du le bassin versant : la Géographie, la géologie générale, les ressources en eau et la détermination de ses caractéristiques géométriques et topographiques (surface, périmètreEtc.).

- Le deuxième chapitre va aborder l'étude des précipitations et des débits sur l'ensemble du bassin versant en se basant sur des données annuelles, saisonnières et mensuelle et leurs variabilités.

- Le troisième chapitre portera sur l'étude dynamique des crues et analyse des hydrogrammes. Nous utiliserons des lois statistiques applicables à l'hydrologie, qui présentent un intérêt dans l'analyse fréquentielle et l'estimation des risques associés aux événements hydrologiques. Cette méthode statistique consiste à étudier des événements historiques afin d'en évaluer les probabilités d'apparition future.

Chapitre 1 : Généralités sur le bassin versant de l'oued Zat

I- Introduction :

Ce chapitre est consacré à la présentation du cadre géographique, géologique, et les différentes caractéristiques physiographiques (Superficie, périmètre, pente, relief, rectangle équivalent, ...) du bassin versant ZAT.

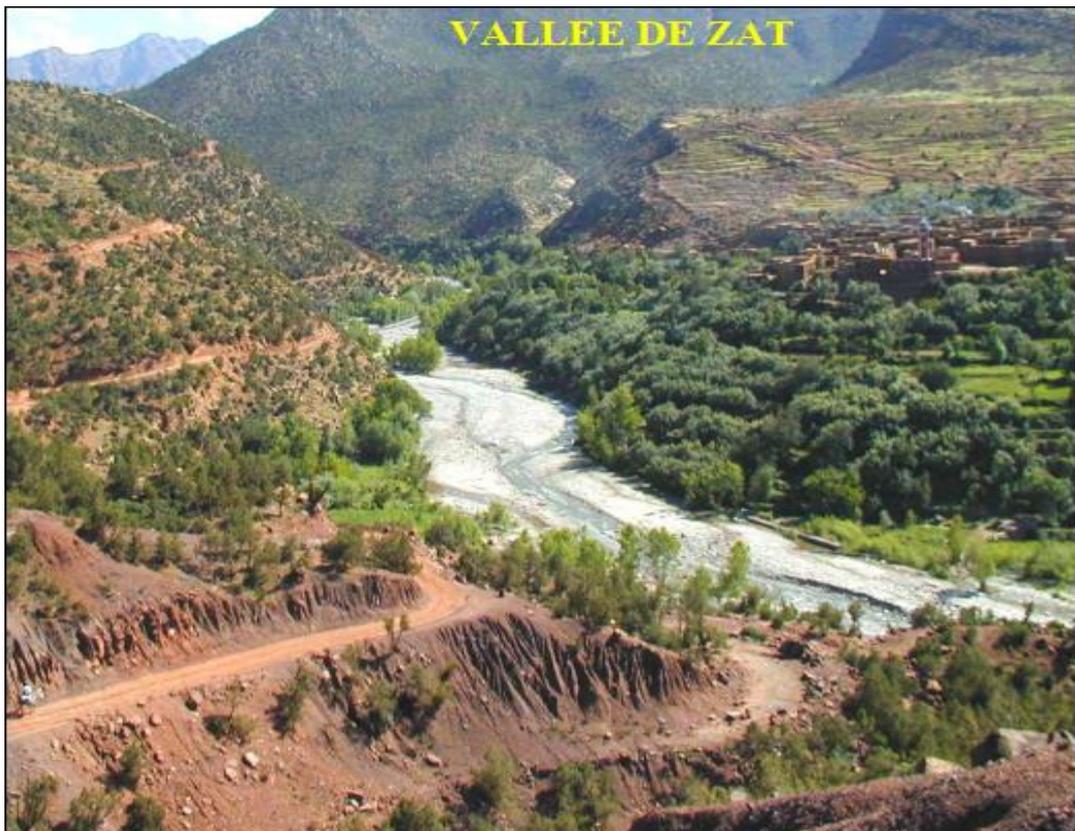
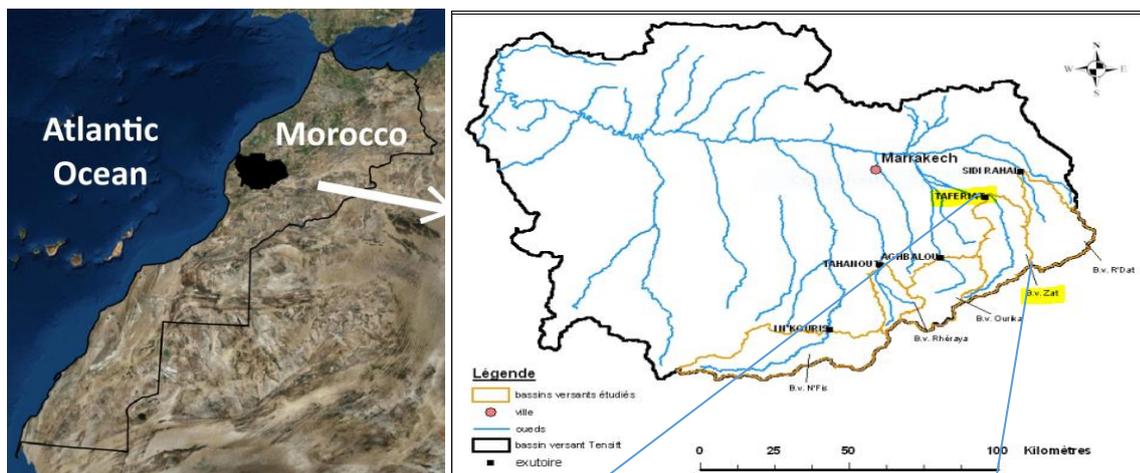


Figure 1 : Vue sur la vallée de ZAT

II- Situation géographique et contexte géologique de la zone d'étude :

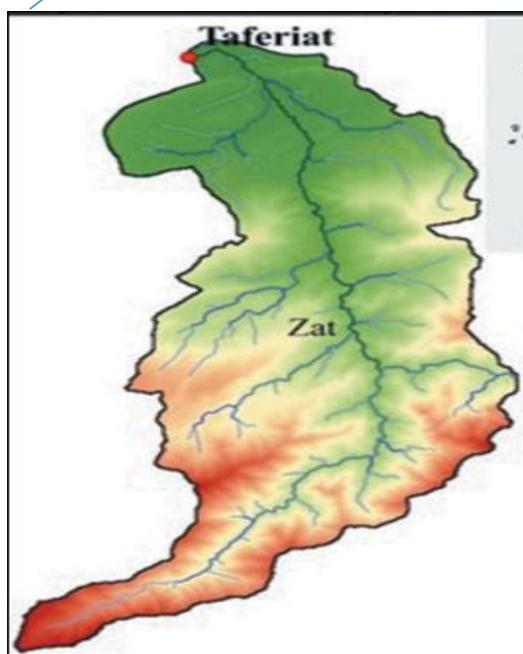
1-Situation géographique :

L'oued ZAT transite par la ville d'Ait-Ouir, à environ 45 km au Sud-Est de Marrakech entre la latitude 31° 30' et 31° 45' et la longitude 7° 30' et 7° 45'. Il est limité au Nord par la plaine du Haouz, au Sud par la zone axiale du Haut Atlas, à l'Ouest par l'Oued Ourika et à l'Est par l'oued R'Dat. **(Fig 2)**



A- Situation géographique du bassin de Tensift

B- Situation du sous bassin du Zat

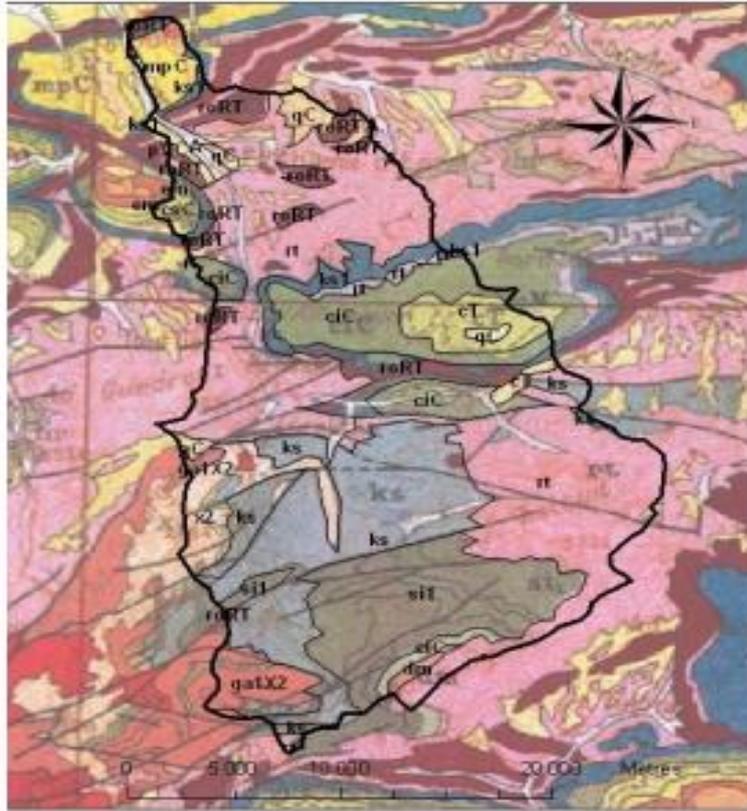


C- Le Sous bassin versant du Zat (forme et hydrographie)

Figure 2 : Localisation géographique du bassin versant du ZAT

2 -Contexte géologique et lithologique :

Le bassin est constitué d'un socle rigide Paléozoïque composé des schistes et précambrien (roches magmatiques et métamorphiques) où apparaît des terrains de couvertures secondaires et tertiaires à dominance des calcaires, grés et argiles qui se développent vers le nord-Est. Les failles sont de direction NE-SW. (Figure 3)



Symbole	Echelle stratigraphique	Lithologie
A	Formations modernes et Quaternaire	Formation de plaine
qC	Quaternaire moyen et ancien	Formation de plaine
pVC	Villafranchien et Pliocène continentale	Formation de plaine
mpC	Mio-pliocène continental	Formation de plaine
em	Eocène moyen	Formation de plaine
csC	Sénonien faciès continental	Formations lre marmo-calcaire
cT	Turonien	Formations lre marmo-calcaire
clC	Infracénomanien et Cénomanien continental	Formations lre marmo-calcaire
roRT	Trias	Basaltes doléritiques
rt	Permo-trias continental	Grès et argiles
dm	Dévonien moyen	Formation lre à dominante calcaire
si1	Ordovicien inférieur	Formation lre à dominante schisteuse
ks	Acadien	Formation lre à dominante schisteuse
ks1	Cambrien moyen	Schistes à Paradoxides
ga1X2	Précambrien II	Granites post-tectoniques
x2	Précambrien II	Schistes, Séricitoschistes

Figure 3: Carte géologique du bassin versant de l'oued ZAT

Les sols du bassin versant du ZAT sont perméable (à 14%), semi perméable (à 40%) et imperméable (à 46%).

III – les ressources en eau :

1- Eaux souterraines :

Les ressources en eaux souterraines concernent les réservoirs dans lesquels s'accumulent ou transitent les eaux pluviales. Parmi les nappes les plus importantes : La nappe du Haouz.

