

Département des Sciences de la Terre

Licence en Sciences et Techniques Eau & Environnement

Mémoire de projet de fin d'études

Crues et relation pluie-débit en milieu montagneux semi-aride. Cas du bassin versant du Ghdat (Haut Atlas, Maroc)

Réalisé par : **OUAKANNOU Ayoub & ABAIRROU Bouchra**

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

- ❖ Pr. Mohamed El Mehdi SAIDI, FSTG Marrakech (Encadrant)
- ❖ Pr. Brahim IGMOULLAN, FSTG Marrakech (Examineur)

Remerciements

Ce présent rapport est le fruit d'une vaste contribution et coopération, il est donc agréable d'exprimer nos profondes reconnaissances à tous ceux qui ont contribué à sa réalisation.

*Nous voudrions dans un premier temps remercier chaleureusement notre encadrant **Mr. Mohamed el Mehdi SAIDI**, professeur au sein de la faculté des Sciences Et Techniques à Marrakech pour sa disponibilité, son écoute et ses judicieux conseils qui ont contribué à alimenter nos idées.*

Nous présentons nos vifs remerciements à M. El Alaoui El Fels Abdelhafid et à M. El Mahlali Amine de nous avoir épaulés et encouragés et d'avoir répondu à nos innombrables questions.

Un grand merci à tout membre du département de géologie nous ayant aidés ou conseillés.

Nous voudrions exprimer notre reconnaissance envers nos amis proches qui n'ont jamais hésité à nous apporter leur aide, et à nous soutenir moralement.

Enfin, nous tenons à exprimer notre gratitude envers tous les membres de notre famille qui ont cru en nous et nous ont constamment soutenus.

Merci



Sommaire

Remerciements	2
Sommaire	3
Liste des figures	5
Liste des tableaux	7
Résumé	8
Abstract	9
I. Introduction	10
II. Cadre général de la zone d'étude	11
1. Situation géographique du bassin versant Ghdat	11
2. Cadre géologique	12
3. Contexte climatique	13
4. Occupation du sol et végétation.....	13
5. Ressource en eau	15
6. Géomorphologie du bassin versant de Ghdat.....	15
6.1. Caractéristique géométrique	15
a. Aire et périmètre	15
b. Indice de compacité	15
c. Rectangle équivalent	16
6.2. Caractéristiques topographiques	17
a. Carte hypsométrique	17
b. Courbe hypsométrique.....	18
c. La répartition des pentes	20
6.3. Caractéristiques du réseau hydrographique :	21
a. Réseau hydrographique	21
b. Classification du réseau hydrographique selon Strahler	22
c. Temps de concentration	22
III. Analyse et étude des données hydro climatiques	25
1. Analyse de la variabilité pluviométrique	25
1.1. Variations mensuelles des précipitations	25
1.2. Variations saisonnières des précipitations	26

1.3. Variations annuelles des précipitations	27
2. Variabilité des débits et régime hydrologique du bassin	28
2.1. Variations mensuelles des débits	28
2.2. Variations saisonnières des débits	29
2.3. Variations annuelles des débits :.....	30
3. Bilans Hydrologiques et relation entre les pluies et les débits	31
3.1. Corrélation entre les pluies et les débits	32
a. Corrélation entre les précipitations et les débits moyens mensuels	32
b. Corrélation entre les précipitations et les débits moyens annuels	33
3.2. Variations simultanées des précipitations et des débits mensuels	34
IV. Etude des crues de l’oued Ghdat	35
1. Etude dynamique des crues de l’oued Ghdat	35
1.1. Analyse de quelques hydrogrammes de crues remarquables de l’oued Ghdat 36	
1.2. Les crues dans l’année hydrologique	43
1.3. Variations des temps de montée et de base des crues	44
a. Variations de temps de montée	44
b. Variations de temps de base	46
2. Analyse fréquentielle des crues de l’oued Ghdat	47
2.1. Application de la loi de Gumbel	47
a. Définitions et généralités :	47
b. Ajustement de la loi de Gumbel aux crues du bassin versant du Ghdat	48
c. Calcul des quantiles et leurs intervalles de confiance	50
2.2. Application de logiciel d’analyse fréquentielle des crues	52
a. Méthode visuelle (analyse des graphes)	53
a. Méthode numérique (analyse des critères statistiques)	57
b. Estimation de probabilités de crues	58
V. CONCLUSION	60
Bibliographie	61

Liste des figures

Figure 1: Carte de la situation géographique du bassin versant de Ghdat.....	11
Figure 2: Carte géologique du bassin versant de Ghdat (Darif, 2013).....	12
Figure 3: Carte d'occupation du sol et de végétation du bassin versant de Ghdat	14
Figure 4: Rectangle équivalent du bassin versant de Ghdat.....	17
Figure 5: Carte hypsométrique du bassin versant de Ghdat.	18
Figure 6: Courbe hypsométrique du Bassin versant de Ghdat	19
Figure 7: Carte des pentes du Bassin versant de Ghdat	20
Figure 8: Carte de réseau hydrographique du bassin versant de Ghdat	21
Figure 9: Répartition de la pluviométrie moyenne mensuelle de Sidi Rahal (1967/1968 à 2016/2017).....	25
Figure 10: Répartition de la pluviométrie moyenne saisonnière de Sidi Rahal (1967/1968 à 2016/2017	26
Figure 11: Précipitations moyennes annuelles de Sidi Rahal (1967/1968 à 2016/2017)	27
Figure 12: Variations des débits mensuelles de Sidi Rahal (1967/1968 à 2016/2017)	28
Figure 13: Variations des débits saisonnières de Sidi Rahal (1967/1968 à 2016/2017).....	29
Figure 14 : Variations des débits annuelles de Sidi Rahal (1967/1968 à 2016/2017)	30
Figure 15: Corrélation entre les précipitations et les débits moyens mensuels au bassin de Ghdat à la station Sidi Rahal (1967-68 à 2016-17).....	32
Figure 16: Corrélation entre les précipitations et les débits moyens annuels au bassin de Ghdat à la station Sidi Rahal (1967-68 à 2016-17).....	33
Figure 17: Variations mensuelles des pluies et des débits au bassin de Ghdat à la station Sidi Rahal (1967-68 à 2016-17)	34
Figure 18: Allure d'une courbe représentant une crue complexe.....	35
Figure 19: Allure d'une courbe représentant une crue simple.....	35
Figure 20: Hydrogramme de la crue du 28 octobre 2010 d'oued Ghdat.....	36
Figure 21: Hydrogramme de la crue du 19 mai 2011 d'oued Ghdat.	37
Figure 22: Hydrogramme de la crue du 13 avril 2012 d'oued Ghdat	38
Figure 23: Hydrogramme de la crue du 05 avril 2013 d'oued Ghdat	39

Figure 24: Hydrogramme de la crue du 18 avril 2013 d'oued Ghda.....	40
Figure 25 : Hydrogramme de la crue du 22 novembre 2014 d'oued Ghdat.....	41
Figure 26: Hydrogramme de la crue du 25 mars 2015 d'oued Ghdat	42
Figure 27: Répartition mensuelle des crues d'oued Ghdat.....	44
Figure 28: Temps de montée des crues d'oued Ghdat	45
Figure 29 : Temps de bases des crues d'oued Ghdat.....	46
Figure 30: Ajustement de la loi de Gumbel aux crues du bassin versant Ghdat à Sidi Rahal..	50
Figure 31: Ajustement graphique des débits maximaux annuels selon les lois statistiques à la station de Sidi Rahal	56

Liste des tableaux

Tableau 1: Paramètres du rectangle équivalent du bassin versant de Ghdat.....	17
Tableau 2: La répartition des tranches d'altitudes du bassin versant du Ghdat	19
Tableau 3: Temps de concentration du bassin versant de Ghdat.....	23
Tableau 4: Caractéristiques globales du bassin versant de Ghdat	24
Tableau 5: Pluviosité moyenne pour chaque saison de l'année.....	26
Tableau 6: Débit moyenne pour chaque saison de l'année.....	29
Tableau 7: Bilan hydrologique moyen mensuel du bassin Ghdat à la station de Sidi Rahal ..	31
Tableau 8: Caractéristique de la crue 23 octobre 2010.....	36
Tableau 9: Caractéristique de la crue 19 mai 2011.....	37
Tableau 10: Caractéristique de La crue du 13 avril 2012.....	38
Tableau 11: Caractéristique de la crue du 05 avril 2013.....	39
Tableau 12: Caractéristique de la crue 18 avril 2013.....	40
Tableau 13: Caractéristique de la crue 22 novembre 2014.....	41
Tableau 14: Caractéristique de la crue 25 mars 2015.....	42
Tableau 15: Nombre et pourcentages des crues mensuelles d'oued Ghdat.....	43
Tableau 16: temps de montée des crues d'oued Ghdat	44
Tableau 17: Temps de bases des crues d'oued Ghdat.....	46
Tableau 18: Ajustement de la loi de Gumbel aux crues du Ghdat à sidi Rahal (1964/65 à 2016/17).....	49
Tableau 19: Débits calculés de différentes périodes de retour selon la loi de Gumbel	51
Tableau 20: Intervalle de confiance de différent période de retour selon loi de Gumbel	51
Tableau 21: Débits maxima instantanés annuels d'oued Ghdat à Sidi Rahal	53
Tableau 22: Résultats des critères AIC et BIC des estimations des crues d'oued Ghdat.....	58
Tableau 23: Estimation des débits de pointe de différentes périodes de retour de Ghdat à Sidi Rahal	58

Résumé

L'étude porte sur le bassin versant du Ghdat qui est un affluent de l'oued Tensift couvrant une superficie de 541 km². Il alimente en partie la plaine agricole du Haouz et la ville de Marrakech. Il est limité 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 le bassin versant du Zat. Il prend sa source dans le Haut Atlas et se jette dans le Tensift, à une trentaine de kilomètres au nord-est de Marrakech. Le bassin est caractérisé par un climat aride à semi-aride, et un climat subhumide en montagne, avec un couvert végétal peu développé. Les précipitations sont variables dans le temps et dans l'espace, mais elles sont dans l'ensemble conformes aux moyennes observées sous les climats semi arides. Les débits moyens pour les différents pas de temps sont irréguliers, et dépendent essentiellement des pluies.

Influencé par ses paramètres géomorphologiques et climatiques, le bassin a un comportement hydrologique variable et imprévisible. Il donne naissance à des crues soudaines et de courte durée qui causent souvent des dégâts importants. L'estimation des débits de pointe et des précipitations maxima de différentes périodes de retour, par un logiciel et manuellement, confirme la possibilité d'avoir des crues importantes qui peuvent avoir des conséquences dévastatrices en aval.

Abstract

The study focuses on the Ghdat watershed, which is a tributary of the Tensift Oued, covering an area of 541.09km^2 , which partly feeds the Agricultural Plain of Haouz and the city of Marrakech. It is bounded to the north by the Haouz plain, to the south by the axis of the High Atlas Range, to the east by the Tessaout watershed and to the west by the Zat watershed. It originates from the High Atlas and flows into the Tensift, about thirty kilometers northeast of Marrakech. The basin is characterized by an arid to semi-arid climate, and a subhumid mountain climate beyond this threshold, with little developed vegetation cover. Precipitation varies over time and space, but is generally consistent with averages observed in semi-arid climates. Average flows for different times are irregular, and depend mainly on rainfall.

Influenced by its geomorphological and climatic parameters, the basin has a variable and unpredictable hydrological behavior. It gives rise to sudden and short-lived floods that often cause significant damage. Estimating peak flows and maximum precipitation from different return periods, by software and manually, confirms the possibility of having significant floods that can have devastating consequences downstream

I. Introduction

Les crues sont partout dans le monde, considérées comme des phénomènes exceptionnels contre lesquels il faut se protéger par la prévision et la prévention. Elles sont violentes et destructrices puisqu'elles influencent les infrastructures de base, les terrains agricoles, la plaine en aval et le capital humain. C'est pourquoi elles sont au centre des préoccupations des scientifiques, afin de diminuer les dégâts qui en découlent.

La zone d'étude est représentée par le bassin versant du Ghdat, affluent de rive gauche de l'oued Tensift, qui alimente en partie la plaine agricole du Haouz et la ville de Marrakech. Il est limité au nord par la plaine du Haouz, au sud par une l'axe de la chaîne du Haut Atlas, à l'Est par le bassin versant de Tessaout et à l'Ouest par le bassin versant du Zat. Il couvre une superficie de 541 km². Le cours d'eau principal prend sa source dans le Haut Atlas et se jette dans le Tensift, à une trentaine de kilomètres au nord-est de Marrakech. Le climat de la région est de type aride à semi-aride en plaine et subhumide en haute montagne.

Les conditions climatiques et morphologiques du bassin versant du Ghdat font de ce dernier une zone sujette aux pulsations brutales dans les niveaux des eaux de l'oued principal. Raison pour laquelle nous avons décidé d'entamer une étude dynamique et statistique des crues de ce bassin. Ceci en vue de connaître la typologie des crues en ce milieu semi-aride montagnard.

Le mémoire est organisé comme suit : dans un premier temps, on va présenter tout d'abord l'analyse géomorphologique des bassins versants en y traitant la forme, les pentes, la géologie, le réseau hydrographique et le couvert végétal. En deuxième lieu, l'analyse du régime pluviométrique et hydrologique des bassins versants. Puis nous décrirons les caractéristiques dynamiques des crues des oueds par l'analyse des hydrogrammes des crues et voir l'impact du milieu physique des bassins versants sur la forme de ces hydrogrammes. En fin de compte nous aborderons les analyses statistiques des crues pour la prévision et la protection. Ceci par l'ajustement de certaines lois mathématiques en vue de calculer les débits des crues de certaines périodes de retour ainsi que les fréquences et les probabilités de certaines pointes de crues.

II. Cadre général de la zone d'étude

1. Situation géographique du bassin versant Ghdat

Le bassin de GHDAT est un affluent rive gauche de l'oued de Tensift, qui alimente en partie la plaine agricole du Haouz et la ville de Marrakech, il appartient au versant Nord de la chaîne du Haut Atlas. Il est situé au Sud-Est de Marrakech entre les latitudes 31°16' et 31°38' Nord et entre les longitudes 7°12' et 7°29' Ouest.

Le bassin de Ghdat (Sidi Rahal) est délimité 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, à l'Ouest par le bassin Versant de Zat.

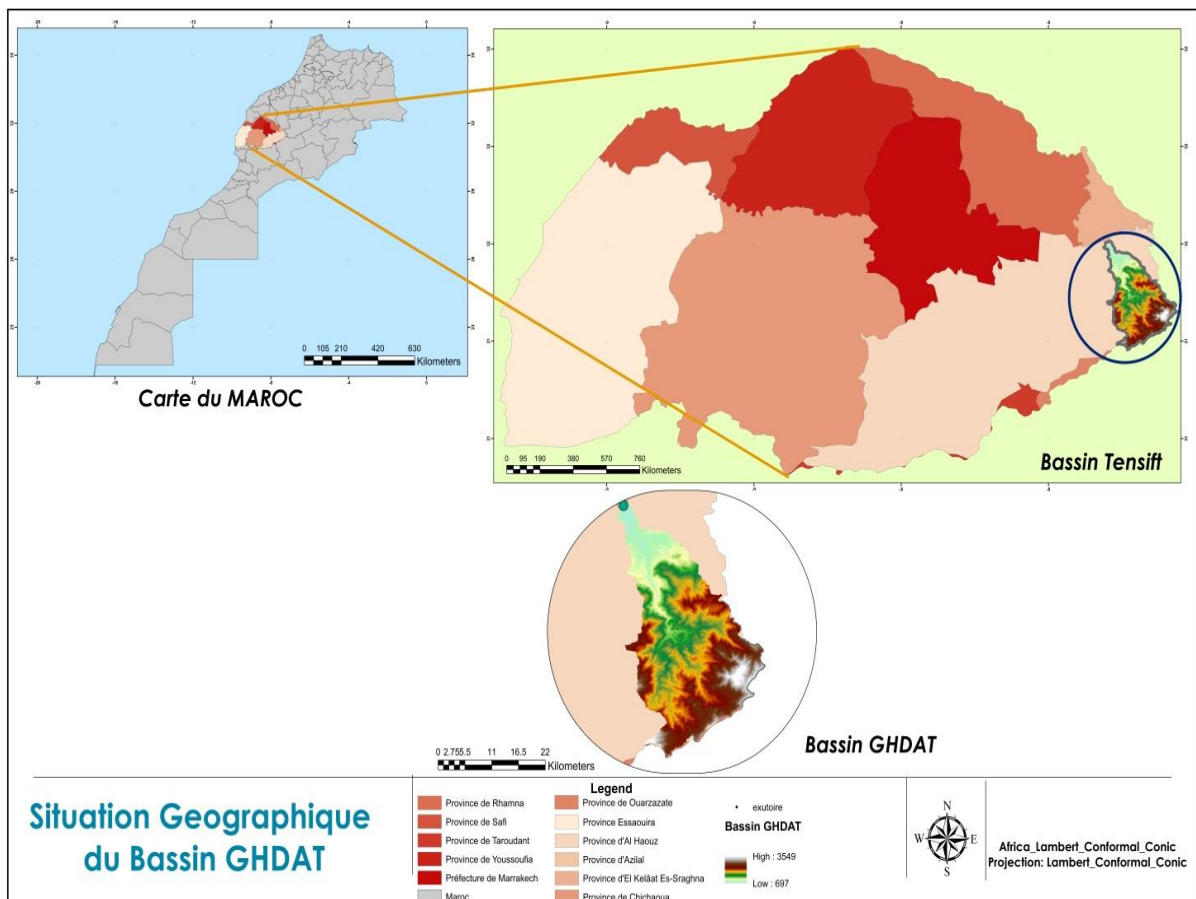


Figure 1: Carte de la situation géographique du bassin versant de Ghdat

2. Cadre géologique

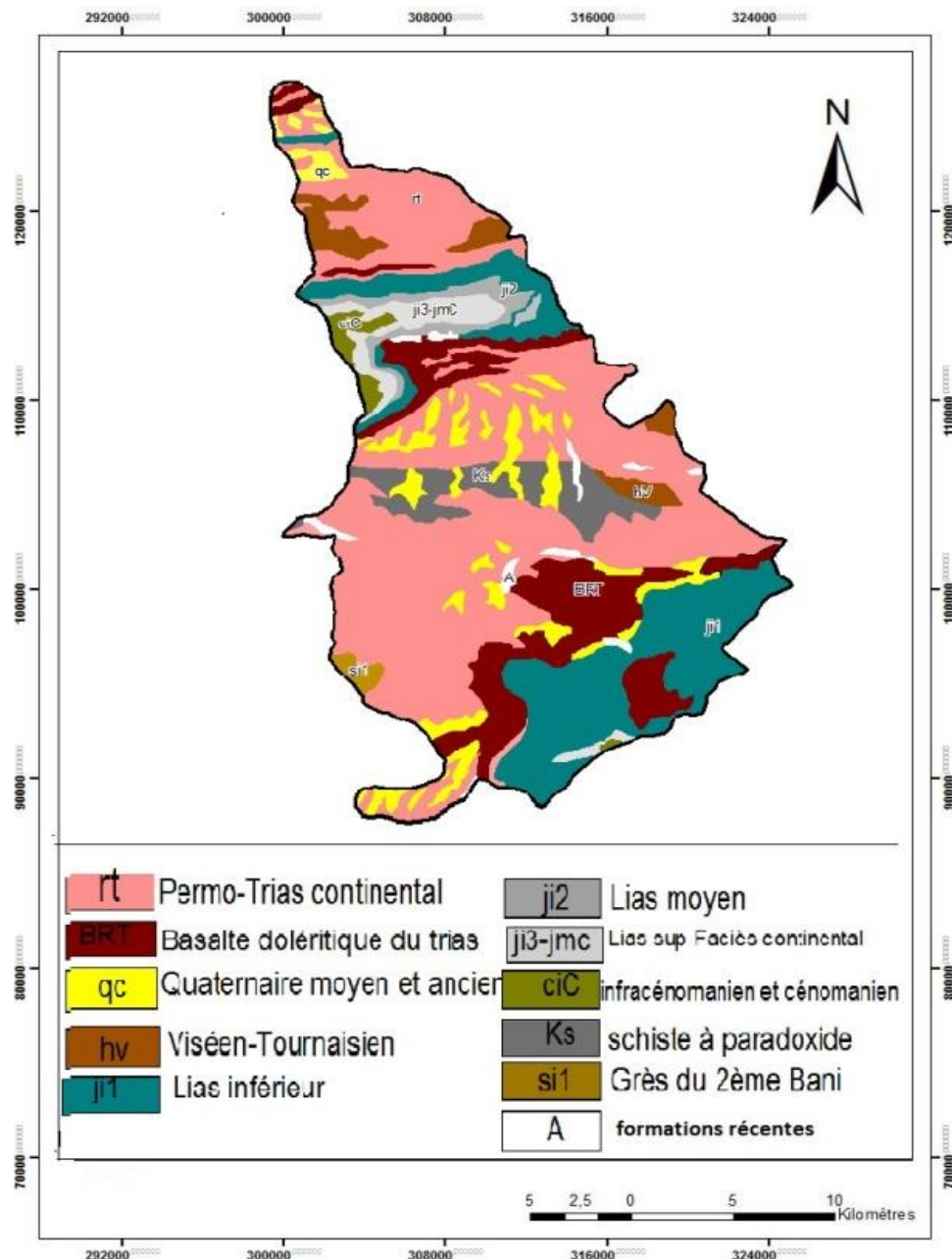


Figure 2: Carte géologique du bassin versant de Ghdat (Darif, 2013)

Le Bassin GH DAT s'étend sur des formations géologiques variées qu'on peut subdiviser en trois zones principales :

- ✓ A l'amont, on trouve les plus hauts sommets de l'Atlas où les terrains sont très peu perméables avec des roches éruptives et métamorphiques précambriennes : les granites, diorites, dolérites, andésites, rhyolites et les schistes.

