



UNIVERSITE CADI AYYAD
FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES

Département des sciences de la terre

Licence Eau et Environnement

Mémoire de fin d'études intitulé :

**Etude hydro-pluviométrique et estimation des débits
de pointe du bassin versant de la Rheraya (Maroc)**

Réalisé par :

- **OUAHIDY Amina**
- **CHOUKRI Maria**

Dirigé par :

- **SAIDI Mohamed El Mehdi**
- **RACHIDI Said**

Soutenu le: 15 / 02 /2018, devant le jury:

- Pr. SAIDI Mohamed El Mehdi : FST Marrakech
- Mr. RACHIDI Said : Agence Du Bassin Hydraulique du Tensift.
- Pr. BENKADDOUR Abdelfattah : FST Marrakech

:

**Année universitaire
2017/2018**

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

{وَأَنْزَلْنَا مِنَ السَّمَاءِ مَاءً بِقَدَرٍ فَأَسْكَنَّاهُ فِي الْأَرْضِ وَإِنَّا عَلَى ذَهَابٍ بِهِ لَقَادِرُونَ}

سورة المؤمنون الآية 18.

صدق الله العظيم

DEDICACES

*A cœur vaillant rien d'impossible
A conscience tranquille tout est accessible
Quand il y a la soif d'apprendre
Tout vient à point à qui sait attendre
Quand il y a le souci de réaliser un dessin
Tout devient facile pour arriver à nos fins
Malgré les obstacles qui s'opposent
En dépit des difficultés qui s'interposent
Les études sont avant tout
Notre unique et seul atout
Ils représentent la lumière de notre existence
L'étoile brillante de notre réjouissance
Comme un vol de gerfauts hors du charnier natal
Nous partons ivres d'un rêve héroïque et brutal
Espérant des lendemains épiques
Un avenir glorieux et magique
Souhaitant que le fruit de nos efforts fournis
Jour et nuit, nous mènera vers le bonheur fleuri
Aujourd'hui, ici rassemblées auprès des jurys,
Nous prions dieu que cette soutenance
Fera signe de persévérance
Et que nous serions enchantées
Par notre travail honoré*



On dédie ce travail ... 

Aux personnes qui nous ont apporté leur aide et qui
ont contribué à l'élaboration de cette mémoire ainsi
qu'à la réussite de cette formidable année universitaire.

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.

En second lieu, nous tenons à remercier notre encadrant *Mr. Mohamed El Mehdi SAIDI*, Professeur à la faculté des sciences et techniques de Marrakech, son précieux conseil et son aide durant toute la période du travail. Ainsi que pour la richesse et la qualité de son enseignement et qui déploie de grands efforts pour assurer à leurs étudiants une formation actualisée.

Un grand merci à *Mr. RACHIDI Said*, Ingénieur au service d'hydrologie à l'Agence Du Bassin Hydraulique du Tensift pour avoir accepté de nous soutenir dans l'aventure de cette mémoire. Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Nous ne pourrions pas terminer sans remercier *Mlle Yamina BOURGEOINI*, responsable de filière eau et environnement et enseignante à la faculté des sciences et techniques de Marrakech.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.



Sommaire

Liste des figures.....	Erreur ! Signet non défini.
Liste des tableaux.....	Erreur ! Signet non défini.
Introduction générale	Erreur ! Signet non défini.
Présentation de l'ABHT	Erreur ! Signet non défini.
Partie 1 : Présentation du bassin versant de RHERAYA	Erreur ! Signet non défini.
Introduction.....	Erreur ! Signet non défini.
I. Situation géographique.....	Erreur ! Signet non défini.
II. Géologie et lithologie du bassin versant de RHERAYA	Erreur ! Signet non défini.
III. Végétation.....	Erreur ! Signet non défini.
IV. Climat	Erreur ! Signet non défini.
Partie 2 : Etude hydrologique du bassin versant de RHERAYA	Erreur ! Signet non défini.
Introduction.....	Erreur ! Signet non défini.
I. Caractéristiques physiques du bassin versant de RHERAYA	Erreur ! Signet non défini.
II. Analyse pluviométrique et hydrométrique.....	Erreur ! Signet non défini.
a) La pluviométrie.....	Erreur ! Signet non défini.
b) Hydrométrie	Erreur ! Signet non défini.
III. Calcul des débits de pointe	Erreur ! Signet non défini.
Introduction.....	Erreur ! Signet non défini.
a) Méthodologie	Erreur ! Signet non défini.
b) Méthodes usuelles	Erreur ! Signet non défini.
c) Ajustement Statistique	Erreur ! Signet non défini.
d) Débits par FRONCO-RODIER.....	Erreur ! Signet non défini.
Conclusion générale	Erreur ! Signet non défini.
Références bibliographiques.....	Erreur ! Signet non défini.
Annexes	Erreur ! Signet non défini.

Liste des figures

Figure 1 : Photographie de L'ABHT.	9
Figure 2 : Zone d'action de L'ABHT.	11
Figure 3 : Bassin versant de RHERAYA.	13
Figure 4 : Situation géographique du bassin versant de RHERAYA.	14
Figure 5 : Carte géologique du bassin versant de RHERAYA.	16
Figure 6 : Exemple d'indice de compacité (MUSY, 2001).	21
Figure 7 : Carte du réseau hydrographique du bassin versant de RHERAYA.	23
Figure 8 : Courbe hypsométrique du bassin versant de RHERAYA.	25
Figure 9 : Carte hypsométrique du bassin versant de RHERAYA.	26
Figure 10 : Carte des pentes du bassin versant de RHERAYA.	28
Figure 11 : Les pluies moyennes mensuelles de la station de TAHANAOUT (1968/69 à 2015/16).	30
Figure 12: Les pluies moyennes saisonnières de la station de TAHANAOUT (1968/69 à 2015/16).	31
Figure 13 : Les pluies moyennes annuelles de la station de TAHANAOUT (1968/69 à 2015/16).	31
Figure 14 : Les débits moyens mensuels de la station de TAHANAOUT (1961/62 à 2015/16).	32
Figure 15 : Les débits moyens saisonniers de la station de TAHANAOUT (1961/62 à 2015/16).	33
Figure 16 : Les débits moyens annuels de la station de TAHANAOUT (1961/62 à 2015/16). .	33
Figure 17 : Ajustement graphique des débits maximaux annuels par la loi GEV.	42
Figure 18 : Ajustement graphique des débits maximaux annuels par la loi Lognormale (3 param.).	43
Figure 19 : Ajustement graphique des débits maximaux annuels par la loi des Fuites.	43

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Occupation des sols dans le bassin versant de RHERAYA.	17
Tableau 2 : Récapitulatif des caractéristiques physiques du bassin versant de RHERAYA.....	29
Tableau 3 : Récapitulatif du temps de concentration du bassin versant de RHERAYA selon les différentes formules.....	36
Tableau 4 : Débits obtenus par la formule MALLET-GAUTHIER.....	37
Tableau 5 : Débits obtenus par la formule de FULLER II.	38
Tableau 6 : Paramètres régionaux de Hazan Lazareviç.....	38
Tableau 7 : Débits obtenus par la formule de Hazan Lazareviç.	39
Tableau 8 : Coefficients de Montana à Marrakech ville.	40
Tableau 9 : Les intensités calculées dans chaque temps de retour T.	41
Tableau 10 : Coefficients de ruissellement par SETRA.....	41
Tableau 11 : Débits calculés par la méthode rationnelle.....	41
Tableau 12 : Ajustements numériques des lois aux débits maximaux annuels pour une période de 100 ans.....	44
Tableau 13 : Débits retenus par la loi de GEV.....	44
Tableau 14 : Débits calculés par FRONCO-RODIER.	46
Tableau 15 : Récapitulatif des débits de pointe des crues pour une période de retour T.	46

INTRODUCTION GENERALE

Les ressources en eau, constituent un élément fondamental et nécessaire au maintien et au développement de toute activité humaine, économique et sociale. Cependant, le succès de tels projets passe nécessairement à une bonne connaissance du régime hydro-pluviométrique.

Le cours d'eau de la RHERAYA est un affluent atlasique rive gauche de l'oued Tensift. Il est constitué par la confluence de Assif Iminene et assif N'Aït Mizaine qui prennent naissance dans le haut Atlas à environ 3600 m d'altitude. Il traverse trois communes rurales: My Brahim, Asni et Imlil. Les principaux villages implantés le long de cet oued sont : Asselda, Tamgounsi, tagadirt, Taghart, Tinitme et Armed. Ce bassin est caractérisé par des altitudes très élevées (1041-4118) et des degrés des pentes importantes varient de 0 à 67, laissant présager une fortes érosion et un relief très accidenté. Les précipitations devraient être solides sur les hauteurs impliquant un écoulement plus important lors de la fonte des neiges.

