



وكالة الدوض الماني لتاسيفت
Agence du Bassin Hydraulique du Tensift



Université Cadi Ayyad
Faculté des Sciences et Techniques
Marrakech
Master eau et Environnement

**Le fonctionnement hydrologique du bassin versant
de R'Dat (Haut Atlas de Marrakech)
et conséquences environnementales des crues de l'oued**

Oumkaltoum DARIF

Encadrée par :

Mohamed el Mehdi SAIDI

Soutenu le 28 juin 2013 Devant le jury :

Khamli N., Professeur à la FSTG

BOURGEOINI Y., Professeur à la FSTG

SAIDI M. E., Professeur à la FSTG

Remerciement

Je tiens, tout d'abord, à exprimer ma profonde reconnaissance à Mr M. SAIDI pour l'intérêt soutenu avec lequel il a entouré ce travail. Aucun mot ne saurait exprimer ma très haute considération et ma grande admiration pour ses conseils, sa façon d'encadrer et sa définition des grandes lignes à suivre.

Mes remerciements s'adressent également à Monsieur le Directeur de l'Agence du Bassin Hydraulique de Tensift (ABHT), pour m'avoir accepté au sein de son Etablissement.

Je remercie Mr S.ERRACHIDI de m'avoir encadré au sein de L'ABHT, pour son aide, pour l'ensemble des données qu'il a mis à ma disposition. il a su répondre à mes attentes et interrogations.

Enfin je tiens à remercier mes professeurs au Départements des Sciences de la Terre ainsi que toutes les nombreuses personnes qui ont contribués, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire pour leurs conseils, soutien et aide technique.

Sommaire

Remerciement.....	1
Introduction	6
Résumé	7
Première partie.....	9
L'analyse de la géomorphologie générale du bassin	9
situation géographique.....	10
2) Evolution structurale	10
2.1) les phases tectoniques :	11
2.2) La lithologie	11
3) relief	14
4) climat et végétation	14
4.1) climat.....	14
4.2) la végétation	15
5) Réseau hydrographique.....	16
5-1) La densité de drainage :	18
5-2) les principales artères hydrographiques.....	18
6) caractéristiques géomorphologiques	20
6.1) l'indice de compacité	20
6.2) l'hypsométrie	21
6.3) le rectangle équivalent	24
6.4) temps de concentration	25
7) Réseau des seguias	26
8) Evaporation et humidité.....	26
9) APPORTS LIQUIDES.....	27
Deuxième partie.....	28
L'étude hydropluviométrique à partir des stations de mesures	28
Introduction	29
A) variations des précipitations et des débits à différentes échelles de temps.....	29
1) variations des précipitations.....	29
1.1) précipitations moyennes annuelles et leurs variations	29
a)Méthode de la moyenne arithmétique :	30
Station du Sidi Rahal.....	30
b) variations annuelles des précipitations.....	31

1.2) variations saisonnières des précipitations	33
1.3) précipitations mensuelles interannuelles.....	34
2) variations des débits des cours d'eau	38
2.1) les variations annuelles des débits	39
2.2) variations des débits mensuels	40
2.3) variations saisonnières des débits de oued R'dat	41
B) Corrélation précipitations/débits, précipitations /coefficient d'écoulement et précipitations /déficit.....	42
1) Variations simultanées des précipitations et des débits mensuels	42
2) corrélation pluies –débits annuels	44
3) corrélation pluies/débits saisonniers	45
4) corrélation pluies/ coefficient d'écoulement.....	45
5) corrélation précipitations/ déficit d'écoulement	48
C) Etude dynamique des crues de l'oued R'dat	49
1) Analyse de quelques crues exceptionnelles	50
1.1) exemple de crue simple du oued R'dat	50
1.2) exemple de crue complexe de oued R'dat	51
2) Les crues dans l'année hydrologique	52
3) variations des temps de montée et de base des crues.....	53
3.1) variations des temps de base	53
3.2) variations de temps de montée	54
Troisième partie: L'analyse fréquentielles des débits et des pluies extrêmes pour l'estimation des débits de pointe pour différentes périodes de retour en utilisant le logiciel HYFRAN.....	56
A) L'ajustement statistique des variables précipitations et débits	57
1) Ajustement des lois à un échantillon des précipitations maximales annuelles	58
1.1) Méthode visuelle	58
1.2) Méthode numérique	60
1.3) Critères de la loi la mieux adaptée à l'ajustement	60
1.4) Estimation des précipitations de pointe journalière	61
2) ajustement des lois à un échantillon des débits maximal annuels	62
2.1) Méthode visuelle (analyse des graphes)	62
2.2) Méthode numérique (analyse statistique)	65
2.3) Estimation des débits maxima annuels pour différentes périodes de retour	66

2.4)critères de la loi la d'ajustement la mieux adaptée pour l'estimation	67
Quatrième partie: L'analyse des impacts environnementaux de l'hydrologie du R'dat sur le milieu et les mesures de protection.....	70
A) Les conséquences des crues sur le milieu aval et mesures de protection.....	71
1) les impacts des crues en aval	71
1.1) Les dégâts environnementaux	71
qualité des eaux de l'oued R'dat.....	75
1) les paramètres mesurés in situ.....	75
a) pH.....	75
b) la conductivité.....	76
c) l'oxygène dissous.....	76
2) la minéralisation.....	76
1.2) Les dégâts humains	76
1.3) Les dégâts matériels	78
2) La protection contre les inondations	80
1.2)la protection directe.....	80
2.2) la protection indirecte	81
Conclusion.....	82
Bibliographie	84

Liste des figures

Figure 1: carte de la situation géographique du bassin versant du R'dat.....	10
Figure 2 : carte géologique du bassin versant du R'dat	121
Figure 3 : carte de la classification du réseau hydrographique du bassin ..	126
Figure 4 : carte du réseau hydrographique du bassin	128
Figure 5 : carte hypsométrique du bassin versant du R'dat	20
Figure 6 : carte du pente du bassin versant du R'dat	22
Figure 7 : rectangle équivalent du bassin versant du R'dat	24
Figure 8 : variations des précipitations annuelles du bassin versant du R'dat à Sidi Rahal	32
Figure 9 : variations saisonnières des précipitations du bassin versant du R'dat.....	33
Figure10 : précipitations moyennes mensuelles interannuelles à Sidi Rahal.....	34
Figure11: variations des précipitations mensuelles à la station de Taddert	35
Figure12: variations mensuelles des précipitations à la station de Toufliht.....	36
Figure 13: variations mensuelles des trois stations du bassin versant du R'dat	37
Figure 14 : variations mensuelles des précipitations au bassin versant du R'dat.....	38
Figure 15 : variations des débits annuels du bassin versant du R'dat à Sidi Rahal.....	39
Figure 16 : variations mensuelles des débits du bassin versant du R'dat.....	40
Figure 17 : variations saisonnières des débits annuels du bassin à Sidi Rahal.....	41
Figure 18 : variations simultanées des précipitations et débits mensuels du bassin.....	43
Figure 19 : corrélation précipitations – débits à la station de Sidi Rahal.....	44
Figure 20 : corrélation précipitations – débits saisonniers.....	45
Figure 21 : corrélation pluies- coefficient d'écoulement.....	47
Figure 22 : corrélation précipitations/ déficit pour le bassin versant du R'dat.....	48
Figure 23: exemple d'une crue simple du bassin versant du R'dat.....	50
Figure 24 : exemple d'une crue complexe.....	51
Figure 25 : répartition mensuelle des crues du bassin versant du R'dat.....	52
Figure 26 : temps de base de crues du bassin versant du R'dat à Sidi Rahal.....	53
Figure 27 : temps de montée des crues du bassin versant de R'dat	54
Figure 28 : ajustement graphique des précipitations maximales annuelles.....	59
Figure 29 : ajustement graphique des débits maxima annuels.....	64
Figure 30 : carte de la localisation du point de suivi de la qualité des eaux de surface.....	73
Figure 31 : carte montrant l'emplacement des habitations du bassin versant du R'dat.....	75
Figure 32 : carte montrant l'emplacement du réseau routier du bassin versant du R'dat.....	77

Liste des tableaux

Tableau1 : pourcentage de terrains selon leur perméabilité.....	10
Tableau2 : pourcentages des surfaces du bassin en fonction des taux d'infiltrations.....	13
Tableau3 : couverture d'occupation des sols dans la zone d'étude	15
Tableau4 : dimensionnement du bassin versant du R'dat.....	19
Tableau 5 : la répartition des tranches d'altitudes du bassin versant du R'dat.....	21
Tableau 6 : récapitulation des paramètres du rectangle équivalent pour le bassin	23
Tableau 7 : temps de concentration du bassin versant du R'dat.....	25
Tableau 8 : les coordonnées Lambert des trois stations.....	29
Tableau 9 : Moyenne des différentes stations du bassin.....	31
Tableau 10: répartition saisonnière des précipitations du bassin versant du R'dat.....	33
Tableau 11 : rapport des débits extrêmes sur le débit moyen.....	40
Tableau 12: bilan hydrologique à la station de sidi rahal.....	46
Tableau 13 : Nombre et pourcentages des crues du bassin versant du R'dat.....	52
Tableau 14 : Ajustement numériques des lois aux précipitations maximales annuelles....	60
Tableau 15 : Statistiques descriptives des précipitations maximales annuelles à la station de Sidi Rahal.....	60
Tableau 16 : Estimation des précipitations maximales journalières selon la loi de Pareto...	61
Tableau 17 : estimation des débits de pointe selon les différentes lois d'ajustements.....	66
Tableau 18 : Statistiques descriptives de débit maximal annuel à la station de sidi rahal...	67
Tableau19 : Débits estimés par la loi de Gumbel empiriquement et par le Hyfran.....	69
Tableau 20 : grille simplifié des eaux des oueds (normes marocaines).....	74
Tableau 21 : qualité globale des eaux de surface du bassin versant de R'dat.....	75

Résumé

L'étude porte sur le bassin versant du R'dat qui est un affluent de l'oued Tensift. Il couvre une superficie de 532 km², et 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. Le bassin est caractérisé par un climat aride à semi aride en aval en dessous de 2000 m d'altitude, et un climat subhumide en montagne au-delà de ce seuil, 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.

A cet effet plusieurs mesures de protection et de prévention ont été prises afin de prévenir le phénomène et d'en atténuer les conséquences.

Introduction

En montagne, la gestion des crues des oueds est un enjeu important. Ces crues sont d'autant plus violentes et destructrices qu'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, pour prendre les précautions qui peuvent diminuer les dégâts qui en découlent.

La zone d'étude est représentée par le bassin versant du R'dat, qui est un affluent rive gauche de l'oued de Tensift, 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 532 Km².

Le climat de la région est de type aride à semi aride en plaine et subhumide en haute montagne. Les précipitations et les débits sont caractérisés par une grande variabilité.

Les conditions climatiques et morphologiques du bassin versant du R'dat 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'entreprendre l'étude du fonctionnement hydrologique de ce bassin, dans le but d'avoir une idée sur la typologie des crues, et leurs impacts environnementaux en aval du bassin et cerner le comportement hydrologique d'un cours d'eau de zone semi aride.

A cet effet, nous avons adopté une démarche articulée autour de 4 axes :

- 1) L'analyse de la géomorphologie générale du bassin,
- 2) L'étude hydropluviométrique à partir des stations de mesures,
- 3) L'analyse fréquentielles des débits et des pluies extrêmes pour l'estimation des débits de pointe pour différentes périodes de retour en utilisant le logiciel HYFRAN
- 4) L'analyse des impacts environnementaux de l'hydrologie du R'dat sur le milieu et les mesures de protection

Première partie
L'analyse de la géomorphologie générale du bassin

1) Situation géographique

Le R'dat appartient au versant Nord de la chaîne du Haut Atlas. C'est un affluent rive gauche de l'oued de Tensift, qui draine un bassin versant de 532 Km², fermé à Sidi Rahal. Il est situé au Sud Est de Marrakech dans l'intervalle indiqué par les coordonnées Lambert suivantes :

$$290000 < X < 330000 \quad \text{et} \quad 70000 < Y < 120000$$

Le bassin de R'dat 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. Le bassin est influencé par la structuration du massif atlasique d'où la nécessité d'examiner cette évolution structurale.

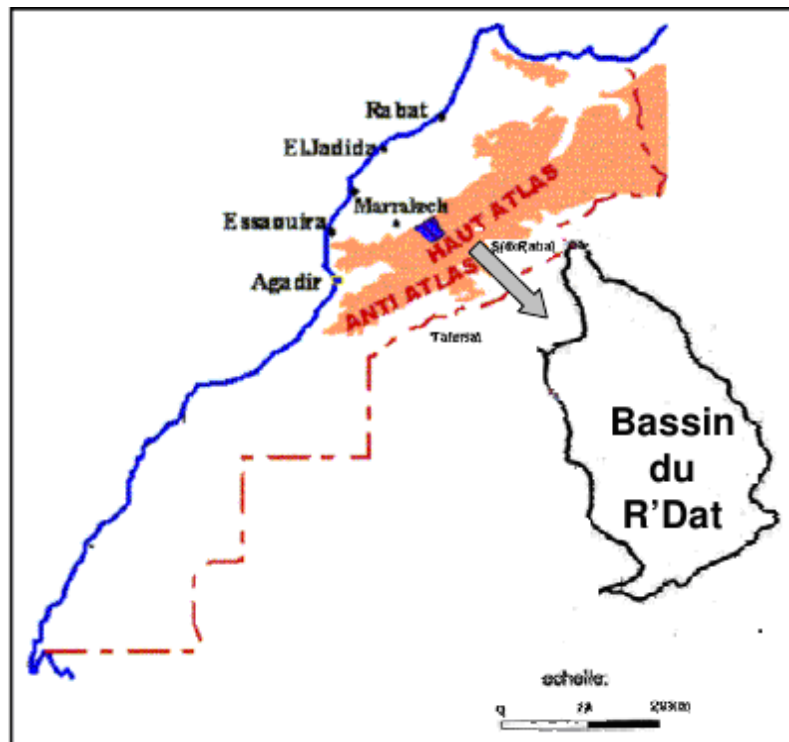


Figure 1 : carte de la situation géographique du bassin versant du R'dat

2) Evolution structurale

La morphologie du bassin versant de R'dat est le résultat d'une évolution géomorphologique très longue. Ce bassin a fait l'objet de nombreuses études géologiques et géomorphologiques dont on va rappeler ceux qui ont une relation avec le comportement hydrologique de ce bassin.

2.1) les phases tectoniques :

Dans ce bassin versant, les caractères généraux affectant le substratum de la région sont divers :

En général les jeux de failles ou de plis ont débuté depuis le précambrien et le paléozoïque, ils se sont intensifiés pendant les deux phases récentes dites atlasiques ; l'une post-éocène et anti-miocène, l'autre pliocène supérieur. A ces dernières phases se rapporteraient les plis, failles et flexures qui ont affecté la haute chaîne magmatique et la formation permo-triasique du bassin de R'dat. La direction de ces failles est NE-SW à ENE-WSW. Ces déformations violentes ont provoqué un grand diaclasage des roches capables de retenir des nappes qui assurent la pérennité de l'écoulement dans ce bassin. Elles sont aussi à la base de son ossature actuelle : des versants raides ou espacés, des ruptures de pentes. Toutefois la vigueur de la tectonique dépend de la nature lithologique (Sabatier, 1982)

2.2) La lithologie

Dans l'ensemble, la lithologie du bassin du R'dat est constitué de 30% de terrains imperméables, 56% de terrains semi perméables et 14% de terrains perméables (P.Pascon 1977).

SOL PERMEABLE	SOL SEMI-PERMEABLE	SOL IMPERMEABLE
14%	56%	30%

Tableau1 : pourcentage de terrains selon leur perméabilité

Le bassin présente des formations géologiques diversifiées.

Dans le haut bassin, les terrains sont très peu perméables : formations métamorphiques ou éruptives imperméables (Primaire Précambrien).

Dans la partie avale, les formations calcaires perméables forment les principaux affleurements. (Crétacé, Eocène, Jurassique Primaire).

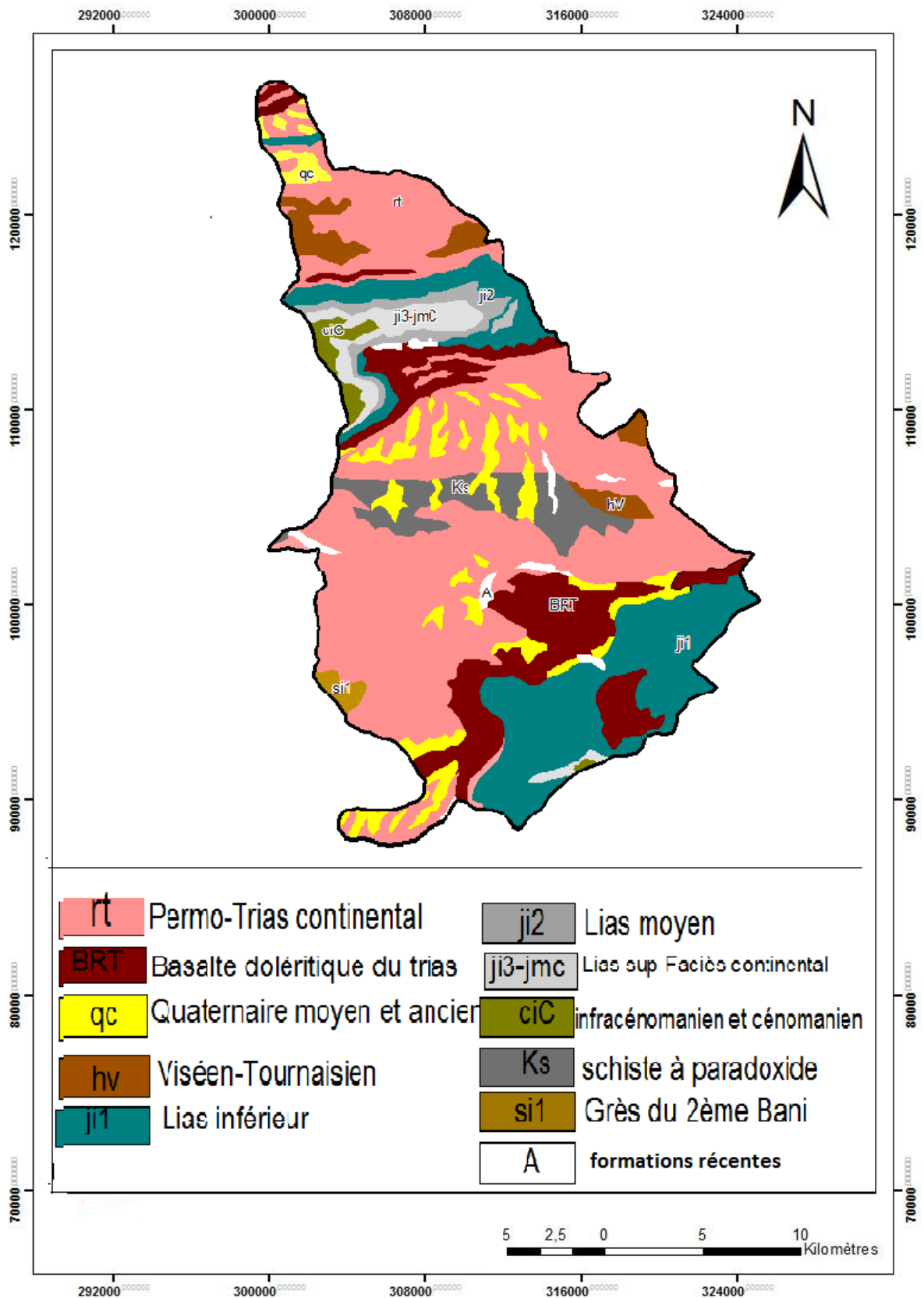


Figure 2 : carte géologique du bassin versant du R'dat

Le bassin versant du R'dat offre deux grands aspects de faciès :

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

La partie septentrionale, située à des altitudes inférieures à 2000 m, est constituée de dépôts permo-triasiques tendres notamment des grés, des argiles, et des conglomérats. Les formations du cénozoïque et quaternaire se distribuent au alentour du piémont nord du Haut Atlas .Elles sont formées de dépôts continentaux et d'autres marins tels que les marnes et les calcaires.

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

- le granite : c'est le matériel le plus ancien, ces affleurements sont visibles sur la partie sud du bassin de R'dat. l'âge de ces granites est probablement hercynien ou plus exactement de la phase hercynienne selon J.Drech (1941), de toute façon carbonifère.

Ces granites sont lardés par des filons de quartz.

- les laves anciennes représentent des roches résistantes et sombres, elles ont donné aux hauts massifs un aspect imposant et austère portant les sommets les plus hauts et les pentes les plus fortes. Ces laves sont des andésites variées, verdâtres à l'état normale, grisâtres ou rouges sombres quand elles sont altérées et des rhyolites brunes sombres dont la couleur varie en fonction de l'altération (brun clair). Ces laves s'organisent en bancs et sont souvent accompagnés de tufs. Nous les trouvons essentiellement dans le massif de l'Ouanoukrim et du Tazaghat. Les géologues se sont longuement interrogés sur leur âge mais il n'a pas été certifié qu'elles appartiennent au cambrien.

- Les schistes : la plus grande partie du bassin versant est dominée par la série schisteuse. Elle donne des formes et des couleurs monotones qui contrastent avec celles des laves, plus vigoureuses. Elle comprend le cambrien moyen, le cambro-ordovicien, l'ordovicien, le gothlandain le dévonien et le carbonifère. Les schistes du bassin versant sont dans l'ensemble résistants quoique de façon inégale, face aux agents érosifs.

- La formation permo-triasique : elle est constituée d'une part par des basaltes altérés, sombres ou verdâtres, d'autre part, par un complexe rouge, grés marnes ou argiles salifères. Les grés sont plus ou moins cohérents, plus ou moins fins ou grossiers et présentent parfois une stratification d'une épaisseur considérable. Cette mosaïque lithologique multicolore est à l'origine de l'hétérogénéité des dépôts quaternaires

constituant avec les affleurements marno-gréseux de l'Oligo-Miocène et pliocène le piémont de l'atlas. Cet amalgame de roches nous apporte, ainsi, de grandes informations hydrologiques : d'une part, l'existence d'un substratum fracturé, diaclase capable de retenir des nappes d'eau, d'autre part, l'hétérogénéité lithologique contribuant à la détermination de l'aspect du réseau hydrographique.

D'après ces données on constate que presque la totalité du bassin est constituée de faciès qui sont généralement perméables. Le tableau suivant qui donne les pourcentages des surfaces du bassin en fonction des taux d'infiltration confirme les données géologiques susmentionnées.

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

Tableau2 : pourcentages des surfaces du bassin étudié en fonction des taux d'infiltrations

(D'après Juillerat, 2004)

D'après le tableau on constate que presque la moitié du bassin de R'dat présente des terrains dont l'infiltration est comprise entre 21 et 35 %

3) relief

L'influence du relief sur l'hydrogramme est évidente. Sur la carte le relief est indiqué par les courbes de niveau joignant les points d'égale altitude. Ce relief est matérialisé par la courbe hypsométrique.

4) climat et végétation

4.1) climat

Le climat du bassin versant du R'dat 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 R'dat dans une zone climatique type continental, aride à semi aride.

Les températures moyennes mensuelles varient entre 12.3 et 28.2 °C. La valeur maximale pendant la série d'années du 1969/70 à 2003/04 est de l'ordre de 45.0 et qui a été enregistrée pendant le mois le plus chaud de l'année à savoir juillet de l'année 1972/73 ; et le minimum de la même série a été enregistré pendant le mois février de l'année 1969/70 avec une valeur de -5.6 °C.

La région du Tensift qui comprend le bassin du R'dat est caractérisée 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 351.7 mm (étude SBOT). 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 (Yaghiyo, 2000).

4.2) la 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 R'dat 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 agricole de cette région est d'environ 95 Km² soit 17 % de leur superficie totale, tandis que la partie forestière est estimée à 122.36 Km² soit 23 % de la superficie totale. Le reste des superficies est partagé entre les vergers ; les pâturages ; les terrains rocheux ; et les terrains inconnus.

(Ref : rapport interne 2 ABHT)

Occupation des sols	Bassin de R'dat	
	Superficies (Km ²)	%
Fortes vergers	19.15	3.6
Agriculture	95	17
Pâturages/terrains nus	180	33.8
Terrains rocheux	1	0.2
Terrains inconnus	34	21.4

Tableau3 : couverture d'occupation des sols dans la zone d'étude (Ref : rapport interne 2 ABHT)

5) Réseau hydrographique

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

La figure représente cette hiérarchie en classant les ordres des affluents selon la technique de SHUMM- STRAHLER. Le nombre affecté au cours principal à l'exutoire est de l'ordre de 5 et désigne donc le nombre maximal d'embranchements de tous ordres : c'est une indication sur l'importance du cours principal.