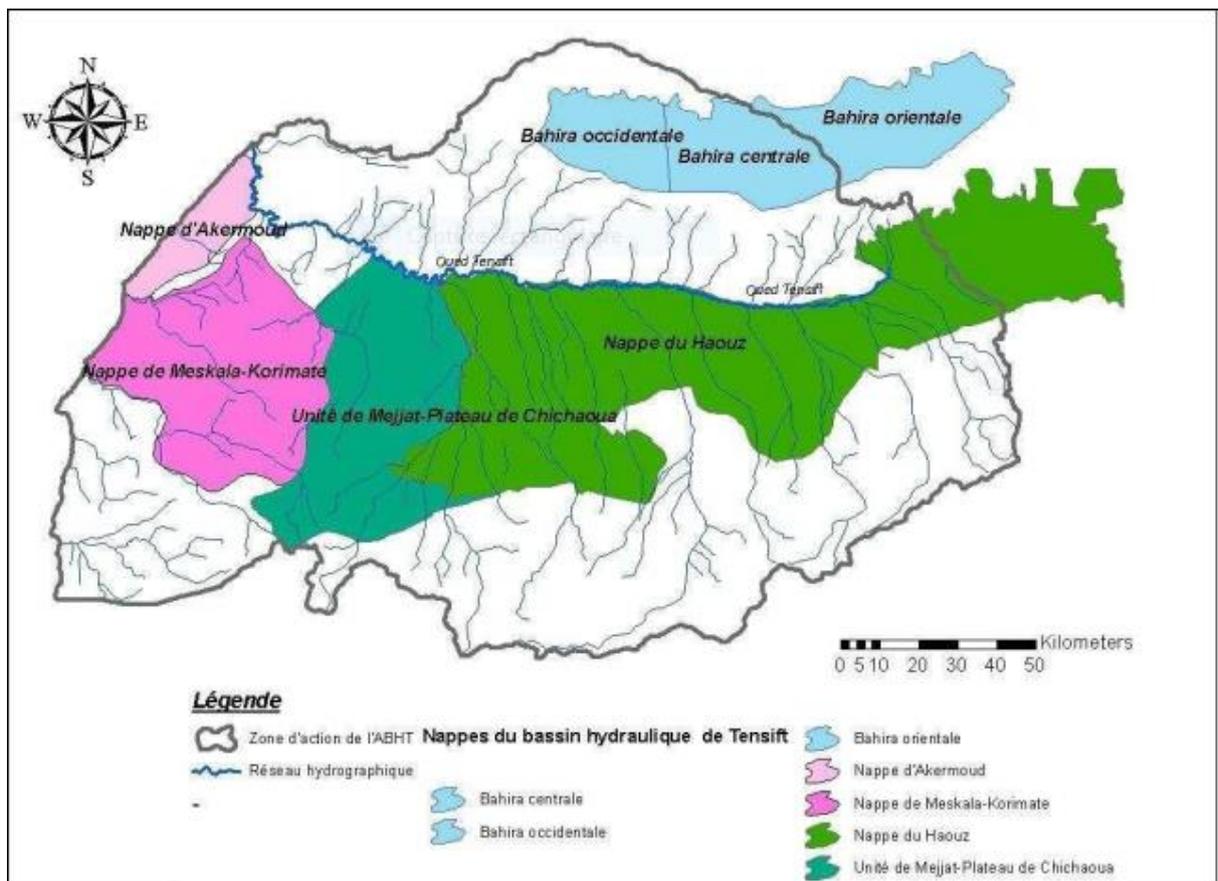


Figure 4 : Les nappes du bassin hydraulique de Tensift. Maroc

2 –les eaux de surfaces :

Les ressources en eau de surface de la région proviennent essentiellement des précipitations (pluies, neige...) des mois pluvieux de l'année. Elles constituent les eaux de ruissellement de l'oued ZAT et ces affluents. Ces eaux sont alimentées par un certain nombre de sources tout au long de la vallée du ZAT dont la plus célèbre est celle de Sidi El Wafi (Arbaa Tighdouine) avec une eau minérale.

IV- Caractéristiques géométriques et topographiques :

1- La surface du bassin:

- La surface correspond à l'aire délimitée par l'ensemble des points les plus hauts qui constituent la ligne de partage des eaux. La surface (A) du bassin versant, exprimée en km², peut être déterminée à l'aide d'un planimètre ou mieux par les techniques de la digitalisation.
- La superficie du bassin versant d'oued Zat jusqu'à l'exutoire situé à la station de TAFERIAT est d'environ 577 km². Cette surface est déterminée par l'intermédiaire du logiciel Arcgis.

2- Le périmètre:

Le périmètre représente toutes les irrégularités du contour du bassin versant par une ligne joignant tous les points les plus élevés. Il n'influence pas l'état d'écoulement du cours d'eau au niveau du bassin versant. Le périmètre, déterminé à l'aide du logiciel Arcgis, est de l'ordre de 167 km.

3- L'indice de compacité:

L'indice de compacité renseigne sur la forme du bassin versant. Il a une grande influence sur l'écoulement global du cours d'eau et surtout sur l'allure de l'hydrogramme à l'exutoire du bassin résultant d'une pluie donnée.

Il est établi en correspondant le périmètre du bassin à celui d'un cercle qui aurait la même surface du bassin versant.

Il est exprimé par la formule suivante (Roche 1963) :

$$KG = P / 2\pi\sqrt{A} = 0.28 P / \sqrt{A}$$

KG : Indice de compacité de Gravelius

P : Périmètre du bassin versant

A : Superficie du bassin versant

Donc $KG = 0.28 P/\sqrt{A} = 0.28 * 167/\sqrt{577} = 1.936$

On peut donc dire que le bassin versant est très allongé et sa longueur est presque neuf fois plus grande que sa largeur.

4- Le rectangle équivalent:

Le Rectangle équivalent est une représentation géométrique du contour du bassin versant transformé en rectangle. Celui-ci est tracé à partir de la longueur et de la largeur du bassin. Les courbes de niveau y sont parallèles et sont tracées en respectant les répartitions hypsométriques. Ce rectangle est conçu pour pouvoir comparer les bassins versants du point de vue morphologique. Les dimensions du rectangle équivalent sont déterminés par les formules suivantes (Roche 1963) Longueur : $L = KG \cdot \sqrt{A} / 1.12 (1 + \sqrt{1 - (.12/ KG)^2}) = 75 \text{ Km}$

Largeur : $l = KG \cdot \sqrt{A} / 1.12 (1 - \sqrt{1 - (.12/ KG)^2}) = 8 \text{ Km}$

5- Les altitudes et courbe hypsométrique:

Le bassin versant de l'oued Zat présente une sorte de mosaïque ou se succède des zones de très hautes altitude (dépassant 2000 m) et des étendues planes peu élevées. Nous allons chercher les

proportions de chaque tranche à l'aide du logiciel ARCGIS. Les résultats obtenus sont mentionnés sur le tableau ci-dessous ainsi que les éléments nécessaires pour calculer l'altitude moyenne.

Tranche d'altitude(m)	Surface (%)
750-1000	14,6
1000-1400	14,2
1400-1800	18,6
1800-2200	21,6
2200-2600	17
2600-3000	8,4
3000-3400	4,6
3400-3900	1,4

Tableau 1 : la répartition des tranches d'altitudes du bassin de ZAT

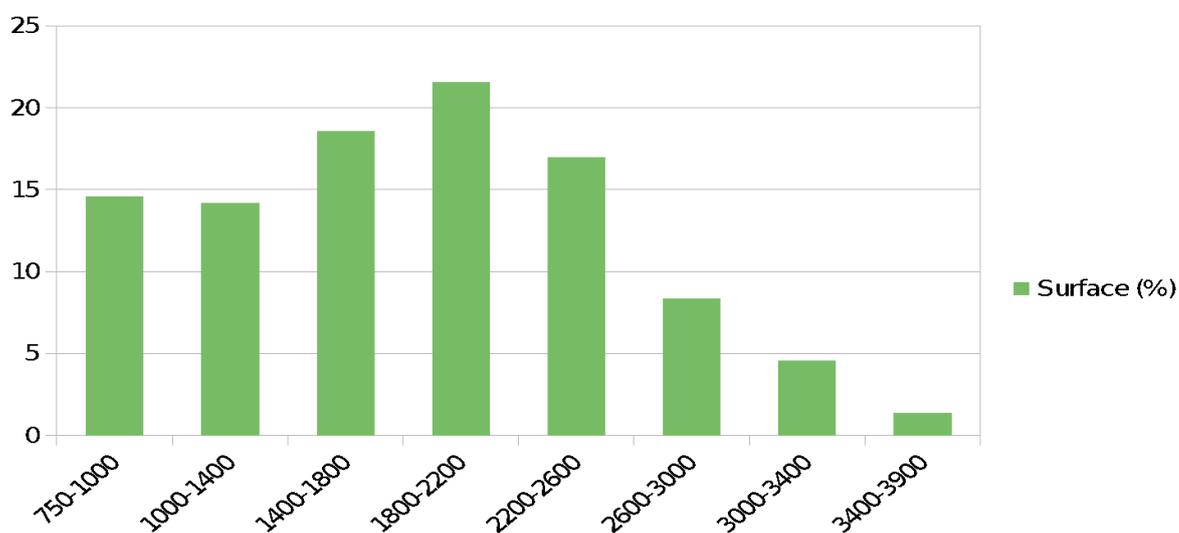


Figure 5 : Histogramme de la répartition des surfaces de chaque tranche d'altitude du

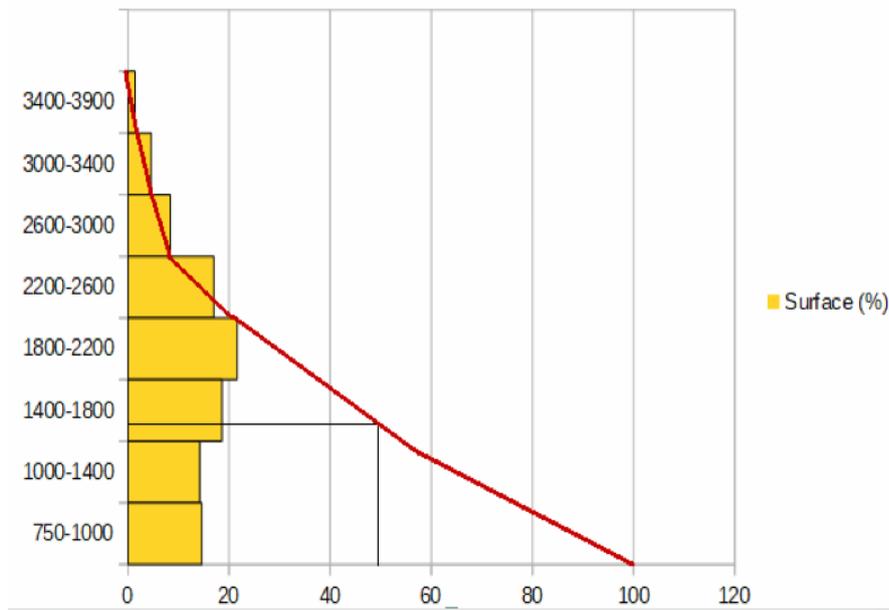


Figure 6: Courbe Hypsométrique de bassin ZAT

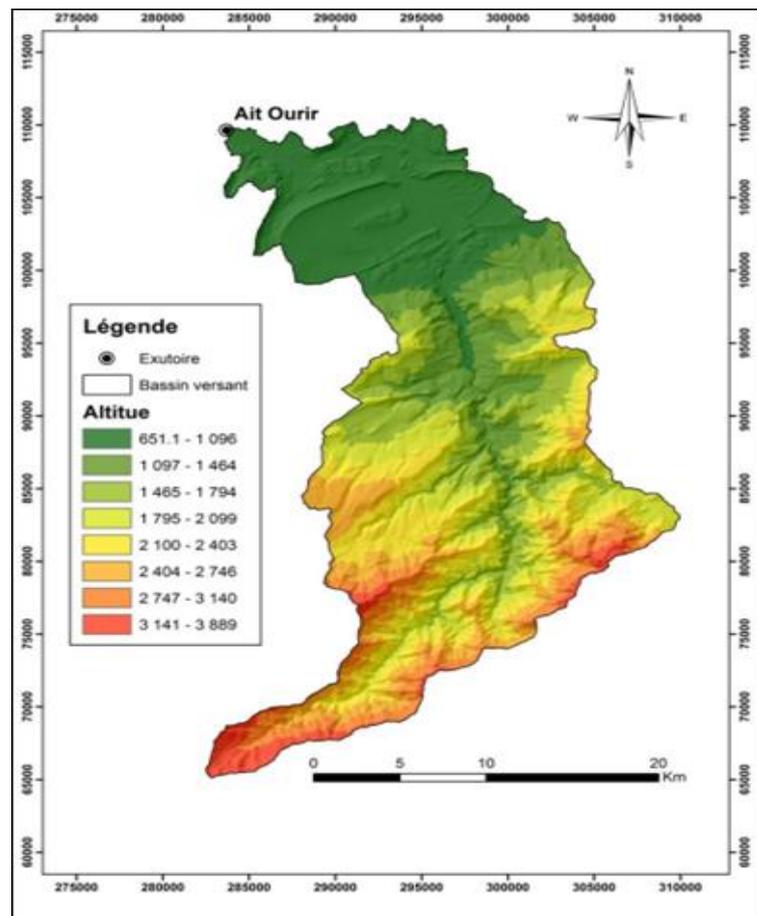


Figure 7 : Carte hypsométrique du bassin versant ZAT

6- La pente:

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.