L'objectif de cette étude est de dégager sur la base des données climatologiques et hydrologiques disponibles, les aspects quantitatifs et statistiques des précipitations et des écoulements sur le bassin versant de l'oued RHERAYA. La démarche suivie repose sur deux parties :

- La première partie : présente des données générales sur le bassin de RHERAYA de point de vue géographique et climatique ainsi que sa végétation et son contexte géologique qui est un élément déterminant dans la compréhension des mécanismes d'écoulement superficiels dans ce bassin.
- La deuxième partie : est consacrée à la délimitation du bassin versant en utilisant un logiciel de SIG approprié (système d'information géographique) pour déterminer les caractéristiques physiques du bassin versant (surface, morphologie, forme, topographie, relief). La partie s'intéresse aussi au traitement des données hydro-pluviométriques sur une durée de plus de 40 ans. Pour la caractérisation hydrologique, on déterminera les temps de concentration et les débits de pointe des crues estimés par des méthodes usuelles (empiriques et rationnelle), l'ajustement statistique et la transposition des débits.

Présentation de l'ABHT

L'Agence du Bassin Hydraulique de Tensift (ABHT) est créée en application de la loi 10-95 sur l'eau conformément à l'article 20, et instaurée par le décret N° 2-00-479 du 14 Novembre 2000, l'Agence du bassin hydraulique du Tensift a démarré effectivement son action en Avril 2002.

Organisme public doté de la personnalité morale et de l'autonomie financière, l'Agence du bassin hydraulique du Tensift traduit la politique de décentralisation de la gestion de l'eau induite par le nouveau concept de la gestion intégrée des ressources en eau à l'échelle du bassin hydraulique, et constitue ainsi un organisme fédérateur des acteurs concernés par la gestion de l'eau au niveau régional.

Gérée par un Conseil d'Administration présidé par le Ministre de l'Aménagement du Territoire de l'Eau et de l'Environnement.



Figure 1 : Photographie de L'ABHT.

L'Agence du bassin est chargée des missions suivantes:

- ☐ Elaborer un plan directeur d'aménagement intégré des ressources en eau relevant de sa zone d'action.
- ☐ Veiller à l'application du plan directeur d'aménagement intégré des ressources en eau à l'intérieur de sa zone d'action.
- ☐ Délivrer les autorisations et concessions d'utilisation du domaine public hydraulique prévues dans le plan directeur d'aménagement intégré des ressources en eau de sa zone d'action.
- ☐ Fournir toute aide financière et toute prestation de service, notamment d'assistance technique, aux personnes publiques ou privées qui en feraient la demande, soit prévenir la pollution des ressources en eau, soit en vue d'un aménagement ou d'une utilisation du domaine public hydraulique.
- ☐ Réaliser toutes les mesures piézométriques et de jaugeages ainsi que les études hydrologiques, hydrogéologiques, de planification et de gestion de l'eau tant au plan quantitatif que qualitatif.
- ☐ Réaliser toutes les mesures de qualité et d'appliquer les dispositions de la présente loi et des lois en vigueur relatives à la protection des ressources en eau et à la restauration de leur qualité, en collaboration avec l'autorité gouvernementale chargée de l'environnement.
- ☐ Proposer et exécuter les mesures adéquates, d'ordre réglementaire notamment, pour assurer l'approvisionnement en eau en cas de pénurie d'eau déclarée.
- ☐ Gérer et contrôler l'utilisation des ressources en eau mobilisées.
- ☐ réaliser les infrastructures nécessaires à la prévention et à la lutte contre les inondations.
- ☐ Tenir un registre des droits d'eau reconnus et des concessions et autorisations de prélèvement d'eau accordées.

Administrativement, cette zone s'étend sur huit préfectures et provinces, elle couvre totalement la préfecture de Marrakech et les provinces d'Al Haouz, de Chichaoua, d'Essaouira et de Youssoufia et partiellement les provinces de Rehamna, de Kelaâ des Sraghnas et de Safi. (Figure 2)

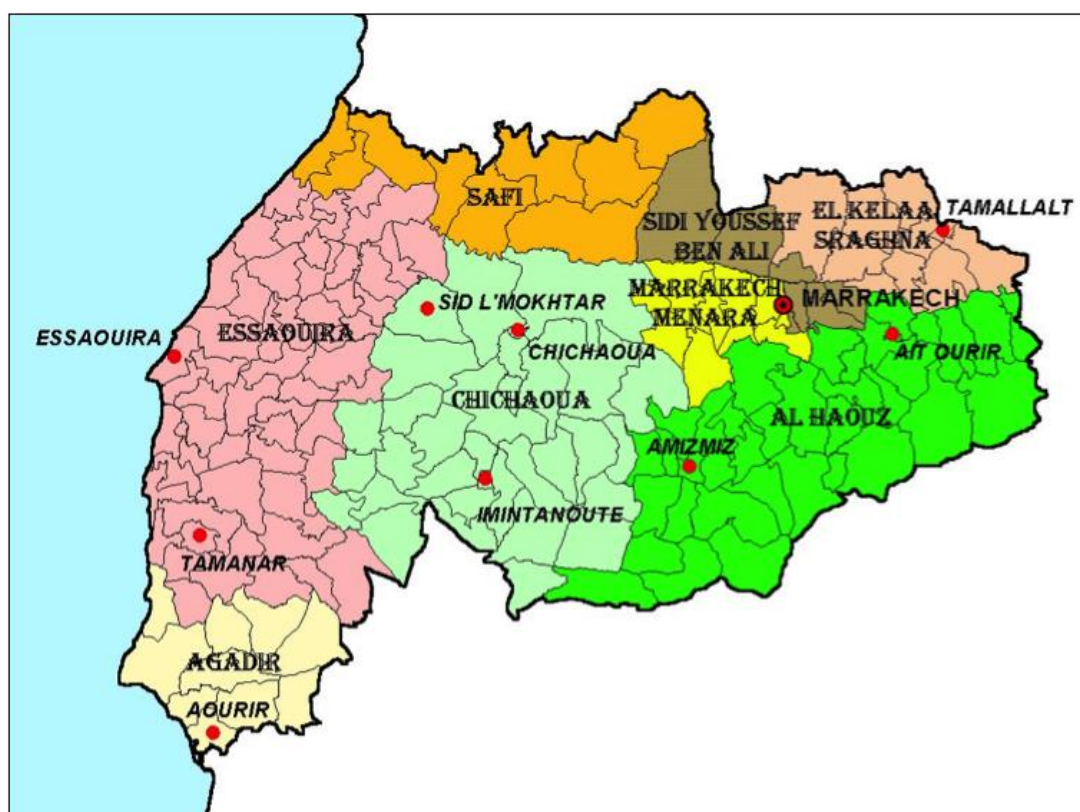


Figure 2 : Zone d'action de L'ABHT.

Partie 1: PRESENTATION DU BASSIN VERSANT

Introduction :

Le bassin versant fonctionne comme un collecteur chargé de recueillir les pluies et de les transformer en écoulement à l'exutoire. Cette transformation ne va pas sans pertes en eau, lesquelles dépendent des conditions climatologiques régnant sur le bassin, mais aussi des caractéristiques physiques de ce dernier.

Cette idée nous laisse à dire que le bassin versant peut être caractérisé par sa morphologie (forme, relief, réseau de drainage), la nature du sol, la couverture végétale et le climat.

Dans cette partie nous allons étudier la situation géographique du bassin versant de RHERAYA. C'est à partir de cette étude qu'on pourra avoir une idée qualitative du mode des différents facteurs qui transforment les eaux de pluies en écoulement et en fin, on pourra établir un certain nombre d'indices pouvant servir comme point de repère dans la caractérisation de ce bassin versant (Figure 3).



Figure 3 : le cours d'eau de l'oued RHERAYA.

I. Situation Géographique :

Le bassin versant du RHERAYA est situé dans le Haut Atlas de Marrakech, entre les latitudes 30°10' et 30°20' les longitudes 7°40' et 8° Ouest.

Il est localisé à une quarantaine de kilomètres au sud de Marrakech, dans le massif de Toubkal (Figure 4).

Il comprend une grande partie des plus hauts sommets de l'Afrique du Nord, en particulier le plus élevé d'entre eux, le JBEL Toubkal (4165 m). Son exutoire principal situé à quelques Kilomètres au Sud de la ville de TAHANAOUT sur Oued RHERAYA qui résulte de conflit de deux oueds ASSIF IMINENE et ASSIF AIT MIZAINÉ.

Administrativement, le RHERAYA s'étend sur les territoires des huit communes rurales suivantes : TAHANAOUT, MOULAY BRAHIM, OUAZGUITA, OUIRGANE, ASNI, OUKAIMEDEN, IMGDAL et IJOUKAK.

Ce bassin versant est limité au Nord par la plaine du Haouz, au Sud par le bassin d'ASSIF TIFNOUT (Haut SOUSS), à l'Est par le bassin de l'OURIKA et à l'Ouest par celui du N'Fis.