- ✓ Zone de Permo-Trias, qui est parfois associé à des roches schisteuses précambriennes et ordoviciennes. Ces roches, fortement colorées, rouges parfois violacées, sont représentées principalement par des grès dans lesquels l'oued GHDAT a creusé son lit.
- ✓ Des formations calcaires primaires et secondaires qui sont perméables qu'on retrouvera surtout vers l'aval.

3. Contexte climatique

Le climat du bassin versant du Ghdat résulte de l'influence des deux facteurs suivants :

- la continentalité : l'influence de la continentalité se manifeste par des températures maximales élevées en été et des températures minimales faibles en hiver
- les caractères montagneux de la plus grande partie du bassin (Haut Atlas)

Le caractère montagneux entraîne une croissance de la pluviométrie, une accentuation de la rigueur des hivers et un adoucissement des étés avec l'altitude.

Ces deux facteurs placent le bassin du Ghdat dans une zone climatique type continental, aride à semi-aride. Les températures moyennes mensuelles varient entre 12.3 et 28.2 °C

La région du Tensift qui comprend le bassin du Ghdat est caractérisé par des variations dans le temps et dans l'espace de précipitations. La période pluvieuse s'étend du mois d'Octobre jusqu'au mois d'Avril et la période sèche se situe entre le mois de Mai et le mois de Septembre. La pluviosité annuelle dans le Haut Atlas est en moyenne de l'ordre de 600 à 800 mm, alors que dans la zone située entre le piémont du Haut Atlas et la plaine du Haouz, cette moyenne varie entre 300 et 400 mm, plus précisément dans la station Sidi Rahal elle est de 346,1mm. Environ 80 % à 90% de ces précipitations se déroulent pendant la saison pluvieuse. Le vent souffle le plus souvent de l'Ouest ou Nord-Ouest avec une vitesse moyenne qui varie entre 1.5 et 3.4 m/s à Marrakech.

4. Occupation du sol et végétation

Les conditions climatiques et la nature morphologique du bassin favorisent le développement d'une couverture végétale hétérogène, formée essentiellement de plantes

steppiques, de plantes herbacées et des plantes ligneuses arborées. L'agriculture dans les régions de Ghdat est marquée par une diversification de la production : on y trouve des céréales, des abricotiers, des agrumes, des pommes de terre, des oliviers, des rosiers, des fourrages, du bétail, du miel, ...Etc.

La superficie de surgir de cette région est d'environ 22.02 Km² soit 4.07% de leur superficie totale, tandis que la partie forestière est estimée à 99.23 Km² soit 18.34 % de la superficie totale. Le reste des superficies est partage entre les herbes ; les terrains rocheux ; et les terrains inconnus.

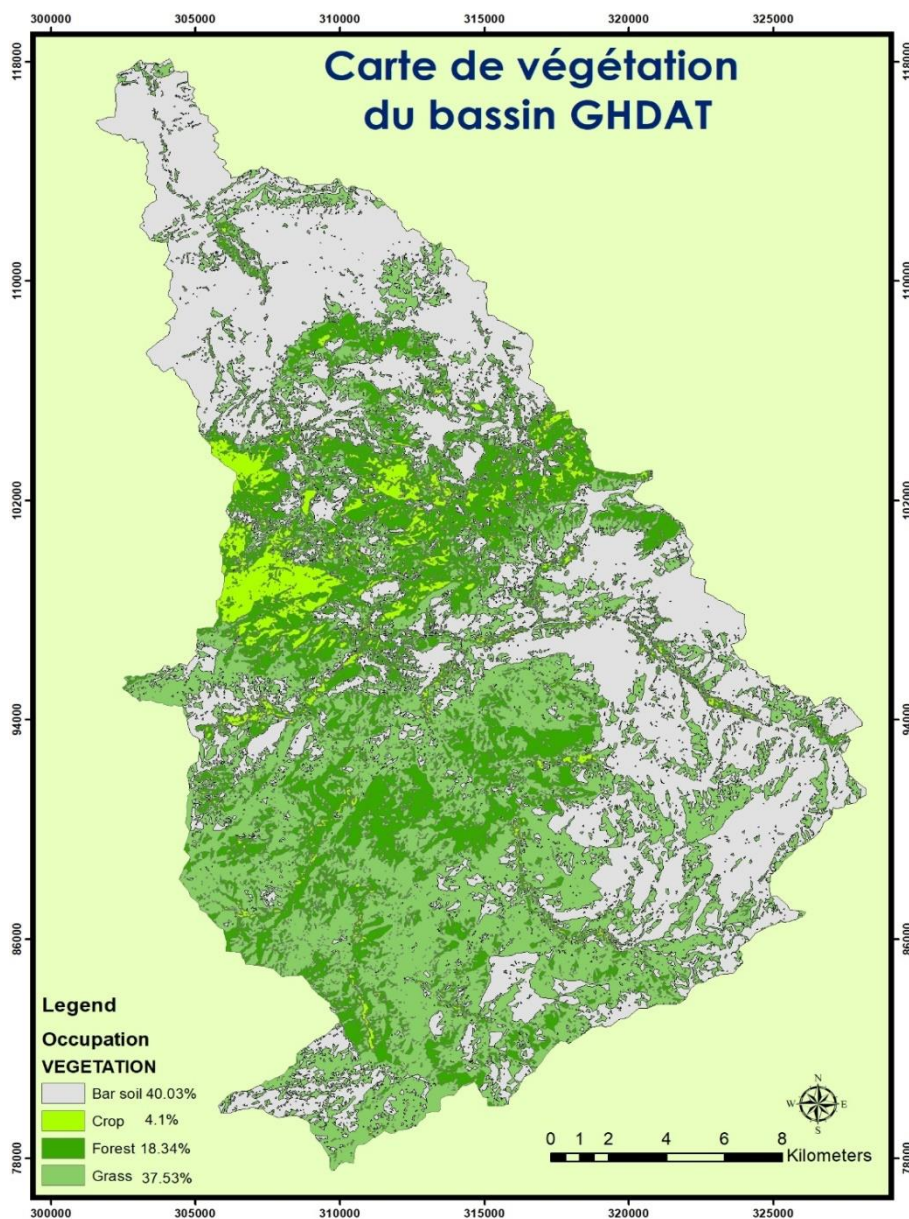


Figure 3: Carte d'occupation du sol et de végétation du bassin versant de Ghdat

5. Ressource en eau

L'oued principal prend source des hauts sommets de l'Atlas hercynien et trace sa trajectoire tout au long des paysages post-hercyniens jusqu'à l'exutoire de Sidi Rahal.

Dans l'absence de précipitations, les affluents de GHDAT sont asséchés et les ressources en eau se font rares.

6. Géomorphologie du bassin versant de Ghdat

Le bassin versant est un objet complexe dont l'ensemble des caractéristiques (géométrique, géologie, et topographie) joueront un rôle non seulement dans la réponse hydrologique du bassin à une sollicitation des précipitations (régime d'écoulement) mais aussi, en amont et pour certaines d'entre elles (altitude, exposition...), directement dans le processus de formation de la pluie.

6.1. Caractéristique géométrique

a. Aire et périmètre

La surface du bassin Correspond à l'aire délimitée par l'ensemble des points les plus hauts qui constituent la ligne de partage des eaux. La surface (A) du bassin versant, exprimée en km^2 . S'obtient par planimétrie sur une carte topographique une fois les limites topographiques du bassin versant sont tracées ou par le biais de l'utilisation de logiciels cartographiques tels que ArcMap, Global mapper ou autre.

Le périmètre représente toutes les irrégularités du contour ou de la limite du bassin versant, il est exprimé en km. Le contour du bassin est constitué par une ligne joignant tous les points les plus élevés. Il peut être mesuré à l'aide d'un curvimètre ou automatiquement par des logiciels.

Pour le bassin Ghdat, il s'étale sur une superficie de 541 km^2 et un périmètre de 143 Km.

b. Indice de compacité

Indice admis pour les hydrologues pour caractériser la forme du bassin versant d'une part et d'autres part de renseigner sur la rapidité de la concentration des écoulements. Appelé indice de Gravelius.

Le coefficient k_c est supérieur à 1 et d'autant plus voisin de cette valeur que le bassin est compact.

$$k_c = \frac{P}{2\sqrt{\pi \cdot A}} = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Avec :

- k_c : l'indice de compacité
- A : La surface du bassin
- P : Le périmètre de bassin

La surface(A) du bassin versant de l'oued GH DAT à Sidi Rahal est de l'ordre de 541.09km² pour un périmètre(P) de 143.21Km. Pour cela l'indice de compacité (k_c) de l'ordre 1.72.

D'après le k_c du bassin versant, on constate que GH DAT a une mauvaise compacité, car la longueur est largement supérieure à la largeur : c'est-à-dire que le bassin est sept fois plus long que large. L'indice de compacité confère également à ce bassin une forme allongée ce qui aura un effet sur le temps de concentration et le rassemblement des écoulements vers l'exutoire.

c. Rectangle équivalent

Le rectangle équivalent ou rectangle de Gravelius correspond à une transformation purement géométrique du bassin versant. Il prend alors une forme rectangulaire de dimensions L et l, tout en gardant la même superficie, le même périmètre, le même indice de compacité et donc par conséquent la même répartition hypsométrique. Les courbes de niveau deviennent des droites parallèles aux petits côtés du rectangle.

La longueur " L " et la largeur " l " sont calculées par les expressions suivantes :

$$L = K_c \frac{\sqrt{A}}{1.128} \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.128}{K_c} \right)^2} \right)$$

$$l = K_c \frac{\sqrt{A}}{1.128} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.128}{K_c} \right)^2} \right)$$

Avec :

- k_c : l'indice de compacité de Gravelius
- A : surface du bassin versant (Km²)
- L : longueur du bassin versant (Km)
- l : largeur du bassin versant (Km)

Tableau 1: Paramètres du rectangle équivalent du bassin versant de Ghdat

Indice de compacité	Surface du bassin versant en (Km ²)	Longueur du rectangle équivalent en (Km)	Largeur du rectangle équivalent en (Km)
1.72	541	62	8.69

D'après les résultats, on remarque que la longueur et largement supérieur à la largeur. Ces dimensions confirment la forme allongée du bassin versant.

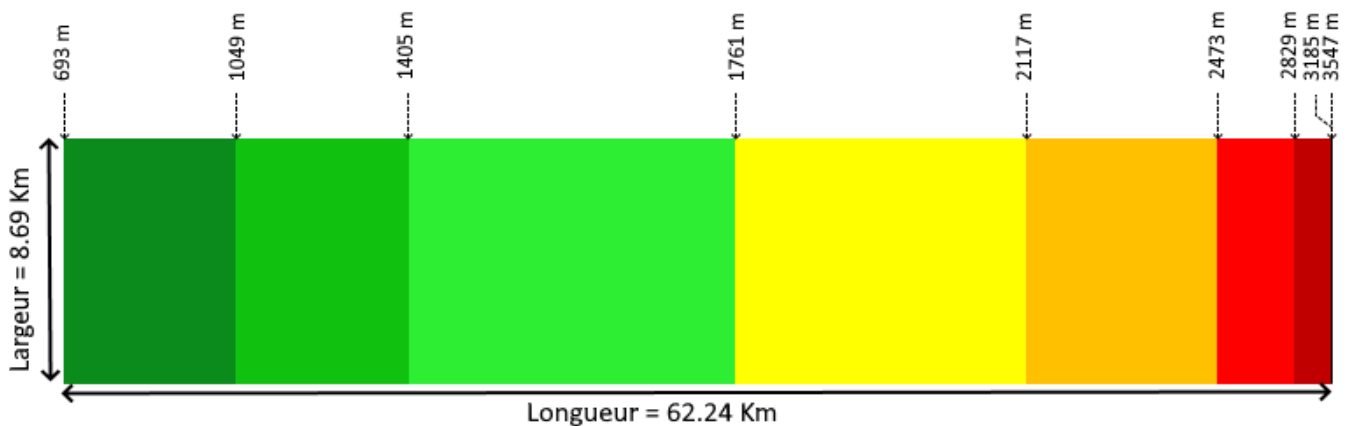


Figure 4: Rectangle équivalent du bassin versant de Ghdat

6.2. Caractéristiques topographiques

a. Carte hypsométrique

La carte hypsométrique donne une idée sur les proportions des tranches d'altitudes. C'est un paramètre important pour les études hydrologiques du fait que la plupart des facteurs météorologiques et hydrologiques sont influencés par l'altitude.

Cette carte (fig. 5) montre une prédominance des altitudes comprises entre 1405 et 2117m avec 48.67% de surface des terrains.

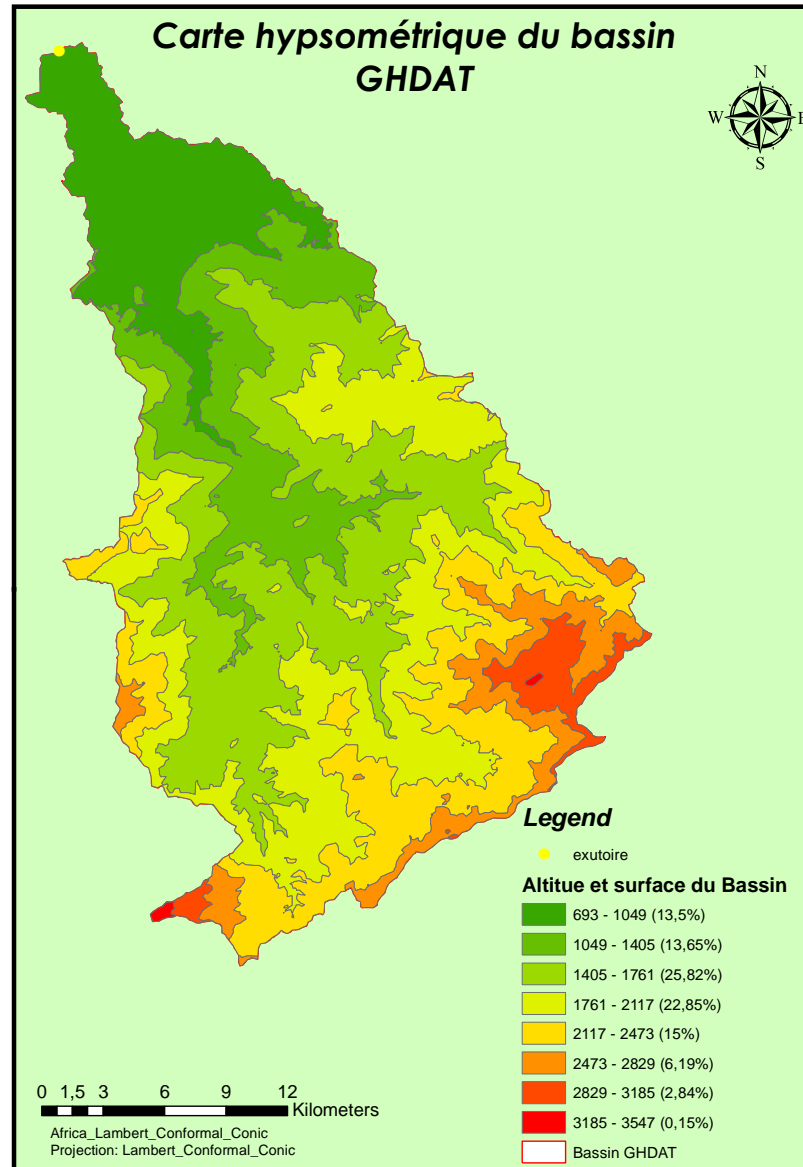


Figure 5: Carte hypsométrique du bassin versant de Ghdat.

b. Courbe hypsométrique

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

Tableau 2: La répartition des tranches d'altitudes du bassin versant du Ghdat

Tranche d'altitude (m)	Surface (Km ²)	Surface (%)	Surface cumulée (%)
693 - 1049	73,05	13,5	13,5
1049 - 1405	73,86	13,65	27,15
1405 - 1761	139,71	25,82	52,97
1761 - 2117	123,64	22,85	75,82
2117 - 2473	81,16	15	90,82
2473 - 2829	33,49	6,19	97,01
2829 - 3185	15,37	2,84	99,85
3185 - 3547	0,81	0,15	100

La courbe suivante (figure 6) illustre une répartition différentielle des tranches d'altitudes. Avec une altitude maximale de l'ordre de 3547m et une valeur minime de 693m. Les altitudes les plus dominantes sont les altitudes [1405-1761] et [1761-2117] qui représentent 48.67% de la surface du bassin.

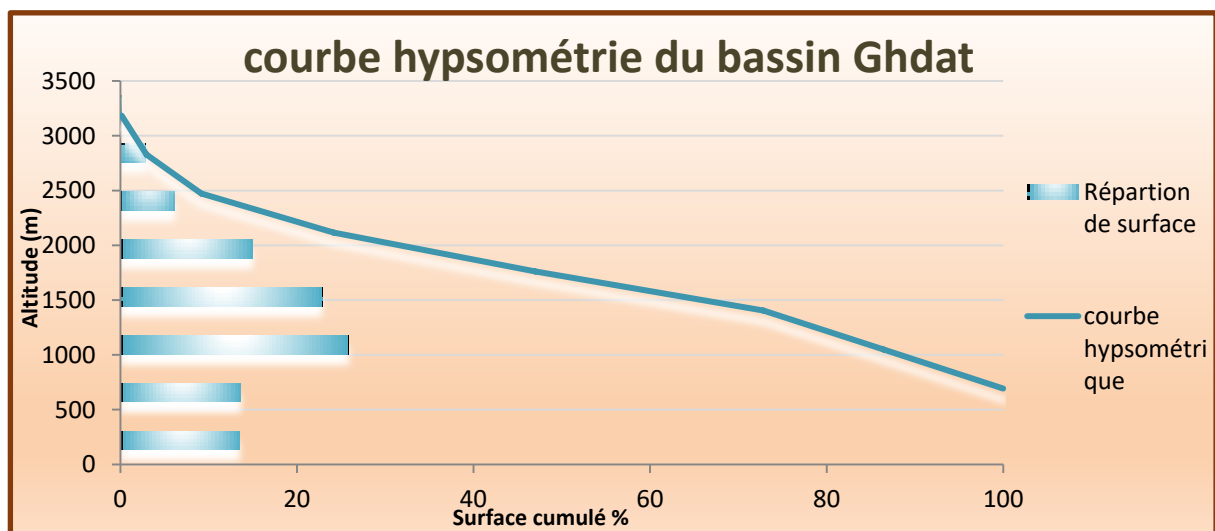


Figure 6: Courbe hypsométrique du Bassin versant de Ghdat

c. La répartition des pentes

La pente joue un rôle très important dans l'écoulement superficiel et souterrain d'un bassin versant. C'est l'un des paramètres principaux dans le calcul du débit et du temps de concentration.