Ce paramètre est également mesuré à l'aide du logiciel d'informatique Arcgis et a donné la valeur de 20,2 °

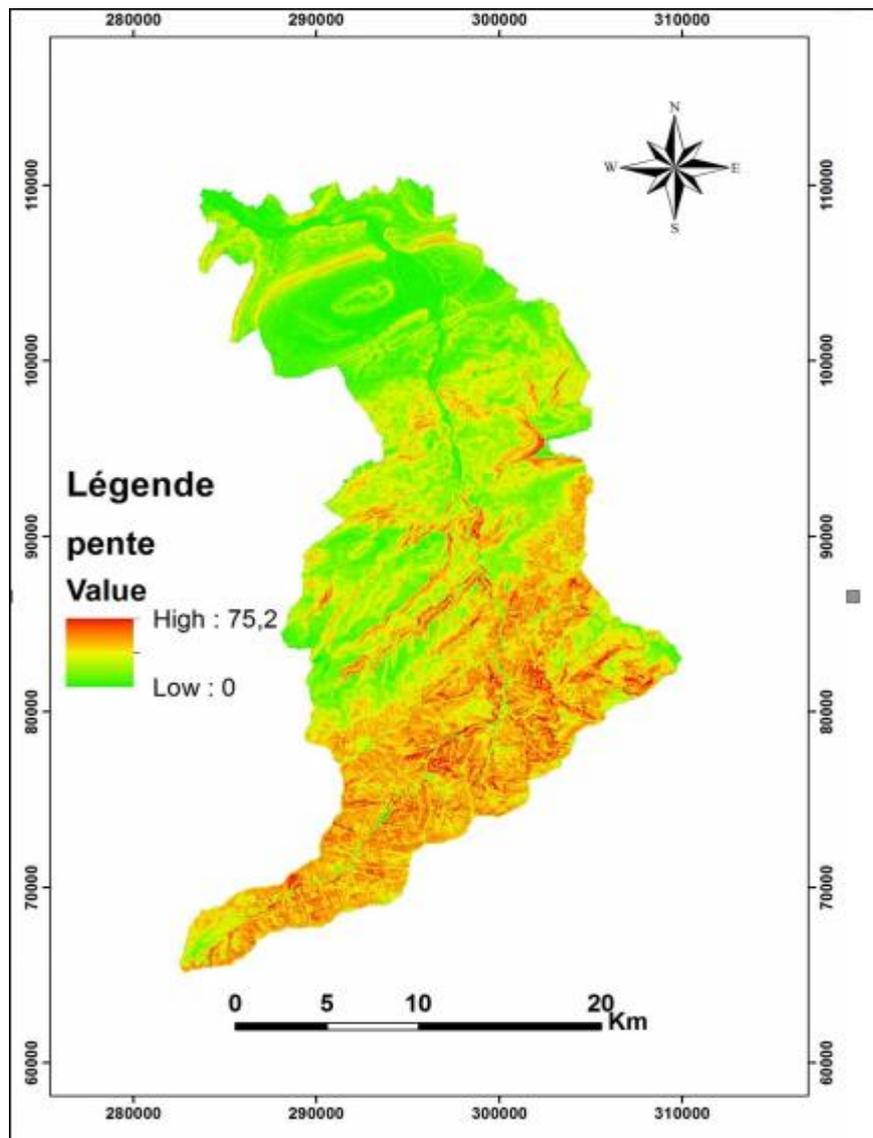


Figure 8 : Carte de pente du bassin versant ZAT

7 – Le temps de concentration:

Le temps de concentration des eaux sur un bassin versant se définit comme le maximum de durée nécessaire à une goutte d'eau pour parcourir le chemin hydrologique entre un point du bassin le plus éloigné de l'exutoire et ce dernier. Pour ce paramètre, on tient compte des caractéristiques géométriques et morphologiques du bassin. On le calcule à partir de la relation de Giandotti :

$$TC = (4\sqrt{A} + 1.5 L) / (0.8v(H_{moy} - H_{min})) = \text{environ 8 heures}$$

Tel que : $A = 577 \text{ km}^2$, $L = 75 \text{ km}$, $H_{moy} = 1869 \text{ m}$, $H_{min} = 750 \text{ m}$

8- Le réseau hydrographique:

Le réseau hydrographique se définit comme l'ensemble des cours d'eau naturels ou artificiels, permanents ou temporaires, qui participent à l'écoulement. Le réseau hydrographique est sans doute une des caractéristiques les plus importantes du bassin. Le réseau hydrographique peut prendre une multitude de formes.

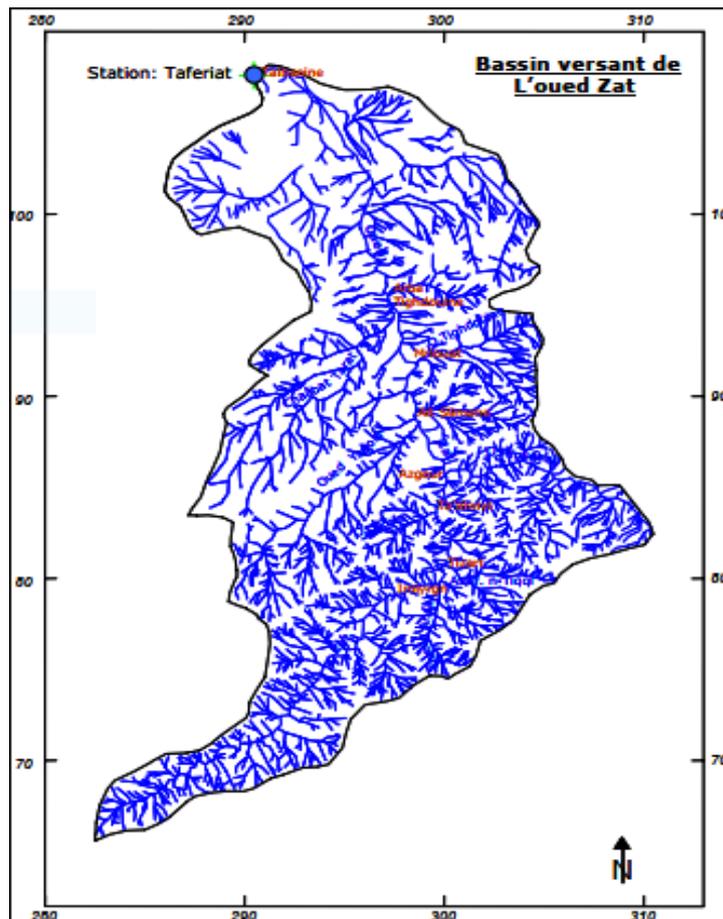


Figure 9 : Carte du réseau hydrographique du bassin

Chapitre 2 : Analyse pluviométrique et hydrométrique du bassin versant du Zat

I- Le régime pluviométrique

Le bassin versant du Zat se caractérise par une forte fluctuation pluviométrique aux échelles annuelle et interannuelle, ce qui influe sur l'hydrologie superficielle et souterraine et sur l'usage de l'eau. Les données pluviométriques concernent la station TAFERIAT.

1/Précipitation mensuelles :

La représentation graphique des variations des moyennes mensuelles interannuelles des précipitations, sur une période de 34 ans (1983-2017). Montre une variation irrégulière, les valeurs maximaux sont enregistrés au niveau des mois de **Novembre** et **Mars** (les mois les plus pluvieux atteint progressivement 49.56 mm et 49.69 mm), alors que les valeurs minimaux caractérisent les mois de **Juillet** et **Août** (les mois les plus secs atteint respectivement 1.77 mm et 5.59 mm. (Fig10)

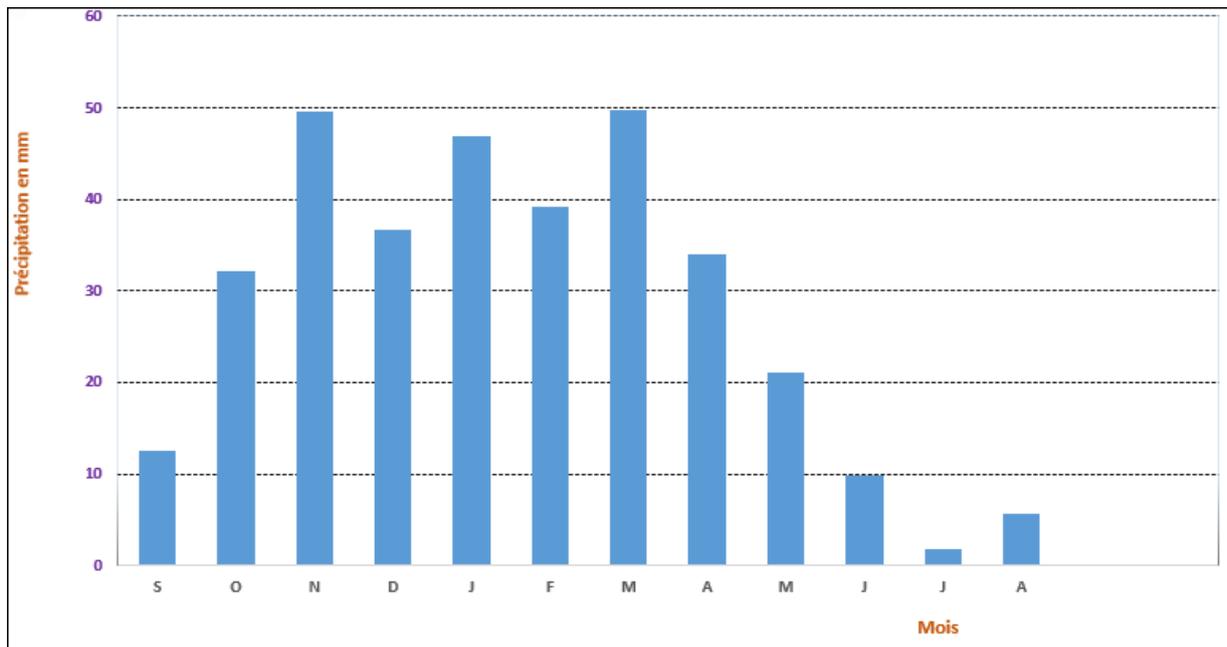


Figure10 : Précipitations moyennes mensuelles interannuelles au niveau du bassin versant ZAT (1983 /84 à 2016/17)

2 /Précipitation saisonnières :

En ce qui concerne les pluies saisonnières du bassin d'étude, la figure ci-dessous montre que la saison d'**Hiver** qui reçoit le maximum de précipitation, suivi du **Printemps** et d'**Automne**, l'Hiver reçoit **122.88 mm** sur la station de TAFERIAT. On remarque aussi que l'**Été** constitué la saison sèche (**17.3 mm**).

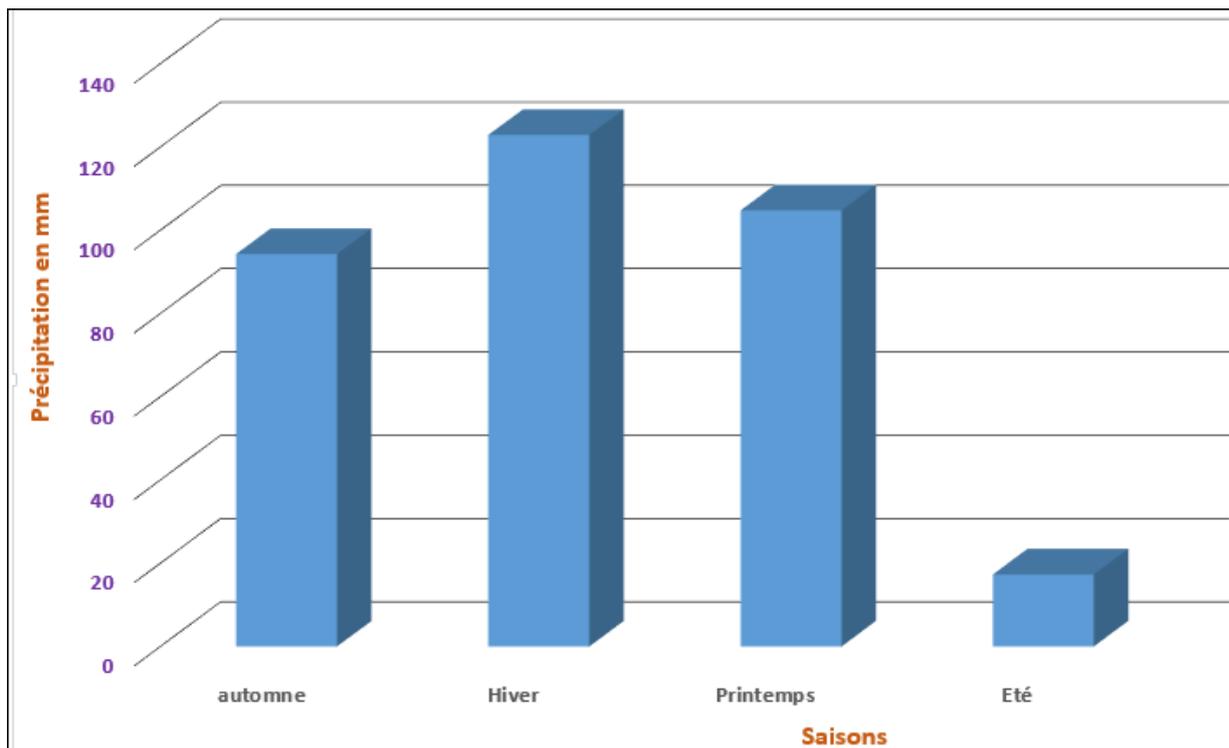


Figure 11: Les pluies moyennes saisonnières au niveau de ZAT

3 /Précipitations annuels:

Les pluies moyennes annuelles ont été obtenues par sommation des moyennes mensuelles de chaque année, pour notre bassin la figure ci-dessous montre l'évolution annuelle des pluies. Nous pouvons voir que, dans la période de **1983/84 à 2016/17**, les précipitations varient de façon **irrégulière** d'une année à l'autre et l'année **1995 /96** est la plus pluvieuse (**913.4 mm**). La station de TAFERIAT a enregistré des valeurs inférieures à 500 mm dans les autres années.