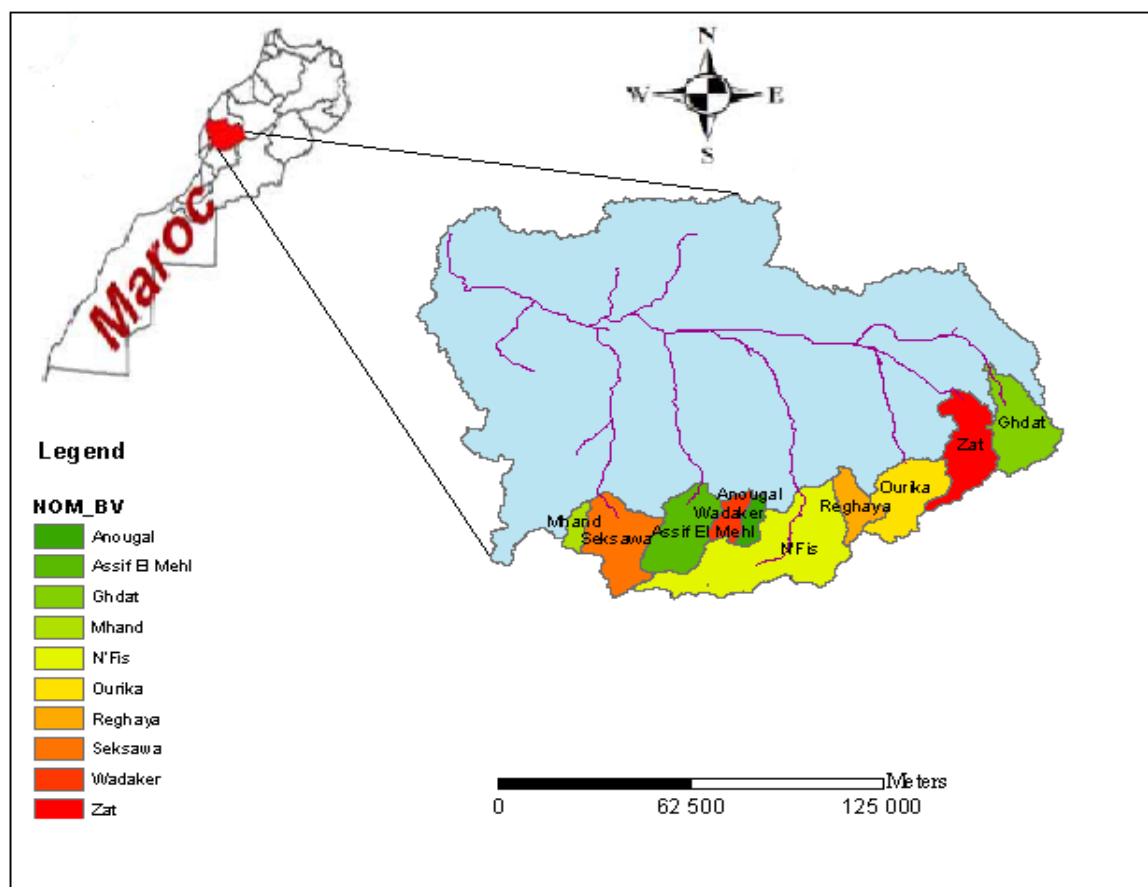


Figure 4 : Situation géographique du bassin versant de RHERAYA.

II. Géologie et lithologie du bassin versant du RHERAYA :

Le bassin du RHERAYA est situé dans le Haut Atlas central siliceux. La Figure représente la carte Géologique du bassin (Figure 5).

Trois zones géologiques se distinguent (HALOUI, 1986) :

- La zone sub-atlasique constitue la partie nord du bassin et elle est composée d'un socle rigide précambrien et paléozoïque gréseux-schisteux et calcaires, socle apparent dans les gorges de Moulay Brahim tout à fait au nord du bassin et où la station exutoire est située.
- Le *horst du RHERAYA* au Sud, constitue un bloc élevé par rapport à la zone sub-atlasique et incliné vers l'ouest. Il est composé de matériaux rocheux primaires et permo-triasiques à dominante gréseuse.

Les matériaux permo-triasiques peuvent être observés au niveau de la vallée d'IMLIL. La surface anté-permotriasique a été fossilisée sous une couverture très épaisse de dépôts détritiques.

Plus au sud dans ces vallées, les matériaux primaires précambriens constitués essentiellement de granites et des andésites sont visibles.

- la zone axiale est le bloc le plus élevé qui forme les hauts sommets du bassin. C'est surtout dans cette zone que se trouvent les affleurements de précambrien caractérisé par des andésites, rhyolites et granites qui forment les hauts sommets culminant au Jbel Toubkal.



Figure 5 : Carte géologique du bassin versant de RHERAYA.

III. Végétation :

L'occupation des sols dans la vallée se présente comme indiquée dans le tableau Ci-contre. La forêt domine une grande partie de la superficie du bassin de l'oued RHERAYA, suivi par les terrains rocheux et l'agriculture.

Tableau 1 : Occupation des sols dans le bassin versant de RHERAYA.

Occupation des sols	Superficie (km ²)
Forêts	98
Vergers	9
Agricultures	41
Pâturages / terrains nus	11
Terrains rocheux	45

IV. Climat :

Au niveau du bassin versant de la RHERAYA il y a une rareté de mesure des paramètres climatologiques.

- **Température :**

La température moyenne par exemple est prise au niveau du barrage de Lala TAKERKOUST (18,6 °C), tout comme la hauteur moyenne annuelle évaporée (1833,7 mm sur le bac Colorado).

- **Vent :**

Selon leurs directions, les vents soufflant sur le bassin versant de RHERAYA sont classés en trois types :

- Direction WNW : provenant de l'Océan atlantique, ces masses d'air en mouvement sont pourvues d'humidité considérable qu'elles vont perdre progressivement lors de l'ascendance orographique déclenchée par leur contact avec les hauts reliefs du RHERAYA. Localement, ils sont appelés «Gharbi».

- Direction SSW : d'origine continentale, ces vents sont chauds et secs, mais leurs caractéristiques peuvent être réduites avant d'atteindre la zone d'étude, durant leurs remontées sur le versant sud du Haut-Atlas par ce qu'on appelle couramment le mécanisme de Föhn.

- Direction ENE : surnommés localement « Chergui », ils sont aussi chauds et secs. En plus de ces directions majeures, la topographie accidentée du bassin contribue à l'apparition de courants locaux accentuant les problèmes d'hétérogénéité spatiale des précipitations.

**Partie 2 : Etude hydro-
pluviométrique du bassin
versant de la Rheraya**

Introduction :

L'hydrologie des cours d'eau ainsi que de leur dynamisme dépendent vivement des caractéristiques physiographiques du bassin versant correspondant. Le relief, la forme et le réseau hydrographique constituent les principaux paramètres de l'étude physique du bassin versant en vue de caractériser son comportement vis-à-vis des différentes unités géologiques qu'il traverse et de déterminer les débits de pointe des crues des différentes périodes de retour. Nous utiliserons les méthodes usuelles (Formules empiriques, méthode rationnelle), des méthodes probabilistes (*ajustement de Q_i max*) et la méthode de Franco-Rodier.

I. Caractéristiques physiques du bassin versant de RHERAYA :

a) Superficie :

La superficie du bassin versant est obtenue par planimétrie sur carte topographique ou à l'aide des logiciels de cartographie ou autres.

Superficie du bassin (km ²)	321
---	-----

b) Périmètre :

Le périmètre du bassin versant est obtenu par curvimètre sur carte ou à l'aide des logiciels informatiques.

Périmètre du bassin (km)	108.9
--------------------------	-------

c) La Longueur du cours d'eau principal :

La longueur du cours d'eau principal renseigne sur le temps de transit de l'eau pour atteindre l'exutoire.

Longueur du talweg principal (km)	33.21
-----------------------------------	-------

d) La forme :

➤ Indice de GRAVELIUS :

La forme du bassin est déterminée à l'aide de l'indice de compacité de GRAVELIUS (KG). Cet indice donne une idée sur la forme du bassin qui a une influence sur l'écoulement global du cours d'eau et surtout sur l'allure de l'hydrogramme à l'exutoire du bassin, résultant d'une pluie donnée. Il est défini comme le rapport du périmètre du bassin au périmètre du cercle ayant la même surface par la formule mathématique suivante :

$$KG = \frac{0.28 \times P}{\sqrt{S}}$$

$$\text{➤ } K_G=1.7$$

Avec :

- P : le périmètre du bassin (Km).
- S : surface du bassin versant (Km²).

Le bassin est considéré comme bien drainé si son indice de compacité tend vers 1. La (Figure 6) illustre des exemples de forme en fonction des indices de compacité.

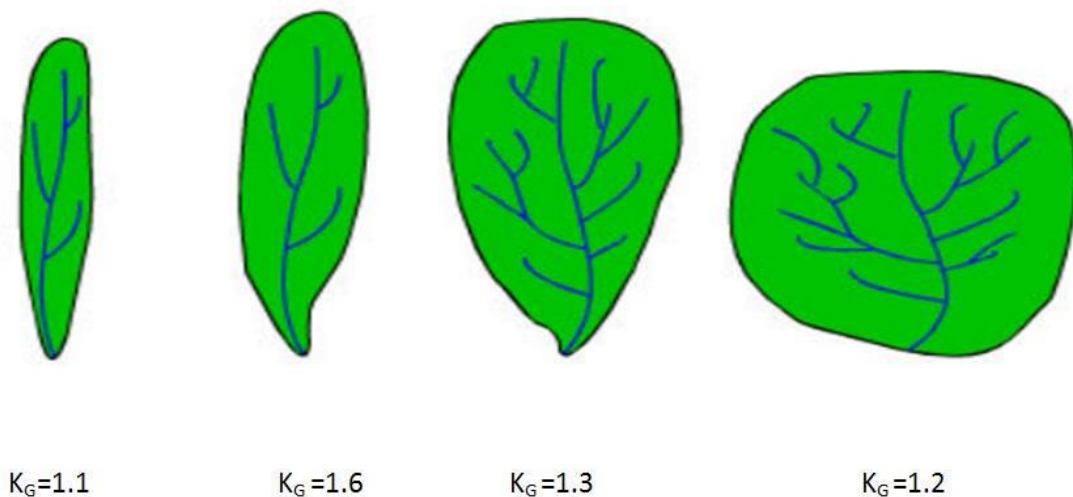


Figure 6 : Exemple d'indice de compacité (MUSY, 2001).