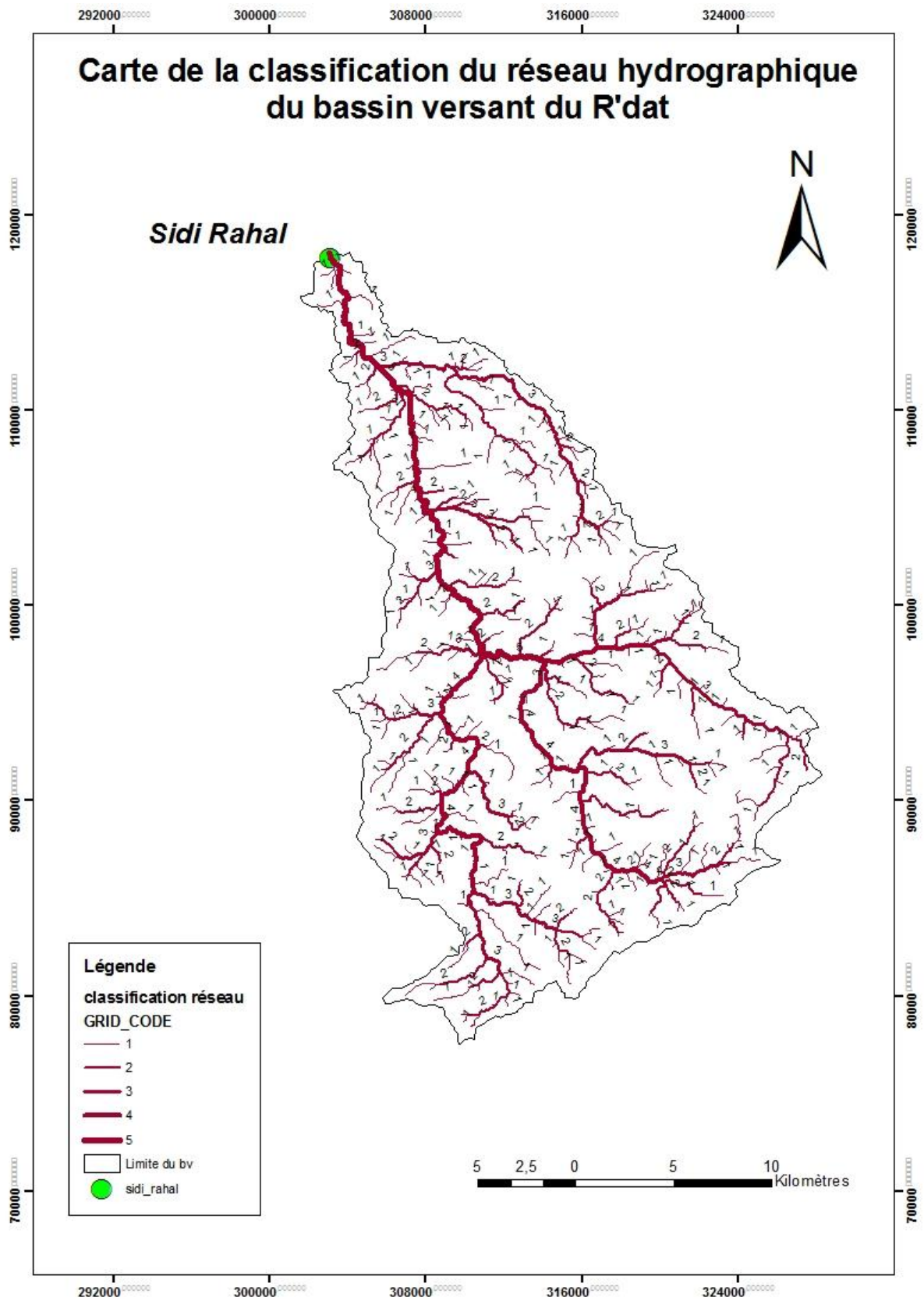


Figure 3 : Carte de la classification du réseau hydrographique du bassin versant du R'dat

5-1) La densité de drainage :

Elle s'exprime comme la longueur moyenne du réseau hydrographique par km^2 de bassin versant. La relation du densité de drainage est la suivante : $Dd = \Sigma li / S$

Pour le bassin de R'dat la longueur du réseau hydrographique est de 1360Km ; donc par rapport à sa superficie il a une densité de drainage estimé à $2.55\text{km}/\text{km}^2$

On constate que le bassin versant du R'dat est bien ramifié.

5-2) les principales artères hydrographiques

Les principaux affluents de l'oued R'dat sur la rive gauche sont:

- Assif-N-Tichka qui est à l'origine de l'oued R'dat et dont la source se situe à une altitude de 2200mètres environ.
- Oued Imizer, formé par la confluence de l'oued Imarighne et l'oued Tihizat.
- Assif-N-Ifraden.
- Oued Tissert.
- Oued Imaghrihne Sur la rive gauche

L'oued R'dat draine une surface de 532 km^2 depuis l'origine jusqu'à son exutoire à Sidi Rahal sur une distance de 50 Km avec une pente modérée.

Tandis que sur la rive gauche nous n'avons pas d'affluents très importants comme les précédents.

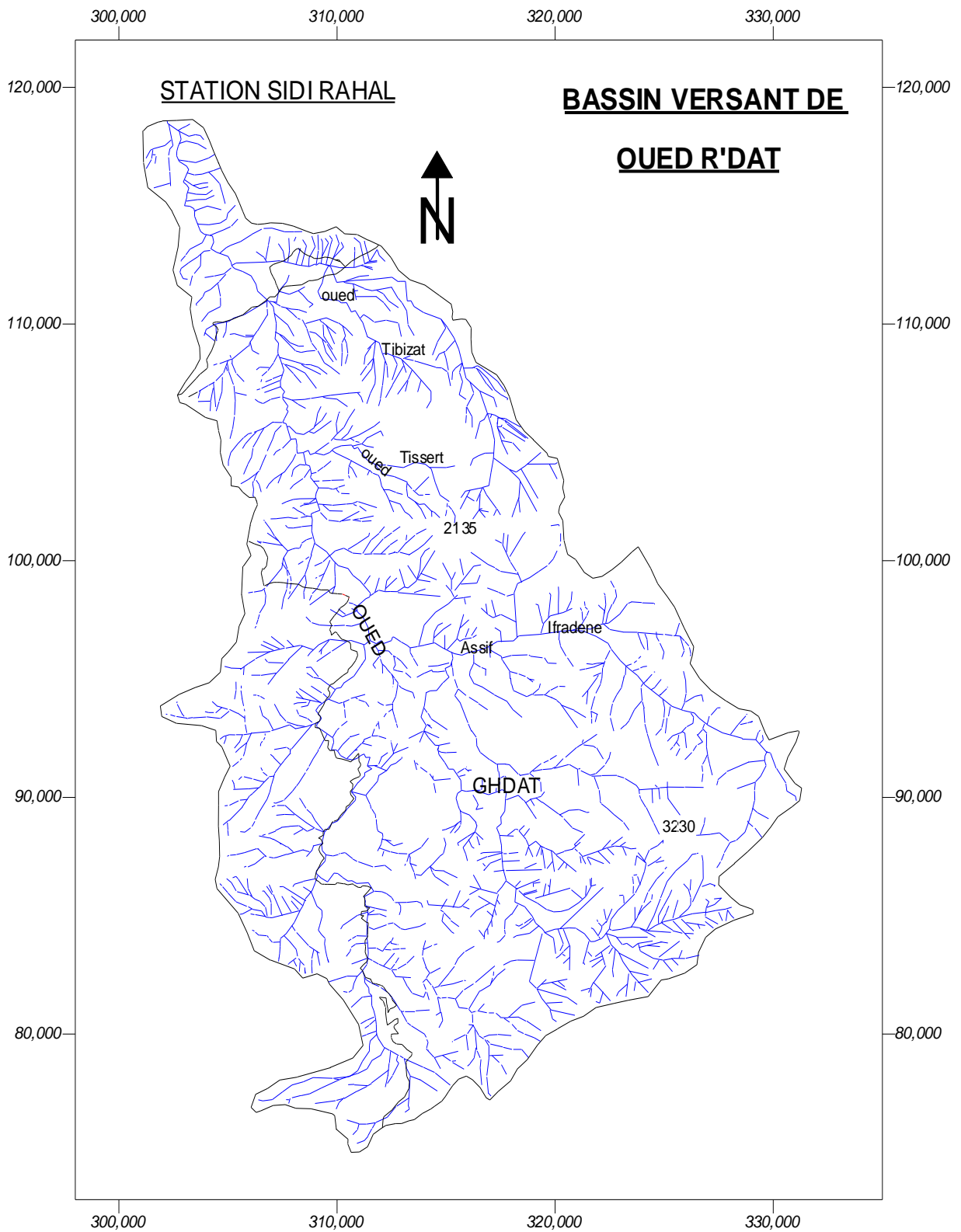


Figure 4 : carte du réseau hydrographique du bassin versant du R'dat

6) caractéristiques géomorphologiques

Pour étudier le fonctionnement hydrologique du bassin versant R'dat une étude des caractéristiques géomorphologiques telles que l'indice de compacité et le rectangle équivalent se révèle indispensable.

6.1) l'indice de compacité

La forme d'un bassin versant est un facteur primordial qui peut avoir des conséquences hydrologiques importantes surtout la fonction des transferts des eaux, la forme des hydrogrammes observés à l'exutoire et l'évolution des crues.

Il y a plusieurs formules permettant de connaître la forme du bassin versant, entre autres, l'indice de compacité (ou de forme) de Gravelius noté K_c qui permet de mieux déterminer la géométrie d'un bassin versant en la comparant avec celle d'un bassin versant circulaire pour lequel cet indice est égale à un ($K_c = 1$).

Formule du K_c : $K_c = 0.28 * (P/S)$

Avec : K_c : l'indice de compacité de Gravelius,
 S : surface du bassin versant en Km^2 ,
 P : périmètre du bassin versant en Km

Comme la montre la formule le calcul du K_c est très simple, il nécessite seulement la mesure du périmètre à l'aide du curvimètre et la mesure de la surface à l'aide du planimètre. Pour bien calculer l'indice de compacité il y a un certains nombres de précautions à prendre, il faut tout d'abord styliser un peu le contour du bassin versant avant de mesurer son périmètre car un contour très tourmenté peut conduire à une valeur exagérée du périmètre due aux irrégularités qui n'ont aucune influence sur l'écoulement de l'eau du bassin versant. D'après le K_c du bassin versant, on constate que R'dat a une mauvaise compacité, car la longueur est largement supérieur à la largeur : c'est-à-dire que le bassin est cinq 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.

Le bassin versant du R'dat a une surface d'environ $532 Km^2$ et un périmètre de $122Km$. Ces deux paramètres vont influencer le comportement hydrologique notamment la lame d'eau écoulée puisqu'elle est liée à la surface du bassin versant.

Bassin versant	Périmètre (Km)	Superficie (Km^2)	K_c
R'dat	122	532.9	1.5

Tableau4 : dimensionnement du bassin versant du R'dat

6.2) l'hypsométrie

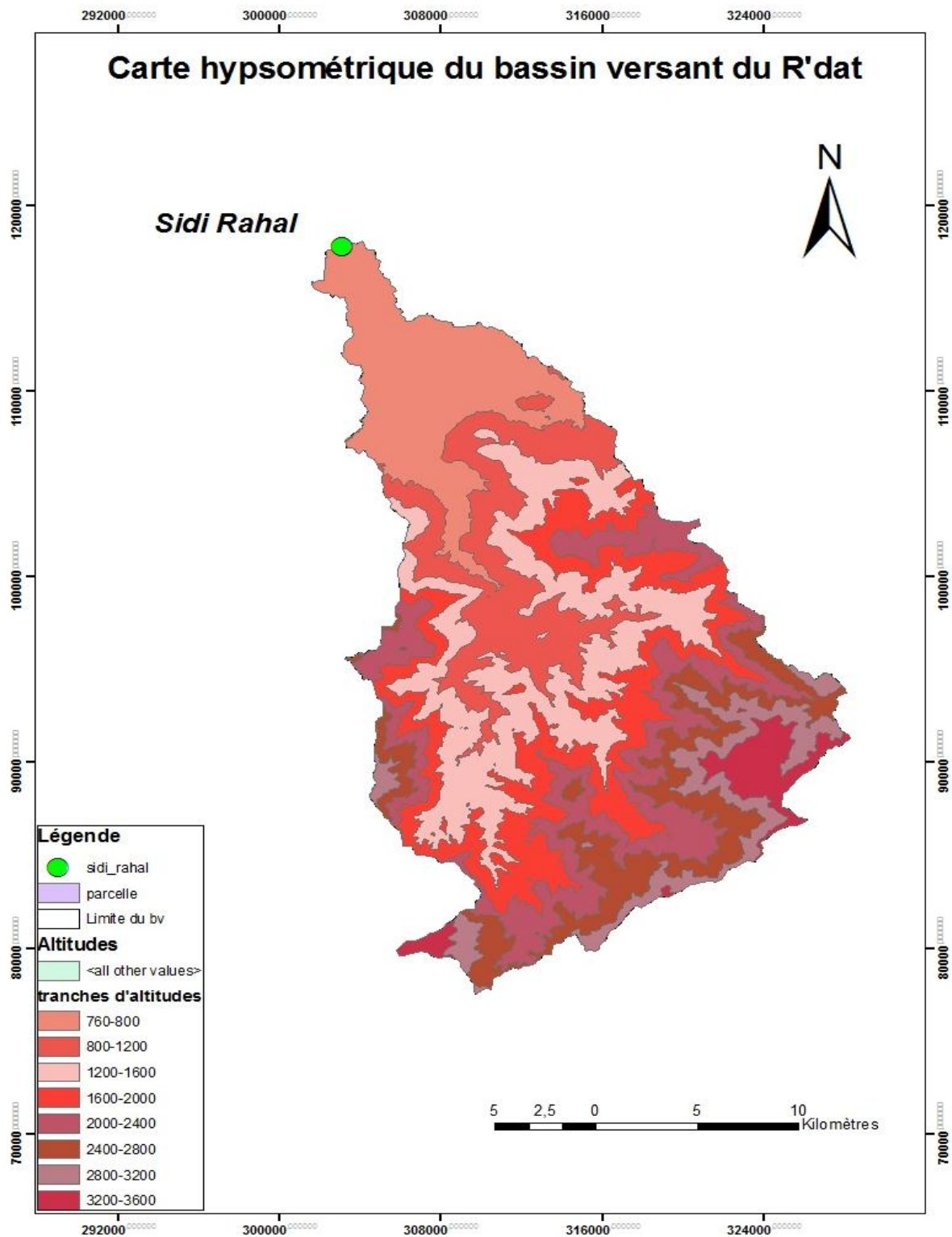


Figure 5 : Carte hypsométrique du bassin versant du R'dat

le bassin versant de R'dat, la carte hypsométrique présente une sorte de mosaïque ou une succession des zones de hautes altitudes (supérieur à 2000m) et des étendues planes peu élevées. Nous allons chercher les proportions de chaque tranche d'altitude au niveau du bassin versant étudié pour en déduire le degré des pentes des talwegs et des versants.

la courbe hypsométrique montre un relief important avec une pente raide dans la zone où l'altitude dépasse les deux milles mètres on remarque par ailleurs une importante fréquence de la tranche d'altitude comprise entre 800 et 2400 estimée de 70%.

Tranches d'altitude	Surface (Km ²) si	si/st %	Si cumulée	Si/st cumulée
760-800	12.5	2.34	12.5	2.34
800-1200	88.2	16.55	100.7	18.89
1200-1600	117.1	21.98	217.8	40.87
1600-2000	162.4	30.47	380.2	71.34
2000-2400	95.2	17.87	475.4	89.21
2400-2800	36	6.75	511.4	95.96
2800-3200	20.4	3.83	531.8	99.79
3200-3600	1.1	0.2	532.9	99.99

Tableau 5 : la répartition des tranches d'altitudes du bassin versant du R'dat

Le bassin versant de R'dat est en général plus bas en altitudes avec des minima en dessous des 1000m. L'altitude moyenne est calculée par la relation suivante :

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

Avec :

H_{moy} : l'altitude moyenne du bassin (m).

A_i : l'aire comprise entre deux courbes de niveaux successives (Km²).

H_i : l'altitude moyenne entre deux courbes de niveaux (m).

A : la superficie totale du bassin versant (Km²).

L'altitude moyenne du bassin versant du R'dat est de l'ordre de 1730 m.

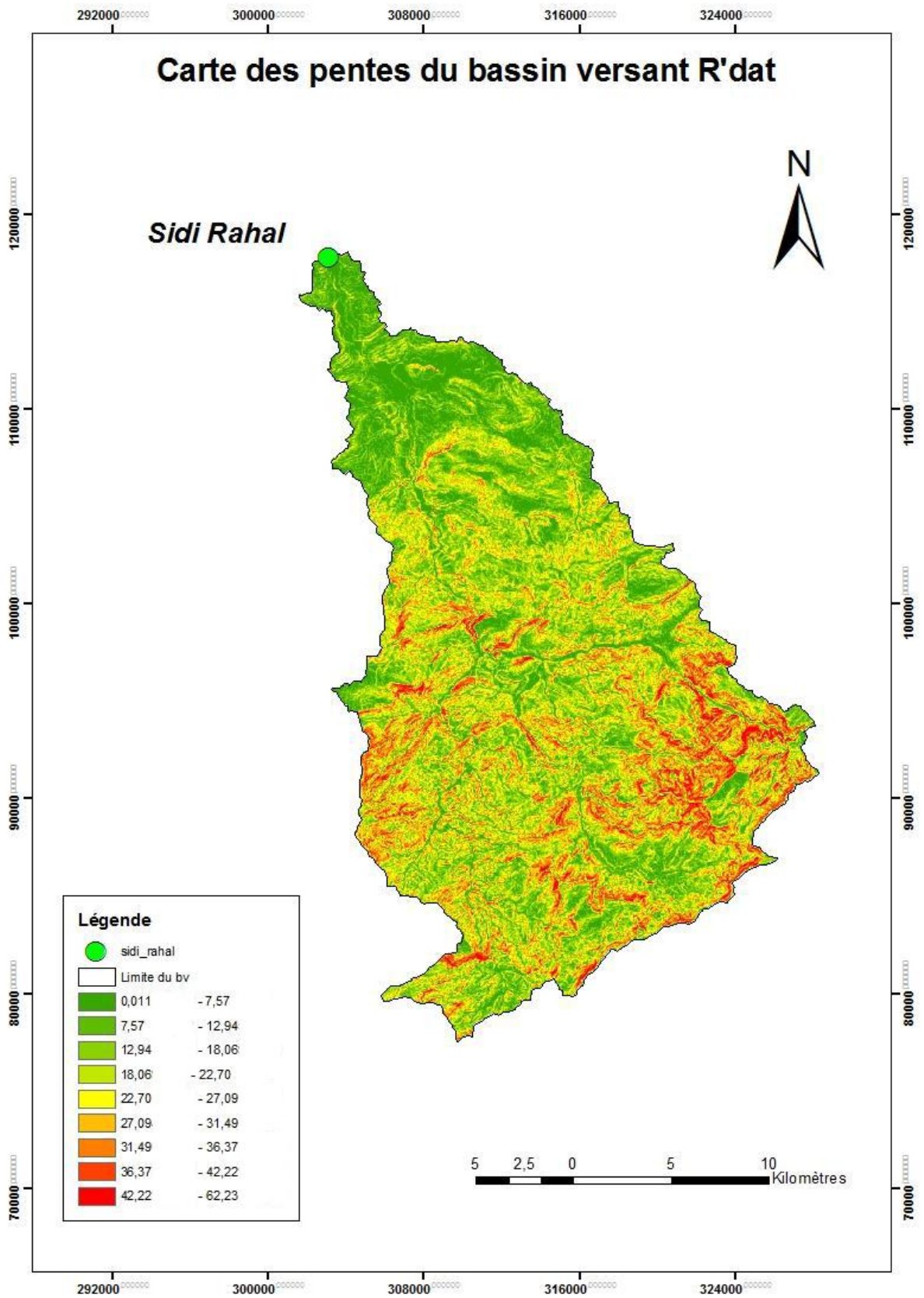


Figure 6 : carte de la pente du bassin versant de R'dat

D'après la carte on constate que la tranche la plus dominante est la pente moyenne moins importante (de l'ordre de 14-15%).

6.3) le rectangle équivalent

Le rectangle équivalent ou le rectangle de GRAVELIUS, est un moyen permettant de comparer facilement les bassins versants entre eux, dans le but de déterminer l'influence de leurs caractéristiques sur l'écoulement.

Les bassins versants rectangulaires résultent d'une transformation géométrique du bassin réel dans laquelle on conserve la même superficie, le même périmètre ou le même coefficient de compacité aussi la même répartition hypsométrique. Les courbes de niveau deviennent des droites parallèles aux petits côtés du rectangle.

$$L = (K_c (A)^{1/2} / 1.12) [1 + (1 - (1.12 / K_c)^2)^{1/2}]$$

$$I = ((K_c (A)^{1/2} / 1.12) [(1 - (1.12 / K_c)^2)^{1/2}])$$

Avec

K_c : l'indice de compacité de Gravelius

A : surface du bassin versant (Km^2)

L : longueur du bassin versant (Km)

I : largeur du bassin versant (Km)

Bassin versant	Indice de compacité	Surface du bassin versant (Km^2)	Longueur du rectangle équivalent en (Km)	Largeur du rectangle équivalent (Km)
R'dat	1.5	532.9	50	10

Tableau 6 : récapitulation des paramètres du rectangle équivalent pour le bassin versant R'dat

Le cours principal du bassin versant du R'dat est long de 50 Km, la longueur et la largeur du rectangle équivalent étant respectivement 50 Km et 10 Km, ce qui confirme la forme allongée du bassin.

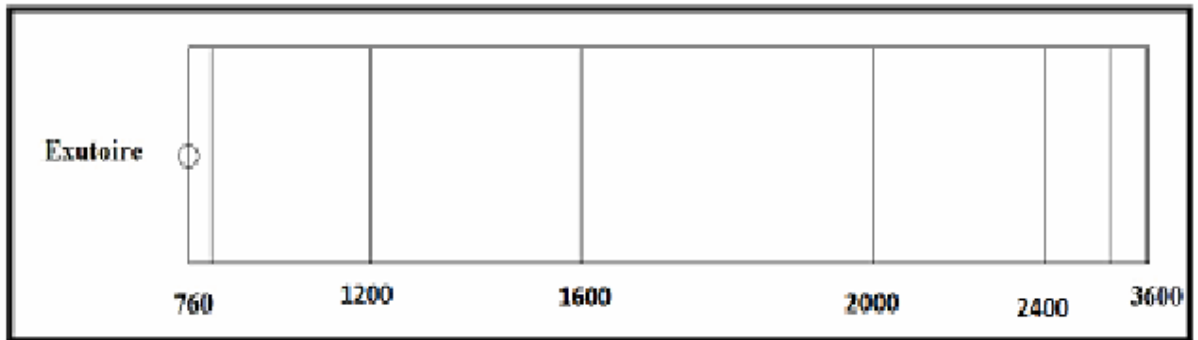


Figure 7 : rectangle équivalent du bassin versant R'dat

La figure montre les tranches d'altitudes sous forme de droites de niveau. Qui se serre plus on s'approche des grandes altitudes, témoignant ainsi une pente modérée au niveau de l'amont du bassin.

6.4) 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 des eaux au niveau de 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 R'dat, on peut les utiliser pour le calcul du temps de concentration de l'eau écoulée, en utilisant la formule de Giandoht (Rmich et Hafoud ; 2004) :

$$TC = \frac{4\sqrt{S} + 1.5L}{0.8\sqrt{H_{moy} - H_{min}}}$$

Avec :

S : la surface du bassin versant (Km²).

L : la longueur du rectangle équivalent (Km).

H_{moy} : l'altitude moyenne du bassin versant.

H_{min} : l'altitude de l'exutoire en (m).

Surface du bassin en (km ²)	532
Longueur du rectangle équivalent en (km)	50
Altitude de l'exutoire en (m)	795
Altitude moyenne en (m)	1720
Temps de concentration en (heure)	7

Tableau 7 : temps de concentration du bassin versant du R'dat

Le temps de concentration du bassin versant du R'dat étant de 7 heures, ce qui implique que les eaux n'arrivent pas très rapidement au niveau de l'exutoire, impliquant ainsi la mise en place d'un réseau d'alerte des crues efficace dans ce bassin.

7) Réseau des seguias

Ce réseau se compose de 18 séguias dont les prélèvements constituent 45 % des apports de l'oued d'après l'étude SBOT (période 1946/86).

Parmi ces séguias, deux sont équipées d'échelles limnimétriques et jaugées régulièrement, il s'agit de AFIAD (N° IRE : 832/45) et FOUKRA (N°IRE : 63/54).

8) Evaporation et humidité

La hauteur moyenne évaporée annuellement à Sidi Rahal est de 2384.2 ml (PICHE).

L'humidité moyenne mensuelle à 7 heures est de 64 %

L'humidité moyenne mensuelle à 14 heures est de 53 %

L'humidité moyenne mensuelle à 18 heures est de 55 %

L'humidité moyenne mensuelle à 21 heures est de 59 %

9) Apports liquides

Le débit moyen de l'oued R'dat au niveau de la station Sidi Rahal est de $2.407 \text{ m}^3/\text{s}$, soit des apports moyens annuels de 76 millions de m^3 . (signalons que la séguia AFIAD est régulièrement mesurée eu égard à son importance. Son débit moyen annuel est de $0.410 \text{ m}^3/\text{s}$, soit un volume de 13 millions de m^3).

Le débit moyen annuel maximal à la station Sidi Rahal est de $8.356 \text{ m}^3/\text{s}$ (1970/71), soit des apports moyens maxima annuels de 263.5 millions de m^3 , et le débit moyen annuel minimal à la station Sidi Rahal est de $0.109 \text{ m}^3/\text{s}$ (1982/83), soit des apports moyens minima annuels de 3.4 millions de m^3 .

Deuxième partie
L'étude hydropluviométrique à partir des
Stations de mesures

Introduction

Dans les études hydrologiques il est important de connaître la lame d'eau précipitée dans une région et dans un temps donné, puisqu'elle constitue la principale composante du cycle de l'eau. Raison pour la quelle on va analyser le régime pluviométrique du bassin versant de R'dat.

Avant d'entamer le traitement des données et leurs interprétation, on doit tout d'abord avoir une idée sur les postes de mesures et leur fonctionnement.

Dans le bassin versant du R'dat vaste de 532.9 Km², ont été installés trois postes pluviométriques la station de Sidi Rahal, la station de Taddert et la station de Toufliht. Le rapport de la surface totale du bassin versant au nombre de pluviomètres a révélé une densité d'équipement très faible, un poste pour 177 Km². Un problème auquel s'ajoute celui du fonctionnement de l'équipement du bassin qui est qualifié comme discontinu a cause des lacunes parfois si nombreuses que pour certaines années on a absence totale des renseignements.

Les trois stations se présentent comme suit :

Stations	Sidi Rahal	Taddert	Toufliht
Latitude (X)	303.10	310.5	306.35
Longitude (Y)	117.80	87.00	100.15
Altitude (Z)	690	1650	1465

Tableau 8 : les coordonnées Lambert des trois stations (ABH Tensift)

A) variations des précipitations et des débits à différentes échelles de temps

1) variations des précipitations

1.1) précipitations moyennes annuelles et leurs variations

a) Méthode de la moyenne arithmétique :

Méthode simple qui s'applique seulement si les stations pluviométriques du bassin versant sont bien réparties et si le relief du bassin est homogène, elle consiste à calculer la moyenne arithmétique des valeurs obtenues au niveau des trois stations du bassin versant.