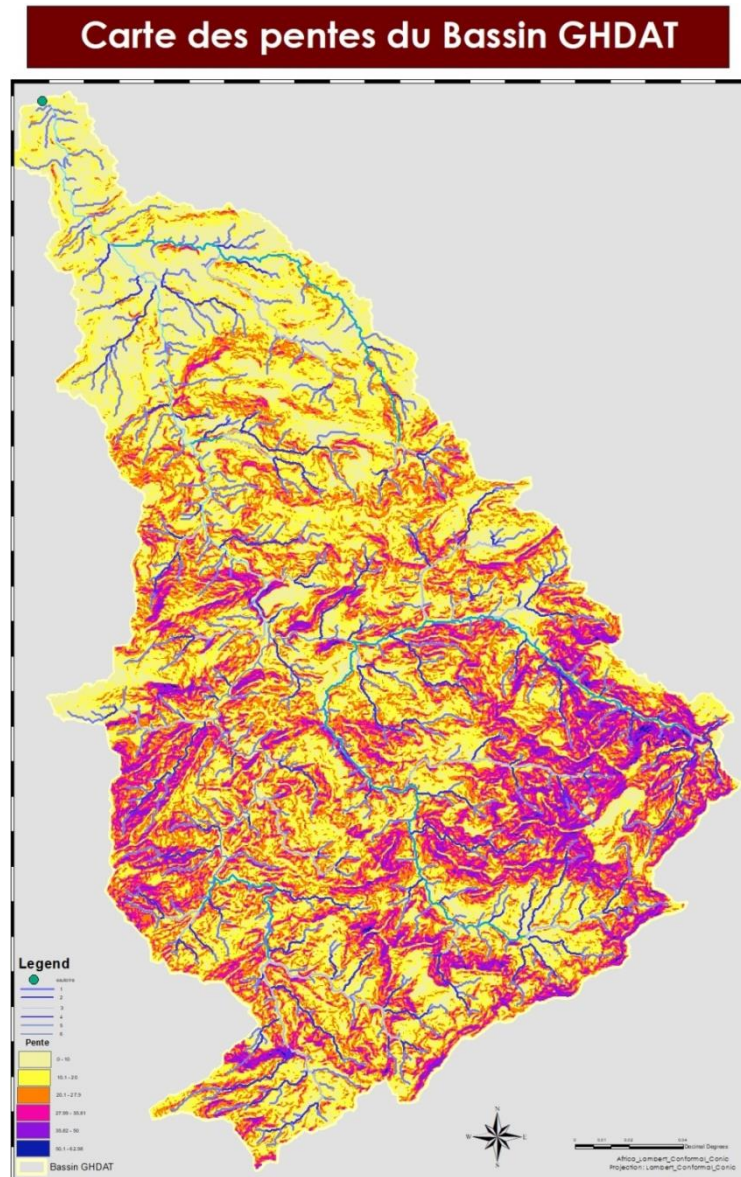


Figure 7: Carte des pentes du Bassin versant de Ghdat

La carte des pentes (figure 7) illustre la répartition des différentes valeurs des pentes dans le bassin. Les pentes varient de 0° jusqu'à 62.98° . On remarque que les pentes fortes se distribuent dans la partie sud du bassin, où il y a des hautes altitudes. De plus, les faibles pentes se distribuent dans la partie Nord.

6.3. Caractéristiques du réseau hydrographique :

a. Réseau hydrographique

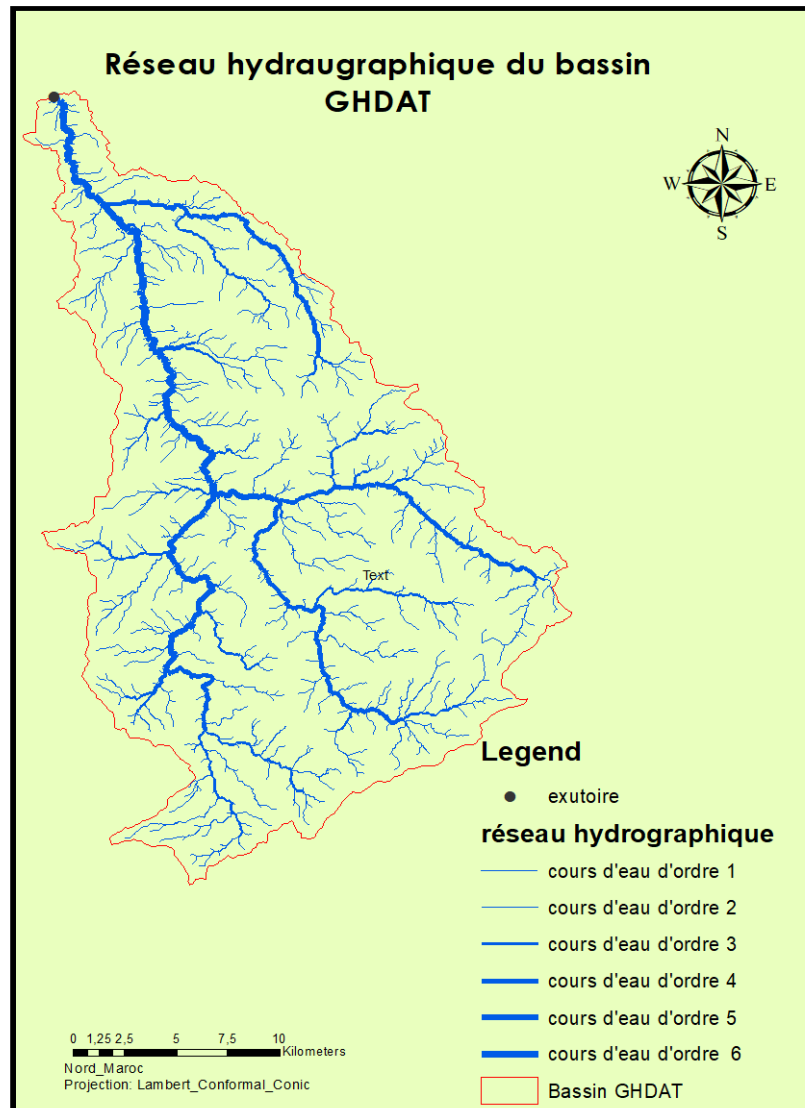


Figure 8: Carte de réseau hydrographique du bassin versant de Ghdat

On désigne par le réseau hydrographique un ensemble hiérarchisé et structuré de chenaux qui assurent le drainage superficiel permanent ou temporaire, d'un bassin versant. La hiérarchie du réseau hydrographique se manifeste par l'importance croissante de ses éléments, depuis les ramifications originelles de l'amont dépourvues de tributaires.

Le réseau hydrographique est d'autant plus dense que le climat est plus humide, que les pluies sont plus abondantes, les pentes plus fortes, les roches ou formations superficielles

moins perméables. L'agencement des éléments du réseau dépend de la structure, de la géologie et du relief.

Le dessin varié, qui en résulte à une grande influence sur la propagation et la composition de l'onde de la crue.

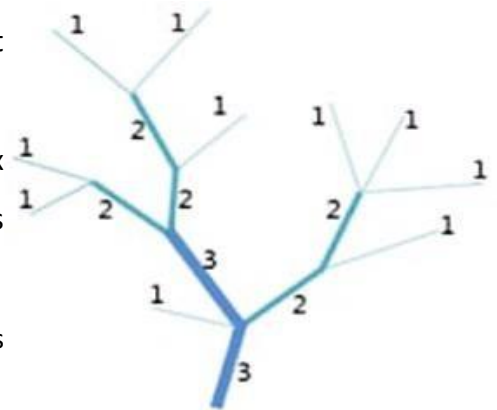
Les principaux affluents de l'oued Ghdat de la rive gauche sont :

- Assif-N-Tichkaqui est à l'origine de l'oued Ghdat et dont la source se situe à une altitude de 2200 mètres environ.
- Oued Imizer, formé par la confluence de l'oued Imarighne et l'oued Tihizat.
- Assif-N-lfraden.
- Oued Tissert.

b. Classification du réseau hydrographique selon Strahler

La classification du réseau hydrographique sert à attribuer un ordre numérique au celui-ci. Cet ordre permet d'identifier et de classer des types de cours d'eau en fonction de leur nombre d'affluents. La classification de Strahler est la plus utilisée aujourd'hui et basée sur les principes suivants :

- Tout cours d'eau dépourvu de tributaires est d'ordre un.
- Le cours d'eau formé par la confluence de deux cours d'eau d'ordre différent prend l'ordre du plus élevé des deux.
- Le cours d'eau formé par la confluence de deux cours d'eau du même ordre est augmenté de un.



c. Temps de concentration

La majorité de ces caractéristiques morphologiques en plus de la nature lithologique de ce bassin versant, influencent le comportement hydrologique du bassin, essentiellement le temps de concentration qui peut être expliqué comme étant le temps maximal nécessaire au ruissellement en provenance du point le plus lointain du bassin pour atteindre l'exutoire qui

est un facteur important en toute étude hydrologique, du fait qu'il permet d'éviter les conséquences de fortes crues.

Après avoir calculé les caractéristiques physiographiques du bassin de Ghdat, on peut les utiliser pour le calcul du temps de concentration de l'eau écoulée, en utilisant la formule de Giandotti :

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5 L_R}{0.8 \sqrt{H_{moy} - H_{min}}}$$

Avec :

- T_c : Temps de concentration (heures)
- A : Surface du bassin versant (Km²)
- L_R : Longueur du rectangle équivalent (Km)
- H_{moy} : Altitude moyenne du bassin(m).
- H_{min} : Altitude de l'exutoire (m)

Tableau 3: Temps de concentration du bassin versant de Ghdat

Surface du bassin (Km ²)	541
Longueur du rectangle équivalent (Km)	62
Altitude moyenne du bassin(m).	1737
Altitude de l'exutoire (m)	693
Temps de concentration (heures)	7.22

Le temps de concentration du bassin GHDAT étant de 7.22 heures, ce qui implique la mise en place d'un réseau d'alerte des crues efficace dans ce bassin.

Tableau 4: Caractéristiques globales du bassin versant de Ghdat

Caractéristiques		
Surface en (Km ²)		541
Périmètre en (Km)		143
Indice de compacité (K_c)		1.72
<i>Rectangle équivalent du bassin</i>	Longueur (Km)	62.24
	Largeur (Km)	8.69
Altitudes du bassin	Altitude maximale en (m)	3547
	Altitude moyenne en (m)	1737.37
	Altitude minimale en (m)	693
Dénivelée (Hmax - Hmin) en (m)		2850
Pentes du Bassin	Pente maximal	62.98°
	Pente moyen	18.87°
	Pente minimal	0°
Temps de concentration en (heures)		7.22

III. Analyse et étude des données hydro climatiques

1. Analyse de la variabilité pluviométrique

1.1. Variations mensuelles des précipitations

La répartition moyenne des pluies mensuelles mesurées à Sidi Rahal durant la période 1967/68-2016/2017, montre une variation irrégulière de précipitations mensuelles avec une moyenne mensuelle de 28,85 mm, avec l'existence de deux périodes (Figure 9) :

- Une saison humide allant du mois d'octobre à avril, où interviennent la quasi-totalité des épisodes pluvieux, soit plus de 85.1 % de la pluviométrie annuelle.
- Une saison sèche allant du mai jusqu'à septembre avec moins de 14.9 % de la pluviométrie annuelle.

On peut voir que les précipitations augmentent du mois juillet jusqu'à novembre, puis fluctuent jusqu'au mois d'avril où elles diminuent régulièrement jusqu'au mois de juillet. On peut ressortir aussi à partir de notre diagramme que novembre et mars, ont le plus de précipitations. Par contre les mois de juin, juillet et août sont les plus secs.

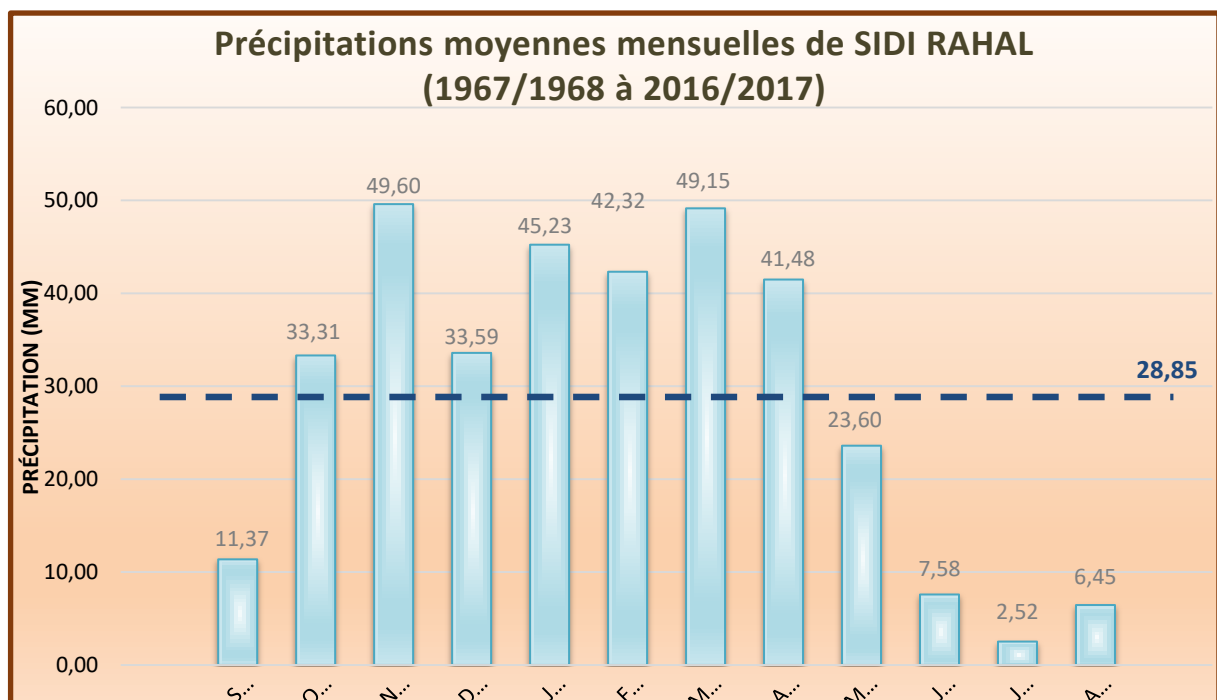


Figure 9: Répartition de la pluviométrie moyenne mensuelle de Sidi Rahal (1967/1968 à 2016/2017)

1.2. Variations saisonnières des précipitations

Les précipitations saisonnières ont été calculées à partir des données mensuelles. Les précipitations d'automne sont la somme des mois de septembre, octobre et novembre. Les précipitations en hiver sont la somme des précipitations des mois de décembre, janvier et février. Les précipitations du printemps sont la somme des précipitations des mois de mars, avril et mai et les précipitations d'été sont le cumul des précipitations des mois de juin, juillet et août.

Pour le bassin du Ghdat la répartition saisonnière se présente comme suit

Tableau 5: Pluviosité moyenne pour chaque saison de l'année

Les saisons	Automne	Hiver	Printemps	été
Précipitation en (mm)	94,276	121,14	114,226	16,546

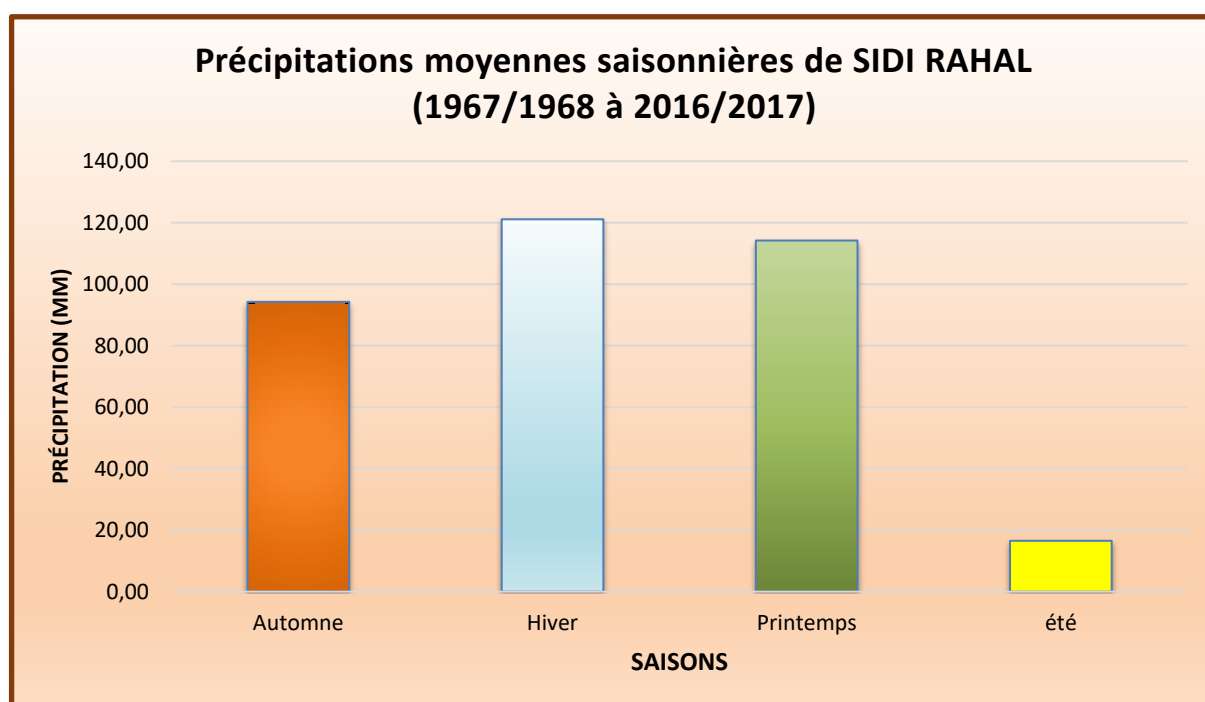


Figure 10: Répartition de la pluviométrie moyenne saisonnière de Sidi RAHAL (1967/1968 à 2016/2017)

1.3. Variations annuelles des précipitations

A Sidi Rahal nous avons une période de 50 ans de données de (1967/68) à (2016/2017). Les données des précipitations annuelles sont obtenues par la somme des précipitations mensuelles, avec une pluviométrie moyenne de l'ordre 346,1 mm.

L'analyse de l'évolution des précipitations à la station de Sidi Rahal, montre que les années 1970/1971, 1973/1974 et 1995/1996 sont les plus humides avec une précipitation dépassent 500 mm. Par contre les années 1982/1983, 1992/1993 et 2000/2001 sont les plus sèches avec une précipitation inférieure à 200 mm.

La figure ci-dessous illustre une variation irrégulière dans le temps des hauteurs de pluies annuelles à la station de Sidi Rahal :

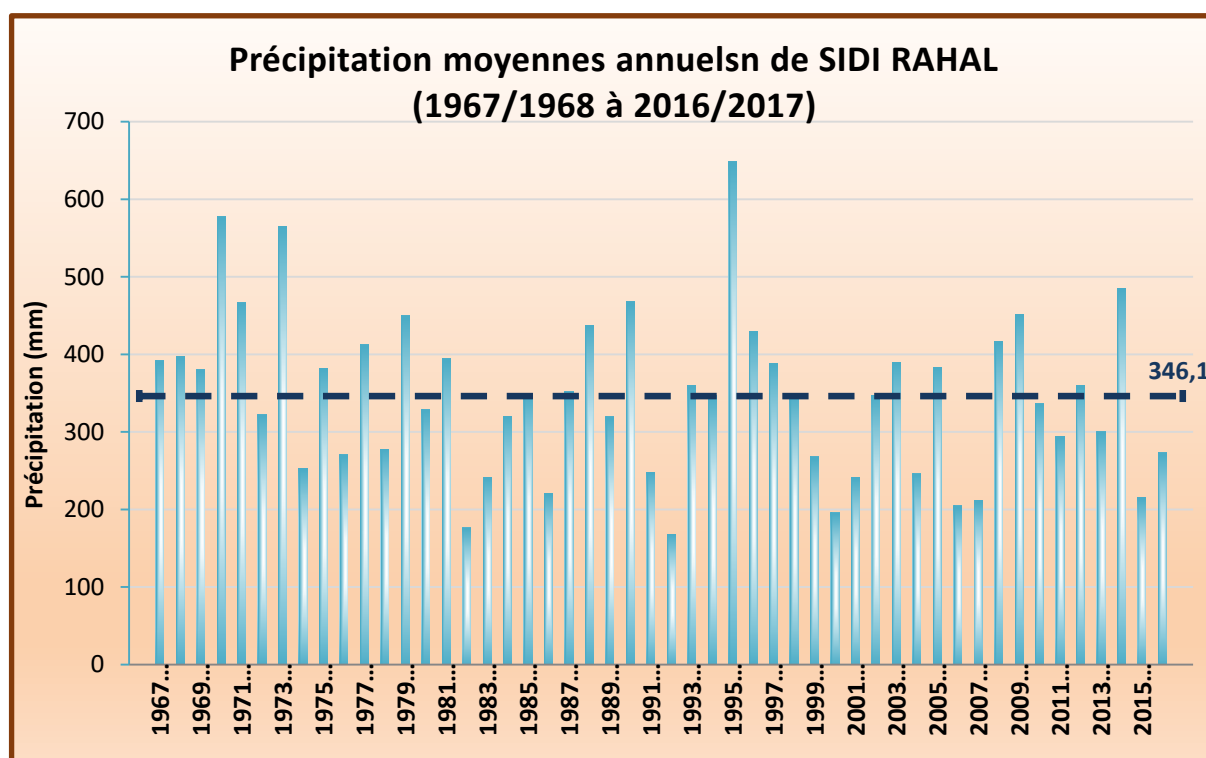


Figure 11: Précipitations moyennes annuelles de Sidi Rahal (1967/1968 à 2016/2017)

2. Variabilité des débits et régime hydrologique du bassin

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.