➤ **Indice de Horton :**

Il exprime le rapport de la largeur moyenne du BV à la longueur du cours d'eau principal.

$$k_h = \frac{S}{L_c^2}$$

➤ $K_h = 0.3$

S : surface en Km²

L_c : longueur du cours d'eau principal

Un bassin allongé présente un indice inférieur à 1.

- Pour le cas du bassin RHERAYA : P= 108,9 km et S = 321 km², ce qui conduit à un indice de compacité de GRAVELIUS est égal à 1,70 et un indice de compacité de Horton est égale à 0,3. Donc le bassin versant de RHERAYA a une forme allongée.

e) Le réseau de drainage :

Le réseau hydrographique du bassin RHERAYA est caractérisé par sa forme spécifique en «Y». (Figure 7)

Il se compose principalement de deux grandes rivières prenant naissance dans le Haut Atlas à savoir l'Oued d'IMENANE en Est et IMLIL à l'Ouest, qui vont se rejoindre en aval, pour former l'Oued de RHERAYA. A grande échelle, la ramification du réseau est plus prononcée en amont qu'en aval, vu les accidents géologiques très abondants dans les moyennes et hautes altitudes. À l'échelle des sous bassins, l'IMENANE produit la majeure partie des apports à partir de sa rive droite, alors que l'IMLIL est plus ramifié sur sa rive gauche, ainsi les crues et les inondations seront plus destructives en aval qu'en amont, à la fois suite au rassemblement des eaux de surface de tout le bassin versant et au relief aplati plutôt en aval.

En ce qui concerne la densité de drainage de RHERAYA, il vaut 0.10 km⁻¹.

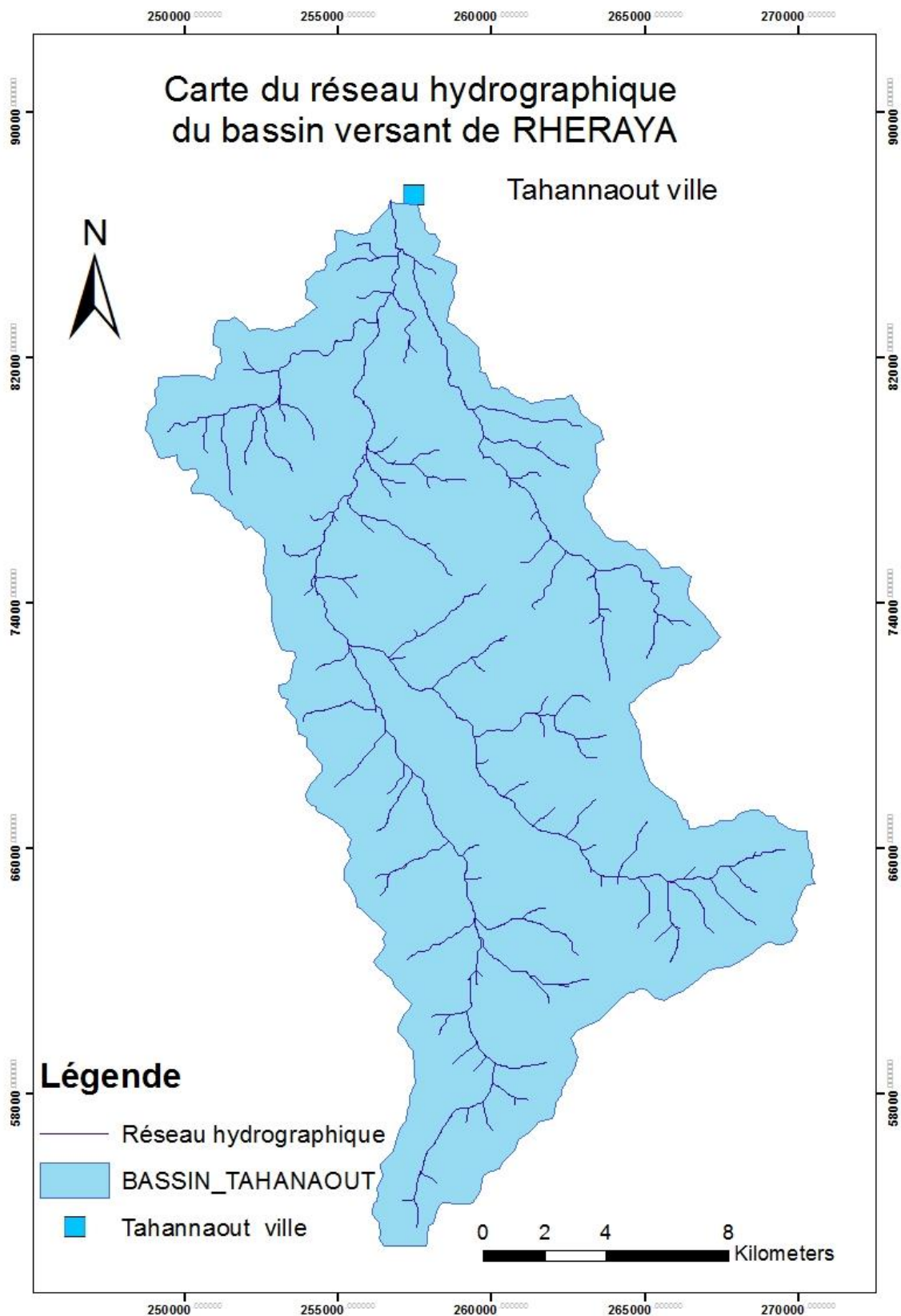


Figure 7 : Carte du réseau hydrographique du bassin versant de RHERAYA.

f) Rectangle équivalent :

La notion de rectangle équivalent a été introduite par Roche (1963) et permet de comparer d'une façon simple des bassins versants en ce qui concerne leurs caractéristiques de forme.

Le rectangle équivalent est une surface rectangulaire résultant d'une transformation géométrique du bassin réel dans laquelle on conserve la même superficie, le même périmètre (donc le même coefficient de compacité).

En y intégrant l'Indice de compacité de GRAVELIUS K_G :

$$\text{longueur :} \quad L = \frac{K_c \sqrt{S}}{1.12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_c} \right)^2} \right],$$

$$\text{largeur :} \quad l = \frac{K_c \sqrt{S}}{1.12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_c} \right)^2} \right],$$

g) Hypsométrie :

On étudie pour un bassin versant la répartition de sa surface en fonction des tranches d'altitudes fixées arbitrairement. On matérialise cette répartition par la courbe hypsométrique. (Figure 8)

Dans le bassin de RHERAYA les tranches d'altitudes sont comprises entre 1041 et 4118 m.

Ces altitudes sont visiblement influencées par la forme en « Y » du réseau Hydrographique. Les altitudes les Plus dominantes sont les moyennes et les Faibles occupants ainsi environ 70 % de la Surface. (Figure 9)

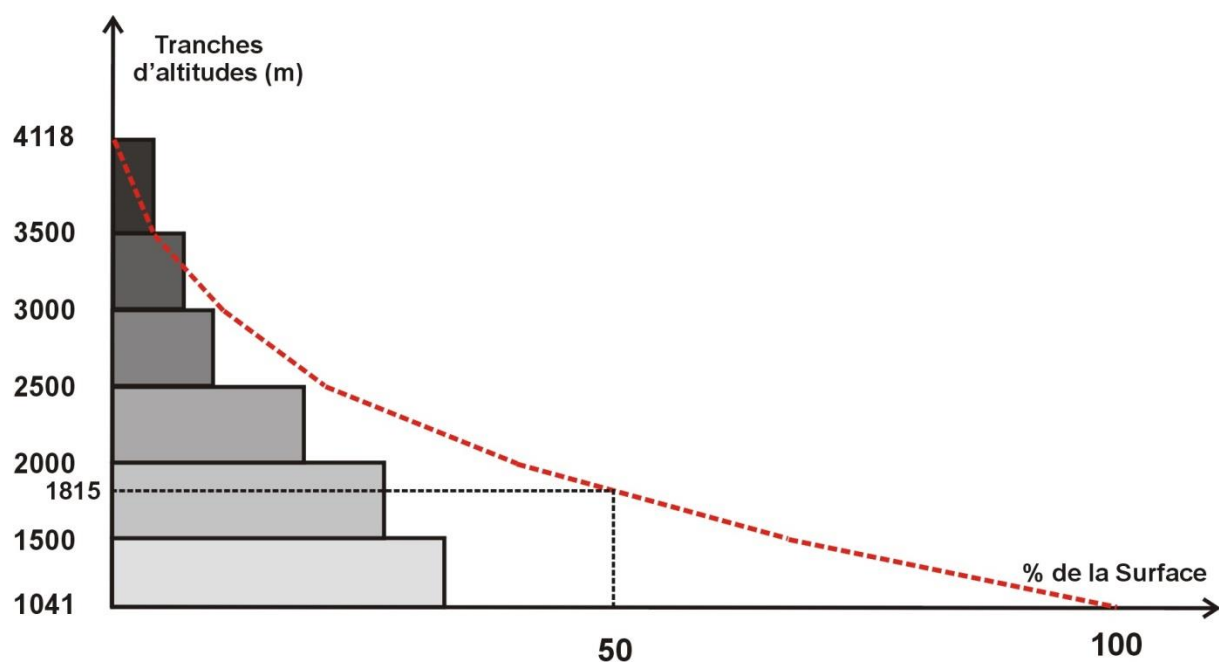


Figure 8 : Courbe hypsométrique du bassin versant de RHERAYA.