Cette méthode simple consiste à calculer la moyenne arithmétique des valeurs obtenues au niveau des trois stations du bassin versant. C'est une méthode peu représentative mais on va l'utiliser juste pour avoir une idée sur la précipitation du bassin versant étudié.

- Station du Sidi Rahal

La moyenne arithmétique des pluies annuelles pour la période de (1967-68) à (2009/2010) est de l'ordre de 348 mm.

Les deux valeurs extrêmes s'étalent de 167.7 mm en 1992/93 à 648.2 mm en 1995/96. Ceci témoigne également d'une importante variation interannuelle des précipitations. Le paramètre de dispersion l'écart type, qui est égal à 105.86 pour cette série d'années, témoigne cette variation interannuelle.

- Station de Toufliht

La période prise en considération s'étale de l'année 1969 à l'année 1997.

Durant cette période on a enregistré deux valeurs extrêmes qui sont 1213 mm et 318 mm correspondant respectivement aux années 1995/96 et 1992/93.

La valeur moyenne interannuelle est de l'ordre de 662 mm, les années dont les précipitations dépassent cette valeur sont plus nombreuses que celles qui sont en dessous.

L'écart type est de l'ordre de 150 si on ne prend pas en considération les années 1986/87 et 1997/98 qui présentent de grandes lacunes de données pluviométriques qui peuvent être dues soit à l'endommagement d'appareil, soit à l'absence d'observateur chargé de l'enregistrement des mesures.

Les années dont la pluviosité est au-dessus de la moyenne sont moins nombreuses que celles qui sont en dessous.

- Station de Taddert

Pour la station de Taddert les données disponibles sont de la période comprise entre 1936/37 à 1997/98.

La moyenne arithmétique pour cette période était de 395 mm. Les deux valeurs extrêmes sont 70 mm et 719 mm enregistrées respectivement aux années 1947/48 et 1988/89.

L'écart type est de l'ordre de 186.

La moyenne des trois stations permet de déduire la moyenne des précipitations abattues sur tout le bassin versant étudié et qui est ici de l'ordre de 468.4 mm.

Station	Moyenne annuelle de précipitations (en mm)
Sidi Rahal	348
Toufliht	662
Taddert	468,4

Tableau 9 : Moyenne des différentes stations du bassin Versant du R'dat

Pour mieux comprendre les facteurs qui influencent les régimes hydropluviométriques et les comportements hydrologiques du bassin versant du R'dat, l'analyse, le traitement et l'interprétation des données seront faits à différentes échelles du temps.

b) variations annuelles des précipitations

A Sidi Rahal nous avons une période de 43 ans de données de (1967/68) à (2009/2010). Les données des précipitations annuelles sont obtenues par la somme des précipitations moyennes mensuelles.

L'illustration graphique de la variation des précipitations moyennes annuelles du bassin versant du R'dat est représenté sur la figure suivante.

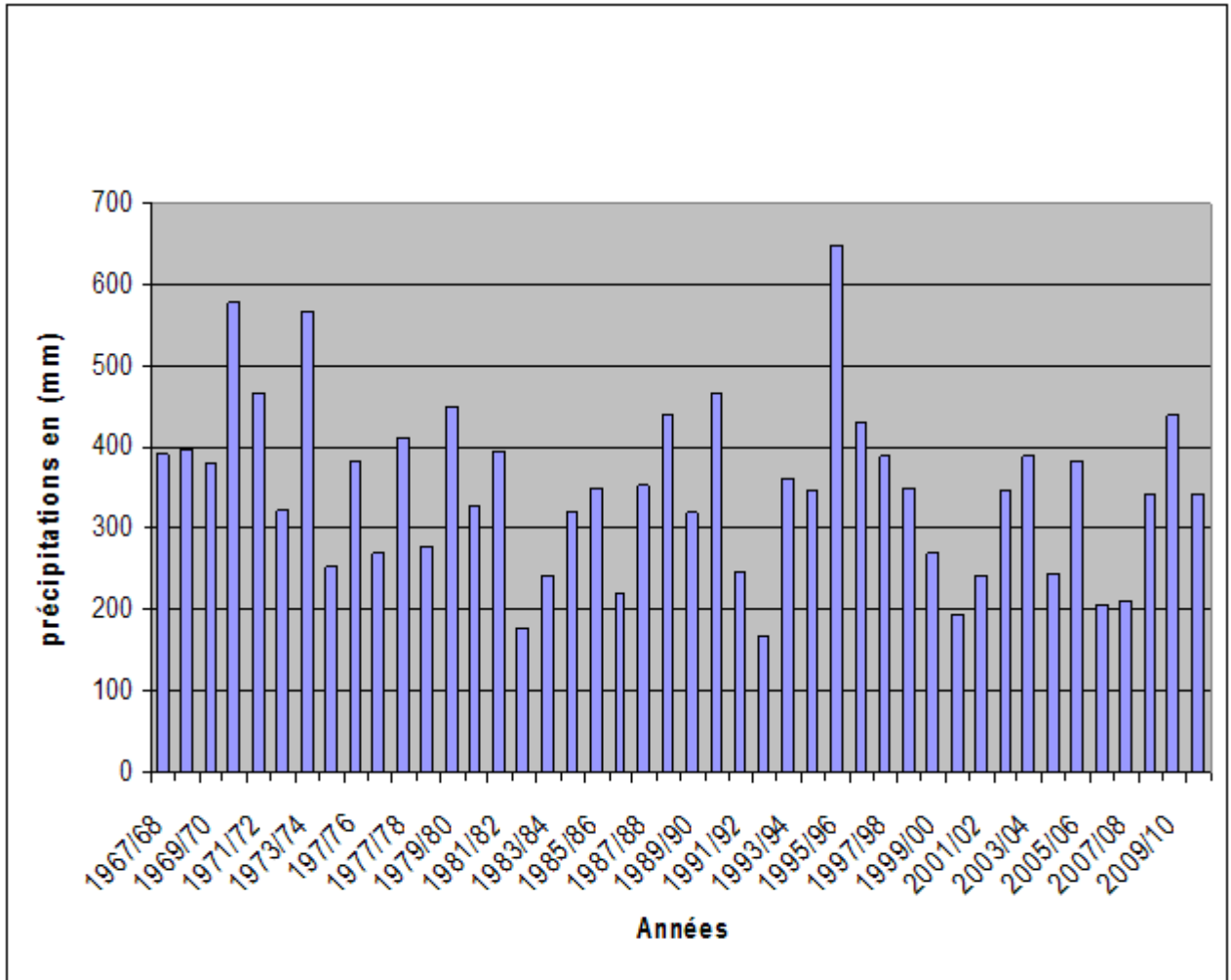


Figure 8 : variations des précipitations annuelles du bassin du R'dat à Sidi Rahal

La variation des précipitations d'une année à l'autre se fait d'une manière irrégulière

La pluviométrie moyenne de la station de Sidi Rahal est de 348 mm.

La valeur maximale de 648 mm, tandis que le minimum a été enregistré en 1992/93 avec une valeur de l'ordre de 167.7 mm. On remarque que la période entre 1967/68 et 1981/82 a été la période la plus pluvieuse.

1.2) variations saisonnières des précipitations

A partir des valeurs moyennes mensuelles des précipitations sur les stations pluviométriques du bassin versant on peut calculer les variations saisonnières des précipitations, dans le but de connaître la pluviosité moyenne pour chaque saison de l'année :

L'été (juin, juillet, et août)

L'automne (septembre, octobre, et novembre)

L'hiver (décembre, janvier, février)

Le printemps (mars, avril et mai)

Pour le bassin du R'dat la répartition se présente comme suit :

Automne	Hiver	Printemps	Eté
91.5 mm	126.9 mm	118.3 mm	16.6 mm

Tableau 10: répartition saisonnière des précipitations du bassin versant du R'dat

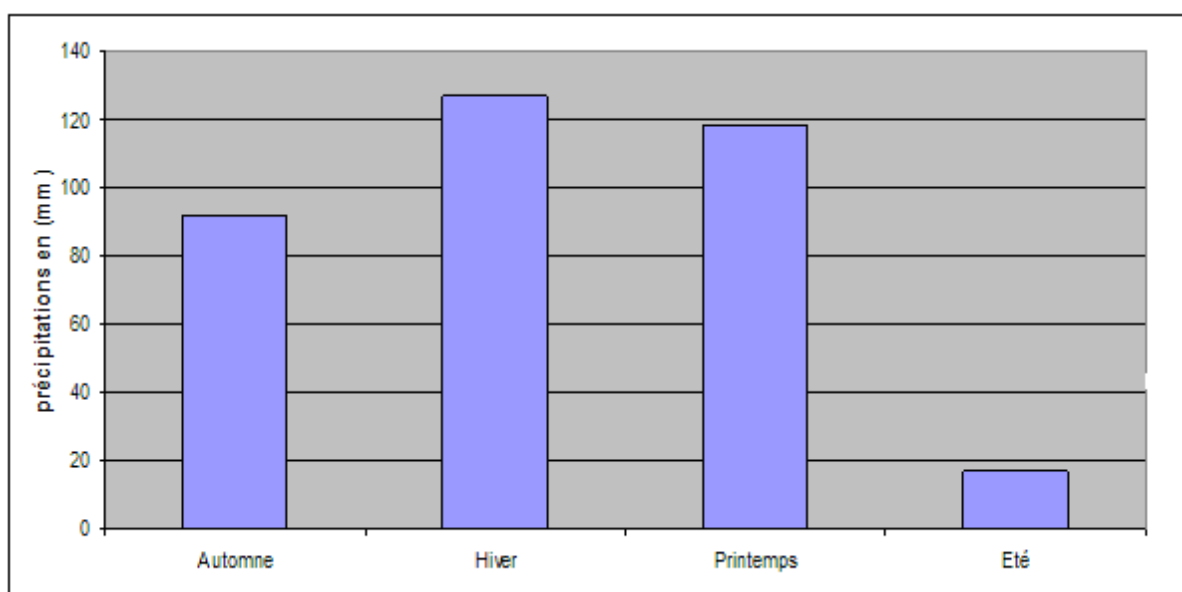


Figure 9 : variations saisonnières des précipitations sur le bassin versant du R'dat

La saison d'hiver reçoit le maximum de chutes de pluie suivie de celles du printemps, et de l'automne, tandis que la saison d'été représente la saison la plus sèche de toute l'année qui n'enregistre que quelques millimètres ou quelques dizaines de millimètres de pluie.

Le bassin du R'dat a une altitude pas très importante, donc la plupart des précipitations sont sous forme des pluies dont le maximum tombe durant la période d'hiver.

1.3) précipitations mensuelles interannuelles

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

- Station de Sidi Rahal

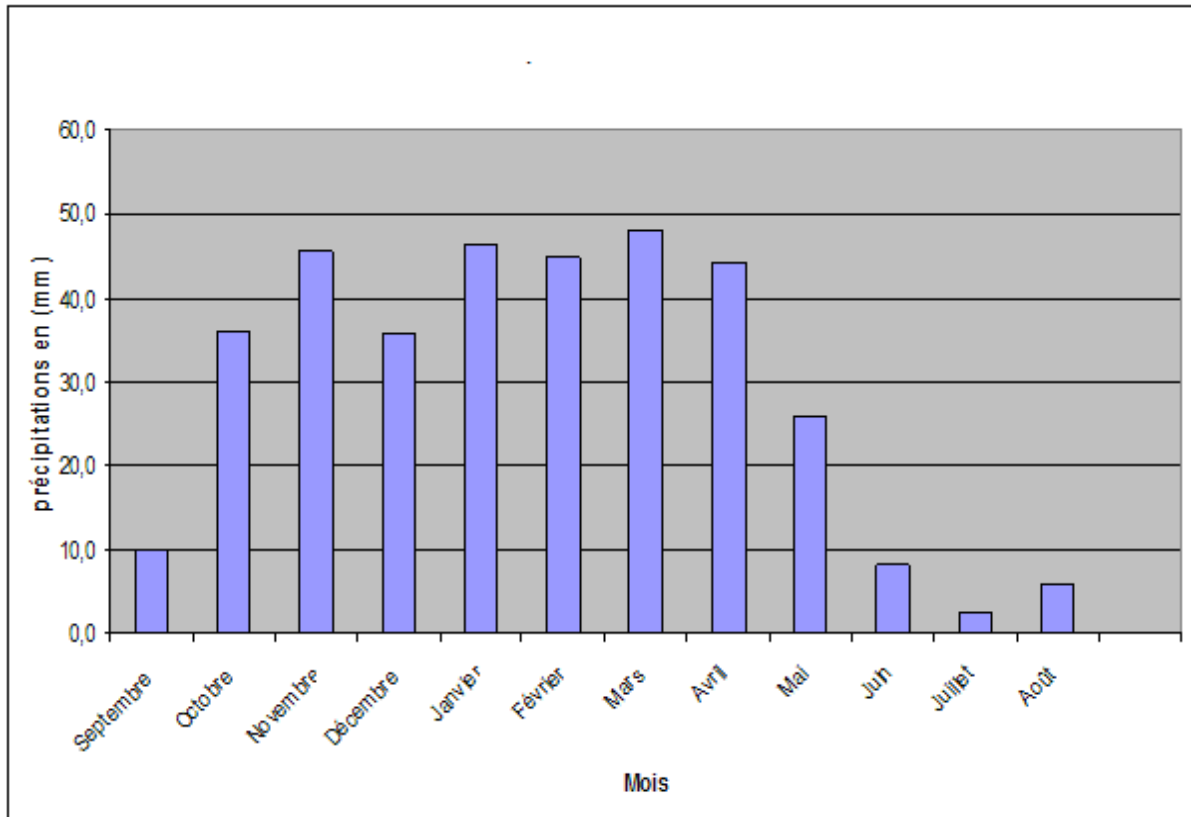


Figure 10 : précipitations moyennes mensuelles interannuelles à Sidi Rahal (1967- 2010)

Pour la station de Sidi Rahal la moyenne mensuelle des précipitations est de l'ordre de 29.5 mm. Il y a cinq mois (de juin à septembre) qui ont des précipitations en dessous de la moyenne.

Le mois de Mars reçoit le maximum des précipitations c'est le mois le plus pluvieux de l'année avec une valeur de l'ordre de 48.1 mm dépassant à peine les mois de février, avril et janvier, totalisant 54% des pluies annuelles, tandis que le minimum est enregistré au niveau du mois de juillet avec une hauteur de pluie de l'ordre de 2.6 mm.

Les quatre mois de juin, juillet, août, et septembre sont les mois les plus déficitaires de l'année.

- Station de Taddert

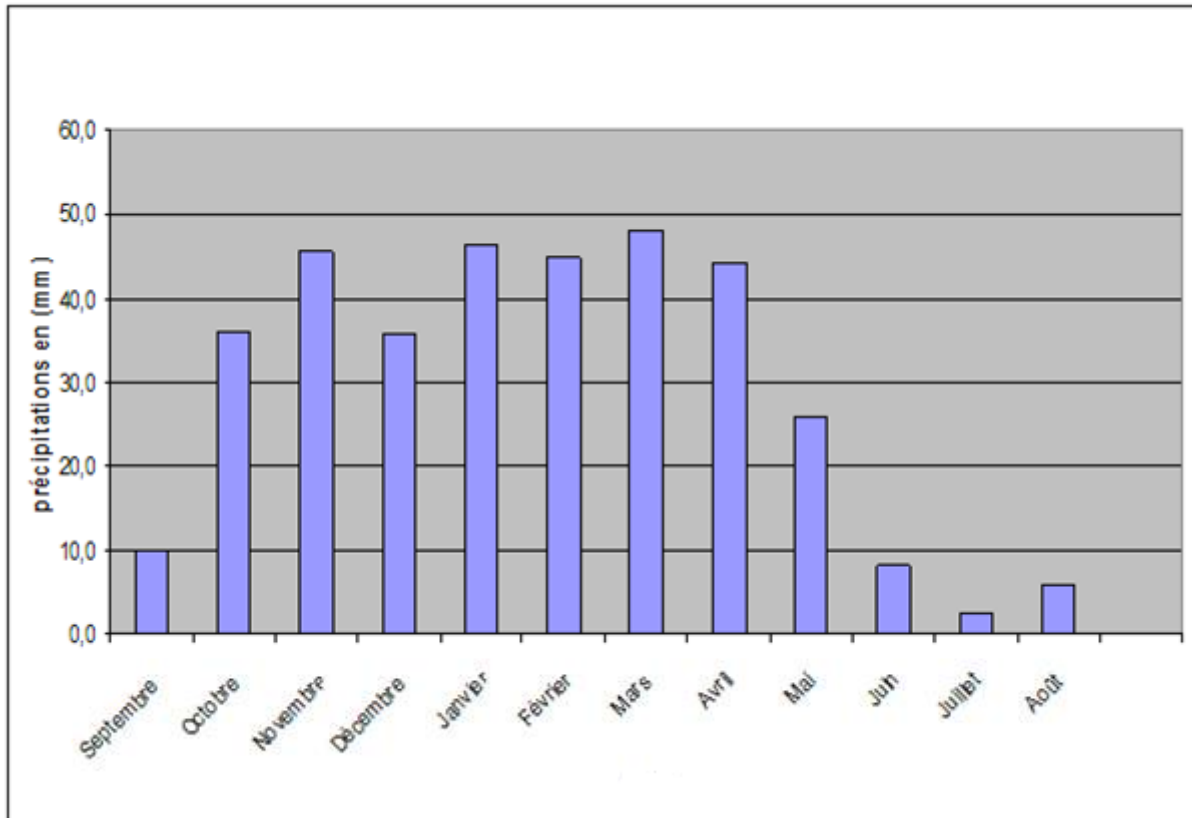


Figure 11 : variations des précipitations mensuelles à la station de Taddert (1963-1997)

Pour la station Taddert la moyenne mensuelle de précipitations est de l'ordre de 36 mm

Il y a cinq mois qui ont une valeur inférieure à la moyenne.

Le maximum est enregistré au niveau des mois de février et mars avec une valeur de 61 mm dépassant de très peu les mois de janvier et novembre.

Les mois les plus secs de l'année sont juin, juillet, août et mai.

▪ Station de Toufliht

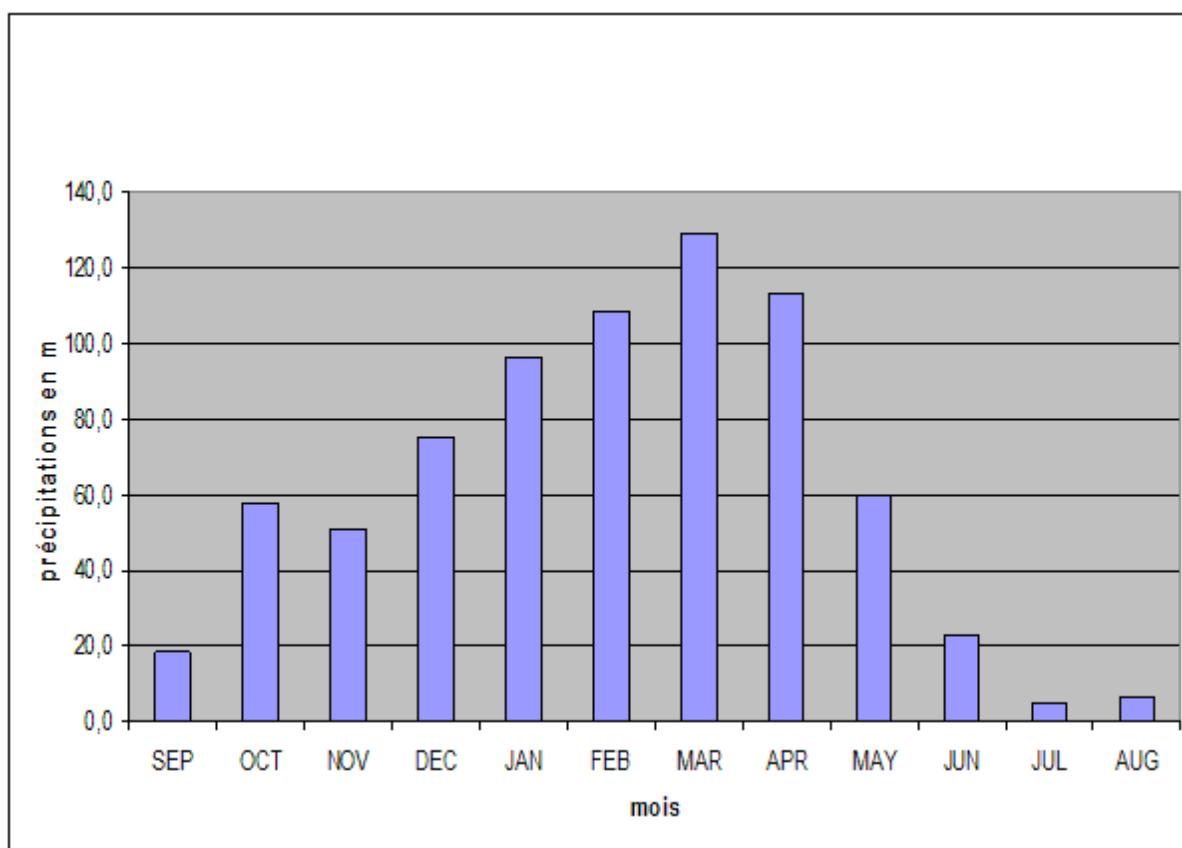


Figure 12 : variations mensuelles des précipitations à la station de Toufliht (1963-1997)

La valeur moyenne mensuelle du bassin versant de R'dat à la station de Toufliht est de l'ordre de 61 mm, la plupart des mois ont une valeur proche de la moyenne.

Le maximum est enregistré pendant le mois de mars (19 % du total annuel) suivi du mois d'avril (17%), février (16%) et janvier (15%). Ces mois recouvrent une quantité importante des précipitations de l'année. Les mois de juin à septembre sont les mois les plus secs de l'année.

Pour comparer la pluviosité mensuelle des trois stations du bassin versant de R'dat, on a établi le graphe suivant :

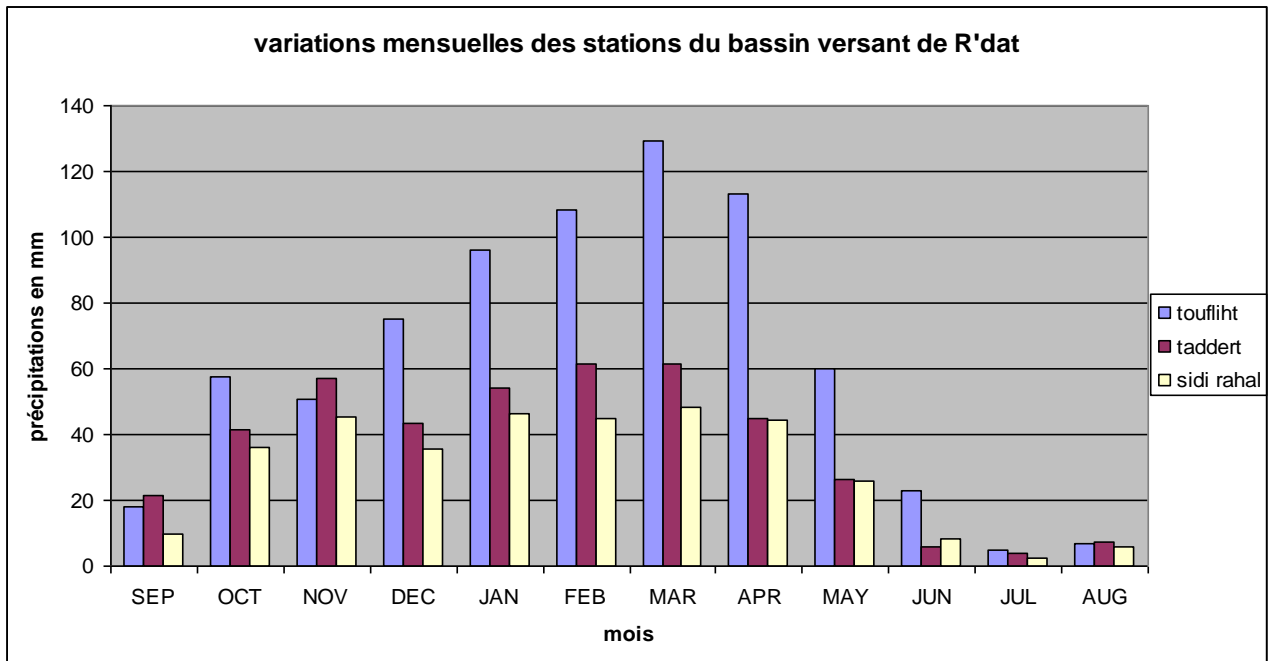


Figure 13 : variations moyennes mensuelles interannuelles des trois stations du bassin versant du R'dat 1967/68 à 2010/2011

D'après le graphe suivant on remarque que la station de Toufliht est la première avec des valeurs dépassant une centaine de millimètres, suivie de celle de Taddert, et en dernier rang on trouve la station de Sidi Rahal dont les précipitations ne dépassent guère 50 mm.

Cette succession peut être due, entre autres, au critère de l'altitude puisque les stations situées à l'amont (Taddert 1650m, et Toufliht 1456m) ont des précipitations généralement plus abondantes que celle située en aval (Sidi Rahal).

Par contre si on compare les deux stations de l'amont Taddert et Toufliht qui sont situées respectivement à 1650m et 1456m on trouve que ce principe n'est pas respecté puisque les précipitations à la station de Toufliht sont supérieures à celles de Taddert, ceci peut être dû à la géographie du bassin et de l'exposition du relief par rapport au flux amenant la pluie.