2.1. Variations mensuelles des débits

Les débits moyens mensuels de la station Sidi Rahal a été obtenus par le calcul de la moyenne arithmétique des données des débits mensuels de chaque année. Cette période s'étend de 1967/1968 à 2016/2017. Le graphique de la figure 12 montre une variation très irrégulière au cours de l'année, avec une moyenne de $2,33 \text{ m}^3/\text{s}$, et avec l'existence de deux périodes :

- Une saison de hautes eaux allant du novembre jusqu'à mai, et qui correspond à la période très pluvieuse.
- Une saison de très basses eaux allant du juin jusqu'à octobre, et qui est conforme à une période sèche.

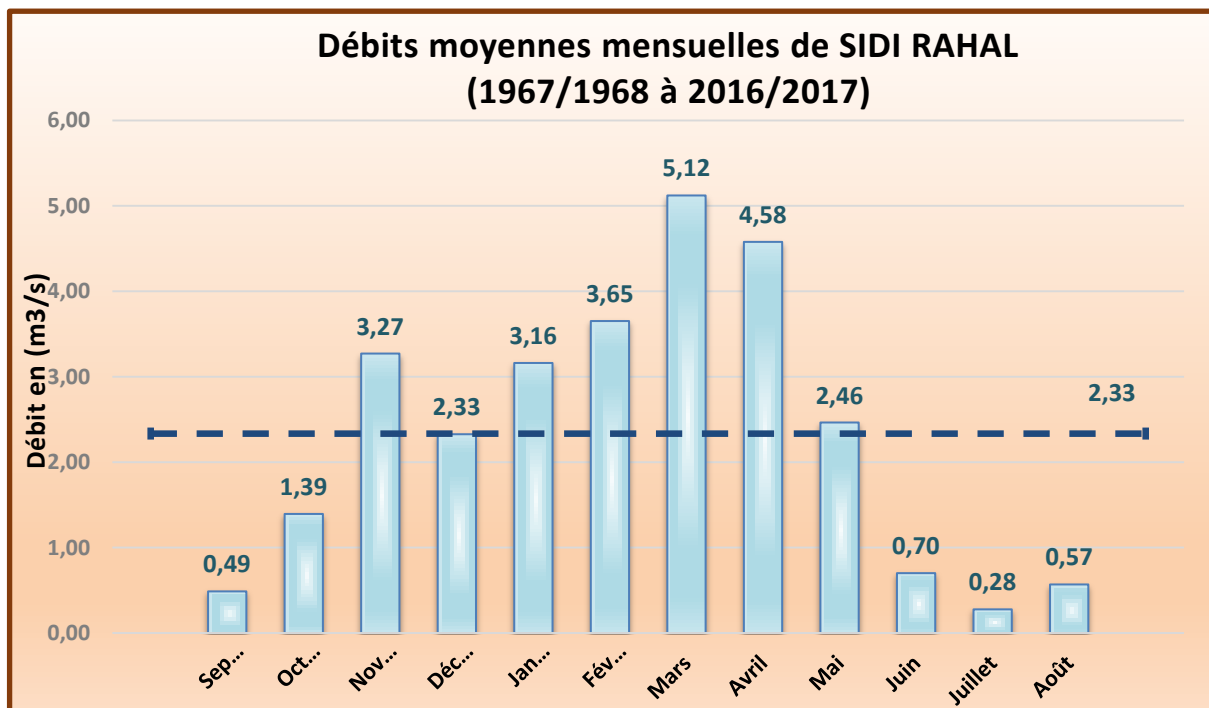


Figure 12: Variations des débits mensuelles de Sidi Rahal (1967/1968 à 2016/2017)

Ces débits varient dans la station de Sidi Rahal de 0.28 m³/s au mois du juillet à 5.12 m³/s au mois du mars. Ils commencent à augmenter à partir du mois de septembre à novembre où il atteint 3,27 m³/s. Après une baisse en en décembre, les débits augmentent graduellement pour atteindre la valeur maximale de 5,12 m³/s en mars. Ils diminuent ensuite jusqu'à atteindre la valeur minimale de 0,28 m³/s.

2.2. Variations saisonnières des débits

Les débits saisonniers ont été calculés à partir des données mensuelles. La période prise en compte pour le calcul des moyennes saisonnières est de 1967/1967 à 2016/2017.

Pour le bassin du Ghdat la répartition saisonnière se présente comme suit :

Tableau 6: Débit moyenne pour chaque saison de l'année

Les saisons	Automne	Hiver	Printemps	été
Débit en (m ³ /s)	1.72	3.05	4.06	0.52

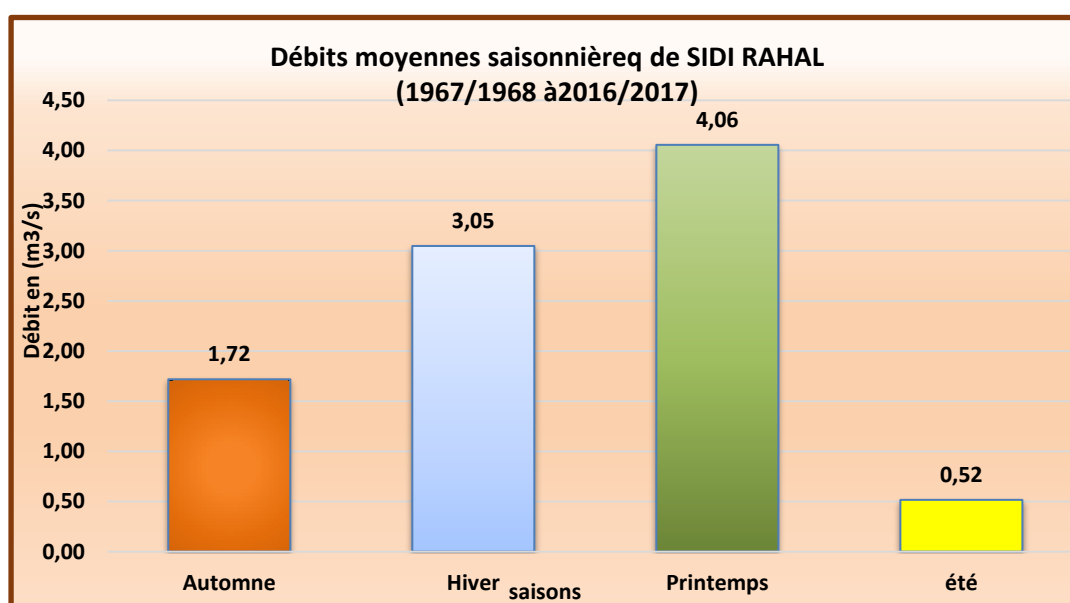


Figure 13: Variations des débits saisonnières de Sidi Rahal (1967/1968 à 2016/2017)

2.3. Variations annuelles des débits :

A Sidi Rahal nous disposons des données de débits d'une période de 50 ans, de 1967/1968 à 2016/2017. Les données des débits annuelles sont obtenues par la moyenne des débits moyens mensuels, avec une moyenne de l'ordre de 2.33 m³/s. Les années qui ont une valeur inférieure à la moyenne sont plus nombreuses que celles qui la dépassent et la variation se fait d'une manière irrégulière.

Sur ce graphique nous constatons aussi que plusieurs années sont marquées par de forts débits comme les années 1970/1971, 1995/1996 et 2014/2015 avec un maximum de 8.37 m³/s (en 70/71) et des années à faibles débits comme 1982/1983, 1992/1993 et 2000/2001 avec un minimum de 0.109 m³/s (en 82/83).

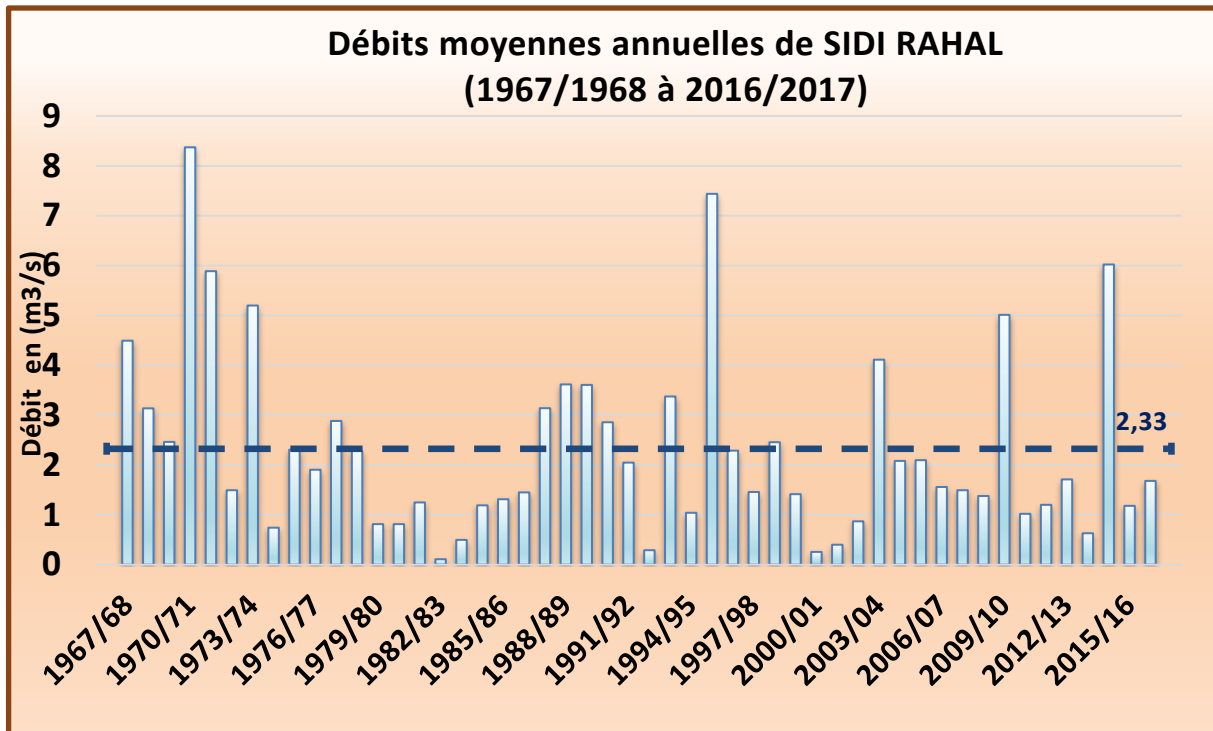


Figure 14 : Variations des débits annuelles de Sidi Rahal (1967/1968 à 2016/2017)

3. Bilans Hydrologiques et relation entre les pluies et les débits

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 un temps donné). Elle est donnée par la relation suivant :

$$E = \frac{Q * (30 * 24 * 3600)}{A}$$

Avec :

E= écoulement en (mm)

Q =débit en (m3/s)

A= Surface de bassin versant en (km²)

Exemple de calcul (pour le mois de septembre) :

$$E = \frac{0.49 * (30 * 24 * 3600) * 10^3}{541.09 * 10^6} = 2.35 \text{ mm} \quad \text{Avec : } A = 541.09 \text{ km}^2 \quad \text{et } Q = 0.49 \text{ m}^3/\text{s}$$

Tableau 7: Bilan hydrologique moyen mensuel du bassin Ghdat à la station de Sidi Rahal

Mois	Précipitation (mm)	Débit (m3/s)	Écoulement (mm)	Déficit d'écoulement
Septembre	11,37	0,49	2,34	9,03
Octobre	33,31	1,39	6,68	26,63
Novembre	49,6	3,27	15,67	33,93
Décembre	33,59	2,33	11,15	22,44
Janvier	45,23	3,16	15,14	30,09
Février	42,32	3,65	17,5	24,83
Mars	49,15	5,12	24,54	24,61
Avril	41,48	4,58	21,93	19,55
Mai	23,6	2,46	11,81	11,79
Juin	7,58	0,7	3,36	4,22
Juillet	2,52	0,28	1,33	1,19
Aout	6,45	0,57	2,73	3,72

3.1. Corrélation entre les pluies et les débits

La corrélation "pluie-débit" suit généralement une loi linéaire. L'étude de la fonction de régression entre les deux paramètres vérifie cette relation. L'existence d'un fort coefficient de corrélation "R" traduit généralement une linéarité du phénomène de la transformation.

La corrélation entre les précipitations et les débits a pour but de mettre en évidence la contribution de la pluie et de la neige sur les débits à l'exutoire et de comprendre les mécanismes hydrologiques. Nous allons étudier les interactions entre la pluie et le débit à des pas de temps annuel et mensuel.

a. Corrélation entre les précipitations et les débits moyens mensuels

A partir des figures qui montrent la relation entre les régimes pluviométriques et hydrologiques, on notera que le bassin du Ghdat présente une corrélation linéaire entre les pluies et les débits moyens mensuels, avec des coefficients de détermination relativement bons ($R^2=0.8035$). On remarque que les débits et les précipitations augmentent simultanément. Ceci indiquerait que la contribution de la neige est relativement faible par rapport aux pluies sur l'écoulement à l'exutoire.

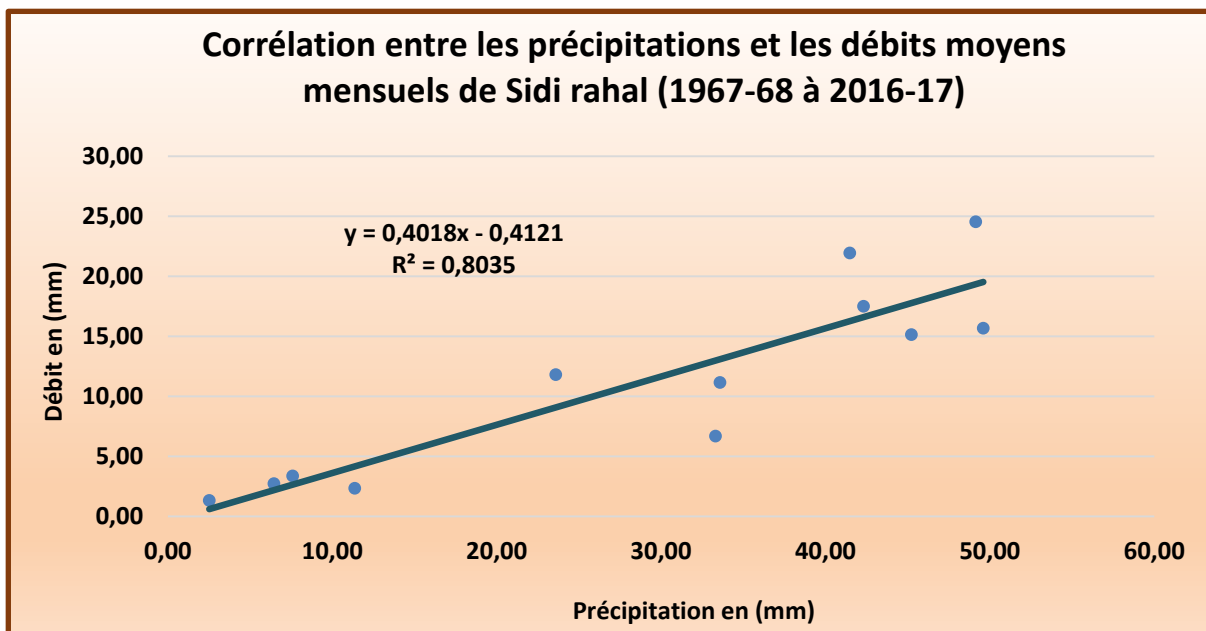


Figure 15 : Corrélation entre les précipitations et les débits moyens mensuels au bassin de Ghdat à la station Sidi Rahal (1967-68 à 2016-17)

b. Corrélation entre les précipitations et les débits moyens annuels

Cette corrélation va nous renseigner sur le degré de liaison entre pluies et débits pour une période de temps de 50 ans. Cette liaison est représentée par un graphique où sont portés les débits annuels et les précipitations correspondantes.

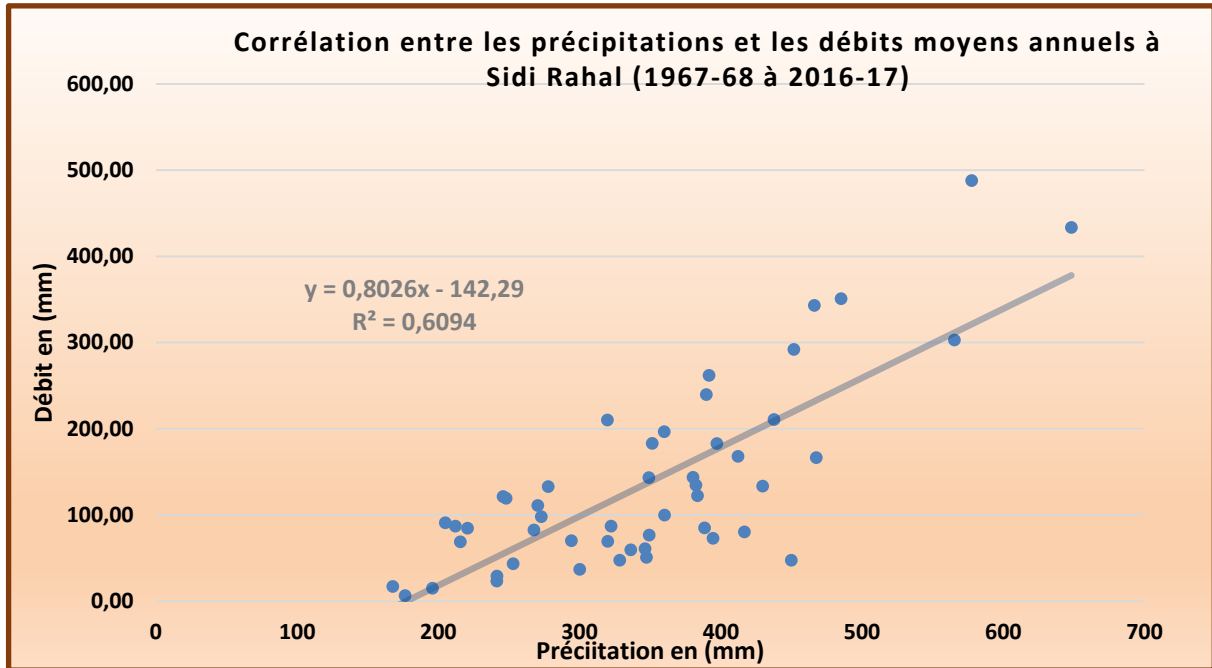


Figure 16: Corrélation entre les précipitations et les débits moyens annuels au bassin de Ghdat à la station Sidi Rahal (1967-68 à 2016-17)

D'après le graphe, on voit que le nuage de points a pris une forme d'ellipse inclinée par rapport aux axes, ce qui permet de dire que la relation entre les deux paramètres est linéaire, avec un coefficient de détermination R^2 de l'ordre de 0.6094 qui confirmera le résultat obtenu graphiquement. La valeur du coefficient de détermination montre qu'il y a une étroite liaison entre les débits et les précipitations. Ce qui revient à dire que le bassin reçoit des précipitations sous forme de pluie qui ne sont pas perturbées par une infiltration importante, par des évaporations trop variables, ou encore par les rétentions souterraines durables surtout qu'on prend en considération l'année hydrologique. Puisque le substratum à ce niveau est constitué de formations tendres qui ne peuvent pas retenir l'eau pour une longue durée surtout qu'on travaille avec l'année hydrologique qui se termine par le mois d'Août qui ne connaît pas de précipitations importantes qui peuvent persister jusqu'à l'année hydrologique suivante. A ceci s'ajoute la composante de neige qui ne perturbe pas

les corrélations annuelles pluies/débits car les précipitations nivales d’hiver commencent à fondre dès le début du printemps.