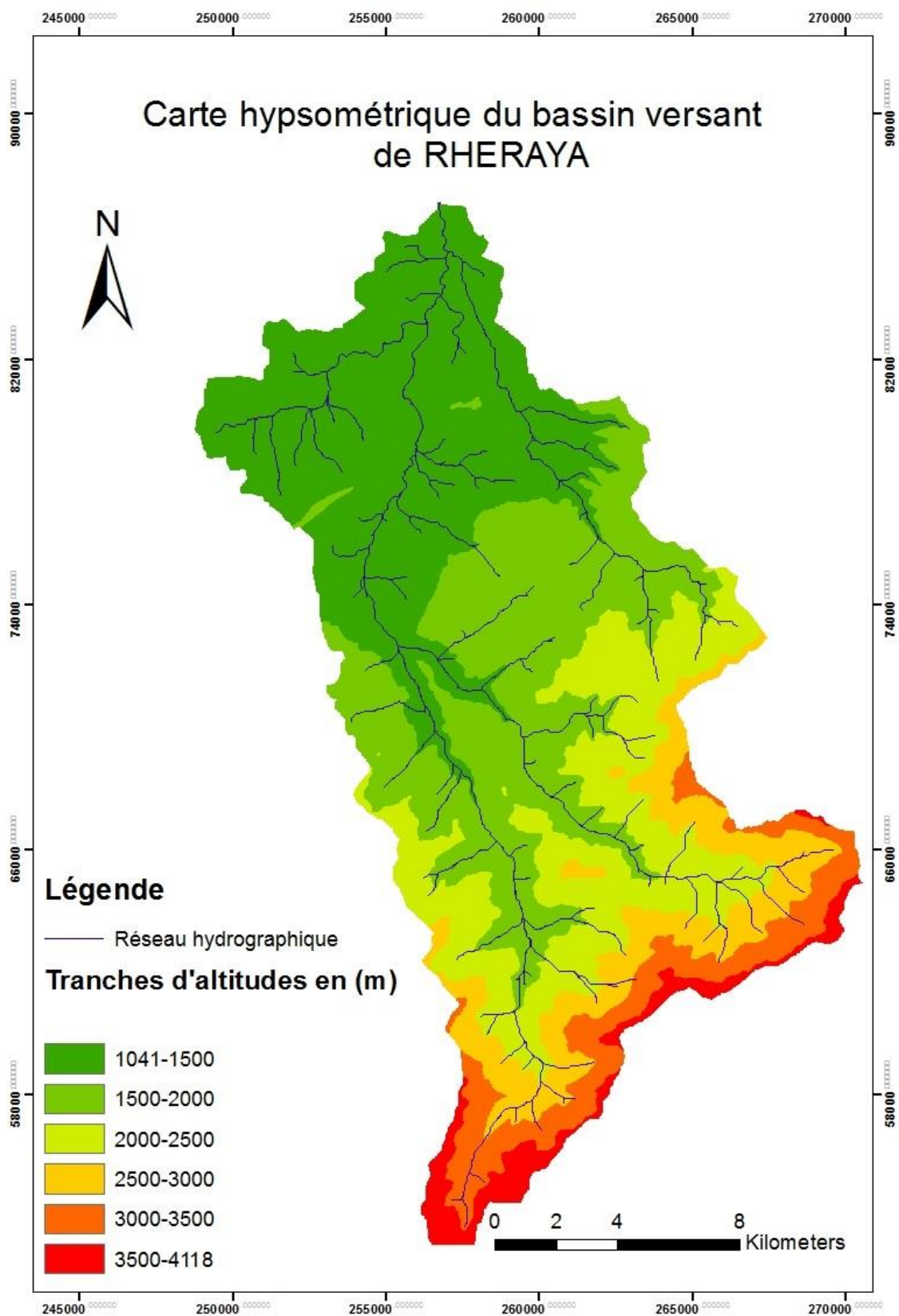


Figure 9 : Carte hypsométrique du bassin versant de RHERAYA.

➤ Altitudes caractéristiques :

L'une des finalités des courbes hypsométriques est le calcul des altitudes caractéristiques suivantes :

- L'altitude maximale $H_{\max}$
- L'altitude minimale $H_{\min}$
- L'altitude moyenne du bassin H_{moy} en m. Elle est calculée en pondérant la hauteur moyenne d'une tranche d'altitude par la surface partielle de cette tranche selon la formule suivante :

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

Avec :

H_{moy} : altitude moyenne du bassin versant [m].

A_i : aire comprise entre deux courbes de niveau [km²].

h_i : altitude moyenne entre deux courbes de niveau [m].

A : superficie totale du bassin versant [km²].

➤ $H_{\text{moy}} = 1960 \text{ m.}$

- L'altitude médiane $H_{50\%}$ au- dessus de laquelle est située 50% de la superficie du BV.

➤ $H_{50\%} = 1815 \text{ m.}$

h) Penttes caractéristiques :

Pour les pentes, elles varient de 0° sur les terrasses aménagés sur les lits des Oueds en aval, jusqu'à 67 sur les versants en amont surtout ceux entourant l'Oued IMLIL, parfois même en aval sous forme de falaise. La carte permet de reconnaître la zone aval, débutante après la confluence des deux branches, comme étant potentiellement à haut risque d'inondations (Figure 10).

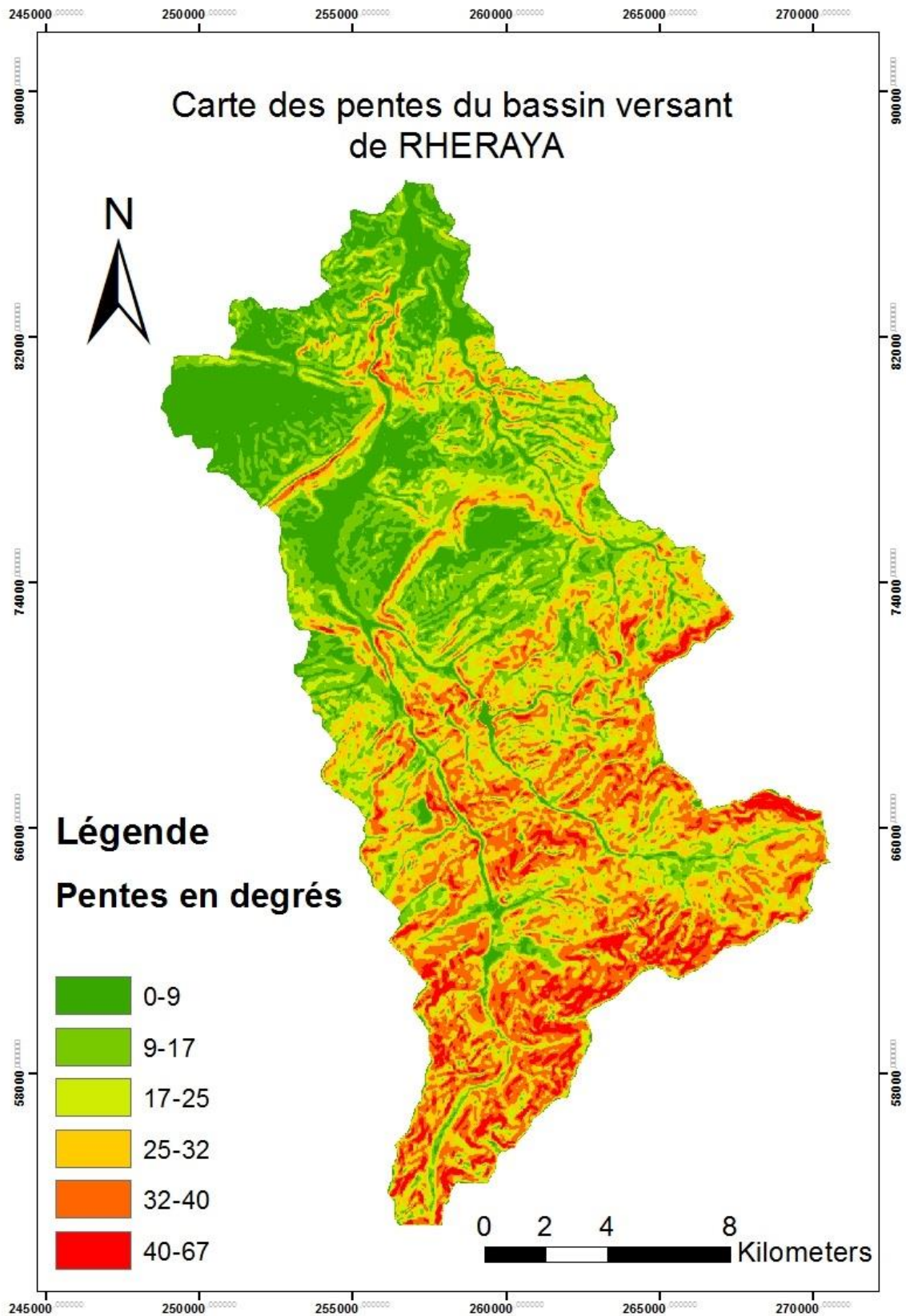


Figure 10 : Carte des pentes du bassin versant de RHERAYA.