La moyenne des trois stations permet de dessiner les variations mensuelles des précipitations de tout le bassin :

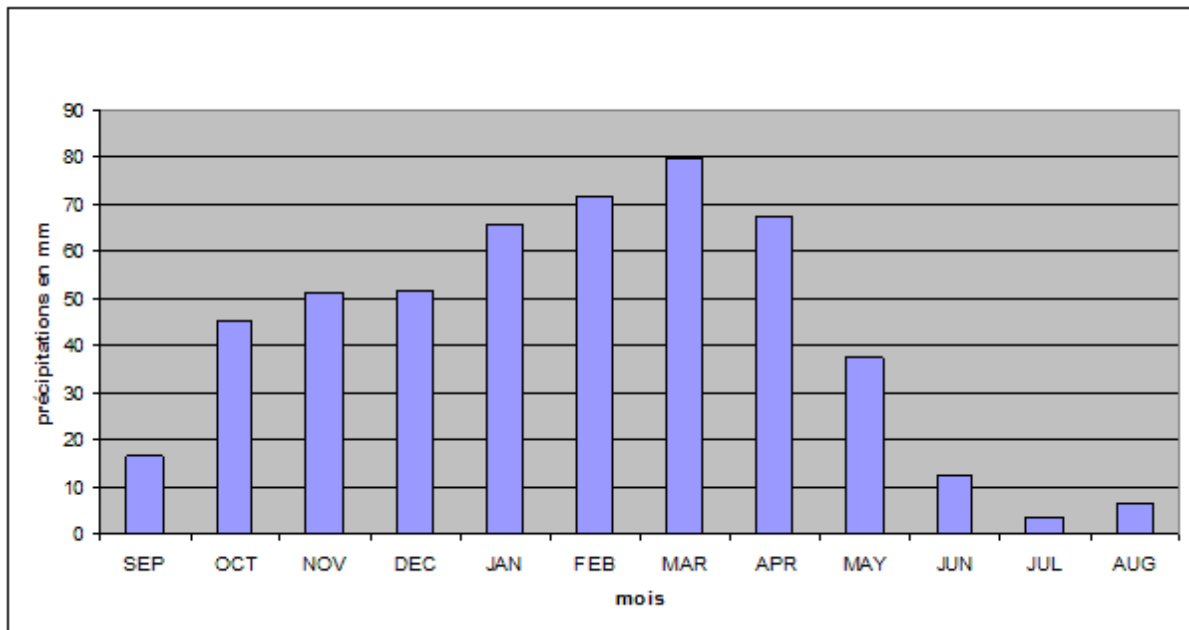


Figure 14 : variations mensuelles des précipitations au bassin versant du R'dat

On remarque que les variations au niveau de tout le bassin ressemblent aux variations de chaque station toute seule, on a toujours :

- Un maximum au mois de mars
- La période d'octobre à mai est la plus pluvieuse
- Les mois de juin à septembre sont les mois les plus secs de l'année.

2) variations des débits des cours d'eau

Le débit de surface ou le ruissellement par dépassement de la capacité d'infiltration survient lorsque l'intensité de pluie (p en mm/h) est supérieure à la capacité d'infiltration instantanée du sol. L'infiltration de la pluie devient alors très faible.

Ce ruissellement est à la fois fonction de la pluie, de l'état structural du sol et de son humidité. Il est variable dans le temps et dans l'espace.

Comme pour les données des précipitations, les données des débits sont représentées pour différents pas de temps.

2.1) les variations annuelles des débits

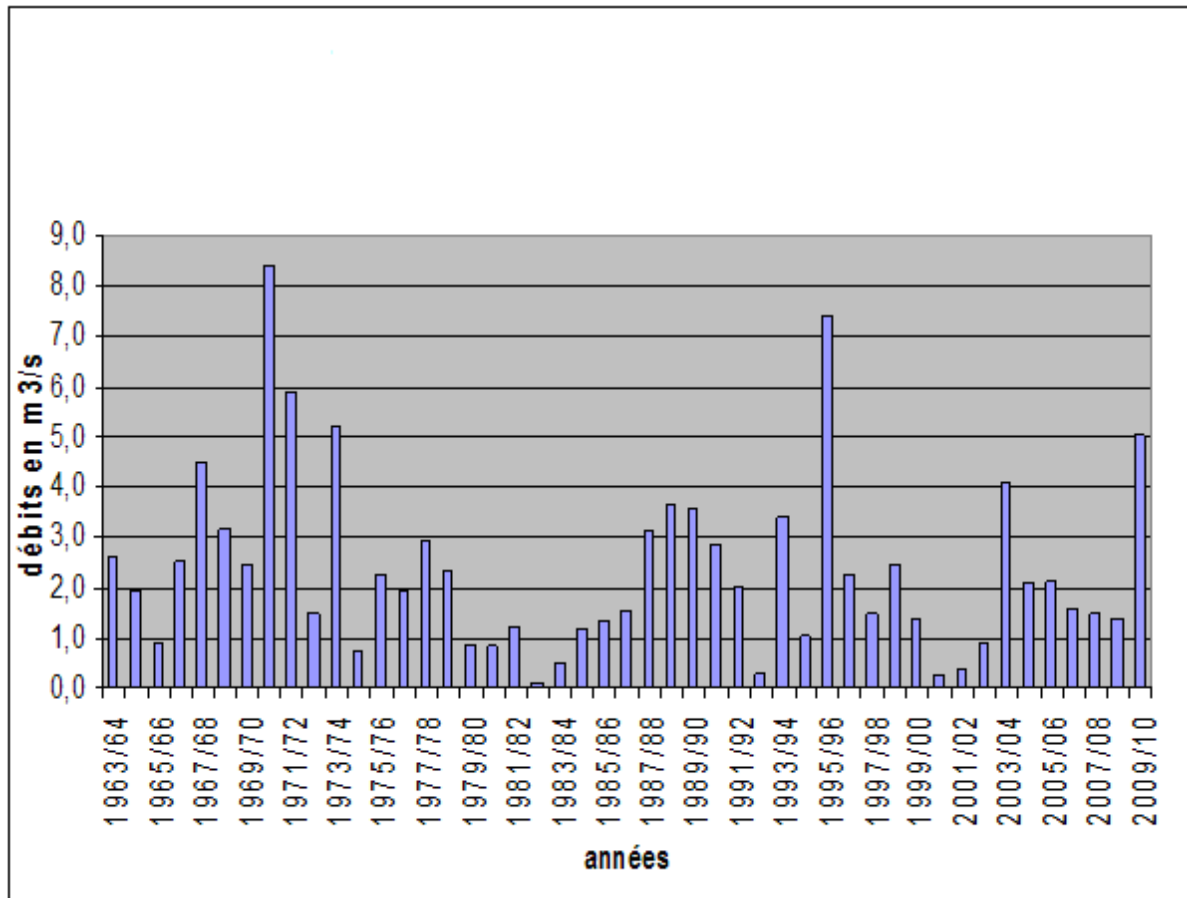


Figure 15 : variations des débits annuels du bassin versant du R'dat à Sidi Rahal

A Sidi Rahal nous avons les données des débits d'une période de 46 ans de données de débits, de [1963/64 à 2010/11].

La valeur moyenne de l'écoulement annuel pour la période considérée est de l'ordre de $2.4 \text{ m}^3/\text{s}$. les années qui ont une valeur inférieure à la moyenne sont plus nombreuses que celles qui la dépassent.

La variation se fait d'abord d'une manière irrégulière.

On remarque d'après l'histogramme qu'on a deux périodes distinctes :

- 1) Une période de hautes eaux s'étalant de 1963/64 à 1973/74 avec une valeur moyenne de l'ordre de $3.5 \text{ m}^3/\text{s}$,
- 2) Une période de faibles eaux dont la moyenne ne dépasse pas $2 \text{ m}^3/\text{s}$ pour le reste d'années avec une exception des années 1995/96, 2003/04 et 2010/11.

Les années 1982/83, 1992/93 et 2000/01 étaient des années de grande sécheresse correspondant généralement aux périodes de sécheresses qui ont sévi dans la région. avec des valeurs respectivement de l'ordre de $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ et $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$.

Il est à noter que le débit maximum a été enregistré pendant l'année de 1970/71 suivie de celui de l'année 1995/96. Ces deux années ont connu des précipitations importantes donc on peut constater que les débits suivent les variations des précipitations dans le temps pour ce bassin.

Pour avoir une idée sur la stabilité des régimes de l'oued de R'dat, on procède au calcul des débits extrêmes sur le débit moyen.

Oued	R'dat
Qmax/Q moy	3,5
Qmin/ Qmoy	0,42

Tableau 11 : rapport des débits extrêmes sur le débit moyen

D'après le tableau, on constate que :

L'oued R'dat présente une très grande irrégularité de son régime, avec un rapport qui se situe dans l'intervalle de $0.42 < r < 3.5$.

2.2) variations des débits mensuels

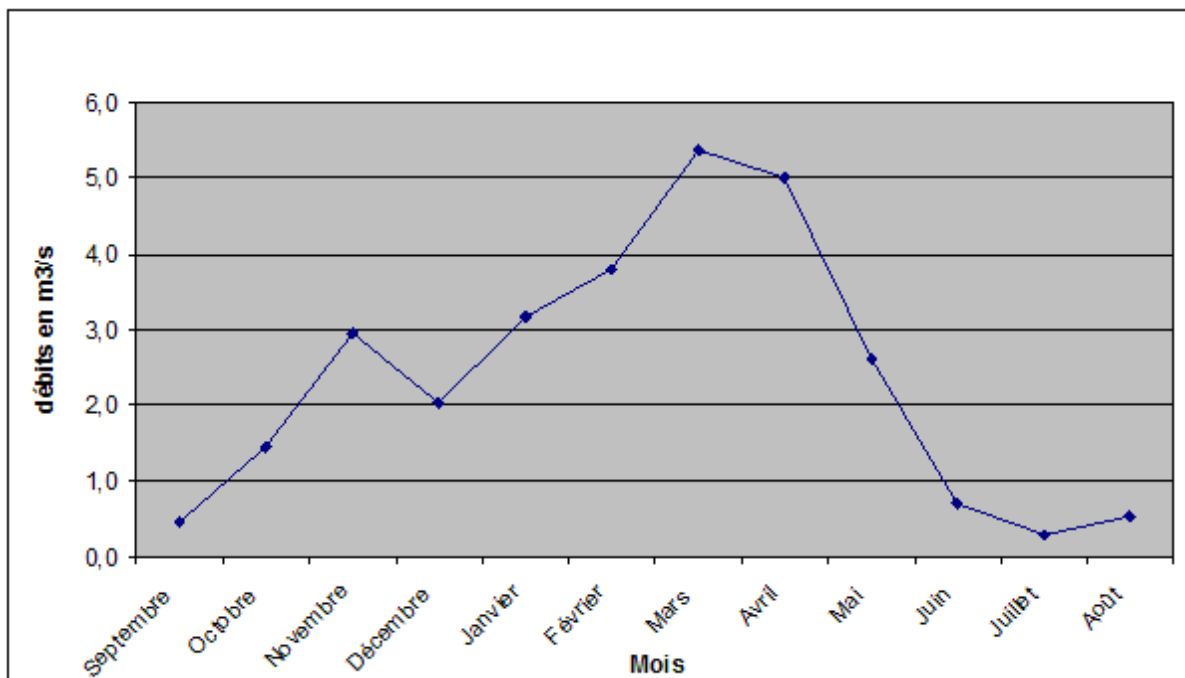


Figure 16 : variations mensuelles des débits du bassin versant du R'dat

Le graphe représente la variation des débits moyens mensuels couvrant la période qui s'étale de l'année 1963/64 à l'année 2010/11.

Ces débits varient dans la station de Sidi Rahal de 0.3 m³/s au mois de juillet à 5.4 m³/s au mois de mars. Ces débits sont généralement faibles avec un régime très irrégulier au cours de l'année. Ils commencent à augmenter à partir du mois de novembre et atteignent leur maximum pendant les mois de mars et avril suite à l'augmentation importante des précipitations durant ces mois et la fonte de neige des mois précédents. Les mois de septembre, juillet et août sont les mois les plus secs de l'année.

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

- a. Une période pluvieuse allant du mois de novembre au mois du mai et
- b. Une période sèche allant du juin à octobre (période d'été)

2.3) variations saisonnières des débits de oued R'dat

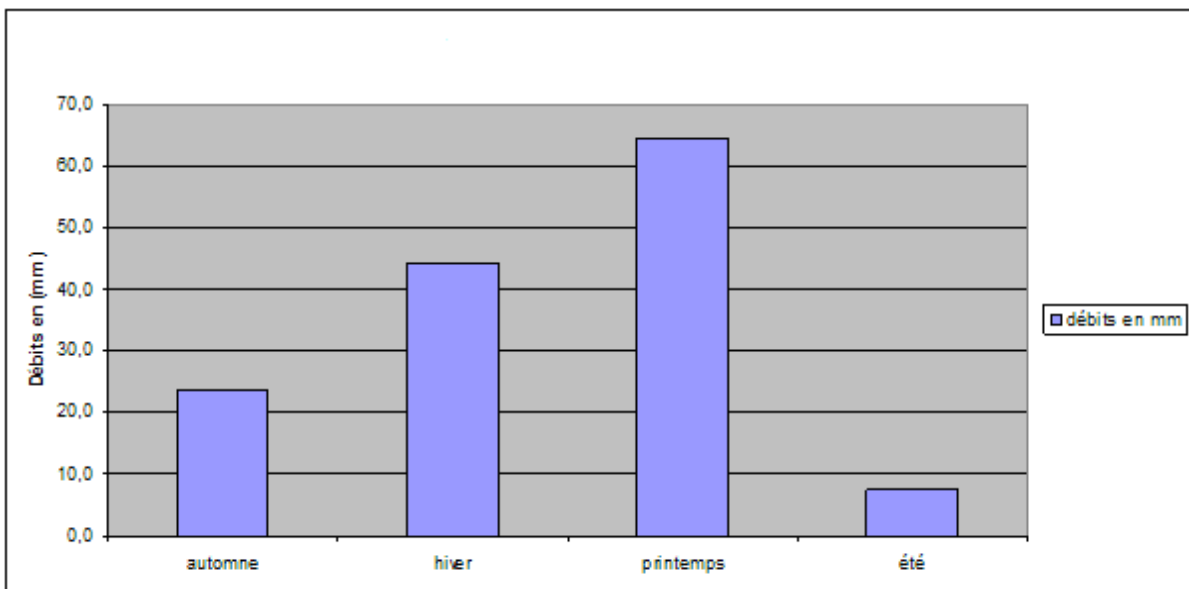


Figure 17 : variations saisonnières des débits du bassin versant du R'dat

On remarque d'après le graphe que le printemps est en première classe avec une lame d'eau écoulée d'environ 60 mm, suivi de l'hiver avec une lame qui dépasse 40 mm. L'écoulement en automne est d'environ 20 m, et en dernier rang l'été avec une valeur de l'ordre de 7 mm. En comparant ces valeurs avec celles des variations saisonnières de précipitations on constate que les variations saisonnières des débits suivent avec un certain décalage dans le temps celles des précipitations :

Au début de l'année climatique en automne les terrains sont encore secs et ont un fort pouvoir de rétention, par conséquent une partie importante de précipitations est retenue dans

le sol et emmagasinée dans le sous sol. Une autre partie d'eau est perdue sous forme de vapeur suite à l'évaporation et l'évapotranspiration du couvert végétal.

Les débits en hiver sont plus faibles que les précipitations qui connaissent un maximum pendant cette saison mais elles sont en partie immobilisées sous forme de neige.

Les débits en printemps sont très importants puisque les précipitations ruissellent sur des terrains déjà saturés en plus du facteur de fonte de neige.

B) Corrélation précipitations/débits, précipitations /coefficient d'écoulement et précipitations /déficit

La corrélation a pour but de mettre en évidence et d'évaluer la liaison entre deux variables aléatoires. Pour notre cas on va étudier la relation existante entre les débits et les précipitations à différentes échelles de temps.

1) Variations simultanées des précipitations et des débits mensuels

Le bassin versant est considéré comme un collecteur chargé de transformer les précipitations recueillies en écoulement. Mais vu les conditions climatiques du bassin versant une partie d'eau s'évapore tandis qu'une autre partie peut être infiltrée selon les terrains géologiques, et qui peut être récupérée par les sources d'eau selon les caractéristiques du substratum qui jouent un rôle très important.

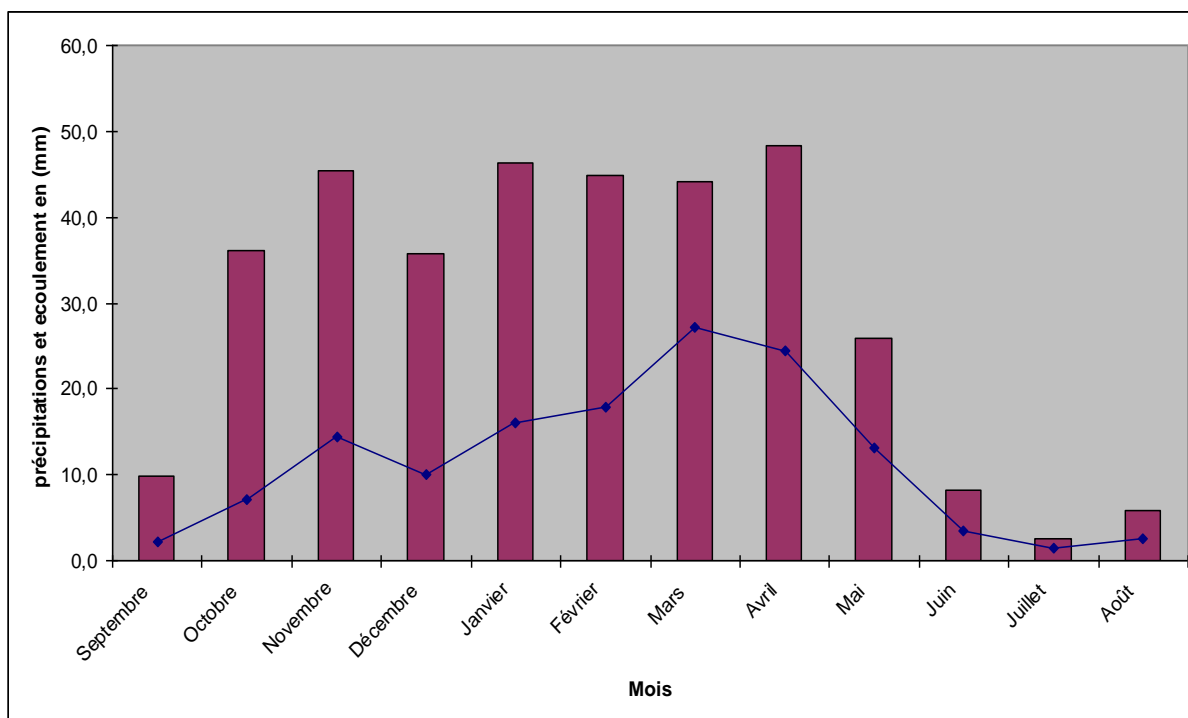


Figure 18 : variations simultanées des précipitations et débits mensuels à Sidi Rahal

Le graphe présente les variations simultanées des débits et des précipitations dans le bassin versant du R'dat, on remarque qu'on a deux pics de débit :

Un pic au niveau du mois de novembre dû à l'augmentation de précipitations,

Un deuxième pic plus important au niveau du mois d'avril. Cette importance est due à l'effet de la fonte de neige qui ne commence 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 R'dat ont les mêmes variations.

2) corrélation pluies –débits annuels

Cette corrélation va nous renseigner sur le degré de liaison entre pluies et débits pour une période de temps de 43 ans. Cette liaison est représentée par un graphique où sont portées les débits annuels et les précipitations correspondantes.

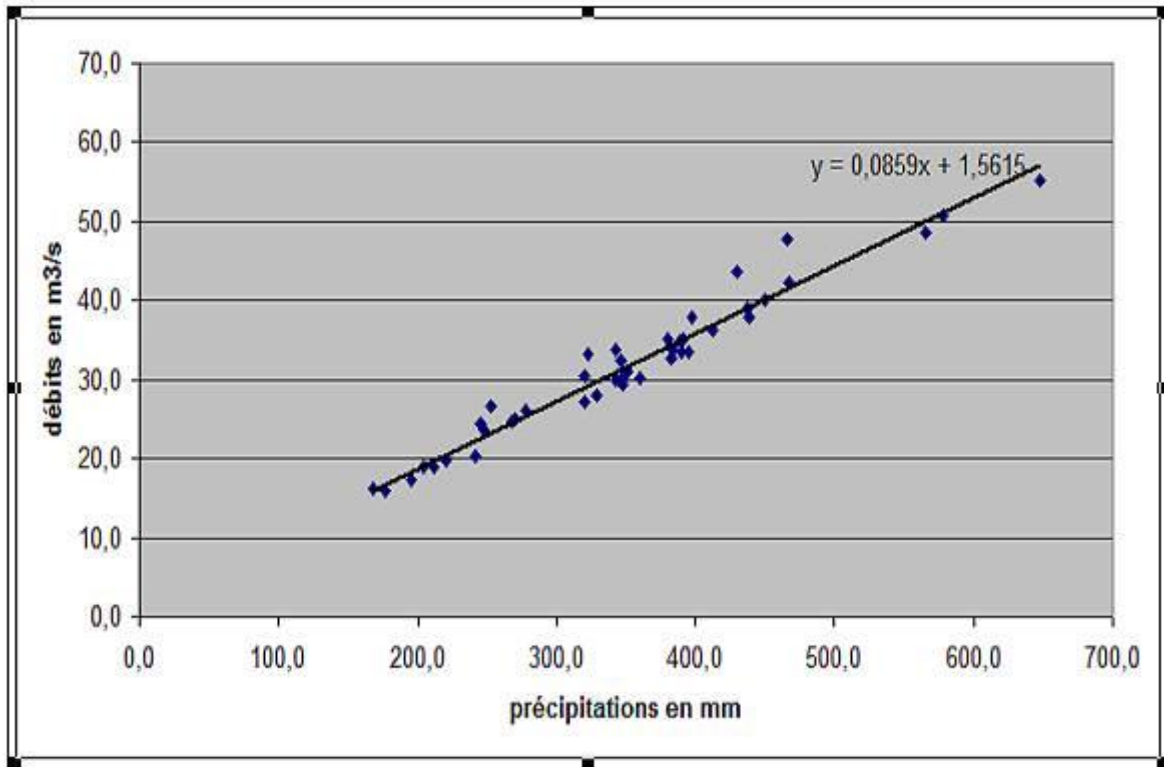


Figure 19 : corrélation précipitations – débits à la station de Sidi Rahal

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 corrélation de l'ordre de 0.84 qui confirmera le résultat obtenu graphiquement. La valeur du coefficient de corrélation 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 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 travail avec l'année hydrologique qui se termine par le mois d'Août qui ne connaît pas des 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 commence à fondre dès le début du printemps.

3) corrélation pluies/débits saisonniers

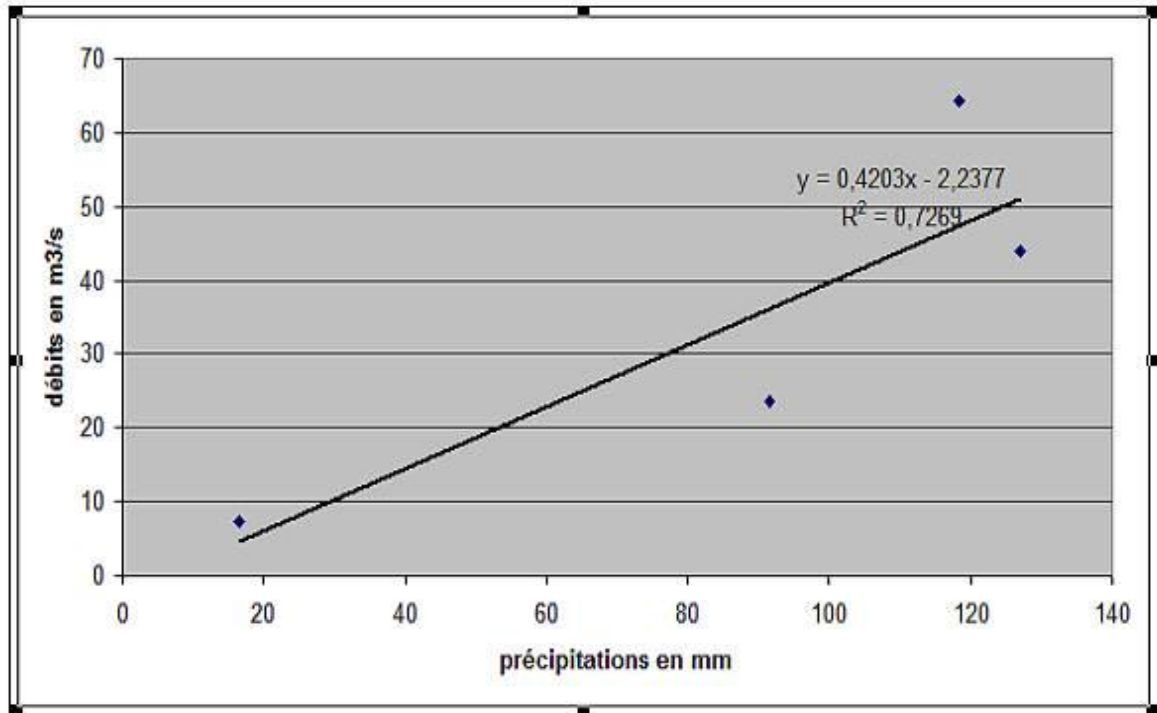


Figure 20 : corrélation précipitations – débits saisonniers à Sidi Rahal

A l'instar des échelles annuelles et mensuelles, les résultats des données saisonnières montrent qu'il y a toujours une étroite relation et liaison entre les débits et les précipitations (0.85) qui sont sous forme de pluies qui conditionnent les régimes hydrologiques.

4) corrélation pluies/ coefficient d'écoulement

Le coefficient d'écoulement est le rapport entre la lame d'eau écoulée et les pluies contemporaines. Il constitue le troisième terme du bilan hydrologique après les pluies et le déficit. Il s'exprime en pourcentages de tranche d'eau précipitée qui ruisselle jusqu'à l'exutoire du bassin versant. Il dépend de plusieurs facteurs:

1-La pluie qui intervient par son intensité, sa répartition, et sa durée.

2- Les caractéristiques physiques du bassin versant:

- ✓ sa superficie,
- ✓ Sa forme,
- ✓ la nature géologique,
- ✓ la perméabilité de son substratum,
- ✓ Le degré de pente.

3-La température qui régit l'évaporation.

4-L'état d'humidité des sols et le niveau d'eau dans les réserves souterraines au moment de la pluie.