3.2. Variations simultanées des précipitations et des débits mensuels

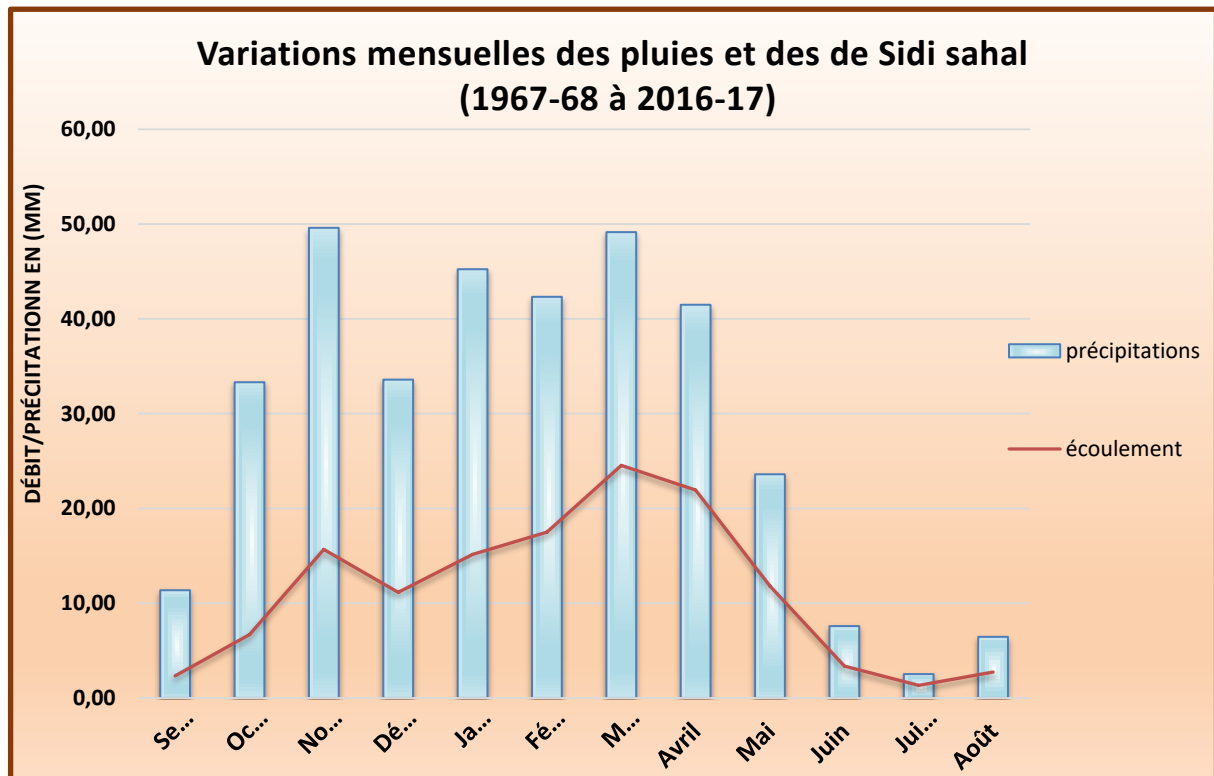


Figure 17: Variations mensuelles des pluies et des débits au bassin de Ghdat à la station Sidi Rahal (1967-68 à 2016-17)

La figure 18 présente les variations simultanées des débits et des précipitations dans le bassin versant du Ghdat, on remarque qu'on a deux pics de débit : Le première pic au niveau du mois de novembre dû à l'augmentation de précipitations, et un deuxième pic plus important au niveau du mois de mars. Cette importance est due à l'effet de la fonte de neige qui ne commence activement qu'à partir du mois de mars provoquant une augmentation du volume d'eau provenant des précipitations de ce mois et de la neige des mois précédents.

Le minimum de débit est survenu au niveau des mois les plus secs à savoir juin, juillet et août. On peut déduire alors que les débits et les précipitations du bassin versant du Ghdat ont les mêmes variations

IV. Etude des crues de l'oued Ghdat

1. Etude dynamique des crues de l'oued Ghdat

Une crue est un phénomène hydrologique qui correspond à une augmentation rapide et temporaire du débit d'un cours d'eau. Elle produit des débits exceptionnels qui dépassent largement des normes habituelles. En fait, une crue n'est pas seulement caractérisée par son débit, mais aussi par sa pointe et d'autres caractéristiques telles que la date et la durée de pointe, le temps de montée et la forme de l'hydrogramme de crue. Ce dernier est un diagramme qui représente la courbe du débit en fonction du temps $Q=f(t)$. Il reflète la vitesse des écoulements, les durées de crue et les volumes d'eau mobilisés. On distingue deux types d'hydrogrammes selon le type de crue :

- Les crues simples (ou mono géniques) : qui sont caractérisées par une seule montée du niveau d'eau suivit d'une descende 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.

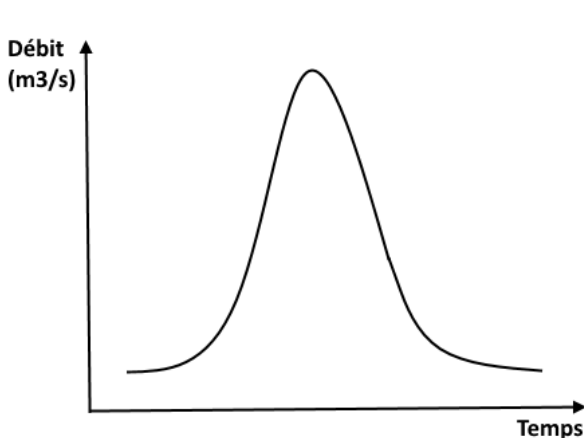


Figure 20: Allure d'une courbe représentant une crue simple

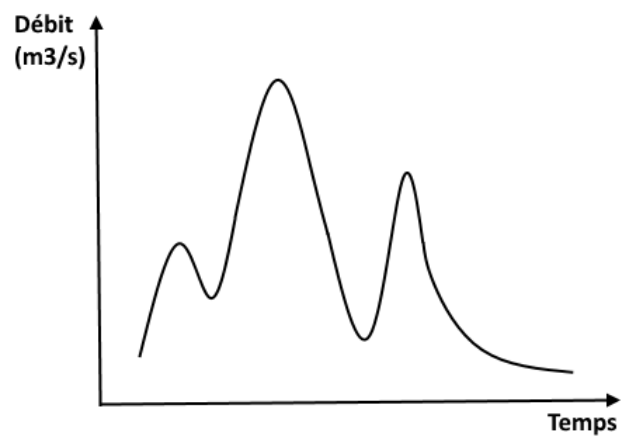


Figure 19: Allure d'une courbe représentant une crue complexe

1.1. Analyse de quelques hydrogrammes de crues remarquables de l'oued Ghdat

❖ La crue du 23 octobre 2010

Tableau 8: Caractéristique de la crue 23 octobre 2010

L'hydrogramme montre que c'est une crue simple (monogénique) avec un seul pic aigu et pointu, soit une seule montée du niveau d'eau suivie d'une descende. C'est une crue très rapide qui atteint son débit de point de l'ordre de 585,7 m³/s en un temps très courte de l'ordre de 1h 30 min et un temps de base de 10 heures.

Caractéristiques de crue	
Débit de pointe (m ³ /s)	585,75
Débit de base avant (m ³ /s)	1,84
Débit de base après (m ³ /s)	36,92
Débit moyen (m ³ /s)	220,17
Coefficient de pointe	2,66
Temps de base (min)	600
Temps de montée (min)	90
Volume de crue (m ³)	7926296,1

Généralement, c'est une crue très courte dans la durée mais qui peut être très agressive et causer des dégâts humains et matériels très importants.

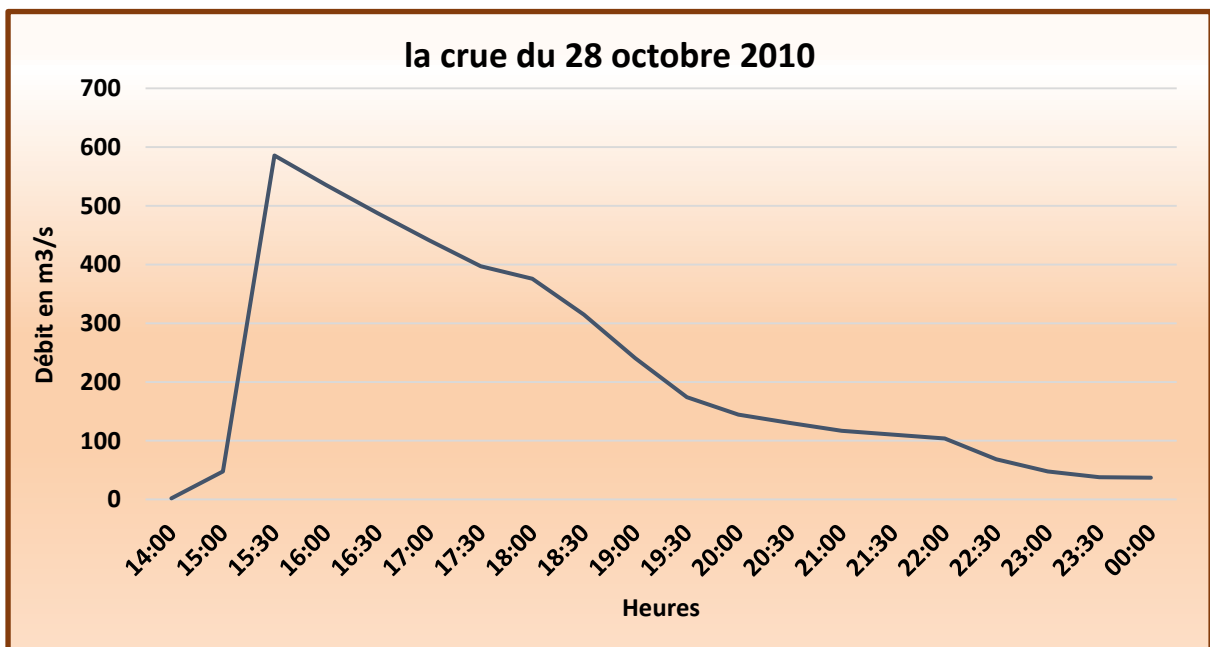


Figure 21: Hydrogramme de la crue du 28 octobre 2010 d'oued Ghdat

❖ La crue du 19 mai 2011

Tableau 9: Caractéristique de la crue 19 mai 2011

Cette crue est une crue polygénique avec deux pics, Elle a enregistré un débit maximum de $27 \text{ m}^3/\text{s}$, et un temps de montée et de base relativement courts. Ils ont été respectivement de 1h 30min, et 17 heures.

Caractéristiques de crue	
Débit de pointe (m^3/s)	27
Débit de base avant (m^3/s)	0,19
Débit de base après (m^3/s)	2,07
Débit moyen (m^3/s)	11,47
Coefficient de pointe	2,35
Temps de base (min)	1020
Temps de montée (min)	90
Volume de crue (m^3)	701887,482

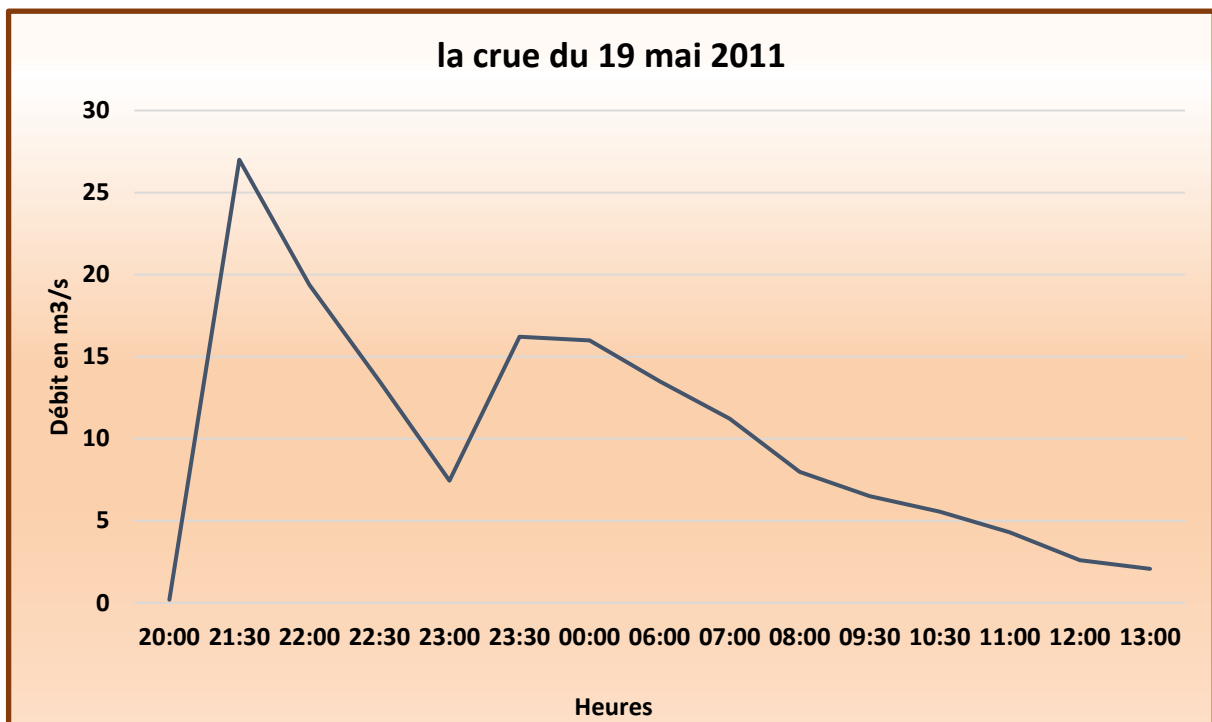


Figure 22: Hydrogramme de la crue du 19 mai 2011 d'oued Ghdat.

❖ La crue du 13 avril 2012

Tableau 10: Caractéristique de La crue du 13 avril 2012

L'hydrogramme montre que c'est une crue complexe (polygénique). Elle est caractérisée par deux montées :

- La première le 12/04/2012 à 8 heures du matin avec un débit de pointe de $30,03 \text{ m}^3/\text{s}$
- La seconde a une valeur de $48 \text{ m}^3/\text{s}$ enregistré le 13/04/2012 à minuit.

Caractéristiques de crue	
Débit de pointe (m^3/s)	48
Débit de base avant (m^3/s)	8,46
Débit de base après (m^3/s)	11,05
Débit moyen (m^3/s)	22,72
Coefficient de pointe	2,11
Temps de base (min)	3600
Temps de montée (min)	1440
Volume de crue (m^3)	4908234,02

Cependant, cette crue est caractérisée aussi par deux descentes la plus importante est celle enregistré le 13/04/2012 à 20 heures jusqu'à $11,05 \text{ m}^3/\text{s}$

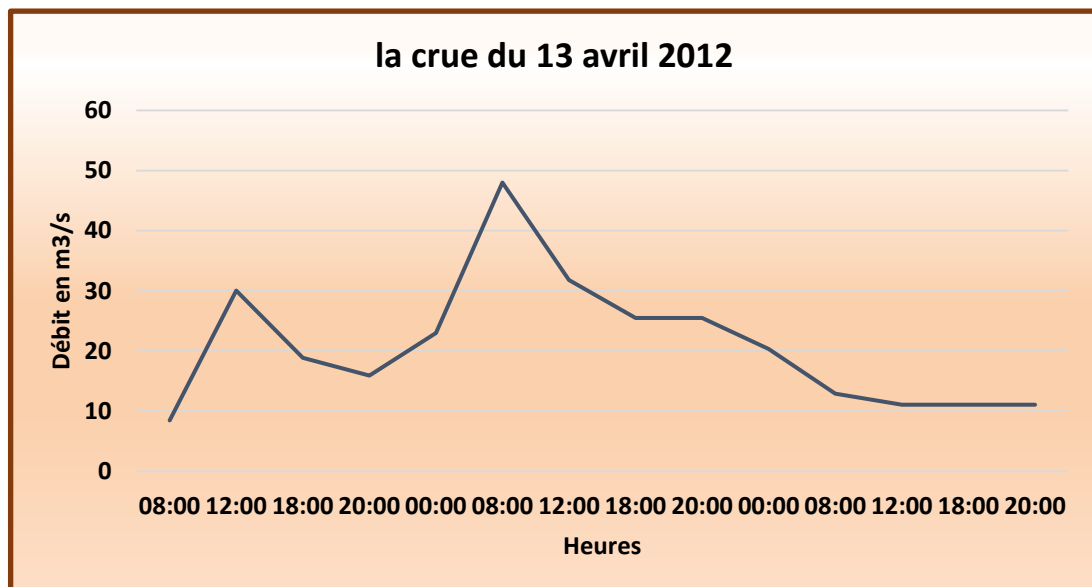


Figure 23: Hydrogramme de la crue du 13 avril 2012 d'oued Ghdar

❖ La crue du 05 avril 2013

Tableau 11: Caractéristique de la crue du 05 avril 2013

Cette crue montre plusieurs baisses et plusieurs hausses des niveaux d'eau, ce qui témoigne que c'est une crue polygénique avec un temps de montée de 10 h et un temps de base de 20 heures. On note aussi un débit de pointe de $102,91 \text{ m}^3/\text{s}$.

Caractéristiques de crue	
Débit de pointe (m^3/s)	102,91
Débit de base avant (m^3/s)	5,87
Débit de base après (m^3/s)	30,03
Débit moyen (m^3/s)	53,36
Coefficient de pointe	1,93
Temps de base (min)	1200
Temps de montée (min)	600
Volume de crue (m^3)	3841713,3

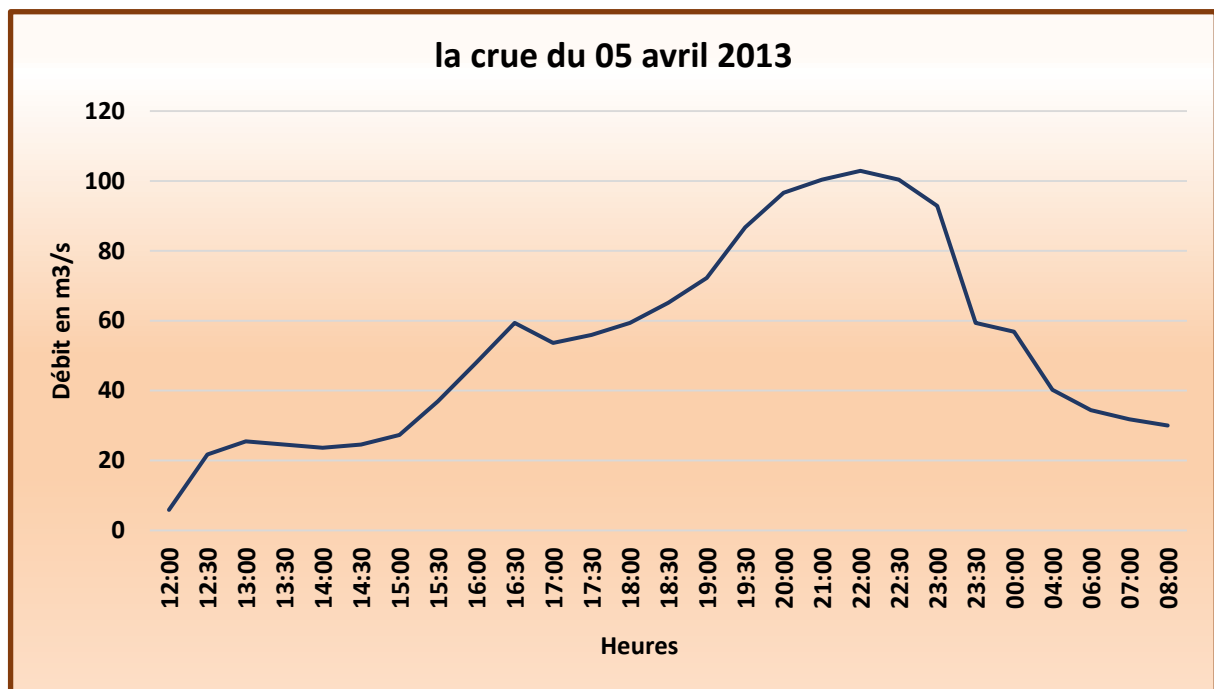


Figure 24: Hydrogramme de la crue du 05 avril 2013 d'oued Ghdat

❖ La crue du 18 avril 2013

Tableau 12: Caractéristique de la crue 18 avril 2013

L'hydrogramme montre que c'est une crue simple (monogénique) avec un seul pic aigu et pointu qui caractérise une seule montée du niveau d'eau suivie d'une descende. C'est une crue très rapide qui a atteint son débit de pointe de 251,79 m³/s en un temps très court de l'ordre de 1 h 30 min et un temps de base de 4 heures.