PARAMETRE	VALEUR
Superficie (Km ²)	321
Périmètre (Km)	108.9
Altitude max (m)	4118
Altitude min (m)	1041
Dénivelée (m)	3077
Longueur oued (Km)	33.21
Pente moyenne oued (m/m)	0.1
Longueur rectangle équivalent (Km)	47.65
Largeur du rectangle équivalent (Km)	6.73
Indice GRAVILUS adimensionnel	1.7
Indice Horton adimensionnel	0.3

II. Analyse pluviométrique et hydrométrique :

a) La pluviométrie : (Annexe 1)

- **Pluies mensuelles :**

La distribution pluviométrique marque une irrégularité importante à l'échelle mensuelle. On observe trois mois plus arrosés qui sont, en général, Février, Mars et Avril, ce dernier atteint jusqu'à 57.4 mm. D'autre part, on constate une diminution des pluies pendant les mois les plus secs qui sont Juin, Août et surtout Juillet qui atteint jusqu'à 3.4 mm, ces pluies tombent généralement sous forme d'orages.

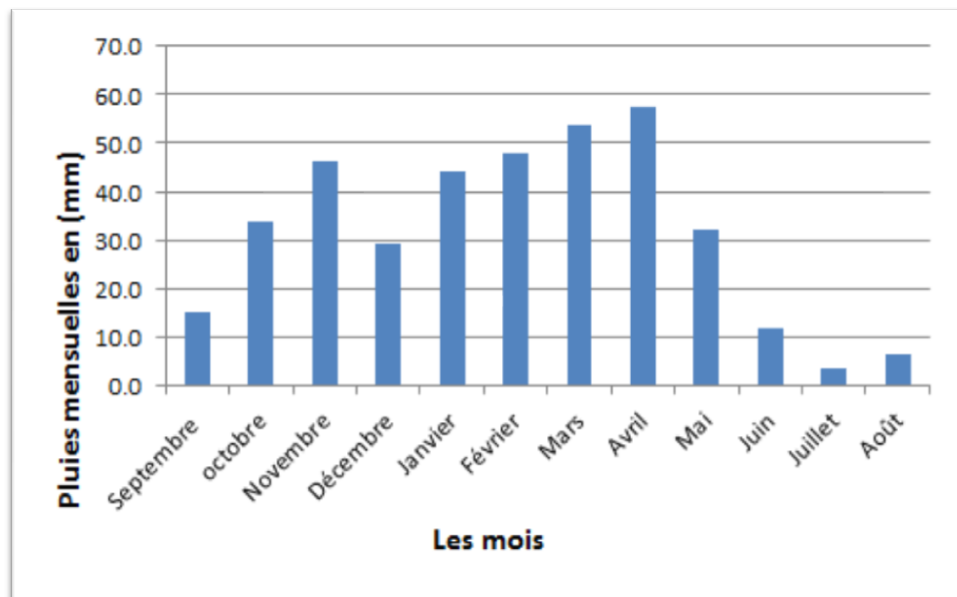


Figure 11 : Les pluies moyennes mensuelles de la station de TAHANAOUT (1968/69 à 2015/16).

- **Pluies saisonnières :**

En ce qui concerne les pluies saisonnières du bassin d'étude, la figure ci-après montre que les saisons les plus pluvieuses sont l'automne, l'hiver et le printemps, ce dernier représente une forte pluie atteignant 47.8 mm sur la station de TAHANAOUT, alors que l'été est la saison la plus sèche avec une pluie de 7.2 mm.

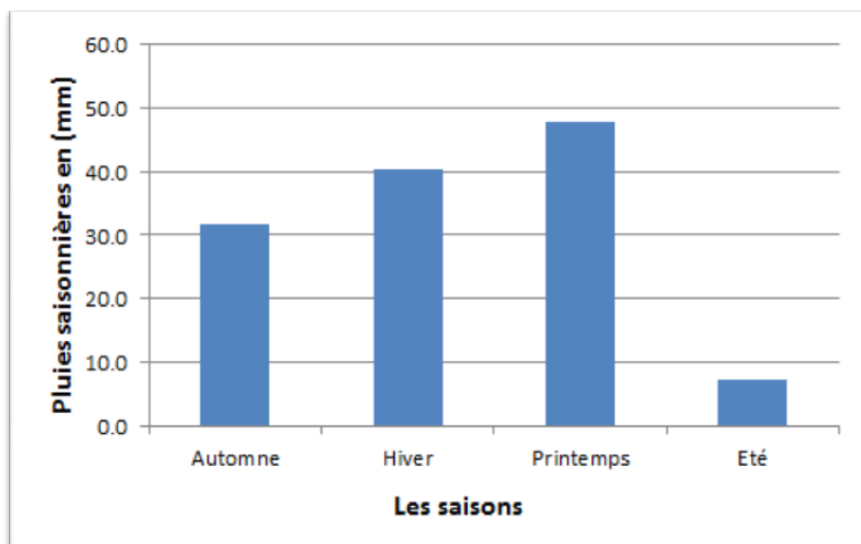


Figure 12: Les pluies moyennes saisonnières à TAHANAOUT (1968/69 à 2015/16).

- **Pluies annuelles :**

Les pluies moyennes annuelles ont été obtenues par sommation des moyennes mensuelles de chaque année, pour notre bassin la figure ci-dessous montre l'évolution annuelle des pluies. Nous pouvons voir que, dans la période de 1968/69 à 2015/16, cinq années ont été exceptionnellement pluvieuses. Ce sont les années 1973/74, 1989/90, 1996/97, 2009/10 et 2015/16. La station a enregistré, pendant ces années, de fortes pluies de plus de 500mm. Deux années ont été particulièrement sèches, 1970/71 et 2016/17 avec des faibles pluies qui sont respectivement 136.8 et 14.3 mm.

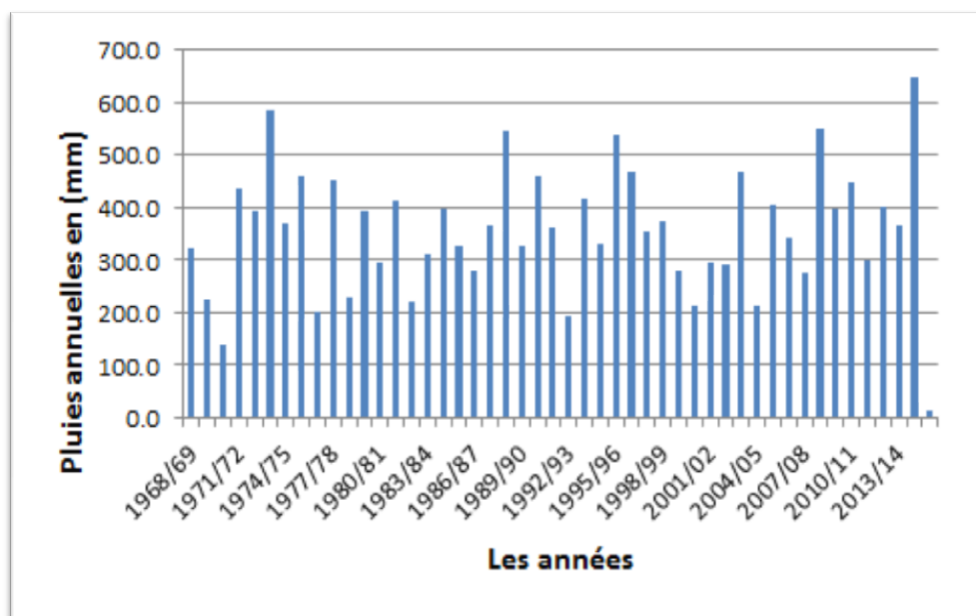


Figure 13 : Les pluies moyennes annuelles à TAHANAOUT (1968/69 à 2015/16).

b) Hydrométrie :

- **Débits mensuels :**

La figure 14 présente la variation des débits moyens mensuels interannuels à la station de TAHANAOUT, elle démontre le caractère pluvio-nival du régime hydrologique du bassin versant de RHERAYA, d'après l'analyse graphique nous voyons une légère augmentation pendant les mois du printemps avec une valeur maximale de débits qui est égale à $3.50 \text{ m}^3/\text{s}$ en Mai, résultante en grande partie de la fonte du stocke neigeux, suivie d'une diminution plus marquée en mois d'août avec un débit égale à $0.49 \text{ m}^3/\text{s}$.