Le tableau suivant récapitule les bilan hydrologique du bassin versant du R'dat

Années	P (mm)	Q (mm)	D (mm)	Cr (%)
1963/64	894,9	203,97	690,93	22,79
1964/65	822	113,21	708,79	13,77
1965/66	534,9	52,14	482,76	9,75
1966/67	484,35	149,52	334,83	30,87
1967/68	687,2	267,26	419,94	38,89
1968/69	826,1	187,18	638,92	2,66
1969/70	618,95	145,89	473,06	23,57
1970/71	941,65	496,09	445,56	52,68
1971/72	554,9	384,13	206,77	62,74
1972/73	414,73	88,23	326,5	21,27
1973/74	711,47	307,93	403,54	43,28
1974/75	426,8	44,27	382,53	10,37
1975/76	504,8	136,02	368,78	26,95
1976/77	478,1	114,1	364	23,86
1977/78	558,3	173,02	385,28	30,99
1978/79	450,13	137,86	312,28	30,63
1979/80	471,73	158	313,73	33,49
1980/81	48,63	48,66	379,97	11,35
1981/82	529	73,83	455,17	13,96
1982/83	263,5	6,59	256,91	2,5
1983/84	361,77	29,04	332,73	8,03
1984/85	520,03	70,47	449,57	13,55
1985/86	540,77	79,19	461,57	14,64
1986/87	380,53	-	-	-
1987/88	580,87	184,77	396,09	31,81
1988/89	691,5	215,58	475,92	31,18
1989/90	488,6	211,1	277,5	43,21
1990/91	582,57	169,6	412,9	29,12
1991/92	417,97	121,11	296,86	28,98
1992/93	244,23	16,95	227,28	6,94
1993/94	498,1	202,4	295,7	40,64
1994/95	346,3	62,19	284,11	17,96
1995/96	531,2	250,34	280,86	47,13
1996/97	429,6	131,89	297,71	30,7
moyenne	524.6	389.06	155.6	203.56

Tableau 12: bilan hydrologique du bassin versant du R'dat

Le calcul du coefficient d'écoulement pour la série d'années qu'on a confirmés les résultats précédents de la contribution de la composante de fonte de neige qui est pour ce bassin très négligeable puisqu'on a aucune année dont le coefficient dépasse le 100 %.

Le graphe suivant montre le degré de liaison entre les pluies et les coefficients d'écoulement.

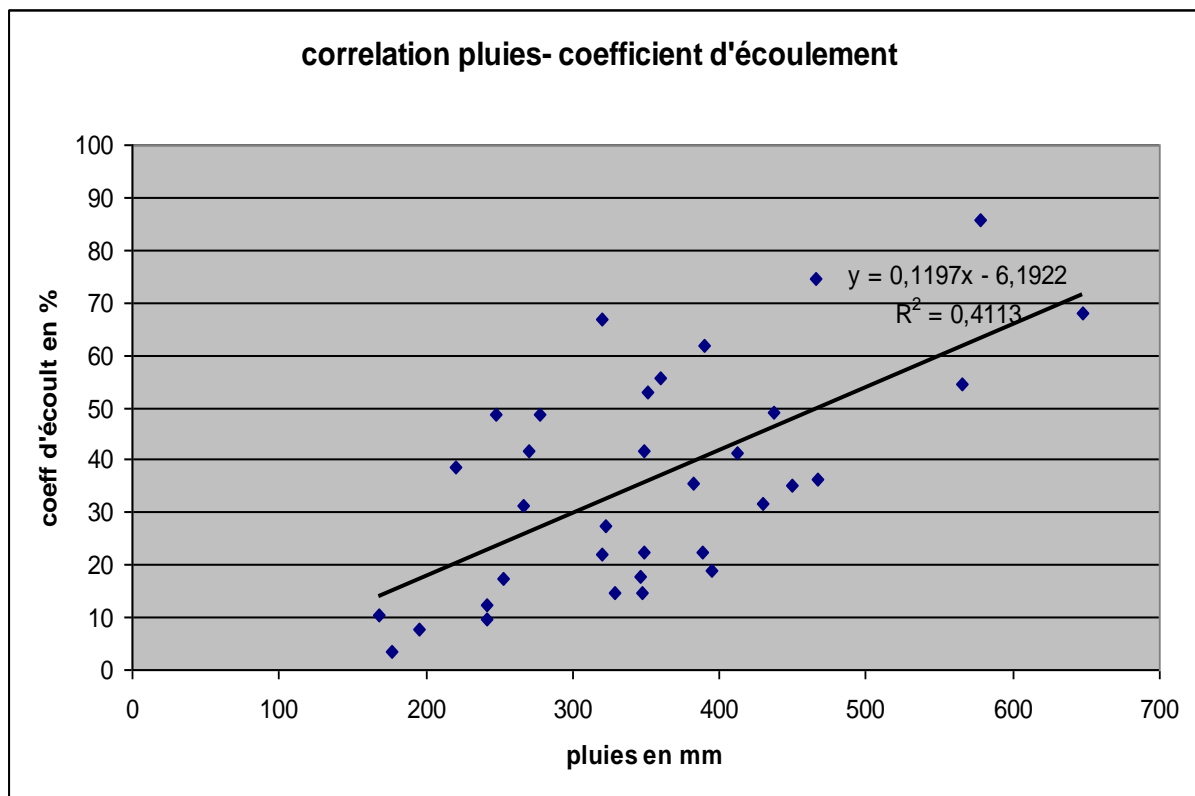


Figure 21 : corrélation pluies- coefficient d'écoulement

Le coefficient de corrélation qui est de l'ordre de 0.64 (faible par rapport aux coefficients déjà calculés) montre que la relation entre les précipitations et le coefficient d'écoulement n'est pas très convaincante. Cela veut dire que le coefficient d'écoulement ne dépend pas que des précipitations, mais d'autres facteurs dont on peut citer :

- La manière avec laquelle ces précipitations ont tombé (Intensité),
- Le déficit d'écoulement qui à son tour dépend de :
 - ✓ La géologie du bassin formée essentiellement des marnes et calcaires du tertiaire et grès et argiles du permo-trias.
 - ✓ L'atténuation de la lame d'eau écoulee peut être due également à la présence de 18 seguias qui ont été répertoriées.

5) corrélation précipitations/ déficit d'écoulement

Le déficit est la différence entre la lame d'eau précipitée est celle écoulee, c'est la quantité d'eau qui eut être infiltrée vers les nappes souterraines ou évapotranspirée.

Dans le bassin versant du R'dat, le déficit varie de 708,79 mm en 1964/65 à 227,28 mm en 1992/93. Ces deux valeurs correspondent aux années de pluviosité extrêmes. La variation de précipitations est le principal facteur derrière la variation de déficit, mais il dépend aussi de la manière avec laquelle ces précipitations ont été tombées et de leur répartition dans le temps, ce qui est important pour l'infiltration et l'évaporation, et par conséquent un déficit important.

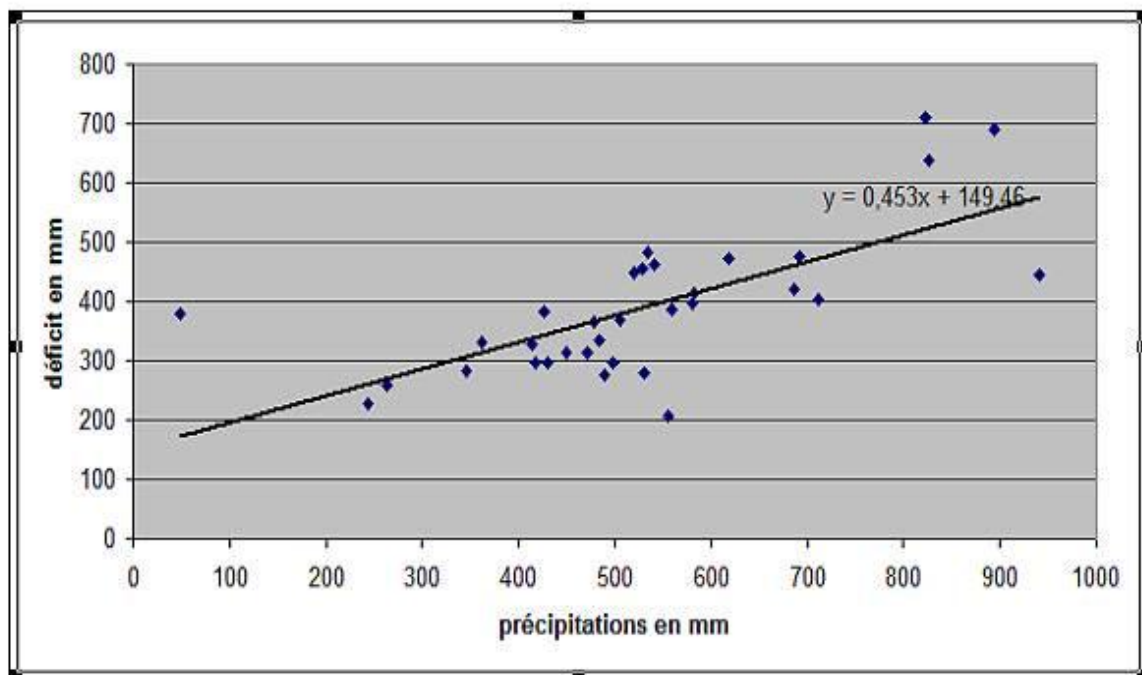


Figure 22 : corrélation précipitations/ déficit pour le bassin versant du R'dat

Le coefficient de corrélation entre les précipitations et le déficit (0.86) montre qu'il y a une étroite liaison entre ces deux paramètres comme le montre l'exemple des années extrêmes citées ci-dessus. Pour la station du sidi Rahal, le déficit est très grand ceci peut être dû essentiellement à l'infiltration puisque les formations géologiques sont constituées essentiellement des faciès perméables tels que les grès, les argiles du permotrias et des marnes et calcaires du tertiaire. En plus de ce facteur naturel, le déficit peut être aussi dû à l'intervention anthropique qui se manifeste par des seguias qui drainent un certain volume d'eau avant que ce dernier arrive au niveau de l'exutoire.

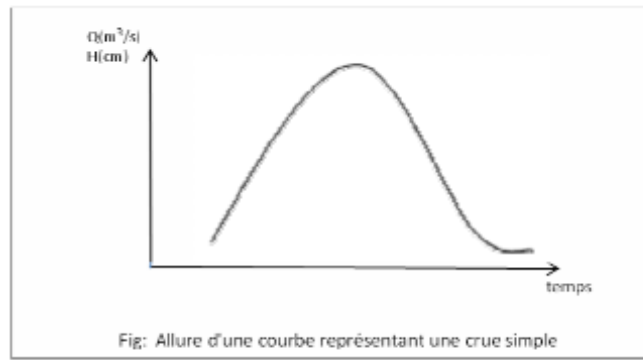
C) Etude dynamique des crues de l'oued R'dat

Définition d'une crue :

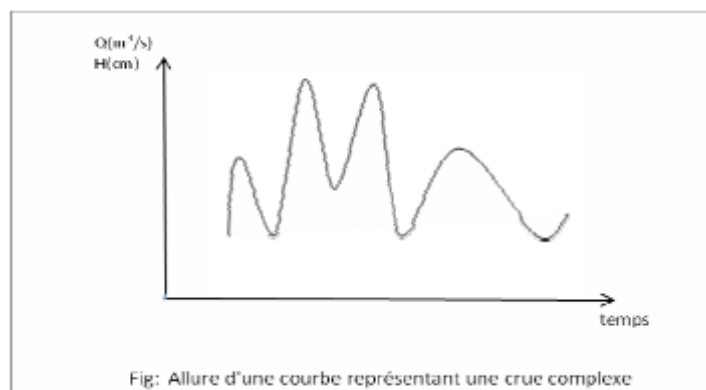
Une crue est un phénomène hydrologique qui correspond à une augmentation rapide et temporaire du débit d'un cours d'eau. Elle est décrite à partir de trois paramètres : le débit, la hauteur d'eau et la vitesse du courant. En fonction de l'importance des débits, une crue peut être contenue dans le lit 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 :

Simple : Hydrogramme avec un seul pic du débit de pointe quand il s'agit d'une crue simple (ou mono génique) :



Complexe : Hydrogramme avec au moins deux pics générés par différents épisodes pluvieux quand il s'agit de crue de type complexe ou (polygénique)



1) Analyse de quelques crues exceptionnelles
 1.1) exemple de crue simple du oued R'dat

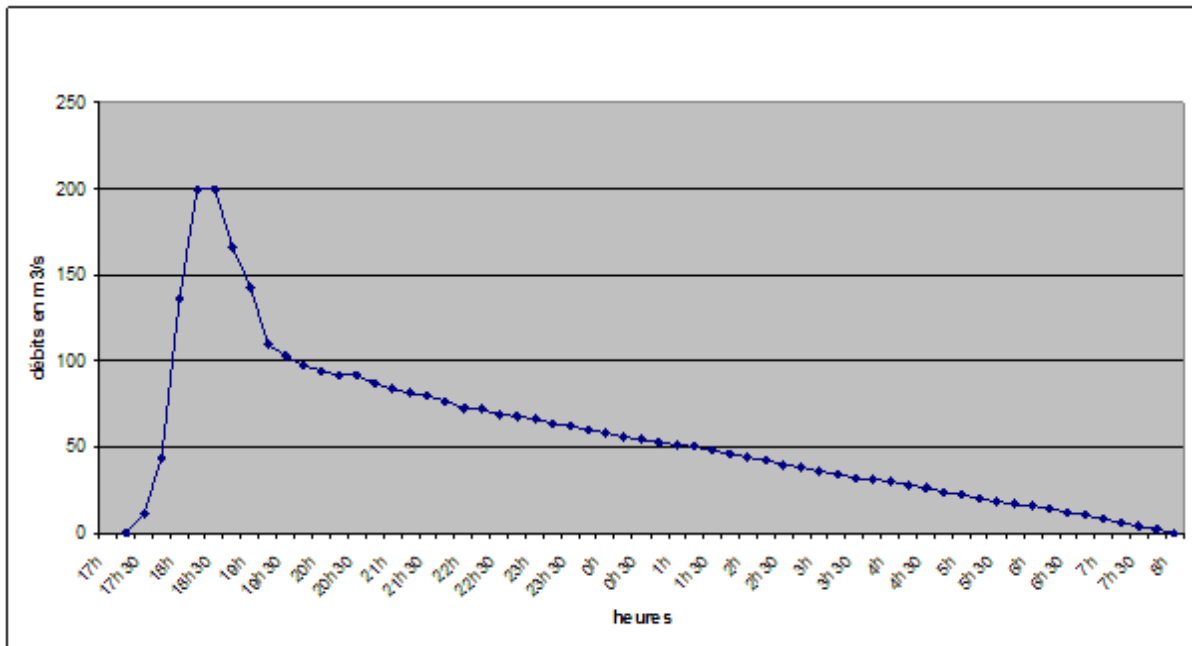


Figure 23: exemple d'une crue simple du bassin versant du R'dat

CARACTERISTIQUES DE LA CRUE	
date début	22/09/1965 à 17h15
date fin	23/09/1965 à 5h30
débit de pointe (m ³ /s)	200,000
débit max. moyen (m ³ /s)	59,427
débit base avant (m ³ /s)	0,050
débit base après (m ³ /s)	18,000
volume 10 ⁶ m ³	2,567
temps de base (heures)	12
temps de montée (heures)	1
coefficient de pointe	3,4

L'hydrogramme, aigu et pointu ci-dessus montre qu'il s'agit d'une crue avec une seule montée du niveau d'eau, ce qui permet de dire qu'elle est simple. C'est une crue très rapide qui atteint son débit de pointe (200 m³/s) en un temps très court de l'ordre d'une heure. la crue est aussi caractérisée par un temps de base de 12 heures, généralement ce type de crue cause des dégâts graves.

1.2) exemple de crue complexe de oued R'dat

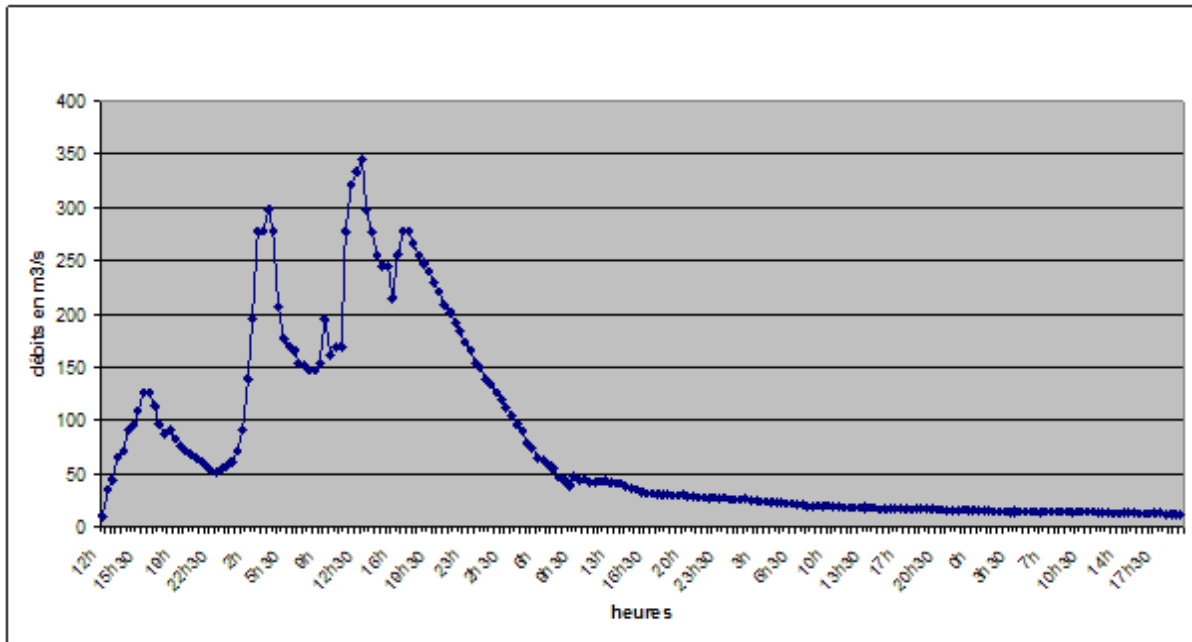


Figure 24 : exemple d'une crue complexe

CARACTERISTIQUES DE LA CRUE	
date début	09/03/1990 à 12h
date fin	11/03/1990 à 8h30
débit de pointe (m ³ /s)	345,000
débit max. moyen (m ³ /s)	128,372
débit base avant (m ³ /s)	10,200
débit base après (m ³ /s)	39,000
volume 10 ⁶ m ³	20,565
temps de base (heures)	44,5
temps de montée (heures)	25,0
coefficient de pointe	2,7

Contrairement à l'exemple précédant, l'hydrogramme ci-dessus 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. C'est une crue de type complexe caractérisée par un débit de pointe de l'ordre de 345 m³/s, un temps de montée très grand de 25 heures, et un temps de base de l'ordre de 44.5 heures.

2) Les crues dans l'année hydrologique

Afin de savoir la répartition mensuelle des crues dans l'année hydrologique, on procède à une étude statistique des crues. Le tableau suivant résume le nombre de crues de chaque mois pour la série de données qu'on a afin de dégager les pourcentages des crues mensuelles.

mois	nombre de crues	pourcentages
Septembre	2	4,87
Octobre	3	7,3
Novembre	9	21,95
Décembre	4	9,75
Janvier	6	14,63
Février	2	4,87
Mars	7	17,07
Avril	3	7,31
Mai	3	7,31
Juin	0	0
Juillet	0	0
Août	2	4,87

Tableau 13 : Nombre et pourcentages des crues du bassin versant du R'dat

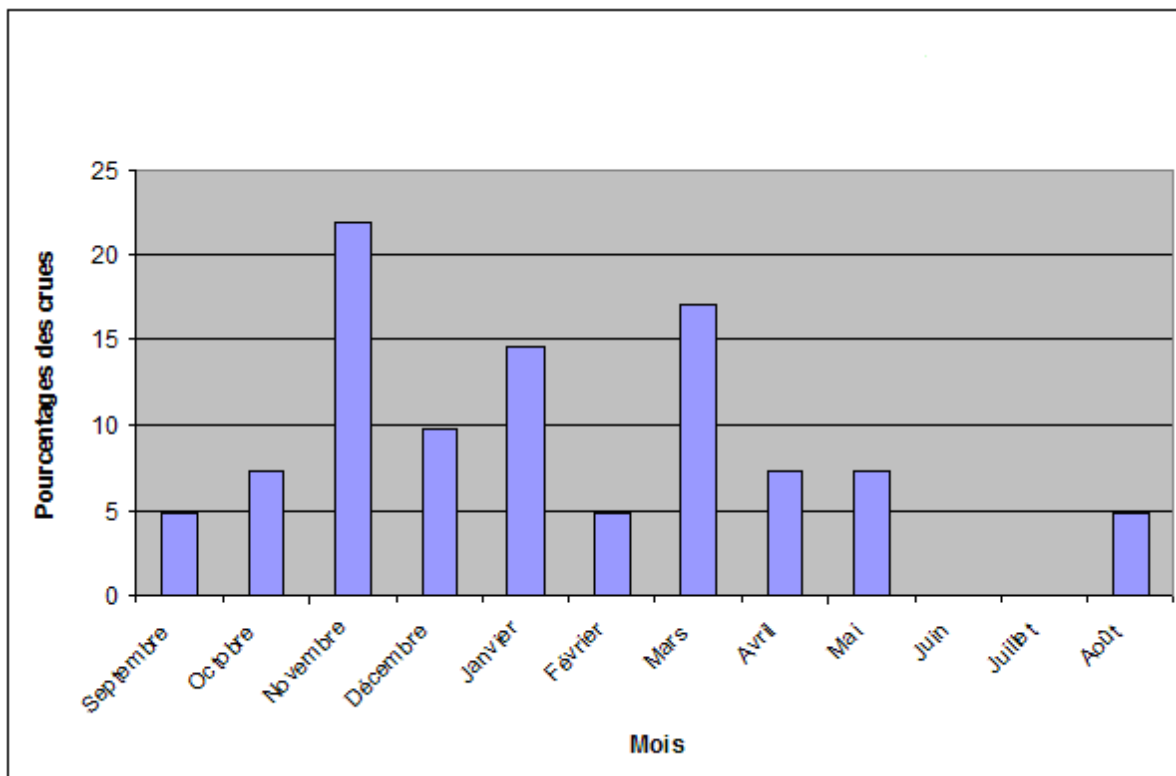


Figure 25 : répartition mensuelle des crues du bassin versant du R'dat

D'après le graphe précédant on remarque que la plupart des crues du R'dat ont été enregistrées pendant la période comprise entre les mois de novembre à mars qui totalisent plus de 60 %. Le bassin a connaît donc surtout des crues d'hiver.

3) variations des temps de montée et de base des crues

3.1) variations des temps de base

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

intervalles de temps	0-1h	1-4h	4-10h	10-20h	20-40h	plus de 40h
nombre de crues	0	1	2	7	18	9

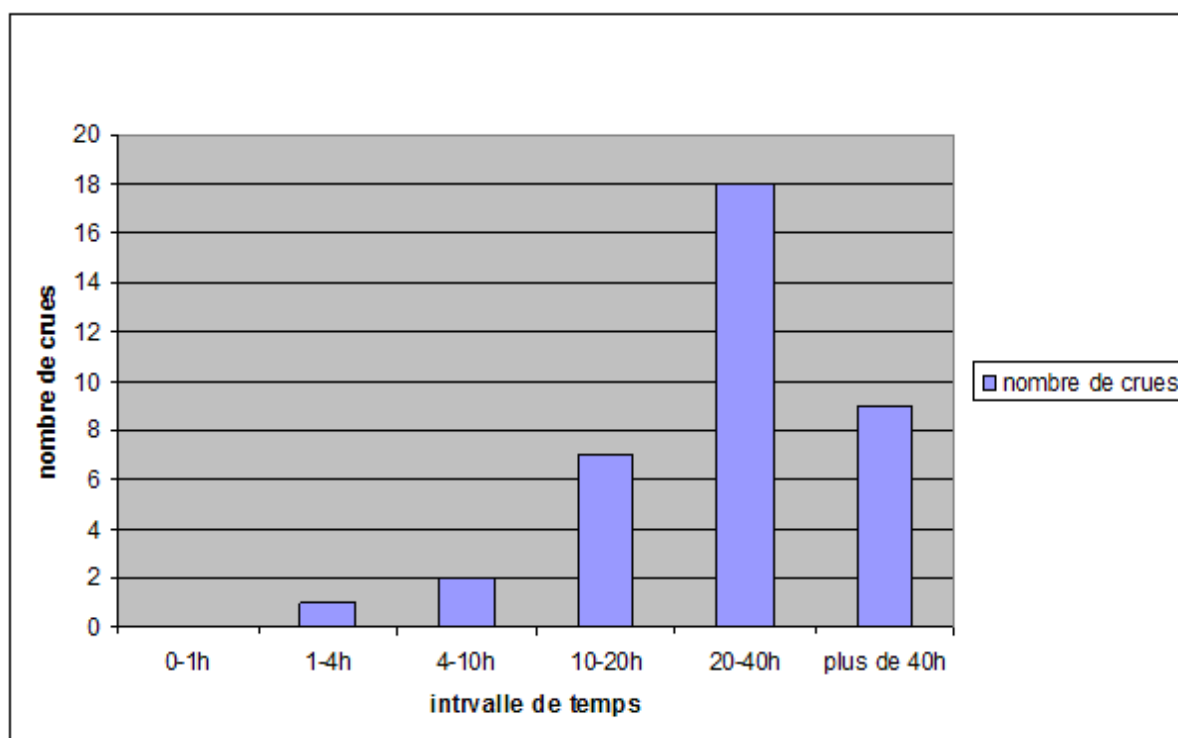


Figure 26 : temps de base de crues du bassin versant du R'dat à Sidi Rahal

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, et d'après les hydrogrammes on remarque qu'ils sont étalés sur une longue période.