Caractéristiques de crue	
Débit de pointe (m ³ /s)	251,79
Débit de base avant (m ³ /s)	11,04
Débit de base après (m ³ /s)	21,40
Débit moyen (m ³ /s)	89,16
Coefficient de pointe	2,82
Temps de base (min)	240
Temps de montée (min)	90
Volume de crue (m ³)	1283891,19

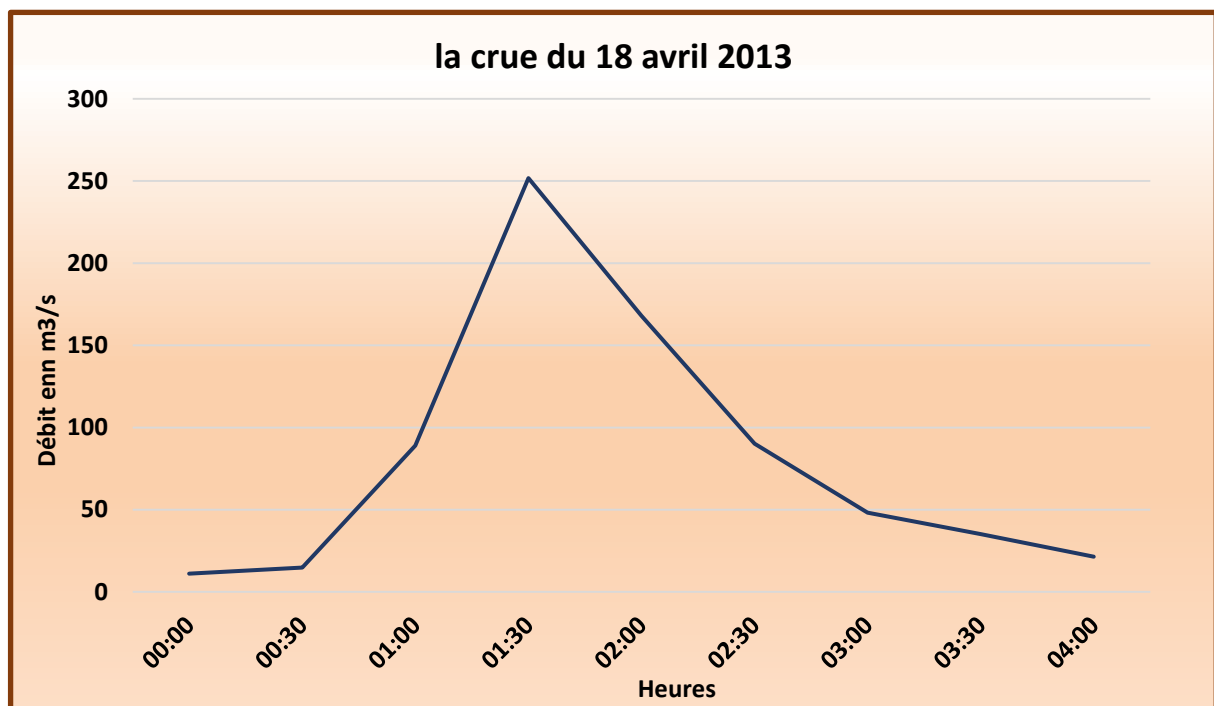


Figure 25: Hydrogramme de la crue du 18 avril 2013 d'oued Ghda

❖ **La crue du 22 Novembre 2014**

Tableau 13: Caractéristique de la crue 22 novembre 2014

L'hydrogramme montre plusieurs hausses et plusieurs baisses des niveaux d'eau, qui peuvent être dues soit aux différents épisodes pluvieux ou encore l'arrivée successive des différents affluents, soit par la variabilité des temps de réponse ou par les différences de pentes des sous bassins. C'est une crue de

Caractéristiques de crue	
Débit de pointe (m^3/s)	372,96
Débit de base avant (m^3/s)	54,02
Débit de base après (m^3/s)	31,70
Débit moyen (m^3/s)	126,09
Coefficient de pointe	2,96
Temps de base (min)	2790
Temps de montée (min)	480
Volume de crue (m^3)	21107986,03

type complexe caractérisée par un débit de pointe de l'ordre de 372 m^3/s , un temps de montée de 8 heures, et un temps de base de l'ordre de 46.5 heures.

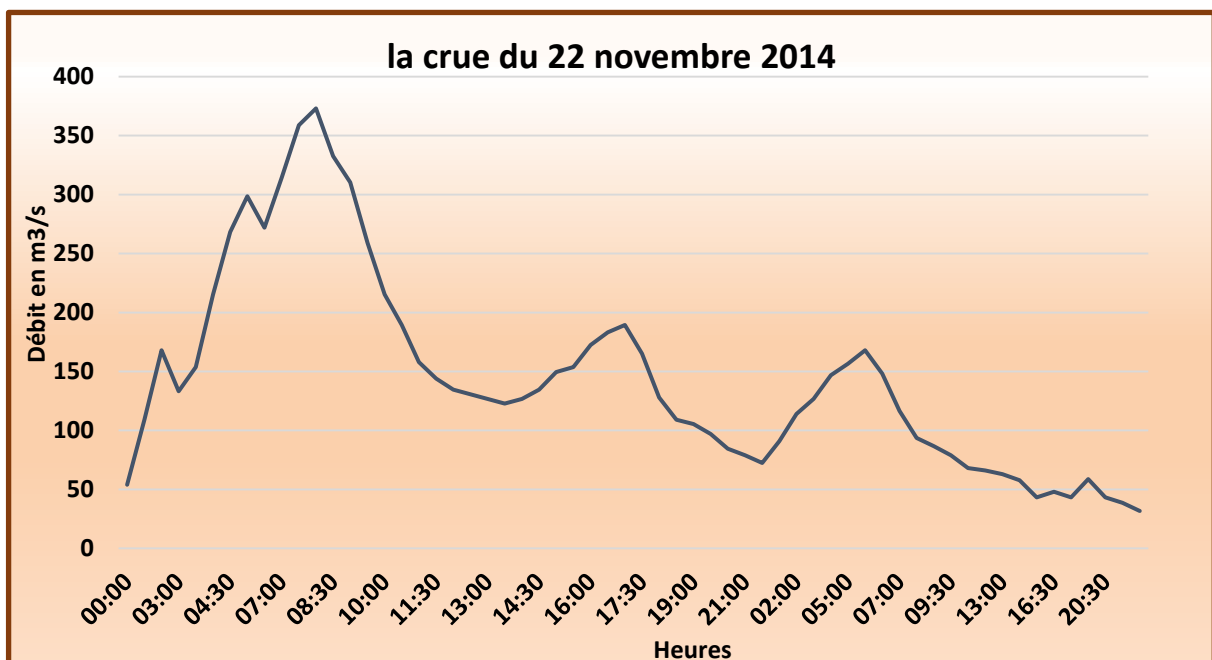


Figure 26 : Hydrogramme de la crue du 22 novembre 2014 d'oued Ghdat

❖ La crue du 25mars 2015

Tableau 14: Caractéristique de la crue 25 mars 2015

La crue du 25/03/2015 se distingue par son caractère complexe et polygénique, On a alors obtenu des hydrogrammes étalés sur trois jours avec plusieurs hausses et plusieurs baisses des niveaux d'eau. Cette crue est caractérisée par un débit de pointe de $74,59 \text{ m}^3/\text{s}$ et un temps de montée et de base relativement longs. Ils ont été respectivement de 25 h et 60 heures.

Caractéristiques de crue	
Débit de pointe (m^3/s)	74,59
Débit de base avant (m^3/s)	20,64
Débit de base après (m^3/s)	22,94
Débit moyen (m^3/s)	42,58
Coefficient de pointe	1,75
Temps de base (min)	3600
Temps de montée (min)	1500
Volume de crue (m^3)	9196791,6

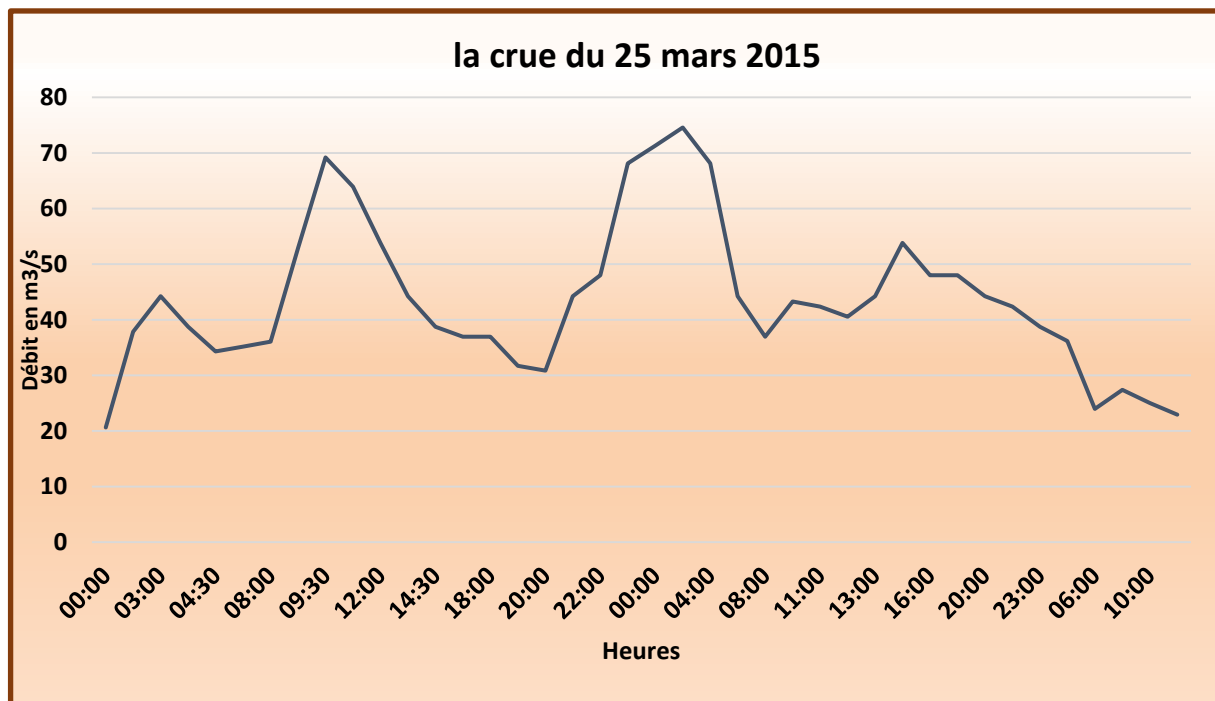


Figure 27: Hydrogramme de la crue du 25 mars 2015 d'oued Ghdat

1.2. Les crues dans l'année hydrologique

Pour la répartition mensuelle des crues dans l'année hydrologique, on procède à une étude statistique des crues. Le tableau suivant (tab. 20) résume le nombre de crues de chaque mois pour la série de données, afin de dégager les pourcentages des crues mensuelles.

Tableau 15: Nombre et pourcentages des crues mensuelles d'oued Ghdat

Mois	Nombre des crues	Pourcentage (%)
Septembre	4	8
Octobre	6	12
Novembre	11	21
Décembre	4	8
Janvier	7	13
Février	3	6
Mars	8	15
Avril	4	8
Mai	3	6
Juin	0	0
Juillet	0	0
Aout	2	4

On remarque ici que les crues se concentrent en majorité dans une période de sept mois d'octobre à avril. Ces 7 mois totalisent à eux seuls 83 % des crues du Ghdat.

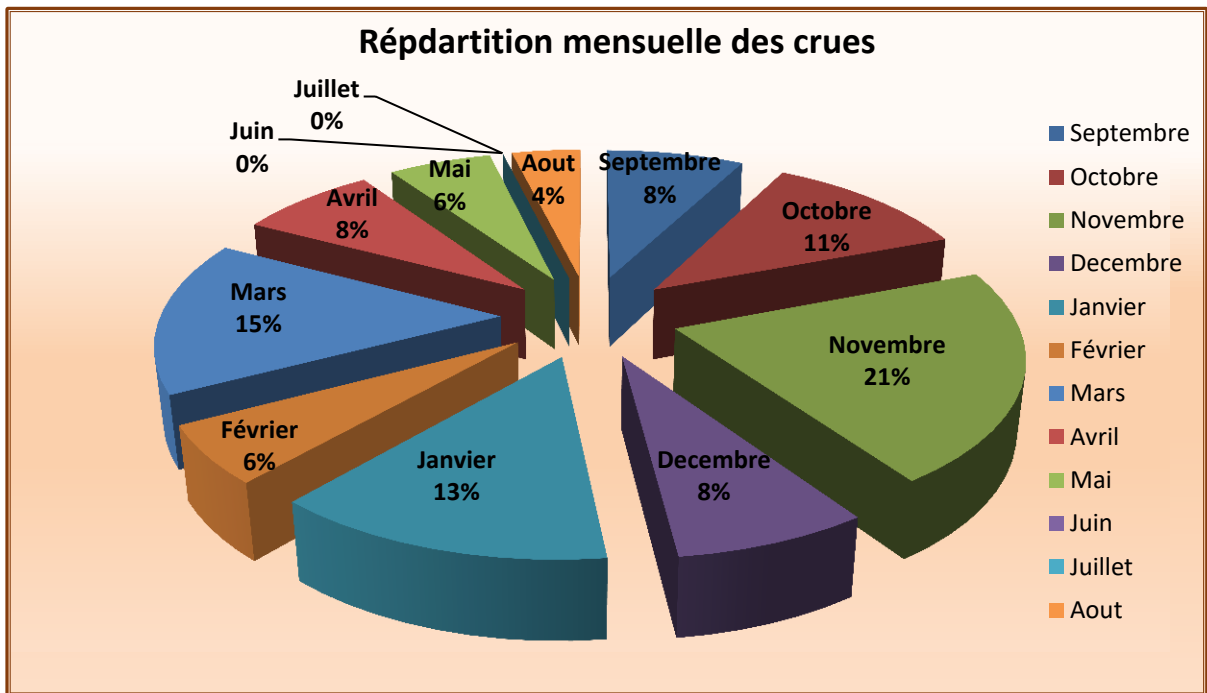


Figure 28: Répartition mensuelle des crues d'oued Ghdat

1.3. Variations des temps de montée et de base des crues

Dans ce paragraphe, nous allons essayer d'analyser les durées globales des crues et leurs temps de montée et de base pour chercher une éventuelle typologie des crues du bassin du Ghdat.

a. Variations de temps de montée

Le temps de montée est le temps compris entre le début de la montée du niveau d'eau et le débit maximum observé au cours de la crue

Tableau 16: temps de montée des crues d'oued Ghdat

Temps de montée	Intervalle de temps	0 -1h	1 – 4h	4 – 10h	10 – 20h	20 – 40h	> 40h
	Nombres des crues		3	11	18	13	7

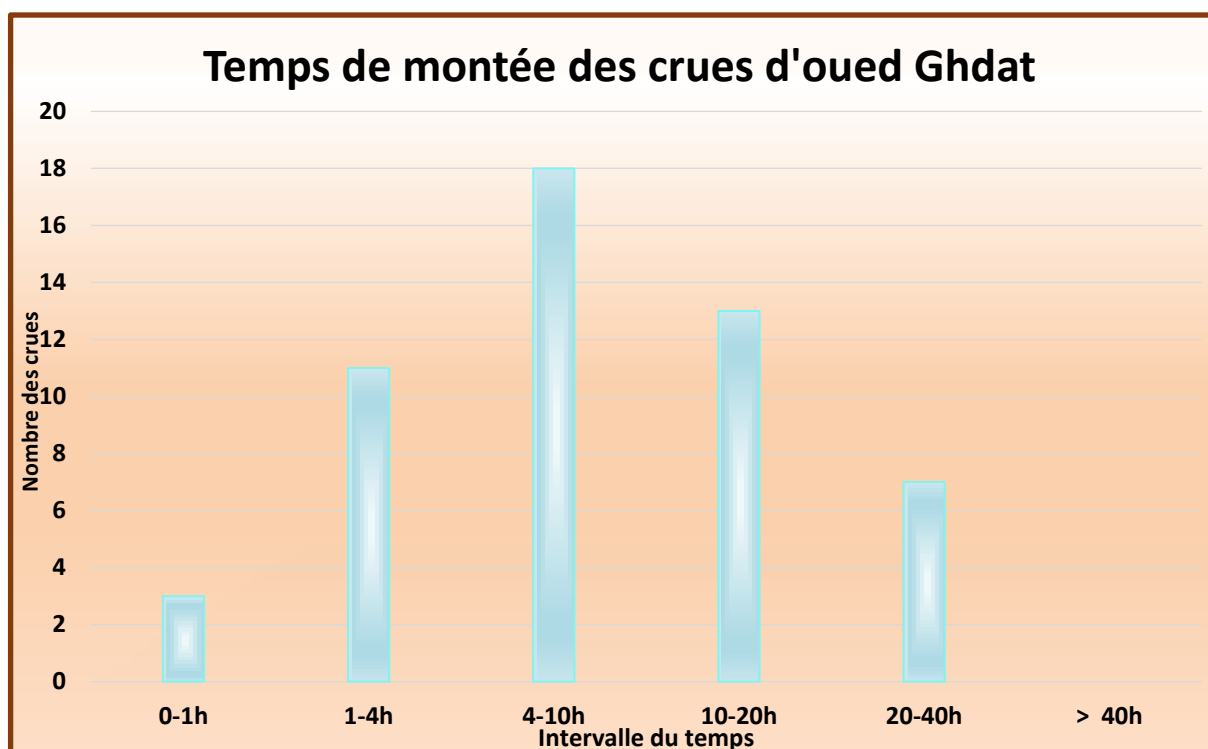


Figure 29: Temps de montée des crues d'oued Ghdat

Le temps de montée des crues le plus dominant pour le bassin versant du Ghdat se situe dans l'intervalle [4 – 10h], c'est un temps qui est généralement court et qui peut causer des dégâts graves.

Ce faible temps de montée peut être dû à plusieurs facteurs tels que :

- **L'imperméabilité** : Le bassin versant est constitué seulement de 30% de terrains perméables et 56% de terrains semi perméables. Ce qui implique l'empêchement de l'infiltration des eaux aux horizons souterraines et par conséquent affaiblir leurs temps d'écoulement.
- **La densité du réseau hydrographique** : Le réseau hydrographique dans ce milieu montagneux est dense ce qui implique que les branches collectent rapidement les eaux pluviales et les acheminent vers le cours principal.
- **La couverture végétale** : Qui est plus ou moins faible dans cette zone, ce qui facilite l'écoulement des eaux vers le cours d'eau principal. Donc, on peut dire que les critères géologiques, morphologiques et de végétation sont des paramètres qui influencent le temps de montée de crue et donc leurs degrés de gravité.

b. Variations de temps de base

Le temps de base est compris entre le début de la montée et la fin du ruissellement superficiel.

Tableau 17: Temps de bases des crues d'oued Ghdat

Temps de bases	Intervalle de temps	0 -1h	1 – 4h	4 – 10h	10 – 20h	20 – 40h	> 40h
	Nombres des crues		0	1	6	10	21

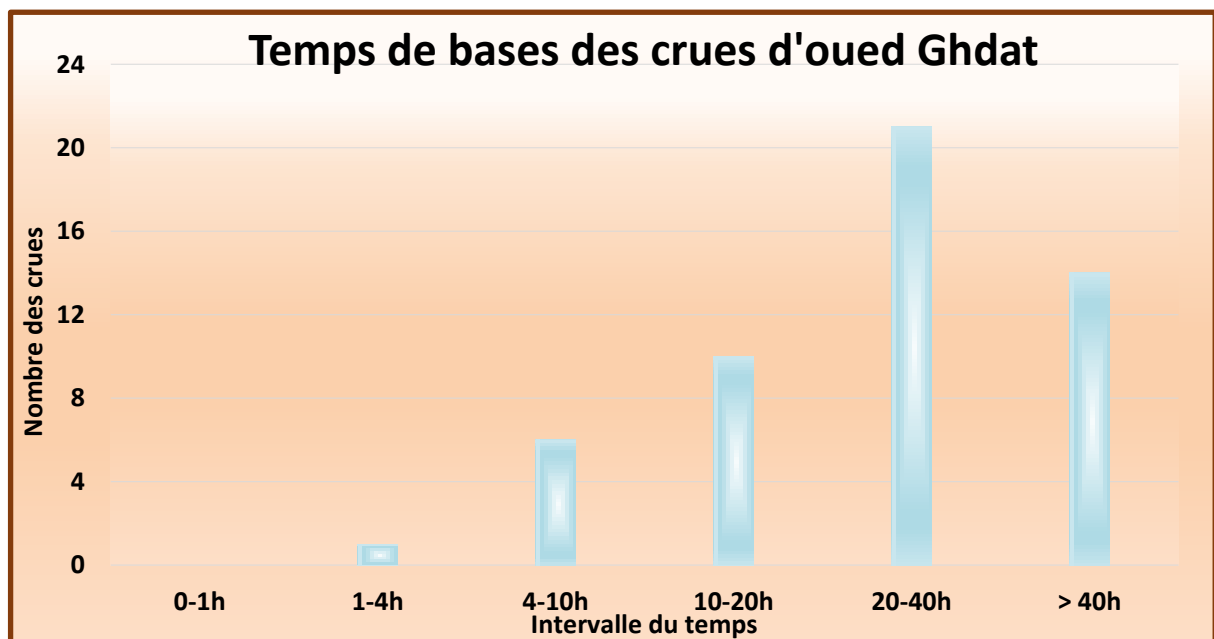


Figure 30 : Temps de bases des crues d'oued Ghdat

Le temps de base de la plupart des crues est situé dans l'intervalle du temps [20 – 40h], qui est généralement considéré comme étant lent (par rapport aux crues éclairs), et d'après les hydrogrammes on remarque qu'elles sont relativement étalées sur une longue période.