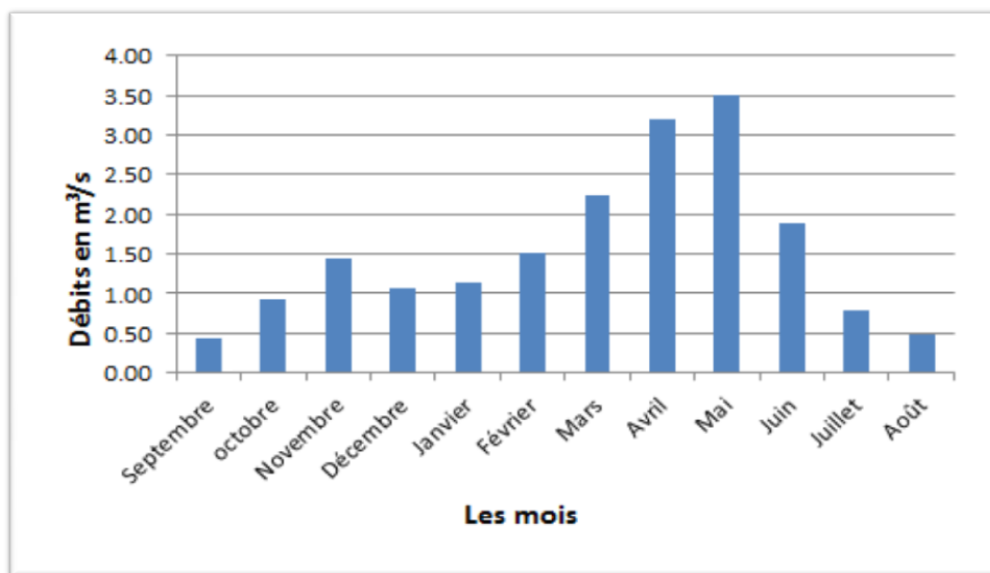


Figure 14 : Les débits moyens mensuels de la station de TAHANAOUT (1961/62 à 2015/16).

- **Débits saisonniers :**

Les débits saisonniers ont été calculés à partir des données mensuelles. La période prise en compte pour le calcul des moyennes saisonnières est de 1961/62 à 2015/16. La figure 15 présente la variation saisonnière des débits au niveau de la station de TAHANAOUT. Nous constatons trois régimes différents à l'exutoire. Le premier est une augmentation plus faible de l'automne à l'hiver, puis plus forte de l'hiver au printemps. La chute de débits intervient entre le printemps et l'été.

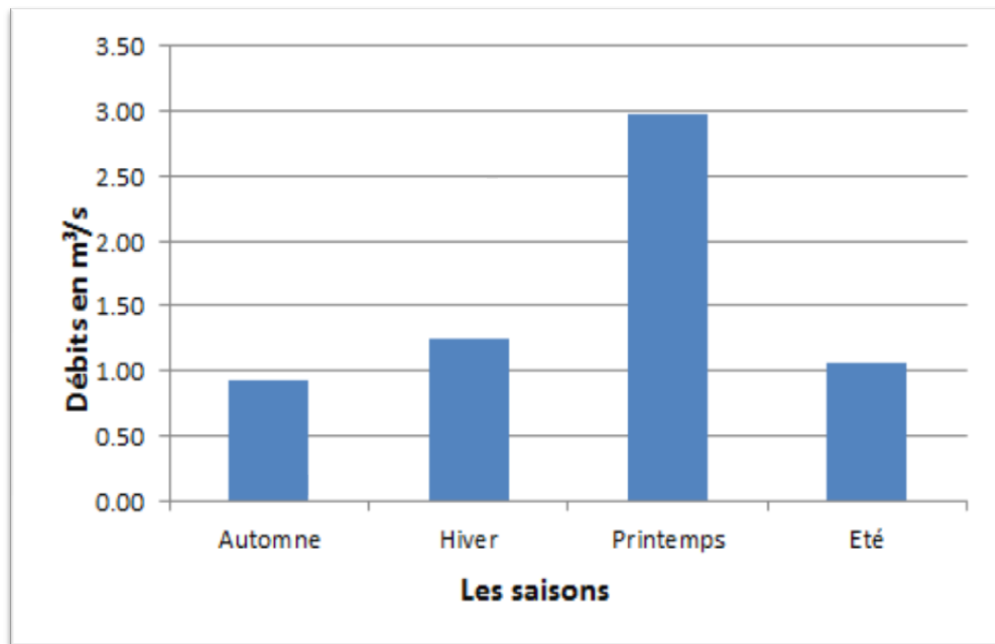


Figure 15 : Les débits moyens saisonniers à TAHANAOUT (1961/62 à 2015/16).

- **Débits annuels :**

La figure 16 présente les débits moyens annuels de la station de TAHANAOUT. Les mesures ont été prises pendant la période de 1961/62 à 2015/16. Sur ce graphique nous constatons que plusieurs années sont marquées par de forts débits comme les années 1961/62, 1962/63, 1991/92 et 1995/96, 2010/11 avec un maximum égal à $4.31 \text{ m}^3/\text{s}$ et Les années à faibles débits sont 2000/01 et 2013/14 avec un minimum égal à $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$.

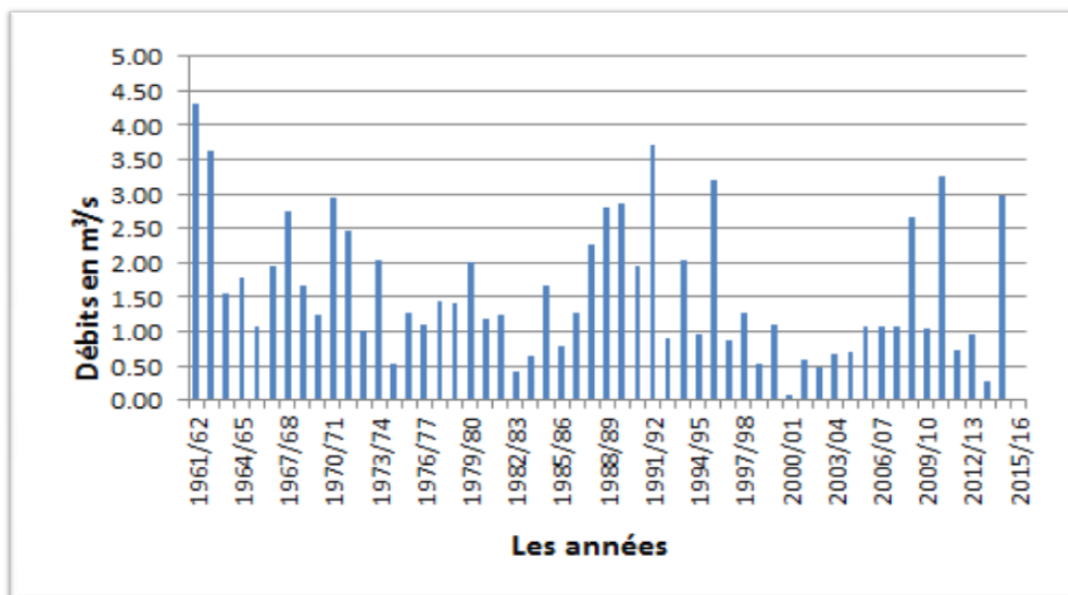


Figure 16 : Les débits moyens annuels de la station de TAHANAOUT (1961/62 à 2015/16).

III. Calcul des débits de pointe :

a) Méthodologie :

Les débits de la ville de TAHANAOUT ne sont pas mesurés, ils seront donc calculés par des formules usuelles et par analogie avec le bassin versant de la station hydrologique voisine << TAHANAOUT>>, à l'aide de la formule de Franco-Rodier.

Ensuite on estimera les débits de pointe des crues à l'aide des méthodes usuelles. On en retiendra après justification, les valeurs finales des débits des crues de fréquence 10, 20, 50, 100 ans. Les formules utilisées pour l'estimation des débits de pointe sont les Formules empiriques (*Fuller* 2, *MALLET- GAUTHIER* et *Hazan LAZAREVIC*), la Méthode rationnelle, l'Ajustement statistique et la Méthode de *FRONCO-RODIER*.

➤ Calcul du temps de concentration :

- La goutte d'eau qui tombe sur le bassin versant met un temps différent pour atteindre l'exutoire selon le point où elle est tombée.
- Le temps nécessaire pour que tout le bassin versant contribue au ruissellement est appelé : Temps de Concentration (TC)

Son calcul se fait en utilisant les formules empiriques suivantes :

➤ La formule de Ventura :

$$T_c = 7,632 \times S^{0,5} \times I^{-0,5}$$

Tc : Temps de concentration en min.

S : Superficie du bassin versant en km².

I : Pente moyenne du talweg en m/m.

➤ La formule Espagnole :

$$T_c = 18 \times L^{0,77} \times I^{-0,1925}$$

T_c : Temps de concentration en min.

L : longueur du cours d'eau principal en km.

I : Pente moyenne du cours d'eau principal en m /m.

➤ **Van Te Chow :**

$$T_c = 7,38 \times \left(\frac{L}{\sqrt{I}} \right)^{0,64}$$

T_c : Temps de concentration en min.

I : Pente moyenne du cours d'eau principal en m /m.

L : Longueur du cours d'eau principal en km.

➤ **La formule de KIRPICH :**

$$T_c = 0,01947 \times L^{0,77} \times I^{-0,385}$$

T_c : Temps de concentration en min.

L : Longueur du cours d'eau principal en m.

I : Pente moyenne du cours d'eau principal en m/m.

➤ **La formule de Giandotti :**

$$T_c = \frac{4\sqrt{S} + 1,5L}{0,8\sqrt{DH}} \times 60$$

T_c : Temps de concentration en min.