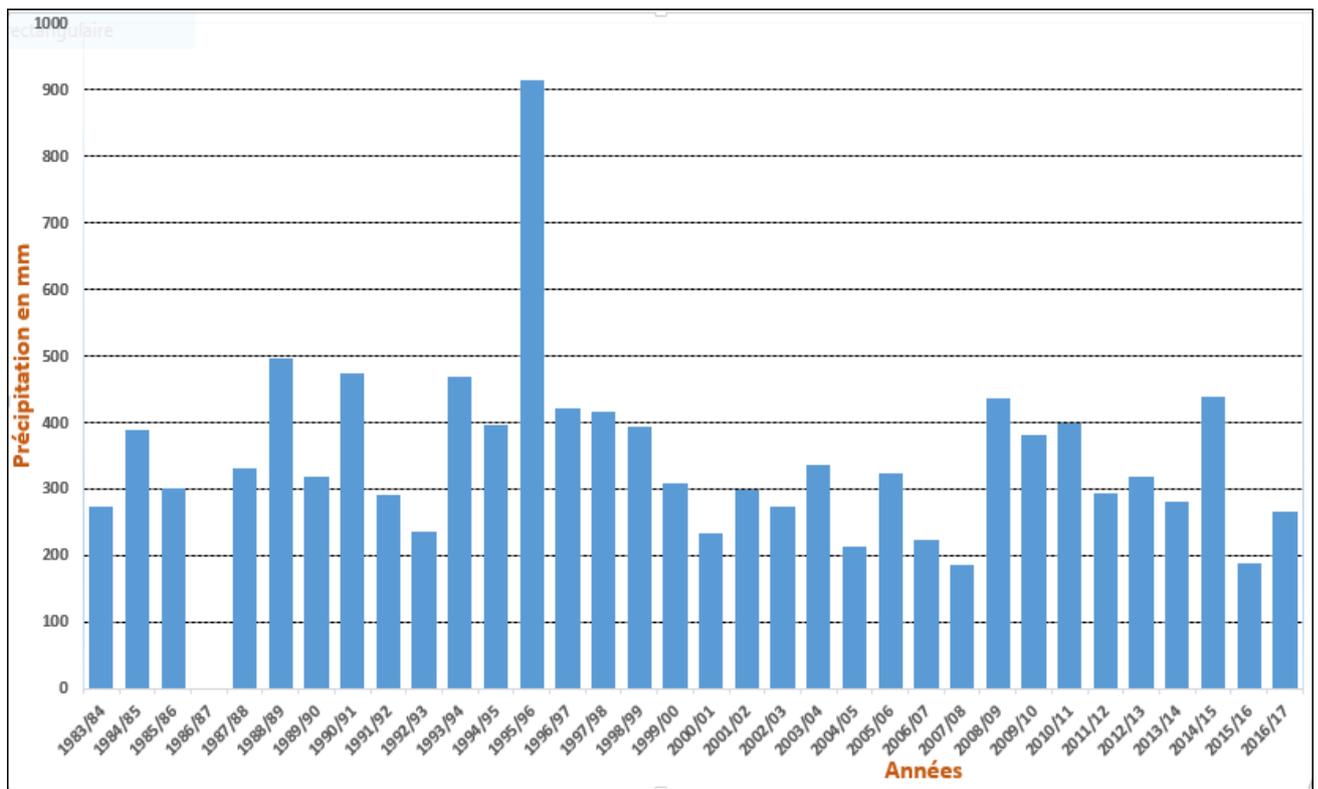


Figure 12: Les pluies moyennes annuelles au niveau du ZAT

II- L'analyse des données de débit:

Le débit de surface ou le ruissellement est constitué par l'eau qui s'écoule plus ou moins librement à la surface des sols. L'importance de l'écoulement superficiel dépend de l'intensité des précipitations et de leur capacité à saturer rapidement les premiers centimètres du sol, avant l'infiltration et la percolation.

Les données correspondent à des mesures qui ont été effectuées au niveau de station TAFERIAT a la région d'Ait Ourir depuis **1962** jusqu'à **2016**.

1- Débits mensuels:

Le diagramme ci-dessous représente les débits moyens mensuels pour la période allant de **1962** à **2016**. Le débit augmente de septembre à novembre où il atteint 3,5 m³/s, puis il diminue légèrement en décembre et janvier, ensuite il augmente rapidement pour atteindre sa valeur maximale de 7,1 m³/s en Avril ; enfin il diminue jusqu'à atteindre sa valeur minimale de 0,6 m³/s en Juillet et Octobre.

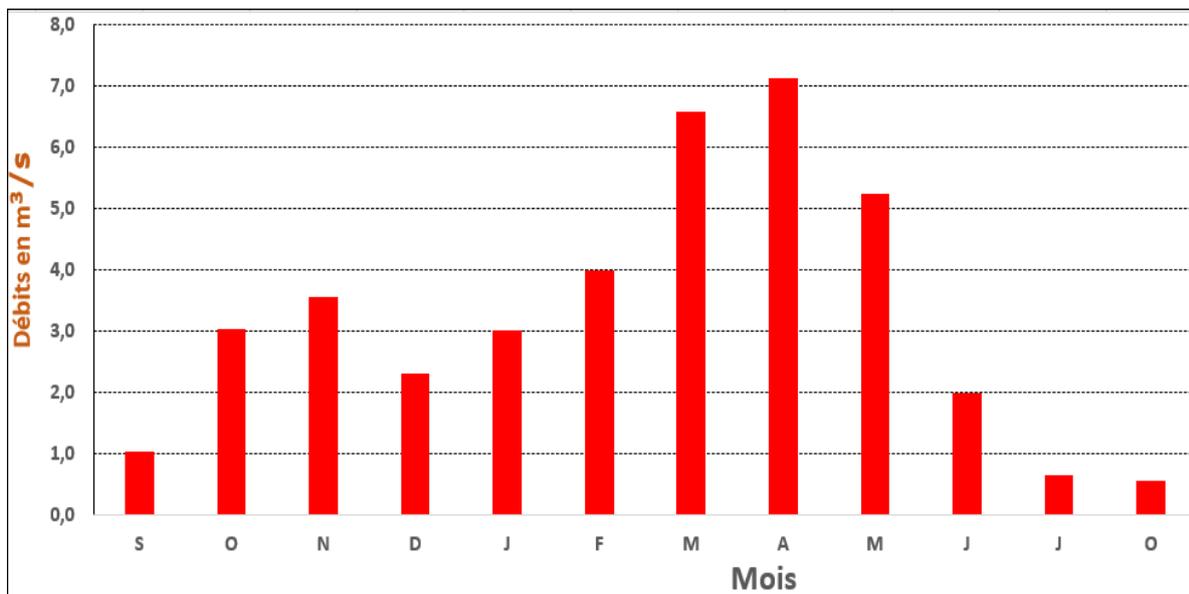


Figure 13: les débits moyens mensuels interannuels au niveau du bassin versant ZAT (1962/1963 à 2016/17)

2- Débits saisonniers:

Les débits saisonniers ont été calculés à partir des données mensuelles. La période prise en compte pour le calcul des moyennes saisonnières est de 1962/63 à 2015/16. La figure 14 présente la variation saisonnière des débits au niveau du bassin versant du Zat. Nous constatons trois évolutions différentes à l'exutoire. La première est une faible augmentation de l'automne à l'hiver, puis plus forte de l'hiver au printemps. La grande chute de débits intervient enfin entre le printemps et l'été.

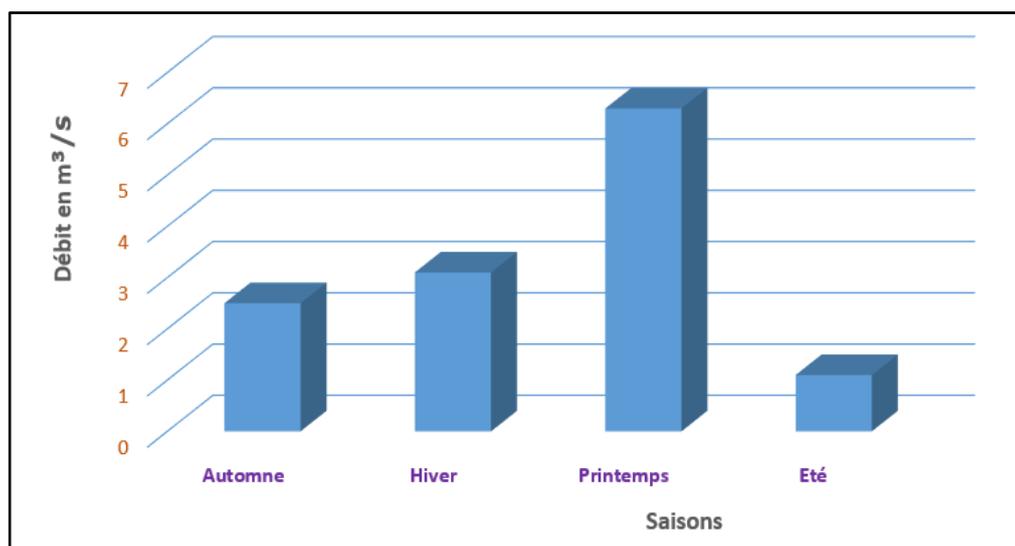


Figure 14: Débits moyens saisonniers au niveau du bassin ZAT

3- Débits annuels:

Pour une période d'observation allant de 1962 à 2019, soit 55 ans, la valeur moyenne annuelle de l'écoulement est de l'ordre $3,4 \text{ m}^3/\text{s}$. On note que les années 1962-1971, 1973, 1975, 1979, 1987-1989, 1993, 1995, 1999, 2008 et 2014 dépassent largement cette moyenne alors que le reste des années ont connu des écoulements inférieurs à cette moyenne avec un minimum de $0,54 \text{ m}^3/\text{s}$ enregistré en 2001.

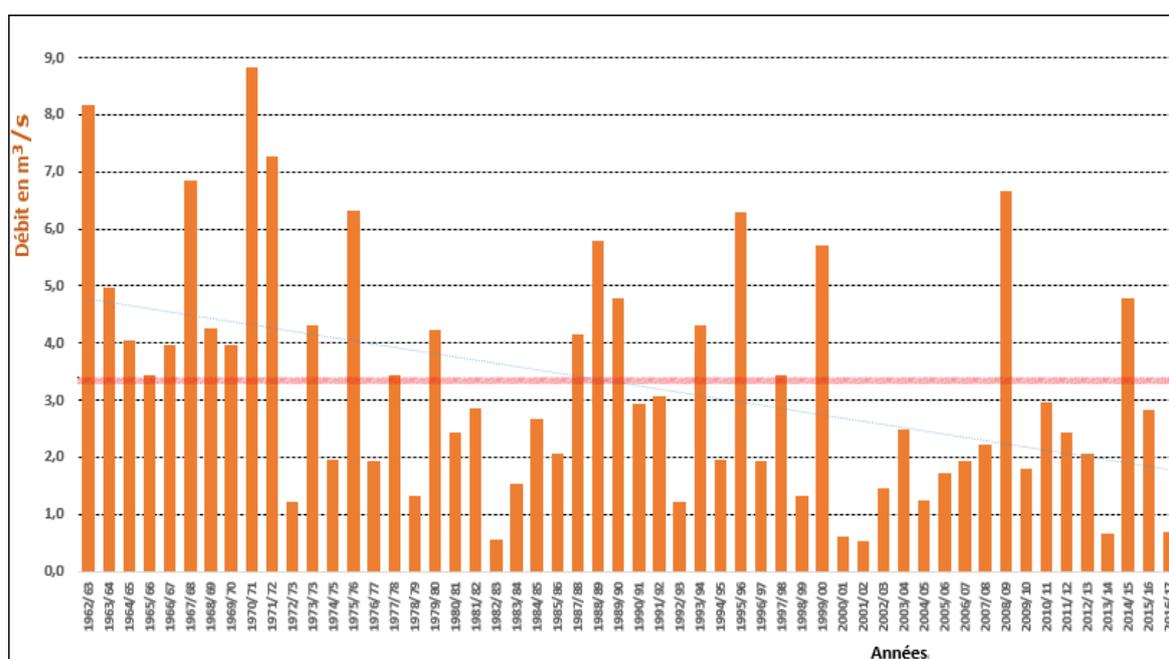


Figure 15: Les débits moyens annuels du bassin ZAT

Chapitre 3 : Etude dynamique des crues et analyse des hydrogrammes

I / Introduction :

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 et 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.