3.2) 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.

intervalle du temps	0-1h	1-4h	4-10h	10-20h	20-40h	plus de 40h
nombre de crues	2	4	16	11	4	0

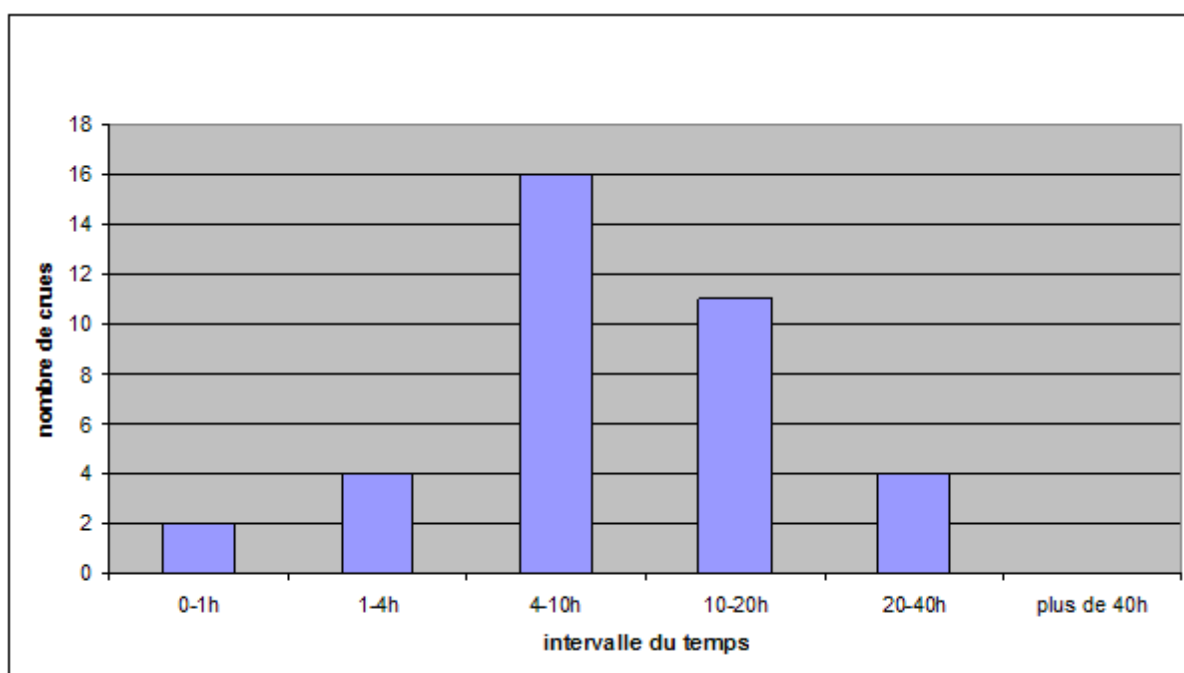


Figure 27 : temps de montée des crues du bassin versant de R'dat

Le temps de montée des crues le plus dominant pour le bassin versant du R'dat se situe dans l'intervalle (4-10h), c'est un temps qui est généralement court et qui peut causer des dégâts graves. Le bassin a connu également des crues avec un temps de montée moyen (10-20h) et un temps lent (20-40h).

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

L'imperméabilité :

Le bassin versant est constitué 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 montagnard 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 la végétation sont des paramètres qui influencent le temps de montée de crue et donc leurs degrés de gravité.

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

**Troisième partie : L'analyse fréquentielle des débits
et des pluies extrêmes pour l'estimation des débits
de pointe pour différentes périodes de retour en
utilisant HYFRAN**

A) L'ajustement statistique des variables précipitations et débits

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 de la masse de données, qui si importante devrait être remplacée par un nombre réduit de paramètres statistiques pouvant représenter correctement cette masse (DADI, 1998).

Afin de découvrir la structure des variations des débits et des précipitations et pour faire une analyse détaillée de ces données, l'ajustement statistique a fait grâce au logiciel HYFRAN. Ce dernier propose 14 lois d'ajustement statistique et détermine un modèle ou plus qui ajustent au mieux 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 et BIC en attribuant les plus faibles valeurs aux lois représentant les meilleurs résultats d'ajustement.

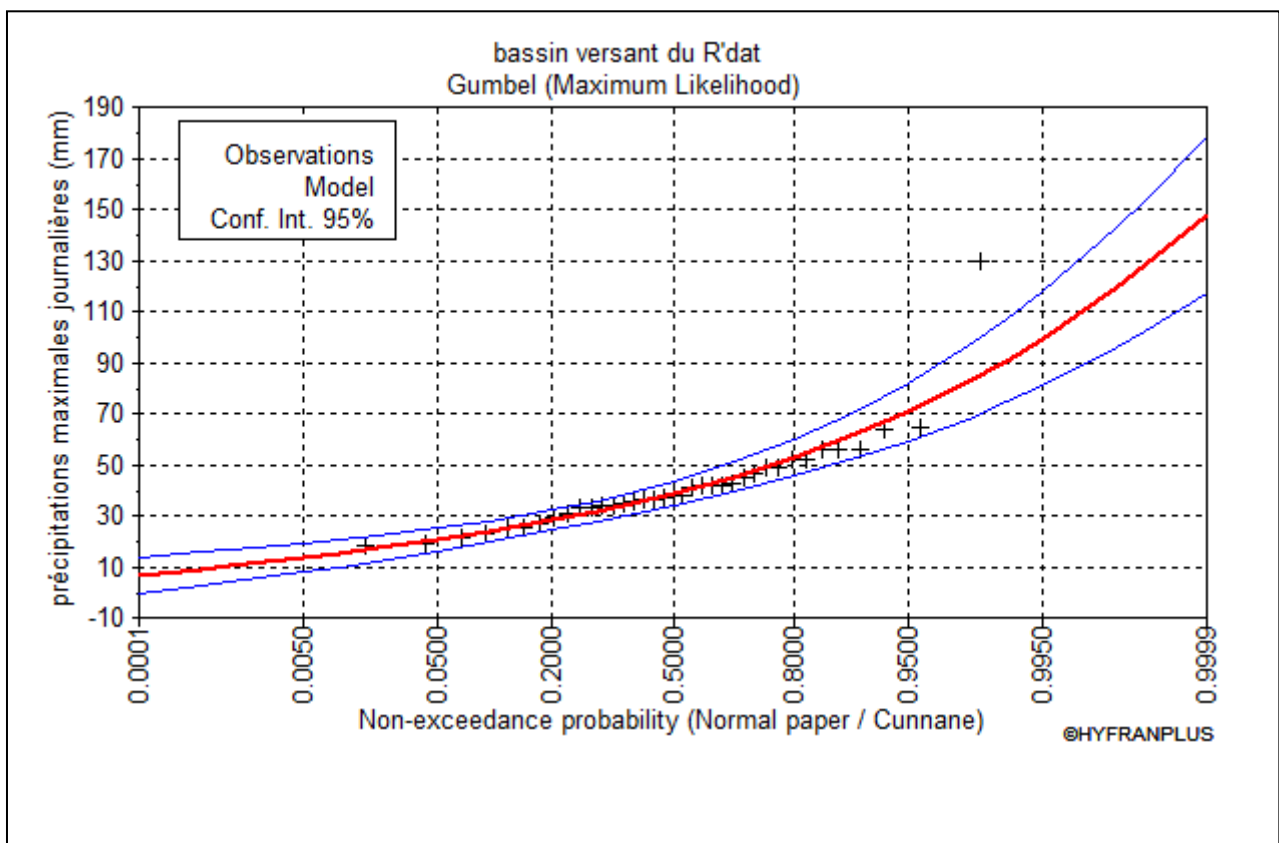
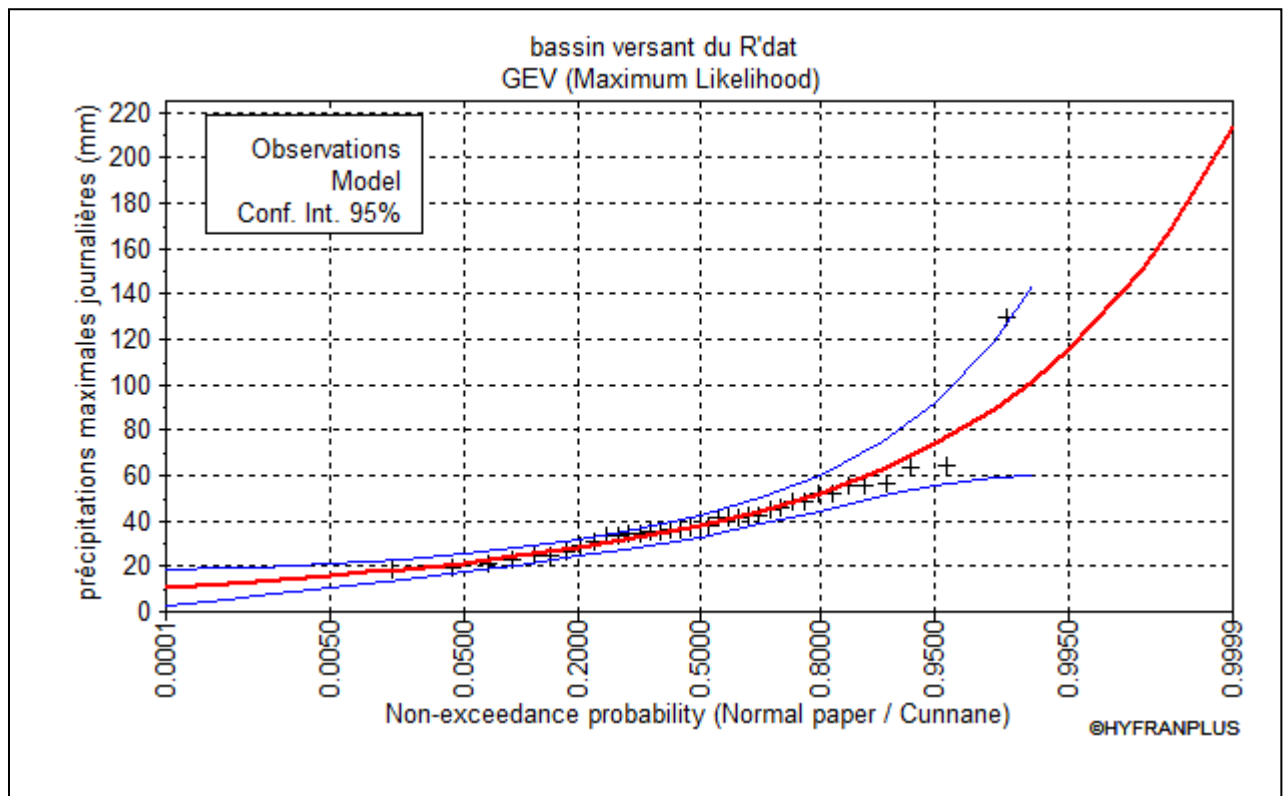
Pour mieux s'assurer de la validation de la loi à utiliser pour l'ajustement de l'échantillon étudié, on se sert du tableau comparatif des caractéristiques de la distribution selon une loi donnée et les caractéristiques statistiques de l'échantillon étudié.

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 et des précipitations du bassin versant de R'dat sur une période de 35 ans (1970/71- 2005/2006).

1) Ajustement des lois à un échantillon des précipitations maximales annuelles

1.1) Méthode visuelle



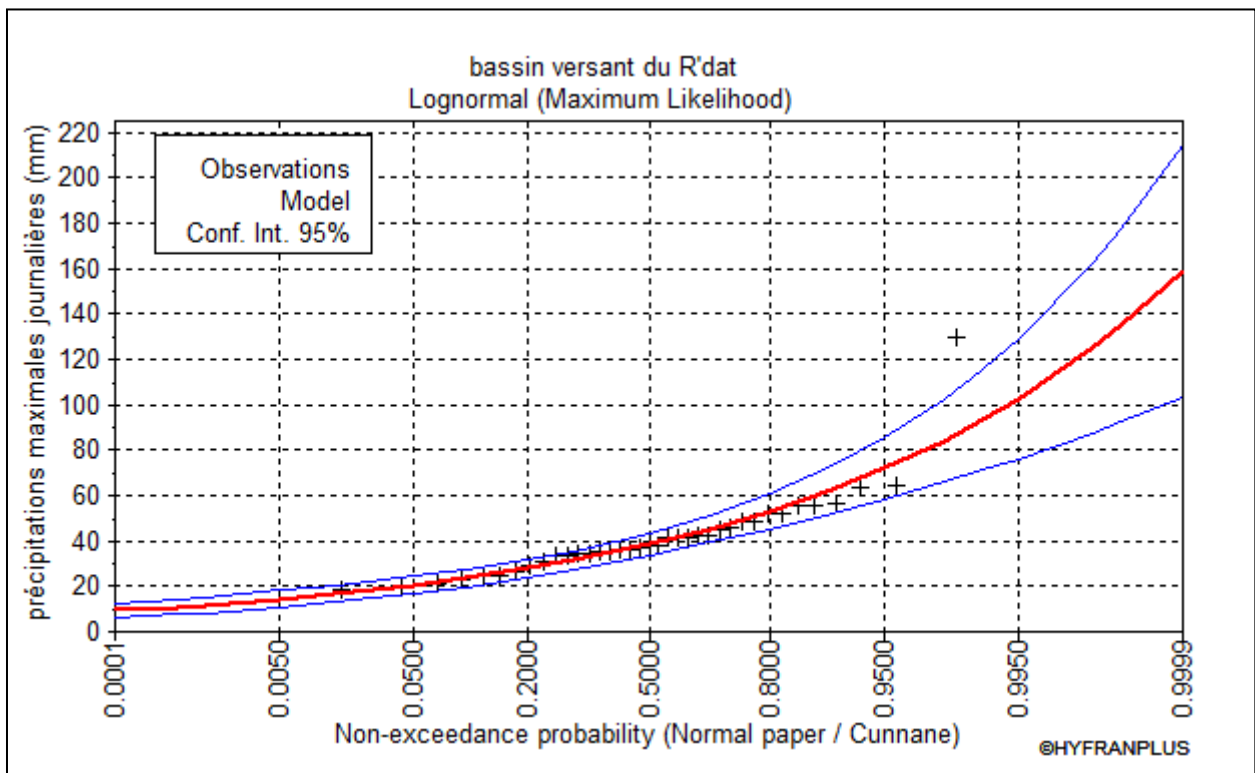
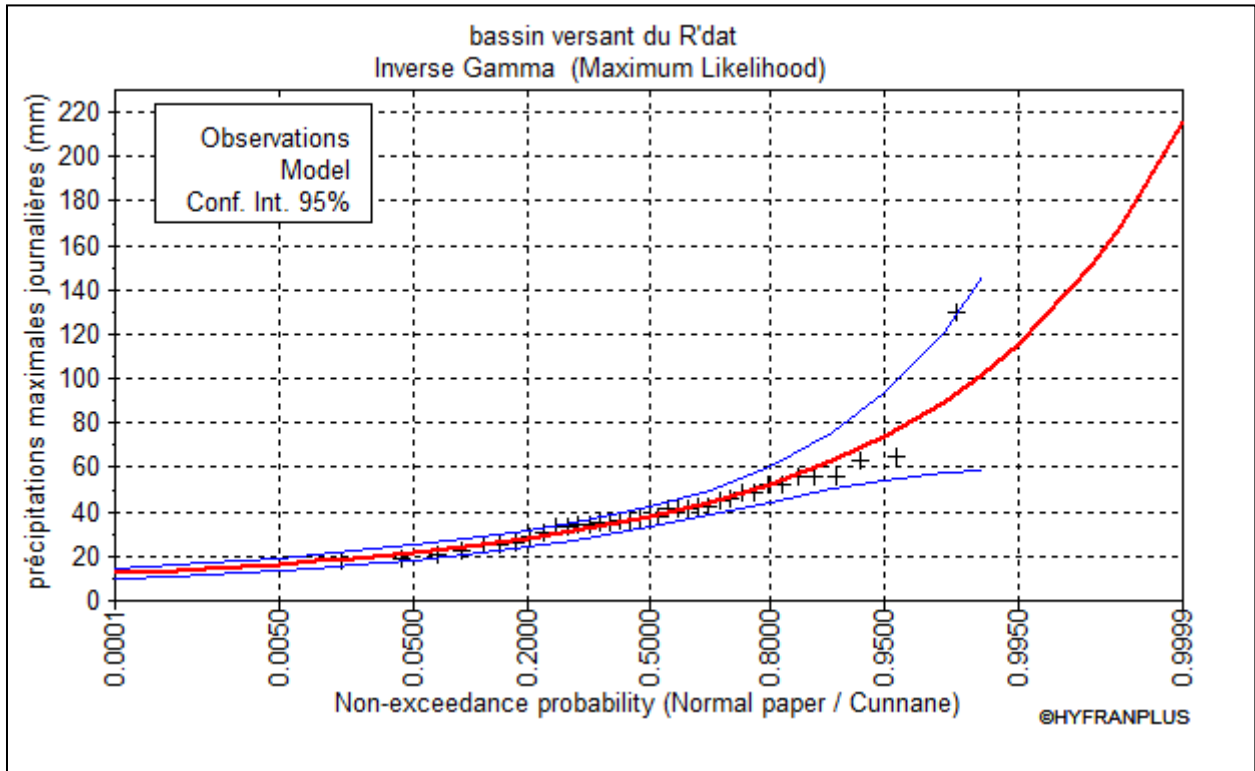


Figure 28 : ajustement graphique des précipitations maximales annuelles

Visuellement on remarque que les lois Inverse Gamma et GEV sont les lois les plus adaptées pour l'ajustement de la variable précipitations journalières maximales.

1.2) Méthode numérique

Modèle	BIC	AIC
Inverse Gamma (Maximum Likelihood)	308.98	305.76
Log normal (Maximum Likelihood)	309.912	306.69
Gumbel (Maximum Likelihood)	310.274	307.052
Gev (Maximum Likelihood)	312.498	307.666

Tableau 14 : Ajustement numériques des lois aux précipitations maximales annuelles
Après une comparaison entre les résultats graphiques et ceux fournis par le tableau ci-dessus on constate que la loi la mieux adaptée pour l'ajustement est la loi de Inverse Gamma qui a les plus faibles valeurs des critères AIC et BIC.

1.3) Critères de la loi la mieux adaptée à l'ajustement

Le logiciel donne pour chaque loi un tableau comparatif des caractéristiques de la population selon cette loi et les caractéristiques de l'échantillon, la loi qui donne des caractéristiques semblables est considérée comme étant la loi la mieux adaptée.

Pour l'échantillon étudié, on a trouvé que la loi Inverse Gamma est la loi qui présente des caractéristiques identiques à celles de notre échantillon, donc on constate que cette loi est la plus adaptée à l'ajustement

	Caractéristiques de la population	Caractéristiques de l'échantillon
Minimum	0	18.2
Maximum	none	130
Moyenne	41	41
Ecart type	18	18
Médiane	37.6	38
coefficient de variation	0.4	0.4
coefficient d'asymétrie	2.06	2.84
coefficient d'aplatissement	12.8	12.9

Tableau 15 : Statistiques descriptives des précipitations maximales annuelles à la station de Sidi Rahal

1.4) Estimation des précipitations de pointe journalière

Après avoir choisi la loi Inverse Gamma pour l'ajustement de la variable précipitations maximales journalières, on va estimer les précipitations de pointe pour des périodes de retour différentes.

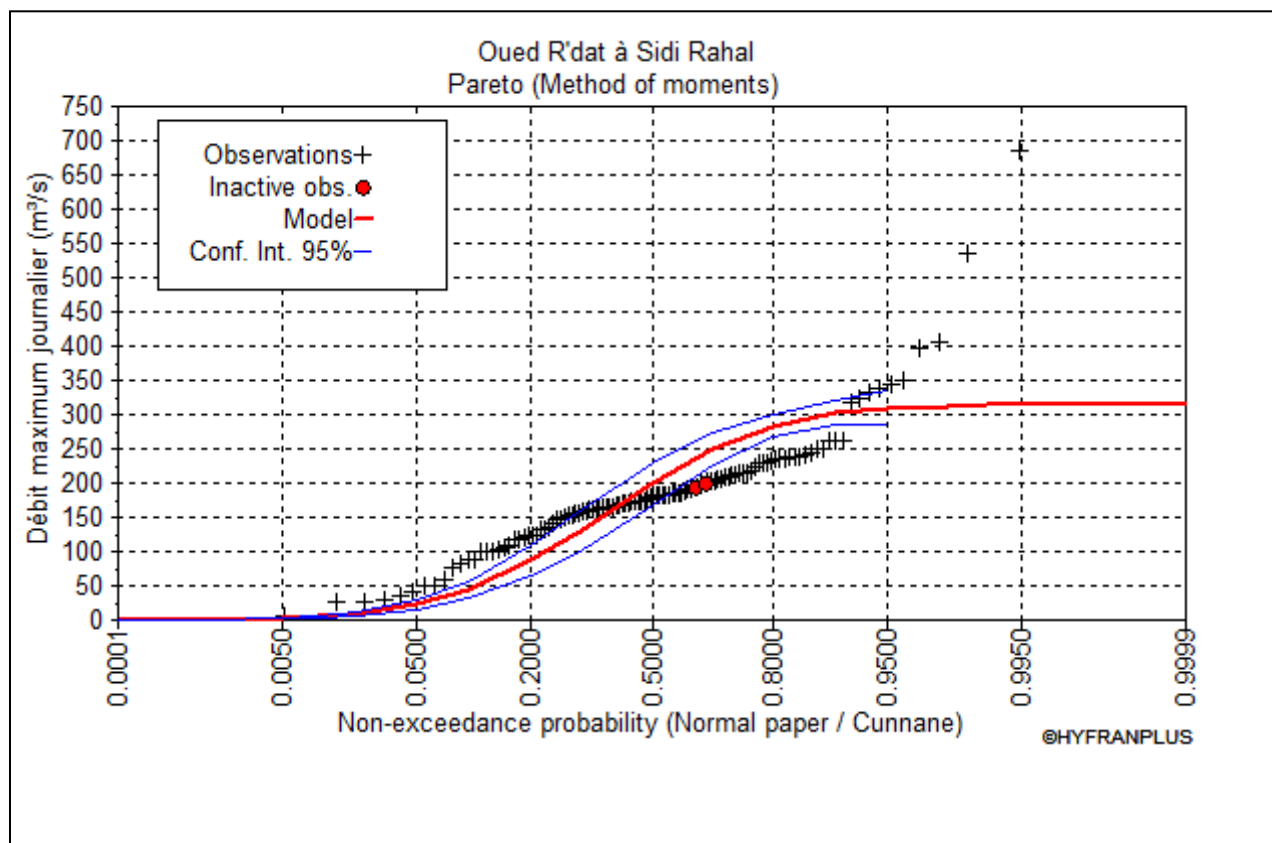
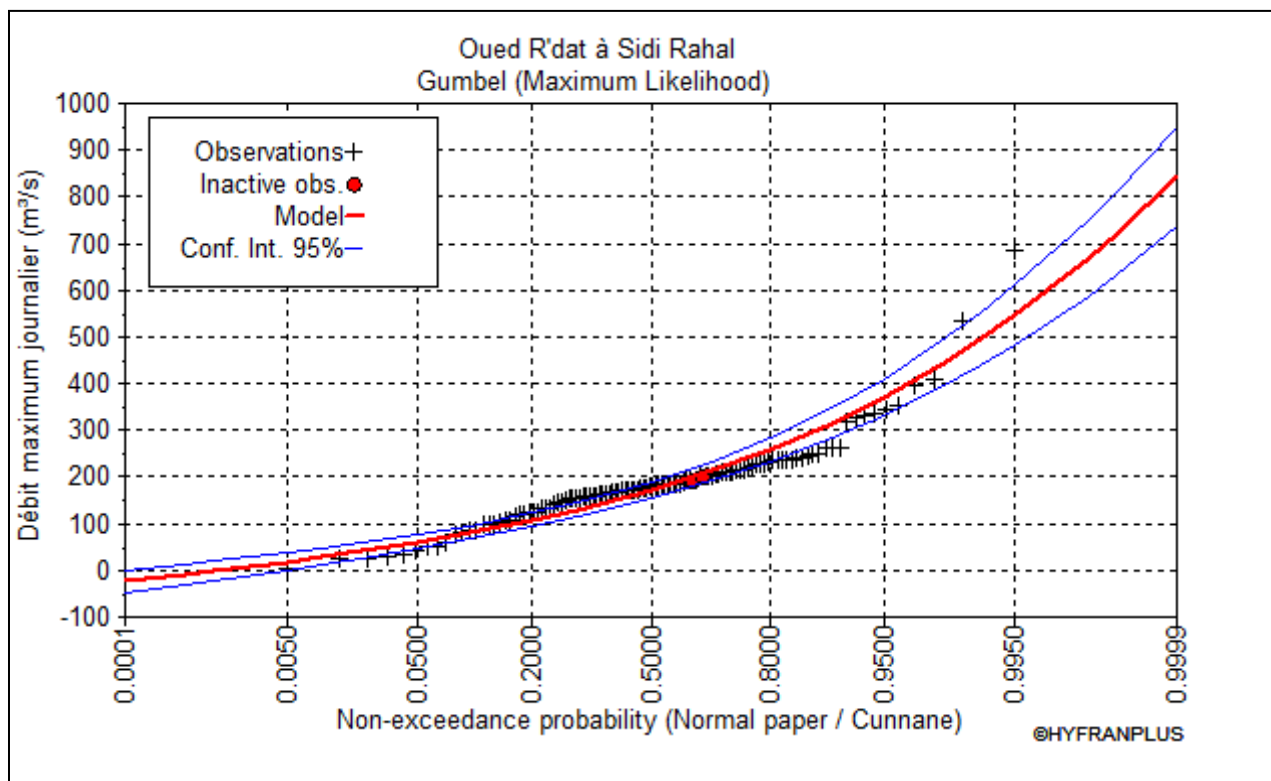
modèle	100 ans	50 ans	20 ans	10 ans
Weibull (Maximum Likelihood)	102.22	89.584	74.024	63