Pour conclure on peut dire que plus le temps de montée est faible et le temps de base élevé, plus la crue est dangereuse

2. Analyse fréquentielle des crues de l'oued Ghdat

L'analyse fréquentielle des événements extrêmes est l'un des outils privilégiés pour l'estimation des débits de crue pour une période de retour donnée. Elle est basée sur des méthodes statistiques de prédétermination, consistant à étudier les événements passés, caractéristiques d'un processus, afin d'en définir les probabilités d'apparition future.

Cette prédétermination repose sur la définition et la mise en œuvre d'un modèle probabiliste fréquentiel, qui est une loi de probabilité décrivant le comportement statistique d'un processus.

L'objectif est de faire une analyse fréquentielle sur une série de débits instantanés maxima annuels enregistrés au niveau de la station de Sidi Rahal, pour une période d'observation de 53 ans (1964/65 – 2016/17) ; en essayant d'ajuster à cette série une loi de probabilité théorique.

2.1. Application de la loi de Gumbel

a. Définitions et généralités :

La loi de Gumbel est une loi dite des valeurs extrêmes ou doublement exponentielle, utilisée pour décrire le comportement statistique des valeurs extrêmes. La fonction de répartition de la loi de Gumbel $F(x)$ s'exprime de la manière suivante :

$$F(x) = e^{-e^{-y}}$$

Avec $y = a(Q - Q_0)$; où y est la droite de Gumbel dont les paramètres d'ajustement étant :

- Le paramètre d'échelle : $\frac{1}{a} = 0,78 \sigma$ (σ est l'écart type de la série des crues).
- Le paramètre de forme : $Q_0 = \bar{Q} - \left(\frac{1}{a} \times 0,577\right)$ (avec \bar{Q} est la moyenne des crues).

En conséquence, dès lors que les paramètres a et Q_0 à calculer, on obtient l'équation de la droite de Gumbel $y = a(Q - Q_0)$ ou $Q = \frac{1}{a}y + Q_0$

Il est alors possible de tracer la droite sur un papier Gumbel sur lequel on porte aussi les valeurs des fréquences au non dépassement de toutes les crues de la série étudiée.

A défaut du papier Gumbel, on procède à un changement de variable pour obtenir une échelle linéaire y , sachant que :

$$F(Q) = e^{-e^{-y}}$$

Par conséquent $y = -\ln(-\ln(\text{FND}))$; FND est la fréquence au non dépassement du débit. Après avoir déterminé le débit de crues probables relatif à une fréquence donnée, il faut connaître l'intervalle de confiance de ce débit, c'est-à-dire la gamme de valeurs qui devrait le contenir. En effet, l'intervalle de confiance est défini par la formule suivante :

$$[Q_x + T_2\sigma ; Q_x + T_1\sigma]$$

- Q_x : Le débit de crue calculé.
- σ : est l'écart type de la série de crues
- T_1 et T_2 : étant des fonctions de n et p pour les fréquences choisies. Elles sont déterminées à partir de l'abaque de Bernier.

b. Ajustement de la loi de Gumbel aux crues du bassin versant du Ghdat

L'équation de la droite de Gumbel s'écrit : $Q = 117,2 y + 118,77$

La série des débits maxima annuels classés par ordre décroissant, en attribuant à chaque débit son rang R , sa fréquence expérimentale : $F = \frac{R-1/2}{n}$ (n est le nombre de données) et sa fréquence au non dépassement $\text{FND} = 1 - F$.

Tableau 18: Ajustement de la loi de Gumbel aux crues du Ghdat à sidi Rahal (1964/65 à 2016/17)

Rang	Débits max (m^3/s)	F	FND	Y	Rang	Débits max (m^3/s)	F	FND	Y	
1	685	0,009	0,991	4,659	28	146	0,519	0,481	0,313	
2	585,8	0,028	0,972	3,551	29	133	0,538	0,462	0,259	
3	534	0,047	0,953	3,03	30	125	0,557	0,443	0,207	
4	407,3	0,066	0,934	2,684	31	125	0,575	0,425	0,155	
5	397	0,085	0,915	2,422	32	110	0,594	0,406	0,103	
6	373	0,104	0,896	2,211	33	107	0,613	0,387	0,051	
7	351,2	0,123	0,877	2,034	34	103	0,632	0,368	0	
8	345	0,142	0,858	1,88	35	102,9	0,651	0,349	0,051	
9	325	0,16	0,84	1,744	36	87,8	0,67	0,33	0,103	
10	322,4	0,179	0,821	1,622	37	87,2	0,689	0,311	0,154	
11	310	0,198	0,802	1,511	38	82,3	0,708	0,292	0,207	
12	287	0,217	0,783	1,408	39	77	0,726	0,274	0,259	
13	251,8	0,236	0,764	1,313	40	70,3	0,745	0,255	0,313	
14	250,8	0,255	0,745	1,224	41	66,5	0,764	0,236	0,368	
15	236	0,274	0,726	1,141	42	60,4	0,783	0,217	0,424	
16	236	0,292	0,708	1,061	43	49,8	0,802	0,198	0,482	
17	216	0,311	0,689	0,986	44	49,3	0,821	0,179	0,542	
18	212	0,33	0,67	0,914	45	48	0,84	0,16	0,604	
19	210	0,349	0,651	0,846	46	45,6	0,858	0,142	0,671	
20	210	0,368	0,632	0,779	47	41	0,877	0,123	0,741	
21	202	0,387	0,613	0,715	48	35,7	0,896	0,104	0,818	
22	202	0,406	0,594	0,653	49	29,6	0,915	0,085	0,903	
23	200	0,425	0,575	0,593	50	27,6	0,934	0,066	1	
24	183	0,443	0,557	0,535	51	27	0,953	0,047	1,116	
25	182,6	0,462	0,538	0,477	52	11,4	0,972	0,028	1,271	
26	160	0,481	0,519	0,421	53	5,5	0,991	0,009	1,54	
27	149	0,5	0,5	0,367						
Moyenne		186,4			Ecart-type			150,26		

Sur un papier à échelles linéaires, nous avons ajusté l'équation de la droite de Gumbel :

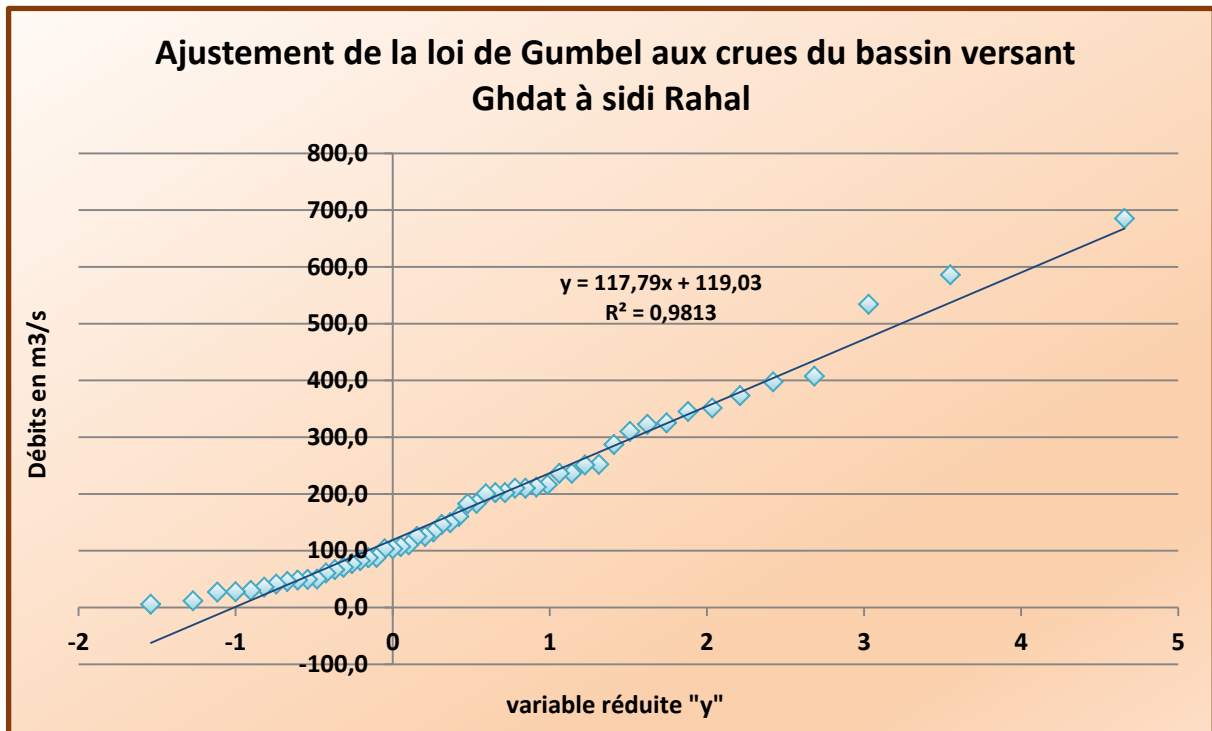


Figure 31: Ajustement de la loi de Gumbel aux crues du bassin versant Ghdat à Sidi Rahal

On remarque que la droite du Gumbel qui a pour l'équation $Q = 117,2 y + 118,77$ traverse le nuage des points, ce qui permet de déduire que l'ajustement est dans l'ensemble satisfaisant et qu'on peut éventuellement utiliser la loi de Gumbel pour estimer les probabilités des crues et leurs périodes de retour.

c. Calcul des quantiles et leurs intervalles de confiance

➤ Calcul des quantiles

Les calculs des quantiles (crue médiane, décennale, cinquantennate, centennale ...) ou les périodes de retour de certaines pointes de crues peut se faire soit par la lecture directe du graphique soit en utilisant l'équation de la droite de Gumbel $Q = 117,2y + 118,77$ avec la fréquence au non dépassement $FND = e^{-e^{-y}}$

Tableau 19: Débits calculés de différentes périodes de retour selon la loi de Gumbel

Réurrence où période de retour (ans)	2	3	5	10	20	50	100	200	1000
Débits calculés (m^3/s)	159	216	279	359	435	534	608	681	852

➤ **Intervalle de Confiance**

Le nombre d'élément étant de 53 et l'écart type de l'ordre de 150,26

Les intervalles de confiance des différents quantiles se présentent ainsi :

Tableau 20: Intervalle de confiance de différent période de retour selon loi de Gumbel

Réurrence ou période de retour (ans)	Intervalles de confiance
2	[126 ; 193]
3	[175 ; 257]
5	[228 ; 331]
10	[292 ; 425]
20	[354 ; 516]
50	[432 ; 635]
100	[491 ; 724]
200	[549 ; 813]
1000	[684 ; 1020]

Ces intervalles de confiance semblent relativement larges et ne donnerons pas de renseignements précis sur le débit de pointe recherché.

2.2. Application de logiciel d'analyse fréquentielle des crues

Dans le but de vérifier des hypothèses d'homogénéité entre une variable aléatoire et un modèle calculé, on procède à l'ajustement statistique. Si ce modèle est bien superposé à l'échantillon étudié, on peut le considérer comme étant bien ajusté. L'objectif de cette méthode est la réduction d'une importante masse de données, qui devrait être remplacée par un nombre réduit de paramètres statistiques pouvant représenter correctement cette masse.

Afin de découvrir la structure des variations des débits et pour faire une analyse détaillée de ces données, l'ajustement statistique est fait grâce au logiciel HYFRAN. Ce dernier propose 14 lois d'ajustement statistique et détermine un modèle ou plus qui s'ajustent au mieux à l'ensemble des données. Dans un premier temps on se base sur les résultats graphiques d'ajustement qui permettent de donner une idée préjugée du degré de corrélation avec la distribution de la variable étudiée. Ensuite on se base sur les résultats de l'analyse numérique qui classe les différentes lois utilisées selon les critères d'AIC (Akaike Information Criterion) (Akaike, 1973) et BIC (Bayesian Information Criterion) (Schwarz, 1978), en attribuant les plus faibles valeurs aux lois représentant les meilleurs résultats d'ajustement.

Pour mieux s'assurer de la validation de la loi à utiliser pour l'ajustement de l'échantillon étudié, on se sert du tableau comparatif des caractéristiques de la distribution selon une loi donnée et les caractéristiques statistiques de l'échantillon étudié. Quand la loi est choisie suite aux critères susmentionnés, on peut déduire pour une probabilité donnée les variations futures de la variable étudiée. Cette estimation est l'un des soucis majeurs pour les concepteurs d'aménagements.

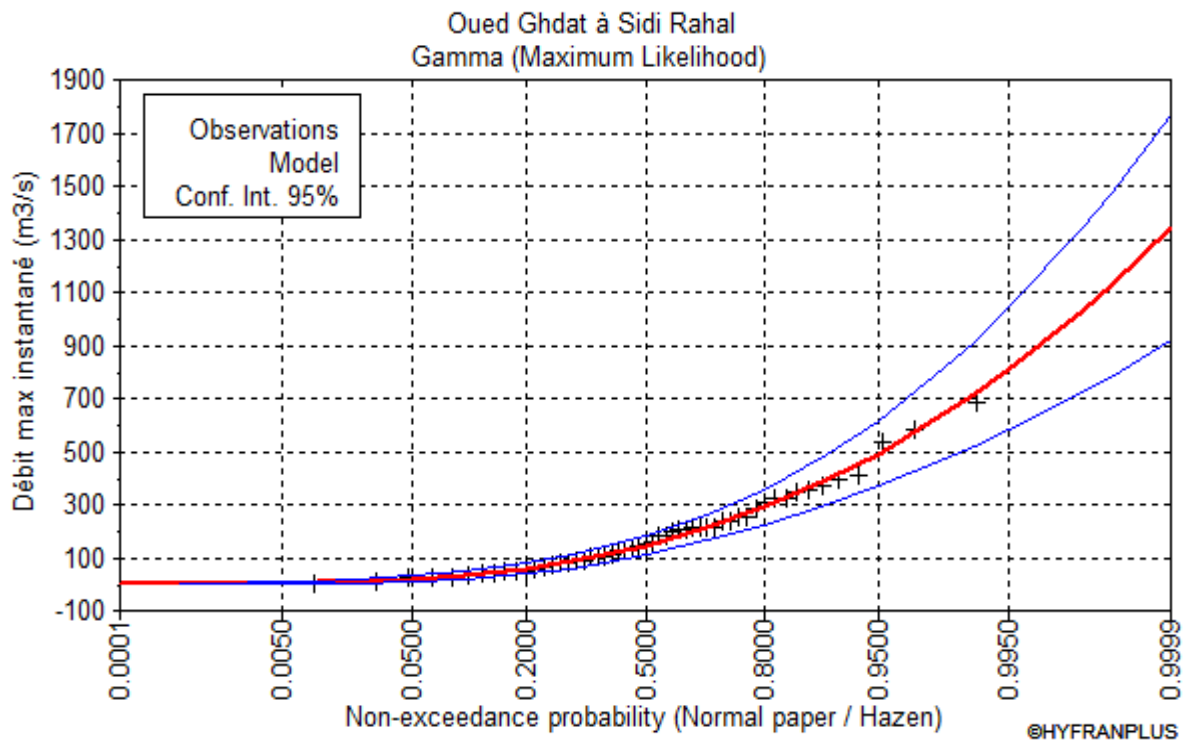
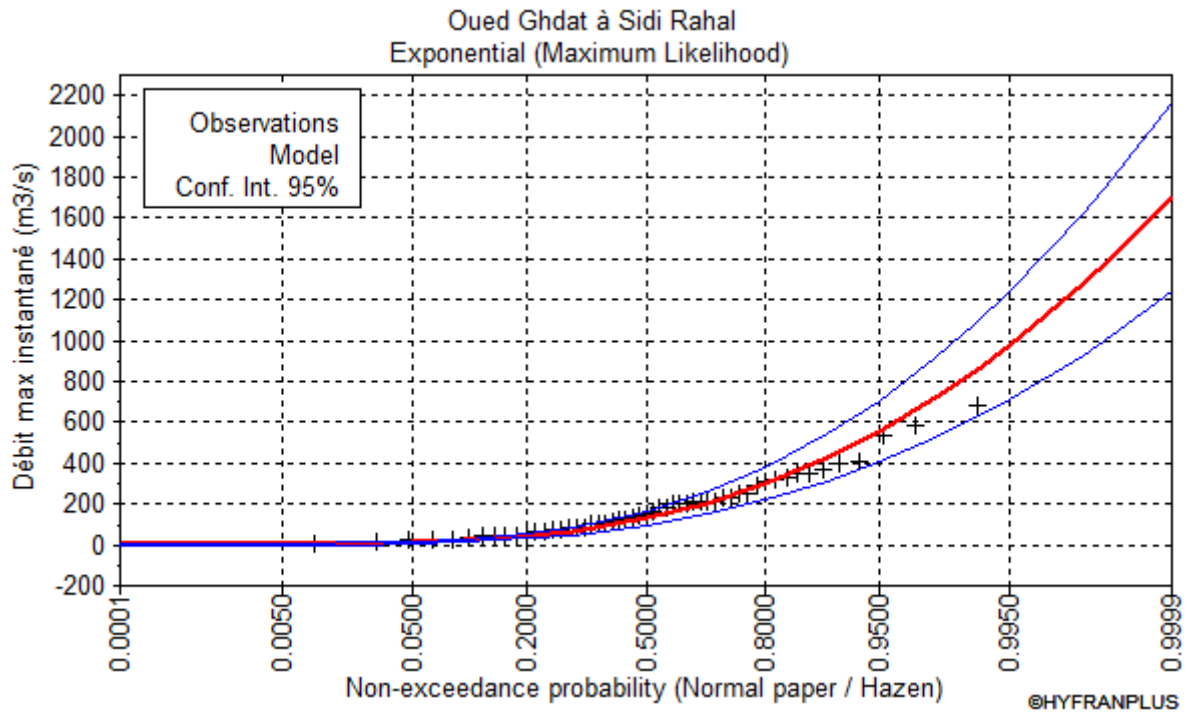
Notre étude porte sur l'ajustement des débits maxima instantanés annuels mesurés au niveau de la station hydrométrique de Sidi Rahal (tableau 20). Ces données couvrent une période de 53 ans, de 1964-1965 à 2016-2017. Elles sont issues de jaugeages ponctuels et des enregistrements du limnigraphe, et sont fournies par l'Agence de Bassin Hydraulique de Marrakech.