On distingue deux types d'hydrogrammes selon le type de crue:

- Les crues simples ou monogéniques qui sont caractérisées par une seule montée du niveau d'eau suivie d'une descente de ce niveau
- Les crues complexes ou polygéniques : Elles sont caractérisées par plusieurs baisses et plusieurs hausses des niveaux d'eau, ce qui témoigne de la pluralité des facteurs responsables de la crue.

II / Etude des crues dans l'année hydrologique:

La répartition mensuelle des crues le long de la période d'étude de 43 ans permet de déduire les périodes de l'année les plus propices à leurs arrivées. La répartition mensuelle des crues se présente comme suit :

Mois	Nombre de crues	Pourcentage
janvier	6	14.29%
Février	2	4.76%
Mars	8	19.05%
Avril	9	21.43%
Mai	1	2.38%
Juin	1	2.38%
Juillet	0	0.00%
Août	3	7.14%
Septembre	0	0.00%
Octobre	4	9.52%
Novembre	3	7.14%
Décembre	5	11.90%

Tableau 2: Nombre et pourcentages des crues mensuelles

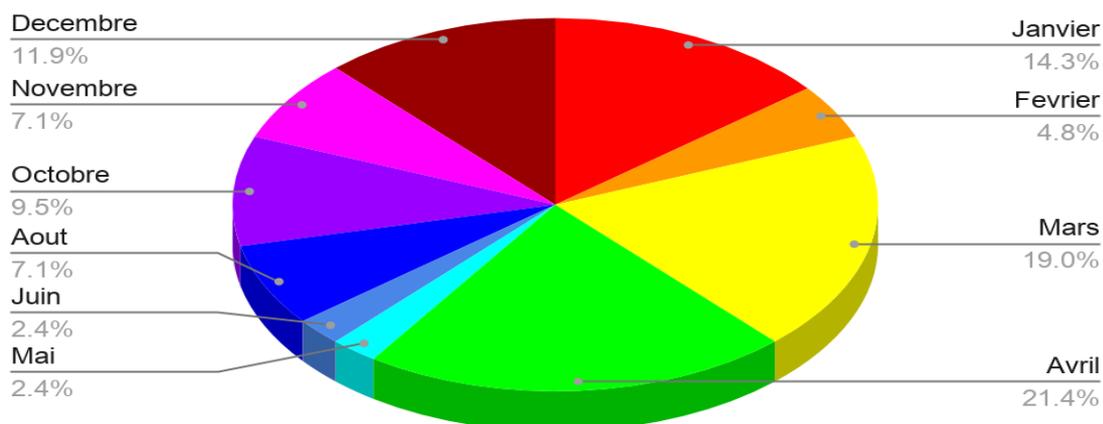


Figure16: diagramme en camembert de la répartition mensuelle des crues

On remarque que les mois de Mars et Avril (mois du printemps) sont les plus riches en crues (ils enregistrent les pourcentages les plus élevés). On remarque aussi l'absence des crues dans les mois de Septembre et juillet.

III /Analyse des hydrogrammes des crues :

La région de TAFERIAT et Ait Ourir a été affectée par des crues exceptionnelles des oueds et cours d'eau, notamment oued ZAT qui a isolé cette commune en débordant sur les routes et pistes qui la desservent. Pour analyser ces crues, nous avons choisi, durant la période 1968-2015, huit événements importants en ce qui concerne le débit maximal instantané enregistré à l'exutoire de TAFERIAT :

- La crue du 13 Août 1982
- La crue du 01 novembre 1987
- La crue du 09 mars 1990
- La crue du 07 mars 1994
- La crue du 17 Août 1995
- La crue du 28 octobre 1999
- La crue du 02 mai 2011
- La crue du 22 novembre 2014

1/ La crue du 13 Août 1982 :

La crue du 13/08/1982, est la plus importante survenue dans le bassin de l'oued ZAT, avec **680 m³/s** de débit de pointe. Le volume de cette crue est de l'ordre de **9,6 10⁶ m³**.

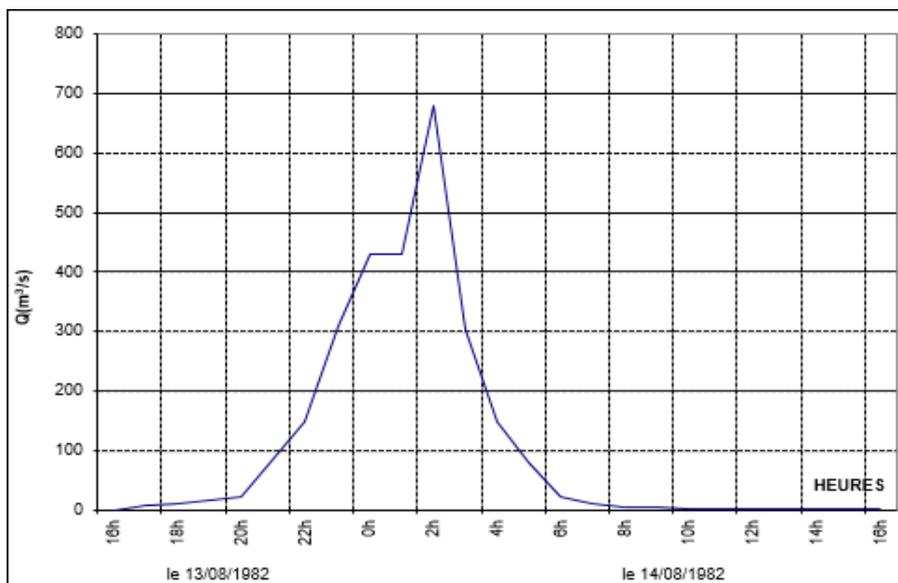


Figure17: Hydrogramme de la crue du 13/08/1982 en m³/s

La figure 17 montre que le débit atteint par cette crue (680 m³/s), est le débit le plus important jamais enregistré, avec un temps de montée de **10h** et un temps de base de **15 h**. C'est vrai que c'est une crue de courte durée mais qui a causé des dégâts très importants.

CARACTÉRISTIQUES DE LA CRUE	
date début	13/08/1982 à 16h
date fin	14/08/1982 à 8h
débit de pointe (m ³ /s)	680
débit max. moyen (m ³ /s)	178,048
débit base avant (m ³ /s)	0,1
débit base après (m ³ /s)	4,2
volume 10 ⁶ m ³	9,615
temps de base (heures)	15
temps de montée (heures)	10
coefficient de pointe	3,8

Tableau 3 : les caractéristiques de la crue de 13/08/1982

2/ La crue du 01 novembre 1987 :

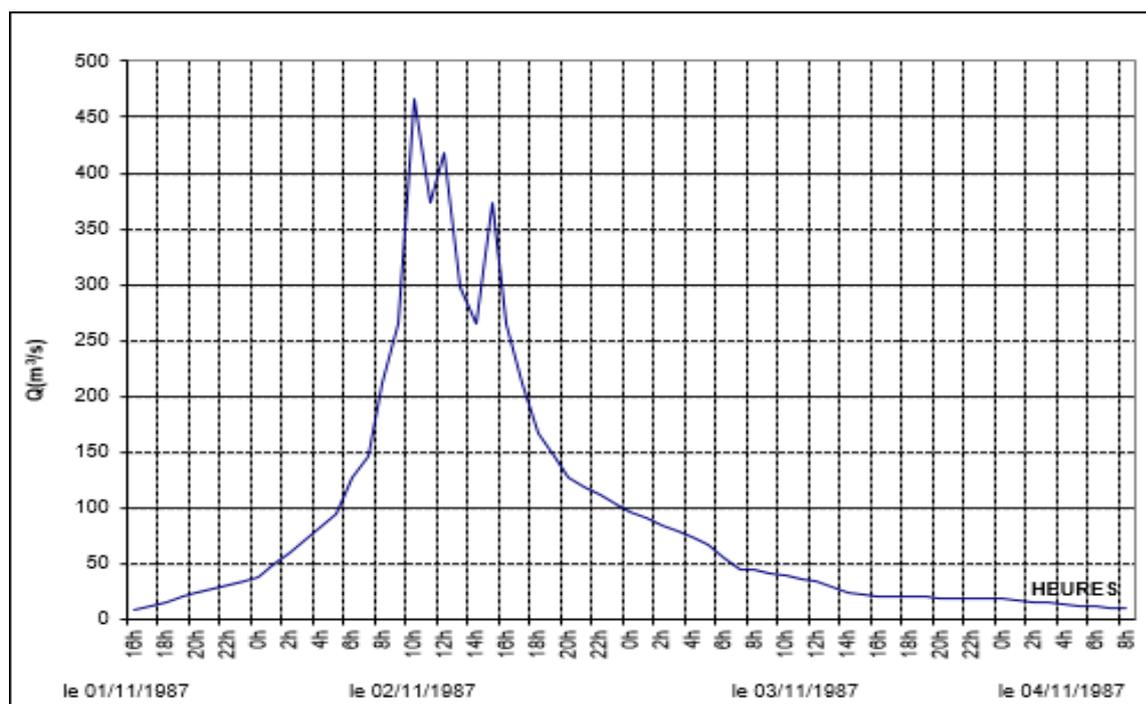


Figure 18 : Hydrogramme de la crue du 01/11/1987 en m³/s

Cette crue montre plusieurs hausses et plusieurs baisses des niveaux d'eau, ce qu'indique l'arrivée successive des eaux de différents affluents ou encore des averses espacées dans le temps. C'est une crue violente avec un débit de pointe de **467 m³/s**, un temps de montée de l'ordre de **18 h** et un temps de base de **47 h**.

CARACTÉRISTIQUES DE LA CRUE	
date début	01/11/1987 à 16h
date fin	03/11/1987 à 16h
débit de pointe (m ³ /s)	467
débit max. moyen (m ³ /s)	104,8
débit base avant (m ³ /s)	9,02
débit base après (m ³ /s)	20,4
volume 10 ⁶ m ³	17,743
temps de base (heures)	47
temps de montée (heures)	18
coefficient de pointe	4,5

Tableau 4 : Les caractéristiques de la crue de 11/02/1987

3/ La crue du 09 mars 1990 :

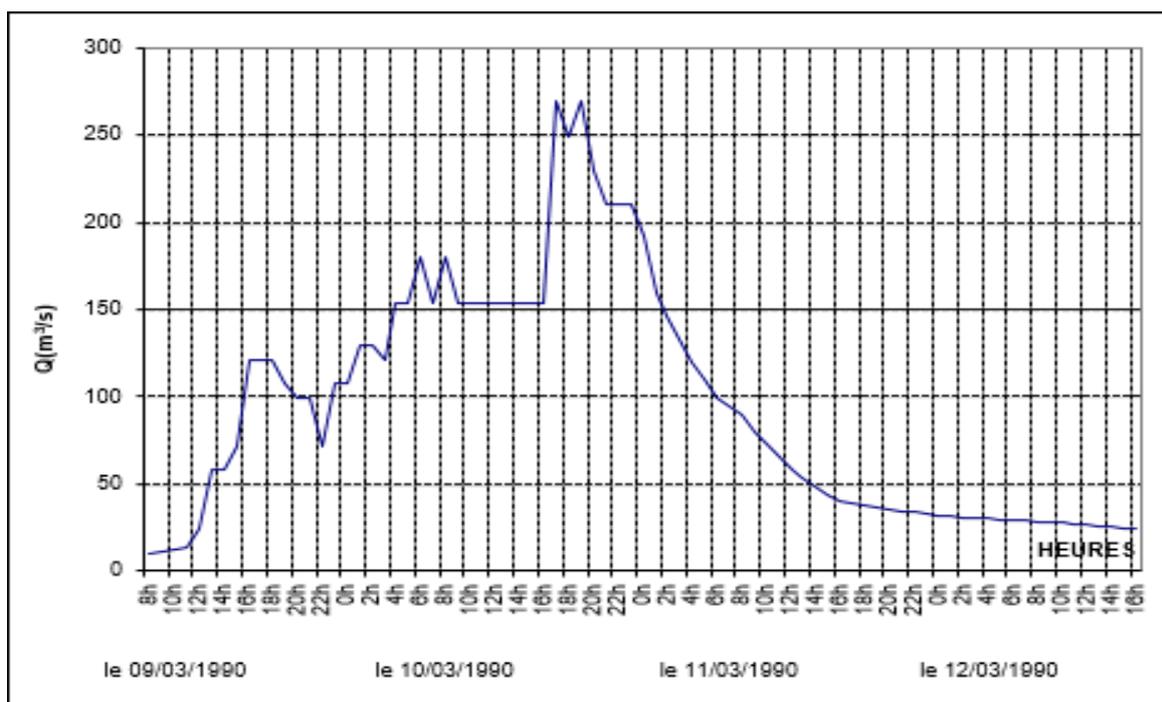


Figure19: hydrogrammes de la crue du 09/03/1990 en m³/s

Cette crue montre des variations irrégulières des débits en fonction de temps au début, mais pendant le 11/03/1990 on remarque une baisse important des niveaux d'eau. C'est une crue importante avec un débit de pointe de **270 m³/s**, un temps de montée de l'ordre **33 h** et un temps de base de **79 h**.