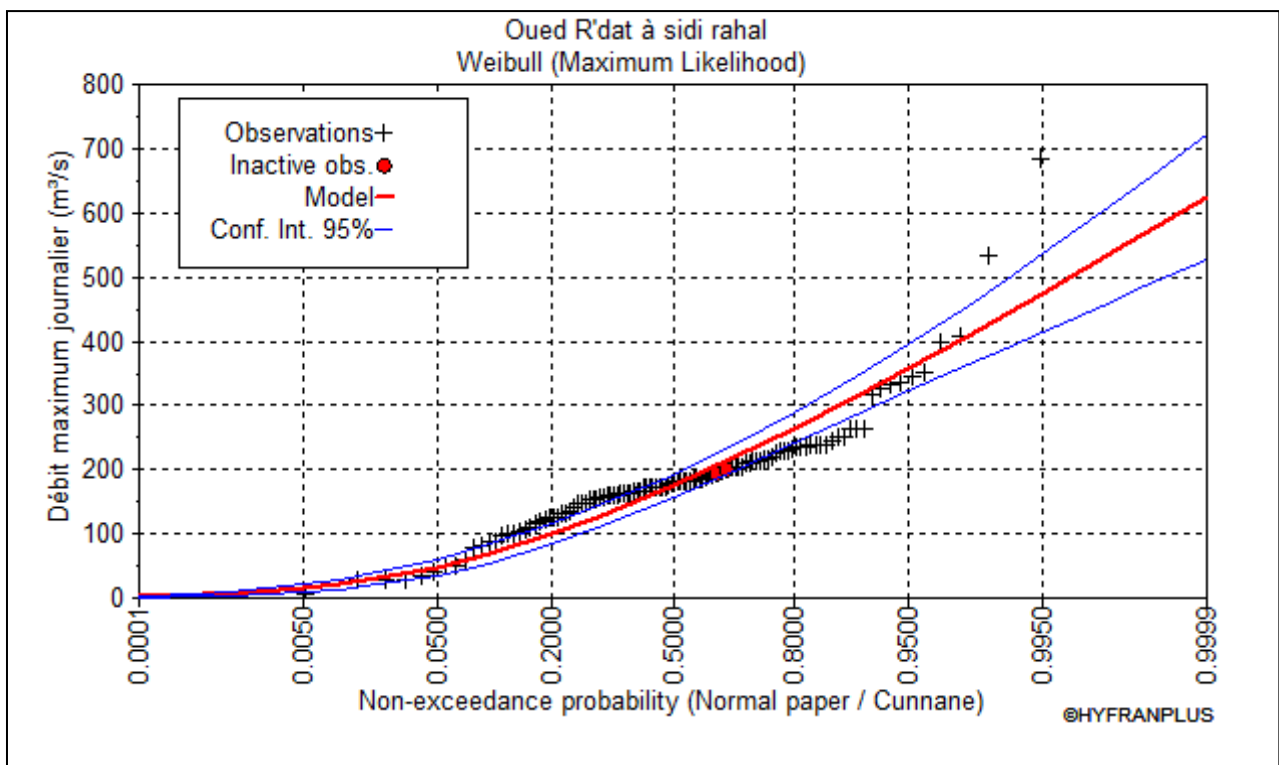
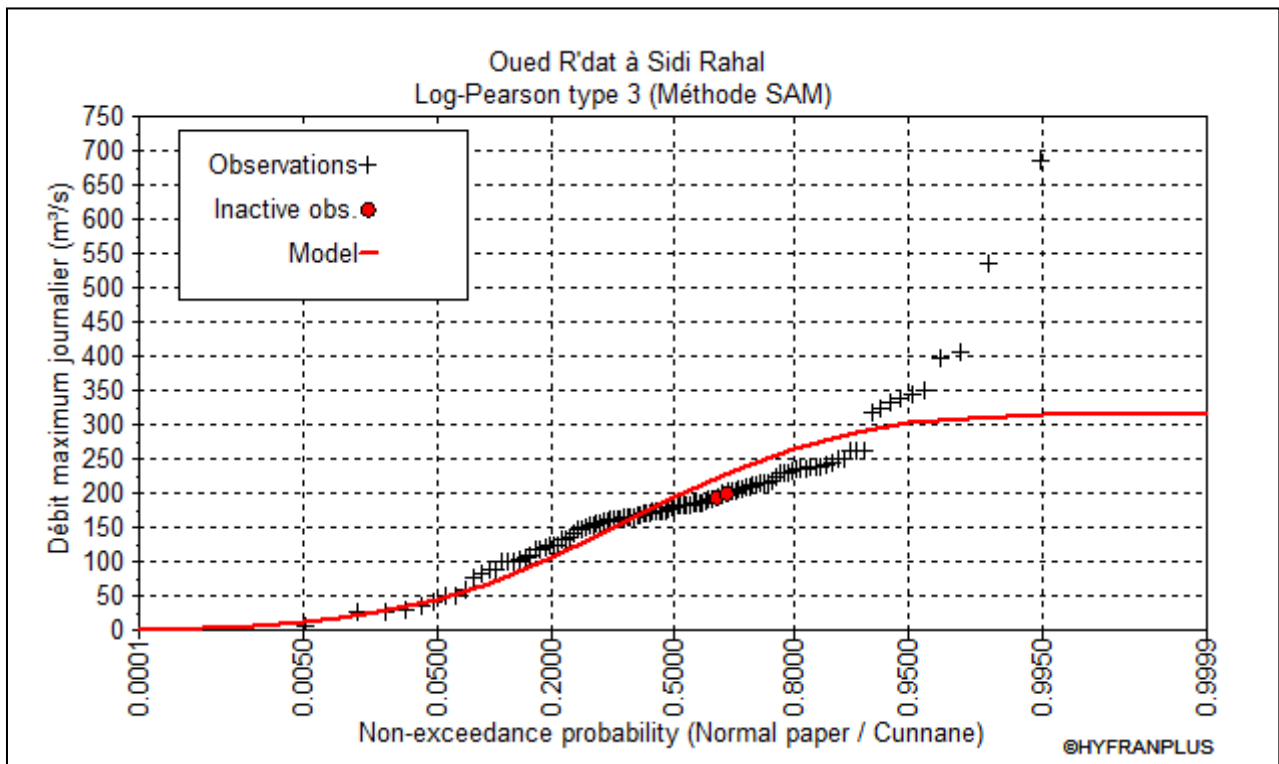
Tableau 16 : Estimation des précipitations maximales journalières selon la loi Inverse Gamma

Les précipitations de pointe de périodes de retour de 10, 20, 50 et 100 sont en général acceptables. Mais on remarque qu'elles sont un peu sous-estimées. Surtout que le bassin a connu pour la série de données qu'on a une valeur maximale journalière d'ordre de 130 mm.

2) ajustement des lois à un échantillon des débits maximal annuels

2.1) Méthode visuelle (analyse des graphes)





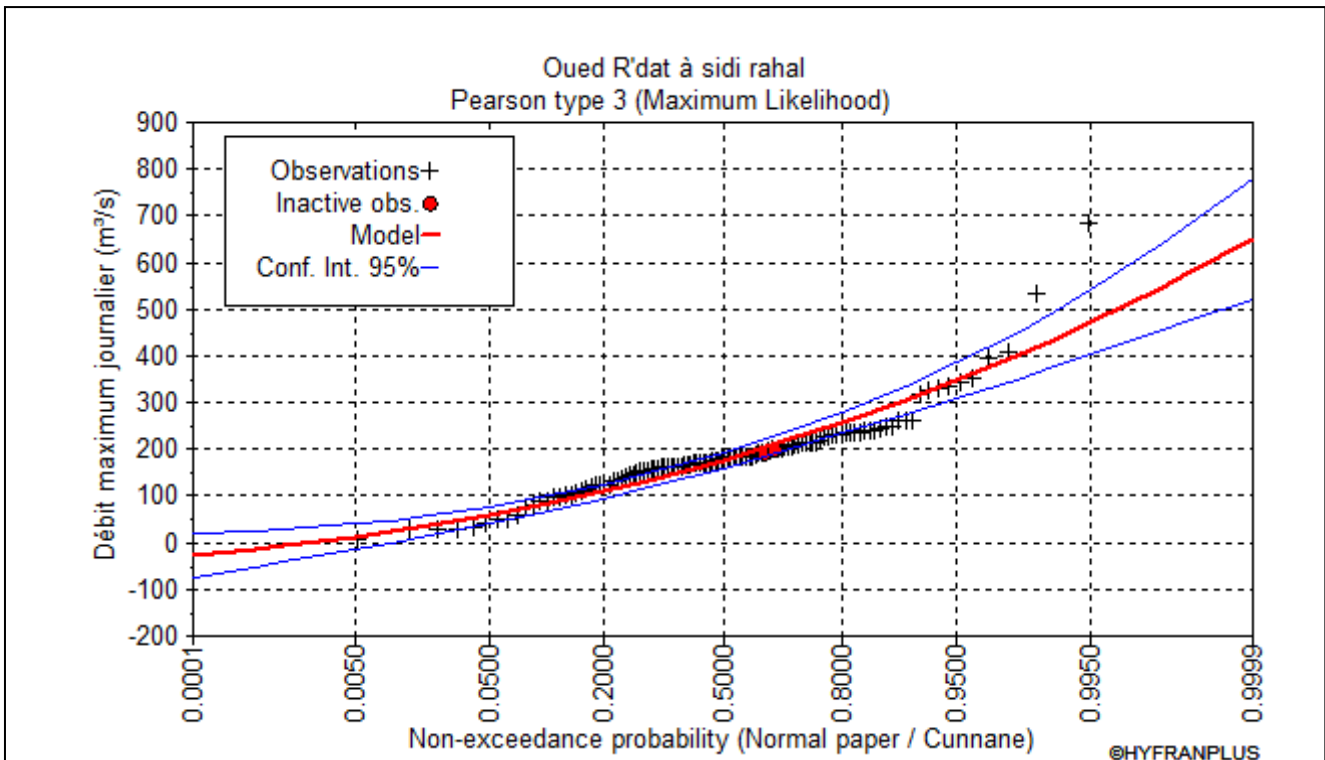
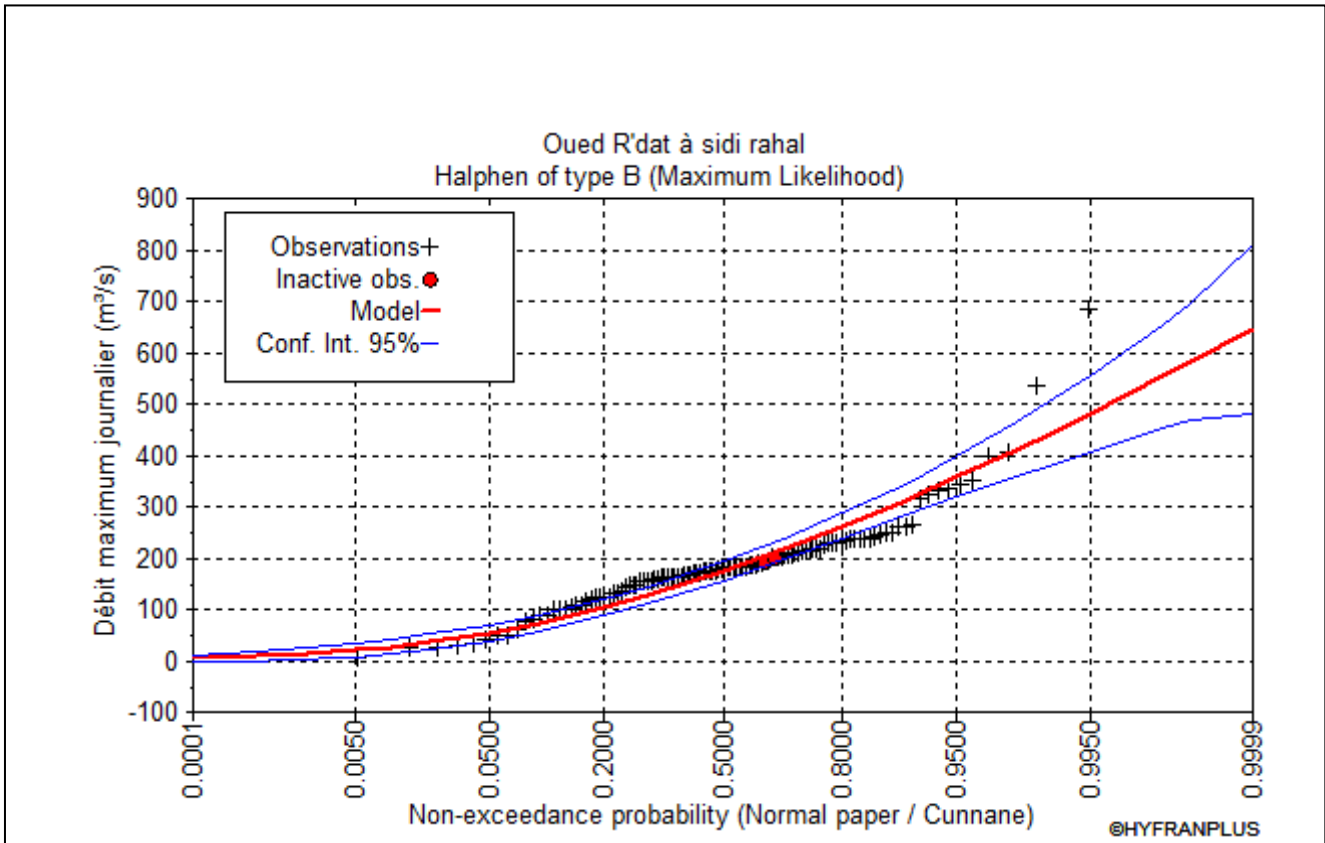


Figure 29 : ajustement graphique des débits maxima annuels

2.2) Méthode numérique (analyse statistique)

Les critères d'information Bayésien (BIC) et d'Alkaike (AIC) permettent de comparer le degré d'ajustement des différentes lois aux données disponibles. Les meilleurs ajustements correspondent aux plus faibles valeurs de ces deux critères.

Les tableaux suivants montrent les valeurs de BIC et AIC des différentes lois utilisées.

Model	BIC	AIC
Gumbel (Maximum Likelihood)	1346.755	1341.283
Pearson type 3 (Maximum Likelihood)	1352.463	1344.254
Weibull (Maximum Likelihood)	1356.180	1350.708
Halphen of type B (Maximum Likelihood)	1360.173	1351.965
Log-Pearson type 3 (Méthode SAM)	N/D	N/D
Pareto (Method of moments)	N/D	N/D

Ajustements numériques des lois pour la période de 20 ans

Model	BIC	AIC
Gumbel (Maximum Likelihood)	1346.755	1341.283
Pearson type 3 (Maximum Likelihood)	1352.463	1344.254
Weibull (Maximum Likelihood)	1356.180	1350.708
Halphen of type B (Maximum Likelihood)	1360.173	1351.965
Log-Pearson type 3 (Méthode SAM)	N/D	N/D
Pareto (Method of moments)	N/D	N/D

Ajustements numériques des lois pour la période de 50 ans

Model	BIC	AIC
Gumbel (Maximum Likelihood)	1346.755	1341.283
Pearson type 3 (Maximum Likelihood)	1352.463	1344.254
Weibull (Maximum Likelihood)	1356.180	1350.708
Halphen of type B (Maximum Likelihood)	1360.173	1351.965
Log-Pearson type 3 (Méthode SAM)	N/D	N/D
Pareto (Method of moments)	N/D	N/D

Ajustements numériques des lois pour la période de 100 ans

Graphiquement et si on se base sur le critère visuel on trouve que les lois de Halphen, Weibull, Pearson et Gumbel sont les lois les plus convenables pour l'ajustement puisqu'elles donnent des meilleurs résultats.

Par contre pour les résultats d'ajustement numérique fournis par le logiciel on trouve que la loi de Gumbel est la loi la plus adaptée pour l'ajustement et l'estimation des débits maxima annuels puisqu'elle a les plus faibles valeurs enregistrées des critères AIC et BIC pour différentes périodes de retour.

De même on remarque que les débits maxima annuels pour les périodes de retour les plus élevées ajustées par les autres lois sont largement sous-estimés surtout la loi Pareto et log Pearson type 3 qui présente une limite pour les faibles probabilités.

2.3) Estimation des débits maxima annuels pour différentes périodes de retour

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

modèle	100 ans	50 ans	20 ans	10 ans
Gumbel (Maximum Likelihood)	494.009	441.000	370.261	315.610
Halphen of type B (Maximum Likelihood)	446.387	410.409	358.120	313.507
Weibull (Maximum Likelihood)	443.460	409.189	358.740	315.086
Pearson type 3 (Maximum Likelihood)	435.789	399.153	347.382	304.527
Pareto (Method of moments)	313.831	313.141	310.128	303.037
Log-Pearson type 3 (Méthode SAM)	312.935	309.882	301.710	289.332

Tableau 17 : estimation des débits de pointe selon les différentes lois d'ajustements

On constate d'après le tableau que les résultats des débits estimés pour les grandes périodes de retour sont très variables d'une loi à l'autre, tandis que pour les faibles périodes de retour ces variations sont minimes.

Pour la loi de Pareto et log Pearson type 3 on remarque que les résultats des débits de pointe de différentes périodes de retour sont surestimés comparés aux autres lois.

2.4) critères de la loi la d'ajustement la mieux adaptée pour l'estimation

	caractéristiques de la population	Caractéristiques de l'échantillon
Minimum	0	5
Maximum	314	685
Moyenne	186	186
Ecart type	94,2	94,2
Médiane	199	178
Coefficient de variation	0,507	0,507
Coefficient d'asymétrie	-0,331	1,82
Coefficient d'aplatissement	2,02	10,1

Tableau 18 : Statistiques descriptives de débit maximal annuel à la station De Sidi Rahal

Les données fournies par les graphes et les critères BIC et AIC ne sont pas très exactes pour le choix de la loi la plus convenable pour l'ajustement. Raison pour laquelle on a recours au tableau suivant qui donne une comparaison entre les caractéristiques de la distribution selon la loi et les caractéristiques statistiques de l'échantillon.

Le tableau suivant montre que la loi la mieux adaptée pour l'estimation des débits de pointe est la loi Pareto, puisque les caractéristiques de la distribution selon cette loi sont semblables aux caractéristiques statistiques (moyenne, écart-type, et coefficient de variation) de l'échantillon. Mais le problème qui se pose c'est que les débits de période de retour donnés par ce logiciel sont très sous-estimés, surtout que ce type a connaît des débits très élevés par rapport à ceux estimés, en plus de celui de maximum qui est très différent.

Pour confirmer la sous-estimation des débits fournis par le logiciel, on procède à une comparaison entre ces débits estimés par la loi du logiciel et ceux estimés par la méthode empirique en prenant comme exemple la loi de Gumbel.

Pour la méthode des crues, on prend les débits maximaux annuels, en les classant par ordre décroissant, en attribuant à chaque classe un rang (R) et une fréquence expérimentale (F) avec $F = (R - 0,5) / n$. Avec le nombre de données. Sa fréquence au non dépassement notée

$FND = (1 - F)$. L'équation de la droite de Gumbel s'écrit comme suit : $y = a(Q - Q_0)$

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

année	Q max	R	F	FND	y
1981/82	685,000	1	0,014285714	0,985714286	4,2413095
1994/95	534,000	2	0,042857143	0,957142857	3,128061585
1995/96	407,300	3	0,071428571	0,928571429	2,602232166
1987/88	397,000	4	0,1	0,9	2,250367327
1986/87	351,000	5	0,128571429	0,871428571	1,983249003
1989/90	345,000	6	0,157142857	0,842857143	1,766338547
1988/89	325,000	7	0,185714286	0,814285714	1,582581914
1999/00	250,800	8	0,214285714	0,785714286	1,422286137
2003/04	236,000	9	0,242857143	0,757142857	1,279403035
2005/06	236,000	10	0,271428571	0,728571429	1,14989629
1997/98	216,000	11	0,3	0,7	1,030930433
1996/97	212,000	12	0,328571429	0,671428571	0,920430187
1979/80	210,000	13	0,357142857	0,642857143	0,816823857
1980/81	210,000	14	0,385714286	0,614285714	0,718885331
1970/71	201,600	15	0,414285714	0,585714286	0,62563214
1977/78	160,200	16	0,442857143	0,557142857	0,536256949
1990/91	146,200	17	0,471428571	0,528571429	0,450079708
1993/94	132,600	18	0,5	0,5	0,366512921
1971/72	125,300	19	0,528571429	0,471428571	0,285035337
1991/92	125,200	20	0,557142857	0,442857143	0,205170983
1984/85	109,600	21	0,585714286	0,414285714	0,126471331
1998/99	107,000	22	0,614285714	0,385714286	0,048498912
1973/74	103,000	23	0,642857143	0,357142857	-0,029189236
1978/79	87,800	24	0,671428571	0,328571429	-0,107059994
1975/76	87,200	25	0,7	0,3	-0,185626759
2002/03	82,260	26	0,728571429	0,271428571	-0,265479609
1983/84	77,000	27	0,757142857	0,242857143	-0,347328732
1972/73	60,400	28	0,785714286	0,214285714	-0,432071362
1985/86	49,800	29	0,814285714	0,185714286	-0,520902215
1976/77	49,300	30	0,842857143	0,157142857	-0,615509894
2004/05	41,000	31	0,871428571	0,128571429	-0,718459438
1974/75	35,700	32	0,9	0,1	-0,834032445
2000/01	29,500	33	0,928571429	0,071428571	-0,970421781
1992/93	27,600	34	0,957142857	0,042857143	-1,147365294
2001/02	27,000	35	0,985714286	0,014285714	-1,44656486
1982/83	5,480	36	0,986	0,014	-1,451308851

Pour calculer les paramètres d'échelle et de forme qui permettent d'avoir l'équation de 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 : $Q_0 = Q_{\text{moy}} - (1/a * 0.577)$ (Q_{moy} est la moyenne des crues).

D'après ces paramètres on peut écrire l'équation de Gumbel :

$$y = 0.0084Q - 0.93$$

Après avoir trouvé l'équation de la droite de Gumbel, on peut calculer les débits estimés empiriquement par cette loi et les comparer par les débits estimés par la même loi donnés par le logiciel HYFRAN.

Pour calculer les quantiles (crue centennale, cinquantennale, et décennale...), on peut utiliser soit le graphe, soit la méthode de l'équation de Gumbel $y = 0.0084Q - 0.93$ et la fréquence au non dépassement $y = e^{-e^{-y}}$

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

		méthode empirique (m3/s)	débits estimé par le logiciel (m3/s)
10	2,25	378,5714286	315,61
20	2,97	464,2857143	370,261
50	3,9	575	441
100	4,6	658,3333333	494
1000	6,9	932,1428571	670

Tableau19 : Débits estimés par la loi de Gumbel empiriquement et par le logiciel HYFRAN

La comparaison entre les débits estimés par la méthode empirique et ceux estimés par le logiciel HYFRAN par une même loi (Gumbel) a permis de déduire que ce logiciel sous-estime beaucoup les débits de pointe, c'est un logiciel théorique qui ne peut pas être utilisé dans un milieu semi aride caractérisé par des débits violents, surtout que ces débits de pointe des périodes de retour importantes sont pris en considération dans les aménagements.

**Quatrième partie : L'analyse des impacts
environnementaux de l'hydrologie du R'dat sur le
milieu et les mesures de protection**

A) Les conséquences des crues sur le milieu aval et mesures de protection

L'étude de l'historique du bassin versant du R'dat a montré l'existence des crues violentes avec des temps de montée très court tel que la crue de 1965/66 (temps de montée de l'ordre d'une heure).

Une crue de telle violence peut être accompagnée par un écoulement de sédiments, des troncs d'arbres, et des blocs surtout que le bassin est constitué d'une partie importante des terrains tendres et meubles du permotriassien. Une fois ces matériaux transportés atteignent certains passages étroits, ils peuvent jouer le rôle d'un barrage naturel que s'il cède il engendra une crue très importante, avec :

- Des fortes et très rapides montées des eaux ;
- De très fortes hauteurs vitesses d'écoulements ;
- Des débits solides importants ;

Les dommages engendrés par les inondations peuvent être divisés en trois catégories ; humains, matériels et environnementaux.

1) les impacts des crues en aval

1.1) Les dégâts environnementaux

- o Sur le paysage :

Le passage de crue entraîne un effondrement de la vallée de l'oued, et les terrasses cultivées, et engendre encore un recouvrement du lit de l'oued par une couche de boue. Le ruissellement provoque l'éboulement des roches gréseuses, et l'endommagement des seguias situés à l'aval du bassin versant du R'dat.

Après le passage de la crue, l'oued peut changer de direction suite à la présence des obstacles qui se trouve sur son chemin ce qui influence l'irrigation des terrasses cultivées et l'endommagement des ouvrages et les prises d'eau servant à l'alimentation du cheptel et l'irrigation.

Embâcles et débâcles : les eaux de crues chargent divers matériaux solides, obstruant ainsi le lit de l'oued en formant un barrage naturel, c'est le phénomène d'embâcle qui entraîne la formation d'un lac temporaire ou encore le changement de chenal d'écoulement. Puis l'accumulation exagérée des matériaux fait détruit le barrage : c'est le phénomène de débâcle

L'érodabilité et l'affouillement des berges : la crue cause l'effondrement des berges dans les zones fragiles, ce qui entraîne l'instabilité des rives et l'érosion des terrains riverains augmentant ainsi les risques d'exposition aux inondations.

- Sur l'agriculture :

Une crue avec un débit de pointe important engendre l'inondation des terrains agricole qui se situent en aval du bassin versant ce qui aggrave la situation et remplit ces terrains par la boue, Les cailloux et les blocs qui sont facilement déplaçables, empêchant ainsi l'exploitation de ces terrains.



Terrains agricoles endommagés par la crue

- Sur la plaine

Les eaux du bassin versant du R'dat finissent par atteindre la nappe phréatique, c'est pour cela qu'on a procédé à une étude de la qualité de ces eaux à partir d'un point de suivi des eaux de surface qui situé en aval comme le montre la carte suivante pour avoir idée sur la qualité de l'eau juste avant de s'infiltrer.