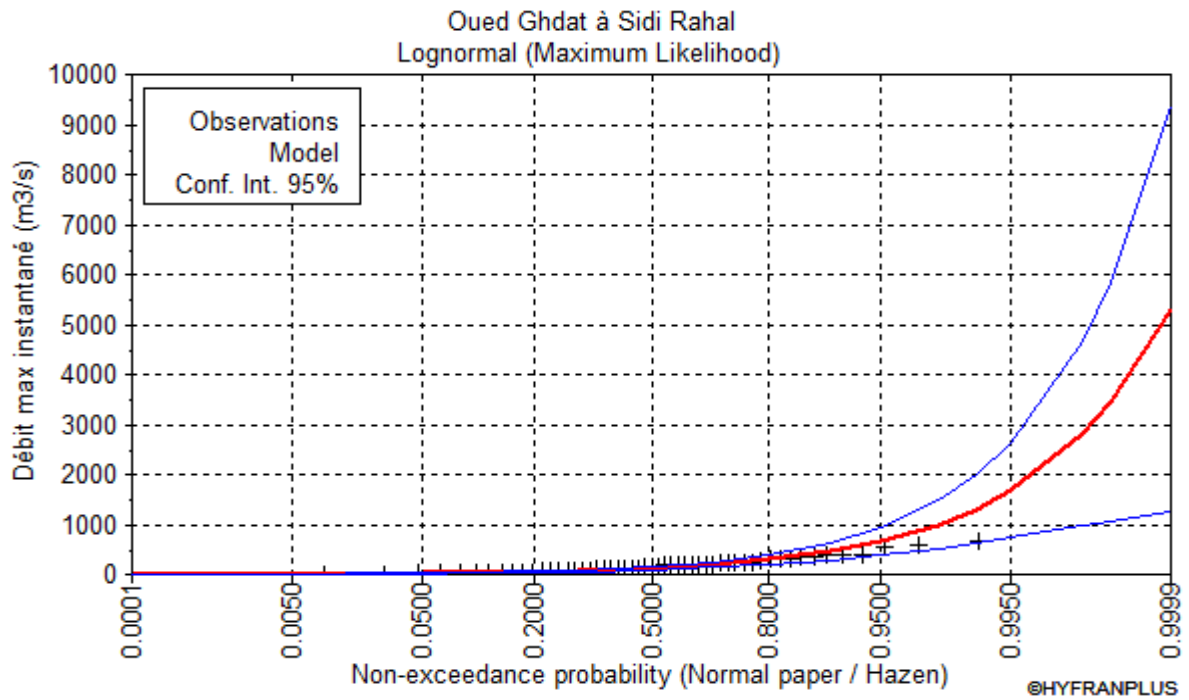
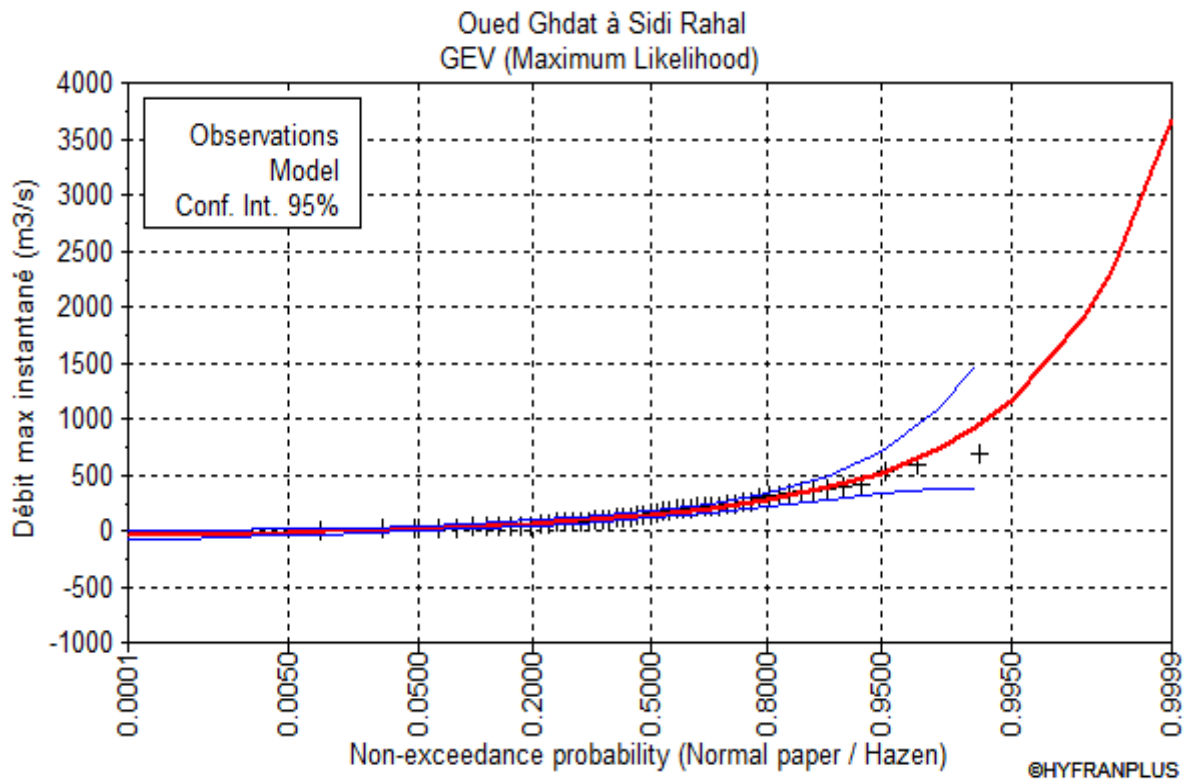
Tableau 21: Débits maxima instantanés annuels d'oued Ghdat à Sidi Rahal

Année	Débit max instantanée (m ³ /s)	Année	Débit max instantanée (m ³ /s)	Année	Débit max instantanée (m ³ /s)
1964/65	70,3	1982/83	5,5	2000/01	29,6
1965/66	200,0	1983/84	77,0	2001/02	27,0
1966/67	183,0	1984/85	110,0	2002/03	82,3
1967/68	202,0	1985/86	49,8	2003/04	236,0
1968/69	66,5	1986/87	351,2	2004/05	41,0
1969/70	149,0	1987/88	397,0	2005/06	236,0
1970/71	202,0	1988/89	325,0	2006/07	310,0
1971/72	125,0	1989/90	345,0	2007/08	182,6
1972/73	60,4	1990/91	146,0	2008/09	11,4
1973/74	103,0	1991/92	125,0	2009/10	322,4
1974/75	35,7	1992/93	27,6	2010/11	585,8
1975/76	87,2	1993/94	133,0	2011/12	48,0
1976/77	49,3	1994/95	534,0	2012/13	102,9
1977/78	160,0	1995/96	407,3	2013/14	251,8
1978/79	87,8	1996/97	212,0	2014/15	373,0
1979/80	210,0	1997/98	216,0	2015/16	287,0
1980/81	210,0	1998/99	107,0	2016/17	45,6
1981/82	685,0	1999/00	250,8		

a. Méthode visuelle (analyse des graphes)

Après avoir ajusté six lois mathématiques (Gamma ; Exponentiel ; Log-Normal ; Normal ; Weibull ; GEV) à notre distribution des débits maxima instantanés annuels (tableau 2), par la méthode de vraisemblance et identifié les paramètres de chaque loi, nous les avons représentées graphiquement pour les analyser et sélectionner les lois les mieux adaptées. L'ajustement des six lois est illustré par la figure 31. La loi Gamma et Weibull paraissent les mieux ajustées à notre distribution.





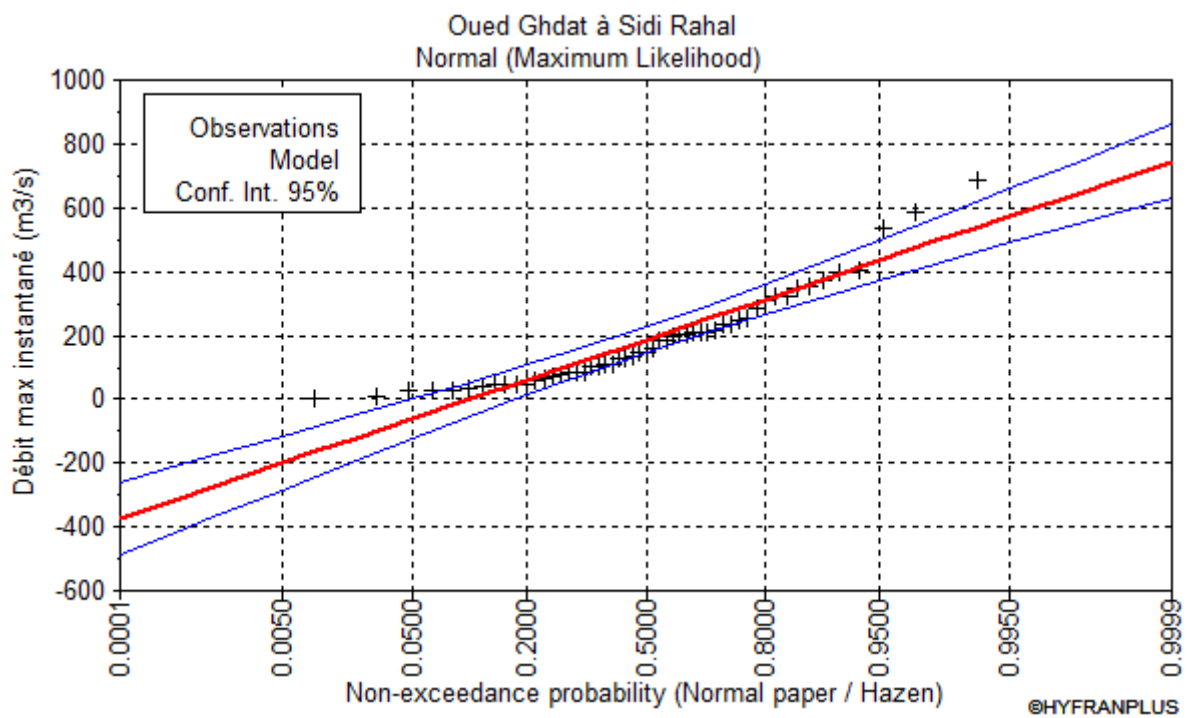
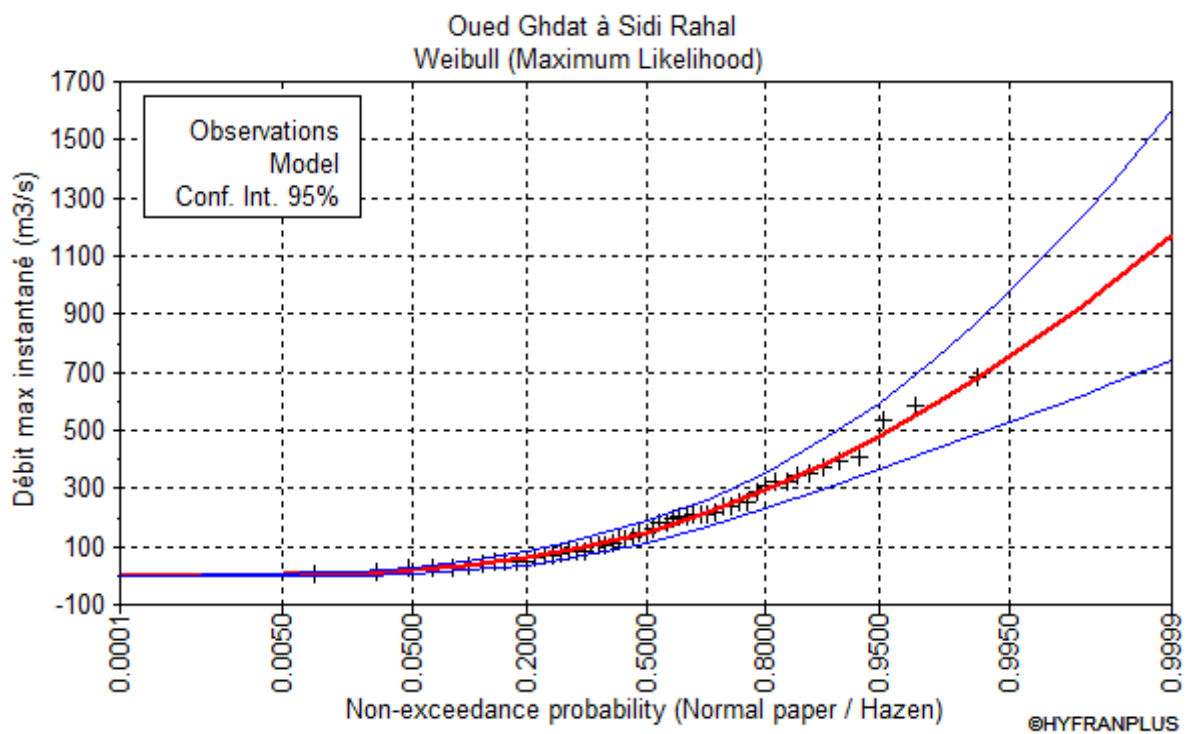


Figure 32: Ajustement graphique des débits maximaux annuels selon les lois statistiques à la station de Sidi Rahal

a. Méthode numérique (analyse des critères statistiques)

La méthode graphique est cependant insuffisante pour choisir les modèles adéquats à l'estimation. Ceci nous a obligés à faire intervenir les deux critères statistiques AIC et BIC. Ces deux critères permettent de classer les lois selon une performance d'estimation. La loi qui obtient les plus faibles valeurs des deux critères est la plus performante pour la prédétermination des débits extrêmes

Ces critères se définissent de la façon suivante :

$$AIC = -2\log(Lik) + 2K$$

$$BIC = -2\log(Lik) + K.\log(N)$$

Avec :

- **log(Lik)** : Représente la log-vraisemblance des paramètres associés aux données.
- **K** : Désigne le nombre de paramètres indépendants dans le modèle.
- **N** : le nombre d'individus composant l'échantillon.

Les résultats de cette analyse comparative de l'ajustement des lois statistiques sont consignés sur le tableau 22.

Après une comparaison entre les résultats graphiques et ceux fournis par le tableau ci-dessous, on constate qu'il y a une conformité. La loi la mieux adaptée pour l'ajustement est la loi de Weibull suivie par la loi de Gamma, qui ont les plus faibles valeurs des critères AIC et BIC.

Tableau 22: Résultats des critères AIC et BIC des estimations des crues d'oued Ghdat

Lois	Période de retour (ans)					
	10		50		100	
	BIC	AIC	BIC	AIC	BIC	AIC
Weibull	663.896	659.955	663.896	659.955	663.896	659.955
Gamma	664.008	660.068	664.008	660.068	664.008	660.068
Exponential	667.089	663.148	667.089	663.148	667.089	663.148
Lognormal	671.082	667.141	671.082	667.141	671.082	667.141
GEV	673.091	667.180	673.091	667.180	673.091	667.180
Normal	688.706	684.765	688.706	684.765	688.706	684.765

b. Estimation de probabilités de crues

Le tableau suivant résume Les estimations des débits maxima instantanés annuels calculés pour les différentes périodes de retour selon les huit lois de probabilité.

Tableau 23: Estimation des débits de pointe de différentes périodes de retour de Ghdat à Sidi Rahal

Période de retour (ans)	Fréquences au non dépassement	<i>Débit estimé en (m³ /s)</i>					
		Lois					
		Weibull	Gamma	Exponential	Lognormal	GEV	Normal
2	0.500	150	145	129	127	142	186
5	0.800	292	289	299	295	275	313
10	0.900	389	391	427	459	387	379
20	0.950	479	491	555	662	517	433
50	0.980	593	620	724	998	727	495
100	0.990	675	717	852	1310	922	536
500	0.998	856	937	1150	2280	1540	619
1000	0.999	932	1030	1280	2820	1890	651

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 2 ans, 5 ans et 10 ans présentent une faible variabilité. On retiendra les estimations de la loi Gamma et Weibull qui étaient les plus adéquates.

Pour un cours d'eau de $2.33\text{m}^3/\text{s}$ de débit moyen, la crue décennale (Q_{10}) s'élève à $389\text{ m}^3/\text{s}$, la pointe centennale (Q_{100}) d'ordre $675\text{ m}^3/\text{s}$ et la pointe millénal (Q_{1000}) atteint $932\text{m}^3/\text{s}$ (selon la loi de weibull). Ce sont des pointes très élevées pour un milieu semi-aride et d'un bassin versant de 541 km^2 de surface. Elles présentent donc un risque hydrologique de grande envergure.

V. CONCLUSION

Le bassin versant du Ghdat offre un environnement géomorphologique et climatique propice à l'écoulement superficiel et au développement des crues violentes. Il est caractérisé par des pentes assez faibles sur la plaine mais beaucoup plus importantes sur les montagnes, des terrains peu perméables en amont et plus perméables en aval et un couvert végétal peu dense. Les précipitations du bassin versant du Ghdat sont très irrégulières et caractérisées par une variabilité spatiotemporelle, avec des moyennes annuelles autour de 600 mm en amont et autour de 300 mm en aval. La valeur annuelle maximale a été enregistrée pendant l'année 1995/96 tandis que l'année la plus sèche était 1992/93. Les variations mensuelles montrent que la période pluvieuse s'étend d'octobre à avril avec presque 85.1 % du total pluviométrique. Les débits sont irréguliers durant l'année, avec un maximum aux mois de mars et avril, tandis que le cours d'eau est quasiment à sec pendant la période estivale sèche. La corrélation débits/pluies à l'échelle annuelle a été bonne avec un coefficient de détermination de 0,61, ce qui revient à dire que les débits dépendent étroitement des pluies du bassin.

Ce concours de circonstances géo climatiques est à l'origine de crues avec des écoulements à grande vitesse et à très forts débits par rapport aux modules moyens. Ces événements de crues sont fréquents et répétitifs dans les vallées et leurs impacts sont considérables et toujours visibles sur les voies de communication, les terrains agricoles et les bâtiments.

L'étude morphologique du bassin d'oued Ghdat et l'analyse statistique des crues (temps de base, temps de montée, ...) sont très importants pour évaluer l'intensité et la gravité de la réponse hydrologique. L'étude de la typologie des crues donne une information supplémentaire pour une meilleure modélisation. Egalement, l'analyse fréquentielle des débits maxima journaliers a un rôle très important dans l'estimation du risque d'apparition d'une crue donnée pour une période de retour. A cet effet, nous avons trouvé que La loi de Weibull est la mieux adaptée pour l'estimation des débits maxima instantanés du Ghdat à Sidi Rahal.

Bibliographie

Abou-Elaaz Khalid & Maïmouna Ibrahim (2006) : Le bassin versant du N'Fis (Haut Atlas de Marrakech) Situation hydro-pluviométrique et bilans hydrologiques, Mémoire de maîtrise, Faculté des sciences et techniques, Marrakech, 43p.

Banacer Amal & Benpa Imane (2016) : Etude hydrologique du bassin versant de Ghdat à Sidi Rahal : Cas de la crue du 28 novembre 2014. Mémoire de fin d'études de Licence, Faculté des sciences et techniques, Marrakech, 55p.

Boualioui mariama & Abouhani Meryem (2017) : Vulnérabilité territoriale aux inondations du Haut Atlas de Marrakech L'exemple de l'aval du bassin versant du ZAT, Mémoire de fin d'études de Licence, Faculté des sciences et techniques, Marrakech, 63p.

Darif Oumkaltoum (2013) : Fonctionnement hydrologique du bassin versant de R'DAT (Haut Atlas de Marrakech) et conséquences environnementales des crues de l'oued, Mémoire de fin d'étude de master, Faculté des Sciences et Techniques, Marrakech, 85p.

El Alaoui El Fels Abdelhafid (2012) : Application de l'algorithme génétique à la modélisation des crues Exemple : Bassin d'Oued N'Fis, mémoire de master, Faculté des sciences et techniques, Marrakech, 72p.

El Hallaoui Abdeljabar (2013) : Caractérisation du Bassin Rdat –Modélisation Hydrologique, mémoire de fin d'étude de master, Faculté des Sciences et Techniques, Fés ,43p.

Hanich, L., Simoneaux, V., Boulet, G., Chehbouni, A.G., (2006), Hydrologie des bassins versants du Haut Atlas marocain. Programme « Gestion durable des ressources en eau dans le bassin versant de Tensift (région de Marrakech, n°MA/148/06)», 14 p

Hiqui Abdessamad (2015) : Les événements hydrologiques exceptionnels du Haut Atlas de Marrakech, mémoire de fin d'étude de master, Faculté des Sciences et Techniques, Marrakech, 64p.

Ouahidy Amina & Choukri Maria (2018) : Etude hydro-pluviométrique et estimation des débits de pointe du bassin versant de la Rheraya (Maroc), Mémoire de fin d'études de Licence, Faculté des sciences et techniques, Marrakech, 52p.

Ramromi Adnane (2007) : Les crues en zone montagneuse semi-aride, Le cas des bassins du R'Dat et du Zat (Haut Atlas, Maroc). Mémoire de maîtrise, Faculté des Sciences et Techniques, Marrakech, 46p.

SAIDI Mohamed El Mehdi & KHAFAOUI Amal (2014) Apport des outils de SIG dans la cartographie d'un bassin versant montagnard : Cas de l'oued R'Dat, Faculté des Sciences et Techniques, laboratoire de Géosciences et Environnement, Marrakech Maroc, 3 p.