CARACTÉRISTIQUES DE LA CRUE	
date début	09/03/1990 à 8h
date fin	12/03/1990 à 16h
débit de pointe (m ³ /s)	270
débit max. moyen (m ³ /s)	79,01
débit base avant (m ³ /s)	9,88
débit base après (m ³ /s)	24,6
volume 10 ⁶ m ³	22,47
temps de base (heures)	79
temps de montée (heures)	33
coefficient de pointe	3,4

Tableau 5 : Les caractéristiques de la crue de 09/03/1990

4/La crue du 06 mars 1994 :

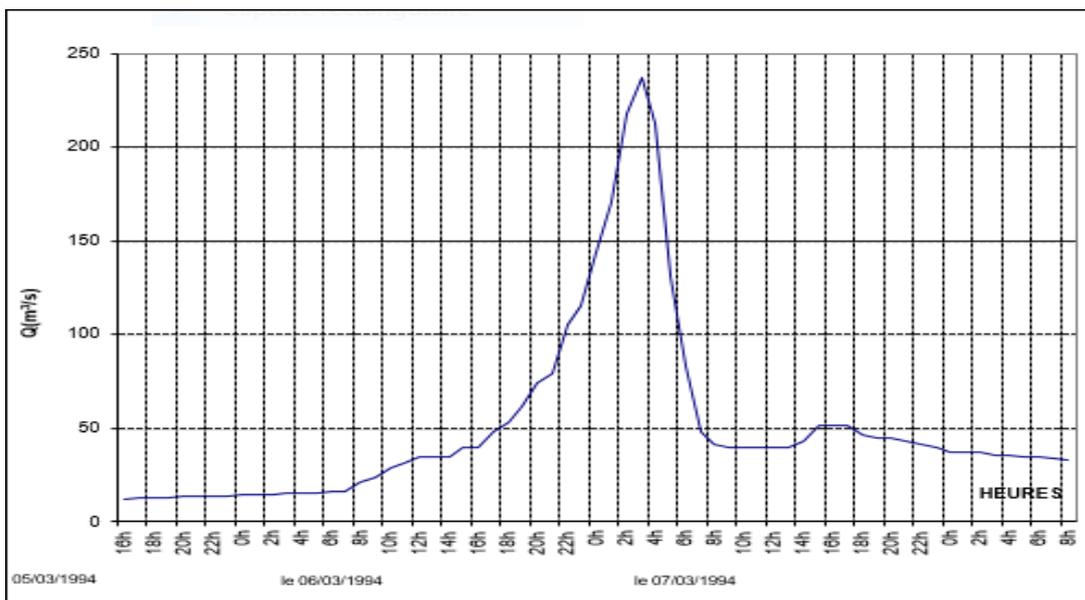


Figure 20 : hydrogrammes de la crue du 06/03/1994 en m³/s

L'hydrogramme montre que c'est une crue simple avec des variations régulières des débits en fonction de temps. Le débit de cette crue à l'oued ZAT a atteint **237 m³/s**, avec un temps de montée de l'ordre de **20 h** et un temps de base de **40 h**.

CARACTÉRISTIQUES DE LA CRUE	
date début	06/03/1994 à 7h
date fin	08/03/1994 à 0h
débit de pointe (m ³ /s)	237
débit max. moyen (m ³ /s)	42,46
débit base avant (m ³ /s)	16
débit base après (m ³ /s)	37
volume 10 ⁶ m ³	6,115
temps de base (heures)	40
temps de montée (heures)	20
coefficient de pointe	5,6

Tableau 6 : Les caractéristiques de la crue de 06/03/1994

5/ La crue du 17 Août 1995:

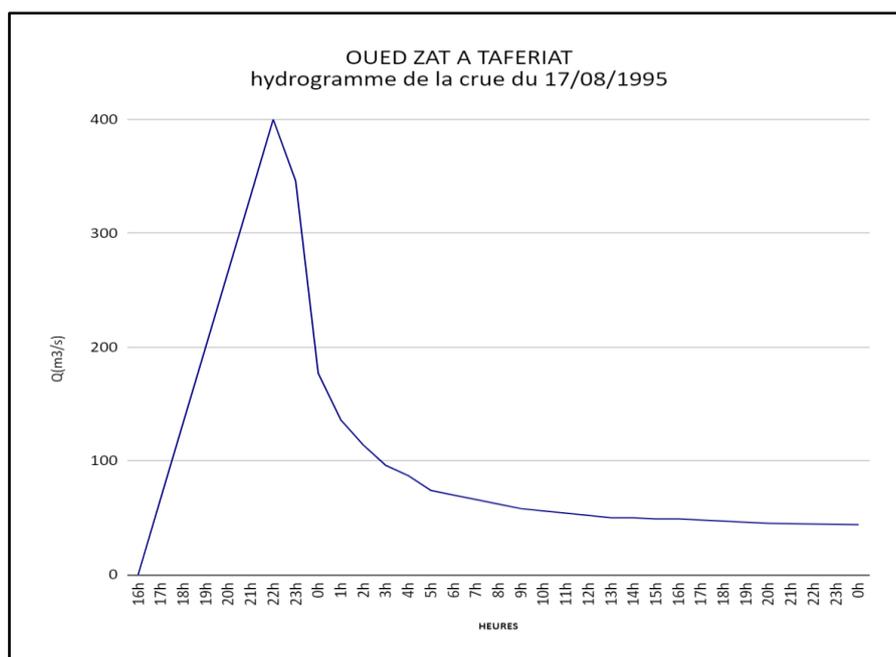


Figure 21: hydrogrammes de la crue du 17/08/1995 en m³/s

L'hydrogramme montre que c'est une crue simple caractérisée par une seule montée du niveau d'eau suivie d'une descente de ce niveau. On note aussi un débit de pointe de **400 m³/s**, avec un temps de montée rapide de l'ordre de **6 h** et un temps de base de **31 h**. C'est donc une crue violente qui atteint rapidement son débit de pointe.

CARACTÉRISTIQUES DE LA CRUE	
date début	17/08/1995 à 16h
date fin	19/08/1995 à 0h
débit de pointe (m ³ /s)	400
débit max. moyen (m ³ /s)	85.84
débit base avant (m ³ /s)	0.042
débit base après (m ³ /s)	44
volume 10 ⁶ m ³	9.579
temps de base (heures)	31
temps de montée (heures)	6
coefficient de pointe	4.7

Tableau 7 : Les caractéristiques de la crue de 17/08/1995

6/ la crue du 28 Octobre 1999:

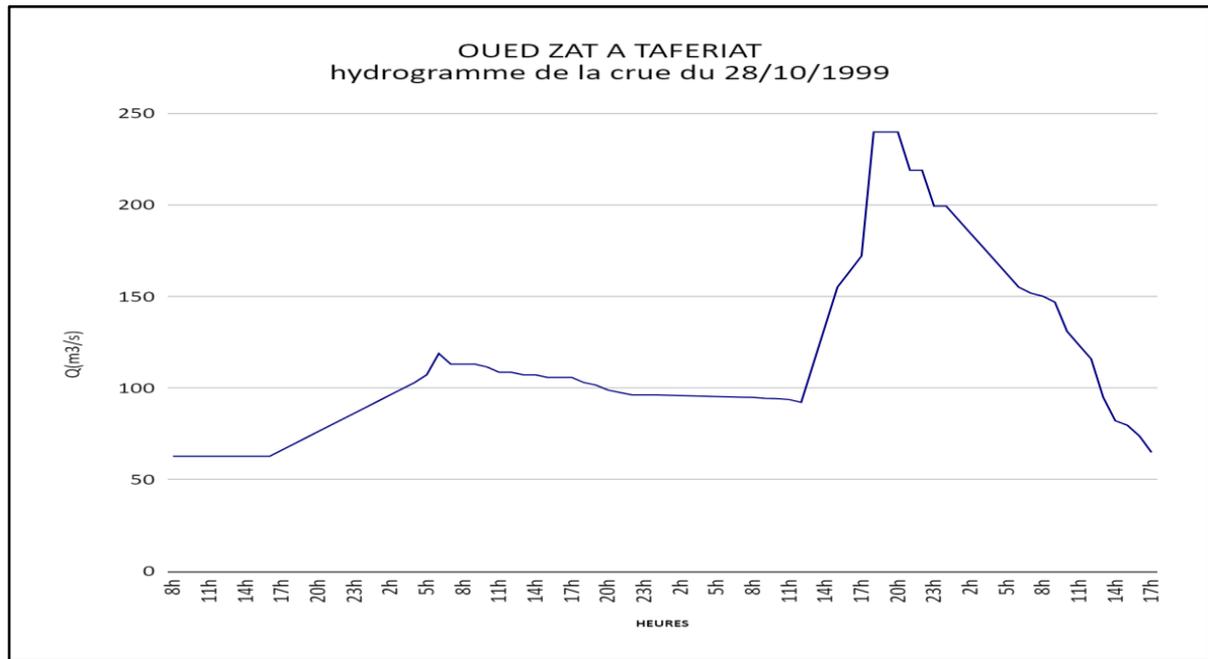


Figure 22: hydrogrammes de la crue du 28 /10/ 1999

Cette crue montre une double hausse et double baisses des niveaux d'eau. C'est une crue violente avec un débit de pointe de **239.8 m³/s**, un temps de montée de l'ordre de **50 h** et un temps de base de **72 h**.

CARACTÉRISTIQUES DE LA CRUE	
date début	26/10/1999 à 16h
date fin	29/10/1999 à 17h
débit de pointe (m ³ /s)	239.8
débit max. moyen (m ³ /s)	57.74
débit base avant (m ³ /s)	62.88
débit base après (m ³ /s)	65
volume 10 6 m ³	14.966
temps de base (heures)	72
temps de montée (heures)	50
coefficient de pointe	4.2

Tableau 8 : Les caractéristiques de la crue de 18/10/1999

7/ La crue du 02 mai 2011:

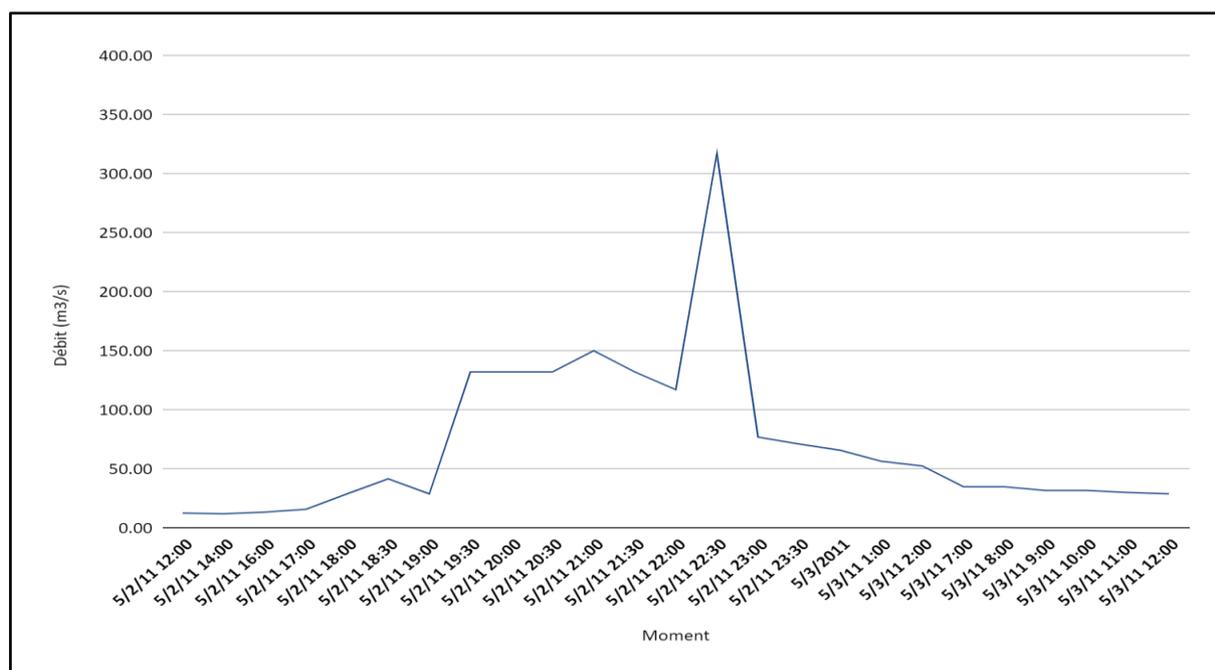


Figure23: Hydrogramme de la crue du 02 Mai 2011

Cette crue montre des variations irrégulières des débits en fonction de temps. C'est une crue importante avec un débit de point **317.16 m³/s**, un temps de montée de l'ordre **10.5 h** et un temps de base de **24 h**.