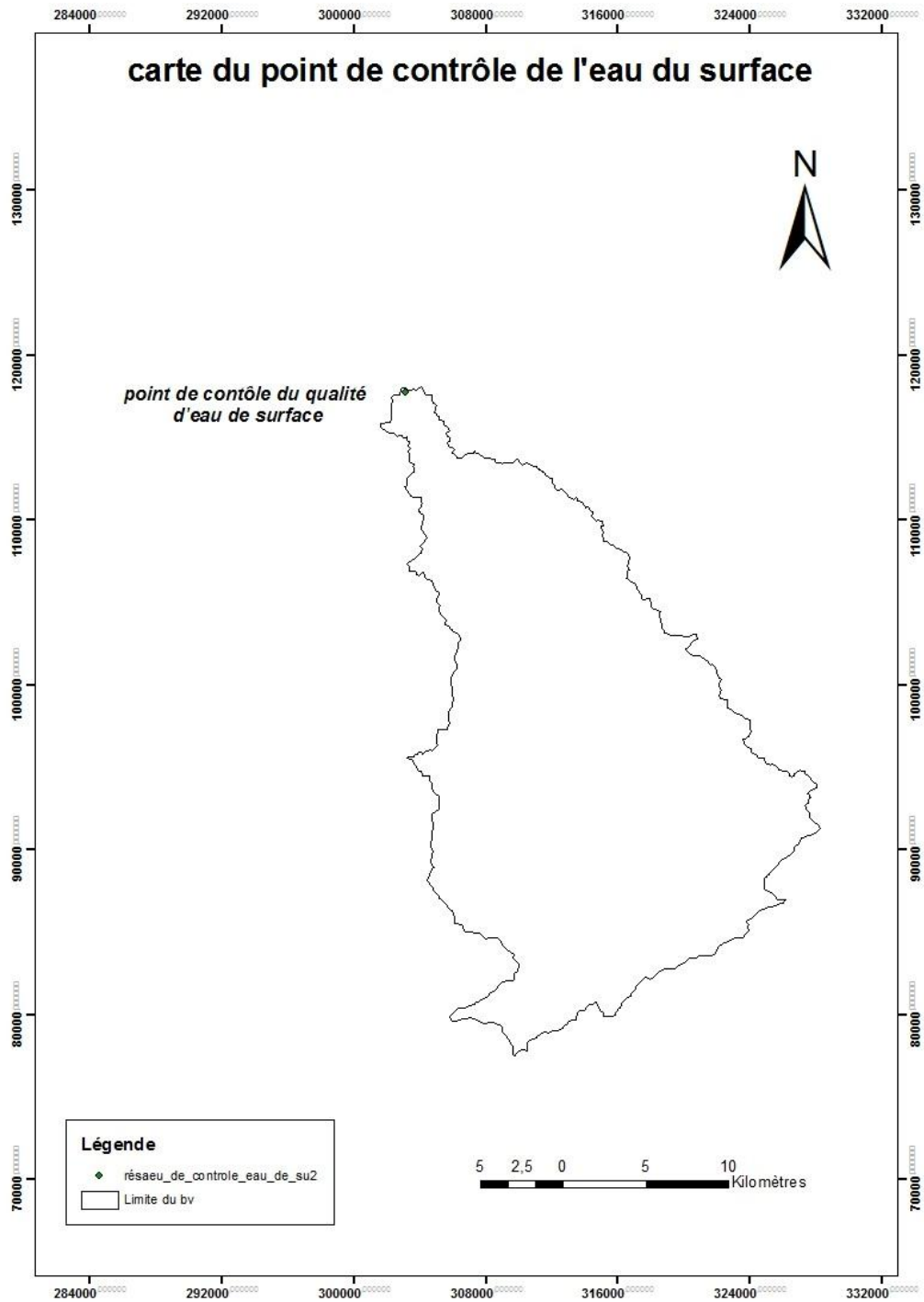


Figure 30 : carte de la localisation du point de suivi de la qualité des eaux de surface

Pour avoir une idée sur la qualité des eaux de surface de la région étudiée, qui a pour but l'évaluation de la typologie de la qualité des ressources en eau dans la zone d'étude, en précisant les paramètres de pollution responsables de la détérioration de la qualité de l'eau.

on procède à l'analyse des résultats des analyses disponibles à l'agence du bassin hydraulique du Tensift, et qui ont été réalisées en coordination avec le Laboratoire Public d'Essais et d'Etude (LPEE) avec une fréquence de quatre fois par ans selon la norme relative aux conditions de l'échantillonnage.

Les paramètres étudiés sont ceux qui renseignent sur la minéralisation et la pollution de l'eau soit par la matière organique, azotée ou phosphatée, ainsi que les paramètres qui caractérisent la qualité physique, et bactériologique.

Ces paramètres sont essentiellement ceux mesurés in situ (pH, et conductivité), puis une étude de la minéralisation des éléments majeurs (Ca, Mg, Na, K, Cl, SO₄, HCO₃ et NO₃), et en fin une étude de la qualité des eaux selon les grilles simplifiées définie par l'arrêté conjoint du Ministère de l'Equipement et du Ministère chargé de l'Aménagement du Territoire, de l'Urbanisme, de l'Habitat et de l'Environnement n° 1275-01 du 10 chaabane 1423 (17 octobre 2002).

Paramètre de qualité	O ₂ dissous (mgO ₂ /l)	DBO5 (mgO ₂ /l)	DCO (mgO ₂ /l)	NH ₄ ⁺ (mgNH ₄ ⁺ /l)	PT (mg/l)	CF (UFC/100ml)
Excellente	>7	<3	<20	<0,1	<0.1	<20
Bonne	7-5	3-5	20-25	0,1-0,5	0,1-0,3	20-2000
Moyenne	5-3	5-10	25-40	0,5-2	0,3-0,5	2000-20000
Mauvaise	3-1	10-25	40-80	2-8	0,5-3	>20000
Très mauvaise	<1	>25	>80	>8	>3	-

Tableau 20 : grille simplifié des eaux des oueds (normes marocaines)

Qualité des eaux de l'oued R'dat

1) Les paramètres mesurés in situ

a) pH

Le potentiel Hydrogène est un paramètre qui mesure l'activité en ions H₃O⁺ de l'eau. Il conditionne un nombre d'équilibres physicochimiques, et dépend, entres autres, de la température et l'origine de l'eau.

La valeur de ce paramètre pour le bassin versant du R'dat est comprise entre 8 et 8.5, ce qui veut dire que le pH est relativement neutre à légèrement alcalin. Il les normes marocaines (6.5 < pH < 9.2).

b) La conductivité

La conductivité d'une est sa capacité à conduire le courant entre deux électrodes. Cette conductivité est assurée par les éléments dissous dans l'eau, qui sont sous forme d'ions chargés électriquement. La mesure de la conductivité permet donc d'évaluer la quantité de sels dissous et donner la minéralisation totale de l'eau.

Pour le cas du bassin versant la valeur de la conductivité est de l'ordre de 2000 $\mu\text{s}/\text{cm}$ pendant la période des basses eaux et de 1000 $\mu\text{s}/\text{cm}$ pendant la période des hautes eaux. Les deux valeurs sont dans les normes marocaines (une qualité d'eau bonne vis-à-vis de la conductivité est inférieure à 1300 $\mu\text{s}/\text{cm}$, au-delà de 2700 $\mu\text{s}/\text{cm}$ la qualité est mauvaise).

c) oxygène dissous

La valeur d'oxygène dissous des eaux de l'oued R'dat est de l'ordre de 6 mg/l, donc une bonne qualité.

2) La minéralisation

La projection des analyses des eaux de l'oued R'dat sur le diagramme de piper montre que ces eaux sont projetées dans le faciès chloruré sodique et sulfato potassique, qui présente la qualité d'eau la plus dégradée. Il caractérise les eaux situées en aval avec une conductivité supérieure à 1000 $\mu\text{s}/\text{cm}$. Il est caractérisé par des teneurs élevées en sulfate. L'origine de ces teneurs (essentiellement Cl^- , SO_4^{2-} et Na^+), serait liée à un régime d'écoulement puisque les eaux se chargent des ions en allant de l'amont à l'aval.

O2 dissous mg/l	DBO5 mg/l	DCO mg/l	NH4 mg/l	P_tot mg/l	CF /100 ml	Qualité de l'eau
5,4	10	48	3,24	0,844	$3,2 \cdot 10^4$	Très mauvaise

Tableau 21 : qualité globale des eaux de surface du bassin versant de R'dat

La comparaison des paramètres étudiés avec les normes marocaines de qualité des eaux potables, permet de constater que cette eau est de mauvaise qualité.

Globalement on peut dire que la qualité de l'eau est mauvaise, la dégradation est de type phosphatée, puis organique, bactériologique et azotée. Ceci permet de constater que le lessivage d'engrais et les rejets liquides jouent un rôle important dans la détérioration des eaux. Surtout que les habitations et les terrains agricoles sont au bord de l'oued. Ceci peut avoir un impact direct sur la plaine du Haouz qui est drainée en grande partie par les eaux des oueds du bassin de Tensift dont R'dat fait partie.

1.2) Les dégâts humains

Parmi les dégâts, se sont les personnes de la région représentées soit par les habitants ou les estivants des hôtels qui sont surpris par la crue. Ils sont soit perdus, morts ou blessés après chaque crue qui se produit dans la région, où le changement rapide de la direction attaque les berges des cours d'eau et détruit les ouvrages situés en bordure comme le cas des habitations.

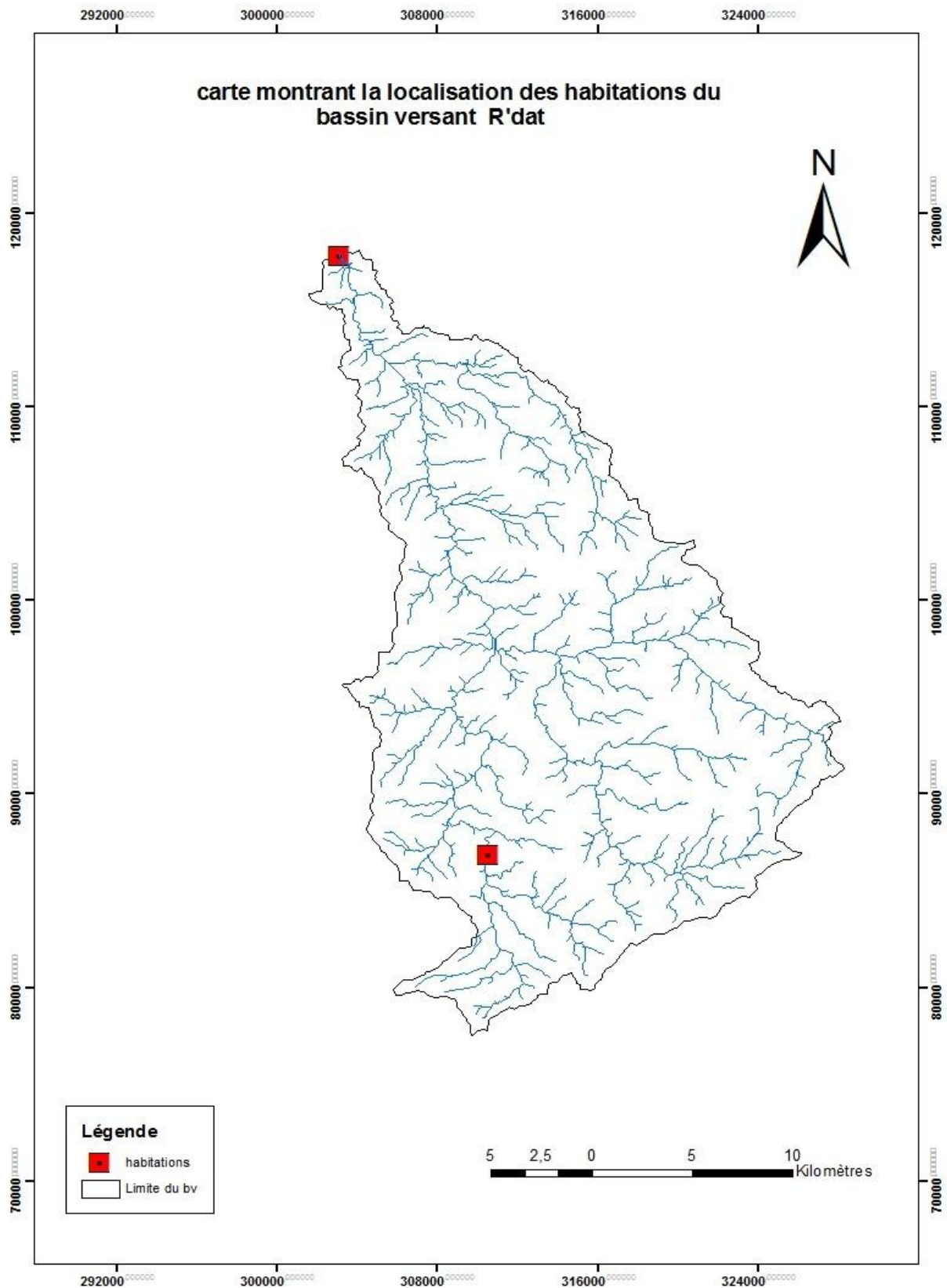


Figure 31 : carte montrant l'emplacement des habitations du bassin versant du R'dat

1.3) Les dégâts matériels

○ Sur l'économie

- Les biens publics ou privés peuvent être atteints directement par l'inondation

Les réseaux d'énergie, les poteaux d'électricité, les routes, les réseaux de communication.....etc.

- l'activité économique, notamment l'agriculture

- impacts sur les habitations, le matériel et les cultures.

○ Sur l'infrastructure

Les dégâts sur les infrastructures, ne sont pas moins importants que les autres dégâts. Le débordement de l'oued inonde la plupart des habitations qui sont construites aux débouchés des affluents, près des points d'eaux, ce qui cause l'endommagement de ces habitations et l'envasement des points d'eaux utilisés par les habitants.

Les routes, les ponts, les poteaux électriques, les hôtels, les magasins, les cafés, les restaurants dans la région peuvent être atteints au moment de la crue.

La carte suivante montre l'emplacement du réseau routier en aval, qui peut être rapidement détériorés.

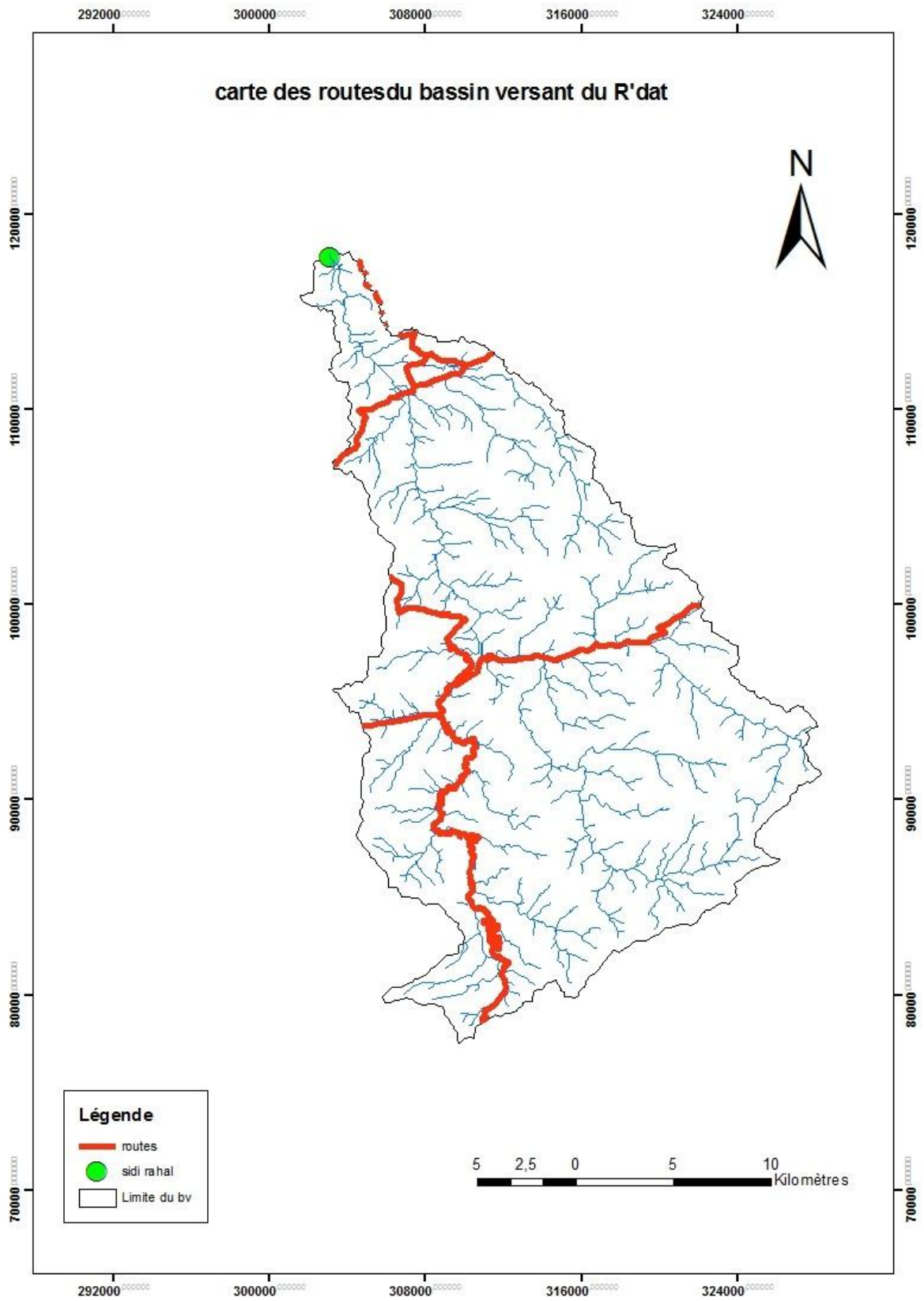


Figure 32 : carte montrant l'emplacement du réseau routier du bassin versant du R'dat

2) La protection contre les inondations

Selon le secrétariat d'état chargé de l'eau et l'environnement, la démarche à suivre dans la lutte contre les inondations se base sur trois principales démarches :

- planifier pour prévenir ;
- veiller pour prévoir
- aménager pour protéger.

Même si on ne peut pas empêcher les inondations de se produire, il est cependant possible d'en atténuer les effets ou d'en diminuer la fréquence en priorité dans les zones les plus sensibles et les plus exposées.

On distingue deux types de protection : citées par le secrétariat marocain d'état chargé de l'eau et l'environnement

1.2) la protection directe

La protection directe consiste à intervenir directement sur le site menacé par la réalisation des actions suivantes :

- Le curage qui permet une nette amélioration des conditions d'écoulement suite à l'élimination des conditions de tous les obstacles et les dépôts entravant l'écoulement des eaux dans le cours d'eau. Le débroussaillage est également nécessaire à la traversée des agglomérations pour des raisons sanitaires et en sections courantes pour diminuer la rugosité et accroître le débit.
- Le recalibrage qui permet d'élargir et d'approfondir les sections des cours d'eau pour augmenter leur capacité d'évacuation des eaux et assurer une section mouillée répondant aux critères de protections désirées.
- Le renforcement des ouvrages de franchissements des Oueds et modification de leurs caractéristiques et des systèmes existants en cas de leur insuffisance (ponts, dalots, buses...).
- La réalisation de canaux permettant de régénérer le couloir initial de l'oued.
Cette solution est indispensable dans le cas où le lit de l'oued et son domaine hydraulique a été complètement occupé par des bâtiments ou par la voirie.
- La protection des berges qui comprend tout ouvrage visant à maintenir la stabilité des terres en dépit de l'action de l'eau. Les berges sont en effet attaquées par des courants perturbateurs générés par les crues. De même, les terres glissent par suite de l'infiltration de l'eau après le retrait de la crue. La protection des berges est également nécessaire au voisinage de certains ouvrages et points critiques tels que les ponts.

-L'endiguement des oueds par la réalisation de digues qui longent le cours d'eau sur ses deux berges. Cette opération est aisément réalisable par les ressources locales en main-d'œuvre et en matériaux. Par ailleurs, ce type de protection permet en outre de réaliser une protection sélective. Il peut en effet être établi graduellement en commençant par mettre à l'abri, de la plupart des crues, la partie la plus riche et le plus peuplée des zones exposées. En contrepartie on notera que ce procédé de protection présente l'inconvénient de provoquer une surélévation souvent notable du niveau des eaux et rend en outre plus difficile le drainage des terrains bas.

2.2) la protection indirecte

la protection indirecte, consiste à intervenir plus loin des sites menacés c'est-à-dire , à l'extérieur du périmètre d'aménagement, en réalisant des ouvrages sur les cours d'eau responsables des inondations par :

- la création des canaux périphériques de dérivation des eaux vers les oueds permettent de les restituer vers des zones situées en dehors des aires à protéger. Cette déviation pourrait concerner une partie ou la totalité des eaux d'un oued vers un autre.
- La réalisation des barrages ou seuils pour stockages des crues à l'amont des zones menacées. Le volume et la capacité de stockage du barrage devront être optimisés de manière à répondre au mieux à la protection envisagée.
- L'aménagement des bassins versants contre l'érosion par la construction des seuils en gabions qui permettent la réduction des vitesses d'écoulement et les dépôts des sédiments en amont.
- Amélioration de l'environnement et création d'espaces verts

Conclusion

Le bassin versant du R'dat offre un environnement climatique et morphologique propice aux écoulements superficiels et à la naissance des crues soudaines et violentes. Il est caractérisé par un couvert végétal peu dense, des terrains peu perméables en amont et plus perméables en aval et une assez forte densité du réseau hydrographique qui est de l'ordre de 2,5 Km/Km². Ceci confère aux écoulements du bassin versant un caractère tumultueux et boueux.

Les précipitations du bassin versant sont variables dans le temps et dans l'espace, avec une moyenne annuelle d'environ 600 à 700 mm en amont et de 300 à 400 mm en aval. La valeur annuelle maximale a été enregistrée pendant l'année 1995/96 tandis que l'année sèche était 1992/93. Les variations mensuelles montrent que la période pluvieuse s'étend d'octobre à mai avec presque 90 % du total pluviométrique.

Les débits sont irréguliers durant l'année, avec un maximum aux mois du mars et avril, tandis que le cours d'eau est quasiment à sec pendant la période sèche.

Les corrélations débits/pluies annuelles, saisonnières et mensuelles ont été assez bonnes avec des coefficients de corrélation respectivement de 0,84, 0,85 et 0,86, ce qui revient à dire que les débits montre que ces derniers dépendent essentiellement des pluies. La corrélation entre les précipitations et les déficits d'écoulement annuels est également de l'ordre de 0.86 montrant ainsi une forte liaison entre ces deux paramètres. Les valeurs importantes du déficit sont dues, outre aux facteurs naturels de températures et de précipitations, aux facteurs anthropiques tels que les prélèvements d'eau par les seguias qui acheminent les eaux pour les usages domestiques et agricoles. Par ailleurs les coefficients d'écoulement semblent moins dépendre des précipitations, que de la manière avec laquelle ces dernières sont tombées. C'est à dire de l'intensité de ces précipitations. Le degré de liaison entre les deux paramètres est de l'ordre de 0,64.

Pour l'écoulement extrême, l'étude dynamique des crues de l'oued a montré l'existence de deux types de crues : simples et complexes. Elles surviennent principalement du mois novembre à mars avec 60% du total annuel. Le temps de montée le plus fréquent est situé dans l'intervalle de temps de 4 à 10 heures ; tandis que les temps de base est généralement compris entre 10 et 20 heures. Ces crues soudaines et de courte durée causent souvent des dégâts importants.

Sur le plan de l'analyse fréquentielle, les débits maxima annuels et les précipitations journalières maximales ont été soumis à des ajustements à certaines lois mathématiques. La loi la mieux adaptée à l'ajustement est la loi Pareto selon les critères de choix du logiciel, mais son problème c'est que ses estimations sont limitées aux événements de grandes fréquences. Par ailleurs, la comparaison des pointes de débits estimées par cette loi et celles estimées par la méthode manuelle de la loi Gumbel a montré que les résultats du logiciel sont très sous-estimés. C'est pourquoi, cette loi ne pourrait pas être adapté au contexte de notre zone d'étude pour l'estimation des débits de faible fréquence.

Sur le plan des impacts sur le milieu naturel, ces crues violentes sont dommageables sur l'environnement, sur le capital humain, sur les infrastructures et sur l'économie en général. Il faut donc faire face à ce risque naturel par la prévention, la prévision et la protection.

A cet effet, deux types de protection ont été mis en place. Les protections directes telles que le curage, Le renforcement des ouvrages de franchissements de l'oued, le recalibrage, la réalisation de canaux permettant de régénérer le couloir initial de l'oued, la protection des berges et l'endiguement de oued ; et les protections indirectes telles que la création des canaux périphériques de dérivation des eaux vers les oueds, l'amélioration de l'environnement et création d'espaces verts, l'aménagement des bassins versants contre l'érosion par la construction des seuils en gabions ou la réalisation des barrages ou seuils pour le stockages des crues à l'amont des zones menacées.

Bibliographie

- Moussyih I. et Barry Mamadou H. (2003) : Les bassins versants du Zat et du R'dat : Cartographie thématique et bilans hydrologiques. Mémoire de fin d'études, Maîtrise Es Sciences Spécialisées Métallogénie. FSTG, Marrakech 60p.

- Rmich, A., Hafoud, N. (2004). Relation entre les précipitations et les débits au niveau du bassin versant de la Rhéraya de 1962 à 2003. Université Cadi Ayyad, FST Marrakech 55p.

- Saadi Z. et Baou A. (2005) : Conséquences géographiques et socio-économiques des inondations dans la vallée de l'Ourika (Haut Atlas, Maroc). Exemple des crues du 17/08/1995 et du 28/10/1999. (Mémoire de fin d'études, Maîtrise Es Sciences et Techniques, Faculté des Sciences et Techniques - Marrakech) 90p.

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

- Ed-Daoudi S. et Bouloumou Y. (2012) : Hydromorphologie du bassin versant d'Issil et crues de l'oued en amont de Marrakech. Mémoire de fin d'études, licence Es Sciences et Techniques, Faculté des Sciences et Techniques, Marrakech 56p.

- Agence du Bassin Hydraulique de Tensift, (non daté) le bassin versant de l'oued R'dat, note interne, 23 p.

- Ministère de l'Equipement et du Ministère chargé de l'Aménagement du Territoire, de l'Urbanisme, de l'Habitat et de l'Environnement n° 1275-01 du 10 chaabane 1423 (17 octobre 2002).