CARACTÉRISTIQUES DE LA CRUE	
Débit de pointe (QP)	317.16
Débit de base avant (QBAV)	12.51
Débit de base après (QBAP)	28.89
Débit moyen (DM)	52.95
Coefficient de pointe (CP)	5.99
Temps de base (TB) heure	24
Temps de montée (TM) heure	10.5
Volume de crue (VC)	4.57

Tableau 9 : Les caractéristiques de la crue de 02/05/2011

8/ La crue du 22 novembre 2014

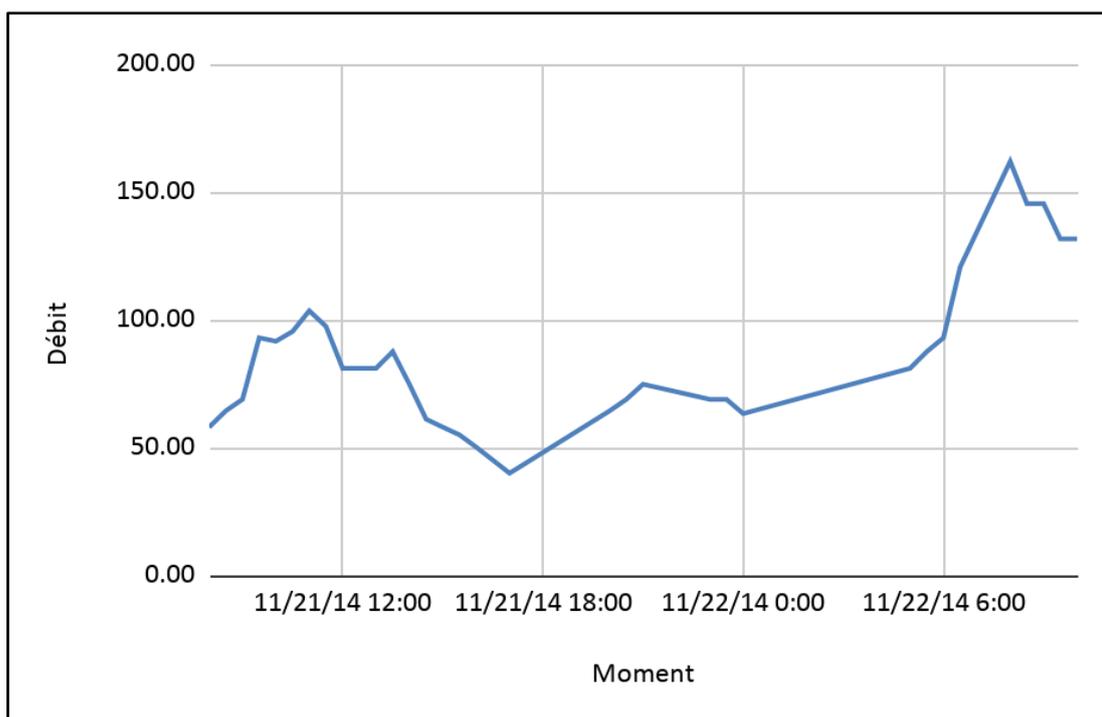


Figure 24: Hydrogramme de la crue du 23 Novembre 2014

Cette crue est complexe (crue polygénique). Elle est caractérisée par trois montées principales dont la plus importante a atteint un débit de pointe de **161.97 m³/s**. Cette crue a un temps de montée de **24 h** et un temps de de base de **26.5 h**.

CARACTÉRISTIQUES DE LA CRUE	
Débit de pointe (QP)	161.97
Débit de base avant	58.03
Débit de base après	131.66
Débit moyen (DM)	81.90
Coefficient de pointe (CP)	1.98
Temps de base (TB) min	26.5
Temps de montée (TM) min	24
Volume de crue (VC)	7.8

Tableau 10 : Les caractéristiques de la crue de 23/11/2014

IV / Analyse fréquentielle des crues de l'oued ZAT:

1- Application de la loi de Gumbel:

La fonction de Gumbel est une fonction doublement exponentielle : $F(x) = e^{-e^{-y}}$

Avec $y = a(Q - Q_0)$; y est la droite de Gumbel.

- Le paramètre d'échelle : $1/a = 0,78 \sigma$ (σ est l'écart type de la série des crues).

- Le paramètre de forme : $a = -(1/a * 0,577)$ (avec Q est la moyenne des crues).

Le calcul des paramètres a et Q_0 nous permet d'obtenir l'équation de la droite de Gumbel

$$y = a(Q - Q_0)$$

La série des débits maxima annuels classés par ordre décroissant se présentent comme suit. Pour chaque débit maximum, nous avons calculé le rang R, la fréquence expérimentale F, la fréquence au non dépassement FND et la variable réduite y :

$$F = (R-0.5) \quad FND = 1-F \quad \text{et} \quad y = -\ln(-\ln(FND))$$

Année	Débit (m3/s)	Rang	F	FND	y
1981/82	680.0	1	0.009615384615	0.9903846154	4.639563833
1965/66	600.0	2	0.02884615385	0.9711538462	3.531179117
1987/88	466.9	3	0.04807692308	0.9519230769	3.010418612
1994/95	400.0	4	0.06730769231	0.9326923077	2.663843085
2010/11	317.2	5	0.08653846154	0.9134615385	2.402250661
2014/15	314.5	6	0.1057692308	0.8942307692	2.191120591
1963/64	285.0	7	0.125	0.875	2.013418678
1989/90	269.7	8	0.1442307692	0.8557692308	1.85947404
1999/00	239.9	9	0.1634615385	0.8365384615	1.72326315
1993/94	236.7	10	0.1826923077	0.8173076923	1.600777311
1967/68	230.0	11	0.2019230769	0.7980769231	1.489212123
1966/67	225.0	12	0.2211538462	0.7788461538	1.38652741
1964/65	209.0	13	0.2403846154	0.7596153846	1.291191306
1995/96	186.0	14	0.2596153846	0.7403846154	1.202023115
1988/89	146.2	15	0.2788461538	0.7211538462	1.118092444
1962/63	145.3	16	0.2980769231	0.7019230769	1.038652006
1979/80	138.0	17	0.3173076923	0.6826923077	0.9630914433
2009/10	136.9	18	0.3365384615	0.6634615385	0.8909047145
2000/01	123.5	19	0.3557692308	0.6442307692	0.8216665151
1973/74	109.0	20	0.375	0.625	0.7550148625
1971/72	108.0	21	0.3942307692	0.6057692308	0.6906379857
1976/77	108.0	22	0.4134615385	0.5865384615	0.6282642782

1978/79	108.0	23	0.4326923077	0.5673076923	0.567654465
1980/81	108.0	24	0.4519230769	0.5480769231	0.5085953937
1983/84	106.0	25	0.4711538462	0.5288461538	0.4508950248
1984/85	106.0	26	0.4903846154	0.5096153846	0.394378316
1991/92	99.5	27	0.5096153846	0.4903846154	0.338883769
1970/71	96.9	28	0.5288461538	0.4711538462	0.2842604648
2012/13	96.2	29	0.5480769231	0.4519230769	0.2303654447
1985/86	85.0	30	0.5673076923	0.4326923077	0.1770613249
2008/09	78.7	31	0.5865384615	0.4134615385	0.1242140389
1990/91	72.7	32	0.6057692308	0.3942307692	0.07169061523
2013/14	68.9	33	0.625	0.375	0.01935688858
2007/08	65.6	34	0.6442307692	0.3557692308	-0.03292496191
1974/75	63.2	35	0.6634615385	0.3365384615	-0.08529917986
1969/70	50.2	36	0.6826923077	0.3173076923	-0.1379196705
1975/76	48.7	37	0.7019230769	0.2980769231	-0.1909539359
2002/03	48.0	38	0.7211538462	0.2788461538	-0.2445880215
1972/73	47.0	39	0.7403846154	0.2596153846	-0.2990329319
2011/12	46.7	40	0.7596153846	0.2403846154	-0.354533204
1968/69	46.4	41	0.7788461538	0.2211538462	-0.4113787104
2006/07	40.3	42	0.7980769231	0.2019230769	-0.4699214143
2003/04	39.4	43	0.8173076923	0.1826923077	-0.5305999683
1977/78	32.0	44	0.8365384615	0.1634615385	-0.5939772167
1996/97	29.9	45	0.8557692308	0.1442307692	-0.6607999538
1997/98	28.7	46	0.875	0.125	-0.7320993681
2001/02	28.3	47	0.8942307692	0.1057692308	-0.8093715027
1992/93	26.9	48	0.9134615385	0.08653846154	-0.8949307518
1998/99	17.8	49	0.9326923077	0.06730769231	-0.9926889295
1982/83	14.7	50	0.9519230769	0.04807692308	-1.110195934
2004/05	12.6	51	0.9711538462	0.02884615385	-1.265757772
2005/06	12.6	52	0.9903846154	0.009615384615	-1.535660233

Tableau 11 : Séries des débits annuels et leurs paramètres de Gumbel

L'équation de la droite de Gumbel s'écrit : **$y = 0,009 Q - 0,69$**

Sur un papier à échelles linéaires, nous avons placé les points des fréquences expérimentales et nous leur avons ajusté l'équation de la droite de Gumbel.

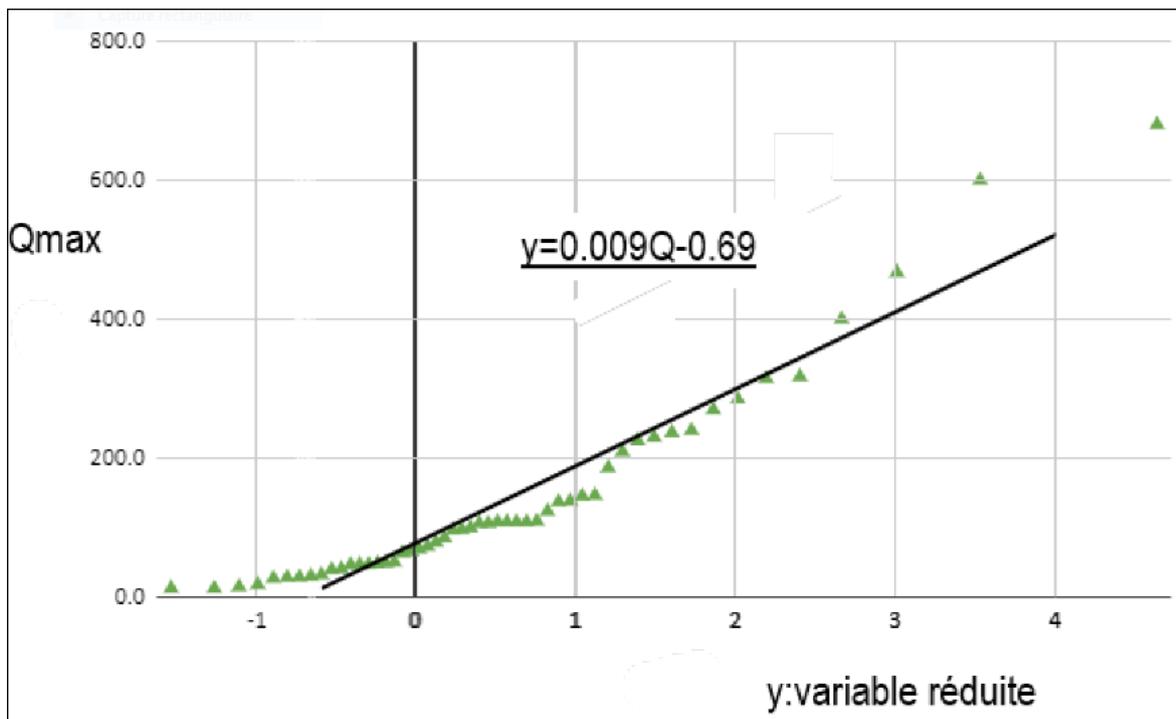


Figure25: Ajustement de la loi de Gumbel aux crues de l'oued ZAT à Taferait

La droite de Gumbel passe au milieu du nuage de points. Ceux-ci serpentent autour de cette droite. L'ajustement paraît convenable et on peut à priori utiliser la loi de Gumbel pour l'estimation des débits de pointe relatifs à certaines probabilités : la crue cinquantennale ou centennale par exemple ; ou encore les périodes de retour de certaines pointes de débits particuliers : 1000 m³/s par exemple.

a- Calcul des quantiles :

Les calculs des quantiles (crue médiane, décennale, cinquantennale, centennale) ou les périodes de retour de certaine pointes de crues peut se faire soit pour lecture directe du graphique soit ou utilisant l'équation de la droite de Gumbel $y = 0,009 Q - 0.69$

Avec la fréquence au non dépassement $FND = e^{-e^{-y}}$

période de retour	Probabilité d'occurrence	Fréquence au non dépassement	Variable réduite y
10 ans	0,1	0,9	2,25
20 ans	0,05	0,95	2,97
50ans	0,02	0,98	3,9
100 ans	0,01	0,99	4,6
1000 ans	0,001	0,999	6,9

Tableau 12 : les périodes de retour et leurs F, FND et y

Pour le bassin versant du ZAT à TAFERIAT, les débits de crue et leurs probabilités se présentent comme suit :

période de retour	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans	1000 ans
Débits calculés (m ³ /s)	326.7	406.7	510.2	587.8	844

Tableau 13 : les débits en m³/s en fonction de leurs périodes de retour

On remarque que ces débits estimés sont assez élevés pour un petit bassin versant de **516 km²** au regard de la période de retour. Le débit de pointe qui reviendrait tous les **10 ans** est de l'ordre de **326.7m³/s** et celui qui reviendrait tous les **1000 ans** est de l'ordre de **843 m³/s**.

b- Intervalles de Confiance :

Les intervalles de confiances sont obtenus à partir d'abaques de Bernier. Il y a un abaque valable pour un intervalle de confiance de 70 % et un autre pour un intervalle de confiance à 95 %. Si par exemple Q10 est l'estimation de la crue décennale à partir d'échantillon de n valeurs, on a 70 ou 95 pour cent de chance de trouver la vraie valeur de Q10 dans l'intervalle **[Q10-T2σ, Q10+T1σ]**.

T1 et T2 dépendent de n, ils sont lus sur les abaques des Bernier.

σ est l'écart type de la série de données.

Pour nous on a : n = 52 ; σ = 144 et les intervalles de confiance des différents quantiles se présentent ainsi :

période de retour	10 ans	100 ans	1000 ans
Intervalles de confiance à 70 %	[290.7 - 369.9]	[515.8 - 674.2]	[735 - 966]

Tableau 14 : les intervalles de confiance à 70 % des différentes périodes de retour

2/ Application de logiciel d'analyse fréquentielle des crues :

a- Présentation du logiciel utilisé dans cette étude :

Le logiciel **HYFRAN-PLUS** permet d'ajuster un nombre important de distributions statistiques à une série de données qui vérifient les hypothèses d'indépendance, d'homogénéité et de stationnarité. Un Système d'Aide à la Décision (SAD) a été développé pour permettre de choisir la classe de distributions la plus adéquate pour estimer le quantile de période de retour élevé.

b- les lois de prédétermination des débits extrêmes :

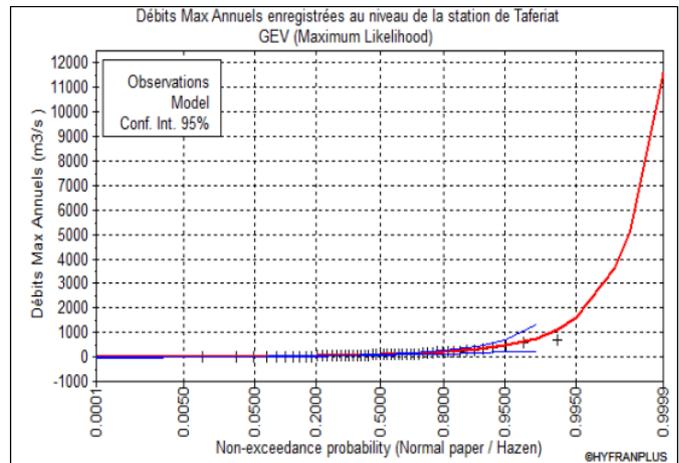
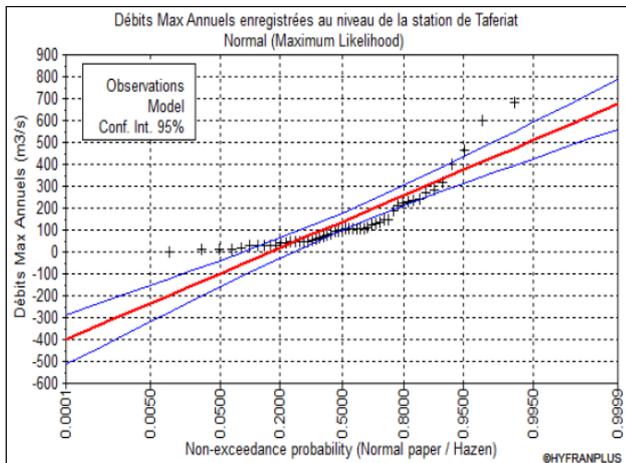
La prédétermination des débits extrêmes selon une loi de probabilité choisie parmi une diversité des lois (Meylan et al, 2008), dont les paramètres sont identifiés par la méthode de vraisemblance en minimisant les écarts entre les débits observés et les débits prédéterminés. Le choix de la loi la mieux adaptée pour l'ajustement de la distribution des débits se fera graphiquement puis se confirmera numériquement par des critères statistiques. Les lois statistiques appliquées dans cette étude sont :

-Loi normale : c'est la loi de Gauss d'un variable aléatoire caractérisé par deux paramètres μ et σ .

-Loi GEV : c'est la loi d'extremum en probabilité et statistique dispose de trois paramètres qui sont α , k et u .

-Loi exponentielle : La loi exponentielle est une loi de probabilité pour les variables aléatoires continue, définit par le paramètre α et m

-Loi de Gumbel : c'est la loi double exponentielle, capable de décrire les séries de maxima annuels.



c- Comparaisons visuelles (analyse):

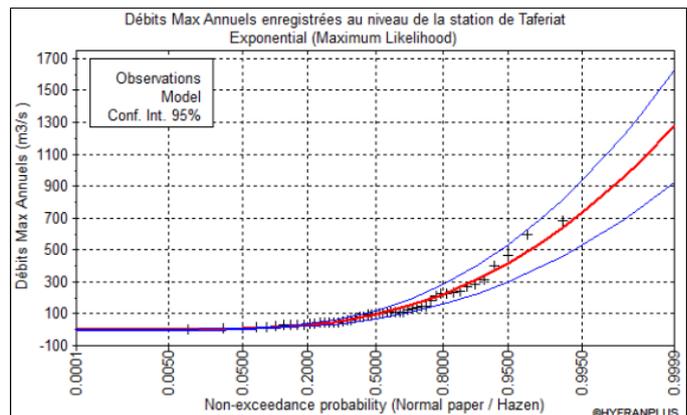
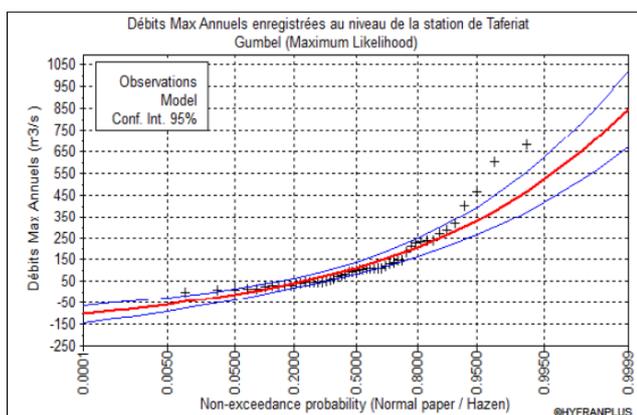


Figure 26: Graphiques des ajustements des lois de débits maxima instantanés du ZAT

La figure 26 montre les graphiques des résultats obtenus. Ils représentent les probabilités empiriques et théoriques des distributions, **Gumbel**, **Exponentielle**, **Normal** et **GEV** sur papier de probabilité normal à l'aide du logiciel. Visuellement, on peut conclure que les lois GEV et exponentielle présentent les meilleurs ajustements de la variable débit maximal instantané.

d- comparaison numérique (analyse des critères statistiques) :

	BIC	AIC
exponentielle	612.903	609.39
GEV	616.083	610.287
Gumbel	628.387	624.524
Normal	658.673	684.809

Tableau 15 : Critères de comparaison des ajustements des lois aux crues du Zat

Le tableau illustre la valeur observée des critères d'information bayésien (BIC) et d'Akaike (AIC). D'après les résultats numériques obtenus, la loi exponentielle représente le meilleur ajustement de la variable débit maximal annuel du bassin versant du ZAT.

e- Estimation des débits de pointe de certaines périodes de retour :

Dans le tableau suivant figurent les débits estimés pour quatre périodes de retour à partir des paramètres calculés précédemment pour les quatre lois de probabilité.

Les lois	Q10	Q20	Q50	Q100
GEV	306	462	768	1112
Normale	322	374	433	472
Gumbel	267	327	404	462
Exponentielle	317	414	541	637

Tableau 16 : Estimation des débits de retour selon des différentes lois d'ajustement

On remarque que les résultats estimés pour les grandes périodes de retour sont très variables d'une loi à l'autre. Par contre, les périodes de retour de 10 ans et 20 ans présentent une faible variabilité.

Les lois de **Gumbel** et **normale** semblent inadaptées à l'ajustement, elles sous estiment les hauteurs de débits de pointe de faible fréquence (50, 100 ans).

Conclusion générale

L'oued ZAT est un affluent atlasique de l'oued Tensift, avec une superficie d'environ de 577 km², un périmètre de l'ordre 167 km. C'est un bassin allongé avec un indice de compacité de l'ordre 1.9. La lithologie du bassin versant est peu perméable, condition favorable pour l'écoulement de surface.

Ce bassin versant a aussi un régime pluviométrique à maximum d'hiver, et un régime hydrologique à maximum de printemps. Ce décalage peut être expliqué par les précipitations nivales retenues au sol en hiver qui commence à fondre au printemps en amplifiant ses débits.

L'étude des crues de l'oued ZAT a permis de constater que la forme des hydrogrammes est généralement pointue, que les débits de pointe sont élevés, que les temps de montée sont courts et finalement que les temps de base sont généralement de plus de 24 heures.

On peut donc dire que les crues de la région ZAT sont soudaines, violentes et ne sont pas de longue durée, ce qui signifie un grand risque d'inondations.

Références bibliographiques

Mohammed Sirtou (1995) Etude hydro-climatologique des bassins du N'Fis, du Rheraya, de l'Ourika et du Zat (Maroc). Thèse de l'Université Paul Verlaine - Metz. 243 p.

Boualioui mariama, Abouhani Meryem (2017) Vulnérabilité territoriale aux inondations du Haut Atlas. Mémoire de fin d'études, Faculté des sciences et techniques Marrakech. 63 p.

L. Hanich, V. Simonneaux, G., Boulet et G. Chehbouni (2014) Hydrologie des bassins versants du Haut Atlas marocain. Communication universitaire, Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère, 20 p.

Ramromi Adnane (2007) Les crues en zone montagneuse semi-aride le cas des bassins de R'Dat et Zat. Mémoire de Maîtrise, Faculté des sciences et techniques Marrakech. 46 p.

Bouyantouch Hanane, EL Baroudi Oumaima (2017) Actualisation annuaires hydrologiques de bassin versant de Tensift et contrôle des débits de l'Oued ZAT. Mémoire de licence, Faculté des sciences et techniques, Marrakech. 66 p.