S : Surface du bassin versant en km².

L : longueur du cours d'eau principal en km.

DH : Dénivelée maximale du bassin versant en m.

➤ **Choix Du Temps De concentration :**

Le tableau suivant récapitule les diverses valeurs du temps de concentration obtenues Par ces formules. La valeur du temps de concentration retenue est la moyenne des valeurs calculées les plus proches :

$$Tc_{\text{retenu}} = 2.58 \text{ h.}$$

Tableau 3 : Récapitulatif du temps de concentration du bassin versant de RHERAYA selon les différentes formules.

FORMULE	Tc (h)	Tc (min)
VENTURA	7.49	449.4
FORMULE ESPAGNOLE	7.04	422.4
VAN TE CHOW	2.48	148.8
KIRPICH	2.43	145.8
GIANDOTTI	2.74	164.4
Tc retenu (moyenne des Tc proches)	2.58	154.8

b) Méthodes usuelles :

➤ **Formules empiriques :**

Les formules empiriques tiennent compte pour un bassin versant, essentiellement des facteurs suivants :

- Sa taille quantifiée par sa surface.
- Son gradient altimétrique, exprimé par sa pente ou sa dénivelée.
- D'autres caractéristiques morphologiques.
- La pluie en quantité et en intensité.
- Le temps de concentration du bassin versant.

Les débits retenus sont ceux calculés par ces formules dont les limites de validité dépendent essentiellement de la taille des bassins.

✓ Débits par Mallet-Gautier :

-Enoncé de la formule :

Utilisée la 1^{ère} fois pour le cas des cours algériens.

L'énoncé de la formule de Mallet Gautier est comme suit :

$$Q(T) = 2 * K * \log_{10} (1 + a * H) * (S / \text{Racine}(L)) * \text{Racine} ((1 + 4 * \log_{10}(T)) - \log_{10}(S))$$

Q: Débit de pointe en m³/s pour une période de retour T donnée.

S: Superficie du bassin versant en km².

T: Période de retour en ans (10, 20, 50, 100).
a : paramètre variant de 20 à 30. On prend 20 au Maroc.
L: Longueur du cours d'eau principal en km.
H : Hauteur moyenne annuelle de pluie en mm.
K : paramètre régional variant de :

- 0.5 : grands bassins versants à faible pente.
- à 5 : petits bassins versants à forte pente.

➤ On prend 0.5 pour le bassin versant étudié.

➤ Débits obtenus :

Tableau 4 : Débits obtenus par la formule MALLET-GAUTHIER.

Paramètres utilisés						Débits calculé par la formule Mallet-Gautier			
Nom du bassin versant	S (km ²)	L (km)	K	a	H(T) en mm	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Oued RHERAYA	321	33.21	0.5	20	78.7	281.23	342.46	409.59	453.83



Débits par Fuller II :

-Enoncé de la formule :

Utilisée pour l'estimation des débits des crues des bassins versants de superficies supérieures à 10 km².

L'énoncé de la formule de Fuller est comme suit :

$$Q(T) = \left(1 + a * \log(T)\right) * \left(S^{0,8} + \frac{8}{3} * S^{0,5}\right)^{4/3} * N/100$$

Q(T) : débit de pointe de période de retour T en m³/s.

T : période de retour en ans.

a : coefficient régional fonction du climat varie de 0.7 à 3.5, dans notre cas a=0.80 région aride.

S : superficie du bassin versant en Km².

N : coefficient régional fonction de relief varie de 80 à 100.

Dans notre cas N=85 relief accidenté.

➤ Débits obtenus :

Tableau 5 : Débits obtenus par la formule de FULLER II.

Paramètres utilisés				Débits calculé par la formule Fuller II			
Nom du bassin versant	S (km ²)	a	N	10 ans	20 ans	50 ans	100ans
Oued RHERAYA	321	0.80	85	303.92	344.59	398.34	439.00



Débits par Hazan-Lazarevic :

-Enoncé de la formule :

La formule de Hazan Lazareviç a été développée au Maroc, et établie sur la base de la synthèse des informations dans différents bassins versants du Maroc. Elle donne le débit millénale en fonction de la superficie du bassin versant.

La formule s'écrit de façon suivante :

$$Q (1000 \text{ ans}) = a.S^b$$

S : Surface du bassin versant en km².

a et b = Paramètres dont les valeurs régionales sont résumées au tableau ci-dessous.

Les valeurs des paramètres « **a** » et « **b** » dépendent de la situation géographique de la zone et de sa pluviométrie annuelle.

Tableau 6 : Paramètres régionaux de Hazan Lazareviç.

Zone		Pluviométrie mm	a	b
Rif	Rif Central	1000 – 1300	15.53	0.776
	Rif Occidental	800 – 1000	9.78	0.793
	Rif Oriental	600 – 800	7.58	0.808
Moyen Atlas Saharien		700 – 900	14.94	0.636
		500 – 700	13.51	0.613
		400 – 500	13.47	0.587
Haut Atlas Saharien		200-400	9.38	0.742

En nous basant sur la géographie et la pluviométrie de la zone d'étude, nous prenons les coefficients qui s'en approchent les plus, ceux du Haut Atlas.

$$a = 9.38 \text{ et } b = 0.742$$

➤ $Q(1000 \text{ ans}) = 679.25 \text{ (m}^3/\text{s)}.$

Le passage des débits 1000 aux débits des différentes périodes de retour se fait via un coefficient α déduit à partir du coefficient a de Fuller 1, par la relation suivante :

$$Q(T) = Q(1000) * (1 + a \log T) / (1 + a \log(1000)).$$

Q(T) : Débit de pointe de période de retour T en m³/s.

a : Coefficient régional, nous prenons a=2.

➤ **Débits obtenus :**

Tableau 7 : Débits obtenus par la formule de Hazan Lazareviç.

Paramètres utilisés					Débits calculé par la formule Hazan Lazareviç			
Nom du bassin versant	S (km ²)	a	K1	K2	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Oued RHERAYA	321	2	9.38	0.742	291.11	349.53	426.76	485.18

➤ **Méthode rationnelle :**

La méthode rationnelle est basée sur l'hypothèse qu'une pluie constante et uniforme sur l'ensemble d'un bassin versant produit un débit de pointe lorsque toutes les sections du bassin versant contribuent à l'écoulement après un temps égal au temps de concentration. Par simplification, la méthode rationnelle suppose aussi que la durée de la pluie est égale au temps de concentration. Elle ne tient pas compte de l'hétérogénéité de la pluviométrie et a tendance à surévaluer le débit de pointe.

$$Q_p = \frac{C \times I(T, t_c) \times A}{3.6}$$

Où

Q_p : Débit de pointe du bassin versant (en m³/s).

C : Coefficient de ruissellement (sans unité). Ce facteur représente la proportion de l'eau totale précipitée qui ruisselle. Afin d'assurer un dimensionnement suffisant des structures, il est préférable de choisir une valeur du coefficient C qui représente les pires conditions de ruissellement du bassin versant.

A : Superficie du bassin versant (en km²).

I (T, t_c) : Intensité de la précipitation pour une durée de précipitation égale au temps de concentration (en mm/h).

➤ **Intensité :**

L'intensité correspond au temps de concentration de période de retour T : $I(T, t) = a(T) \times t^{-b}(T)$

t : Temps de concentration retenu en min.

I : Intensité en mm/min ou (mm/heure).

Les paramètres a et b de MONTANA sont actualisés à l'occasion de la construction de l'autoroute Marrakech-Agadir, sont :

Tableau 8 : Coefficients de Montana à Marrakech ville.

T ans	A	b
2	2,967	0,639
5	4,944	0,620
10	6,270	0,615
20	7,545	0,612
50	9,197	0,610
100	10,437	0,608

➤ Les intensités retenues sont :

Tableau 9 : Les intensités calculées dans chaque temps de retour T.

Bassin versant		Intensités de pluies (mm/h)			
Nom du bassin versant	Tc (min)	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Oued RHERAYA	154.8	16.93	20.68	25.47	29.19

➤ Coefficient de ruissellement :

Le tableau des coefficients de ruissellements recommandé par le SETRA (Service des études sur le transport, les routes et leurs aménagements : Organisme français) pour la crue décennale est comme suit :

Tableau 10 : Coefficients de ruissellements par SETRA.

COUVERTURE VEGETALE	MORPHOLOGIE	PENTE MOYENNE %	TERRAIN AVEC SABLE GROSSIER	TERRAIN ARGILEUX OU LIMONEUX	TERRAIN ARGILEUX COMPACT
Bois	Presque plat	0 - 5 %	0.10	0.30	0.40
	Onduleux	5 – 10 %	0.25	0.35	0.50
	Montagneux	10 – 30 %	0.30	0.50	0.60
Pâturage	Presque plat	0 - 5 %	0.10	0.30	0.40
	Onduleux	5 – 10 %	0.15	0.36	0.55
	Montagneux	10 – 30 %	0.22	0.42	0.60
Culture	Presque plat	0 - 5 %	0.30	0.50	0.60
	Onduleux	5 – 10 %	0.40	0.60	0.70
	Montagneux	10 – 30 %	0.52	0.72	0.82

On prend le coefficient de ruissellement pour notre bassin versant = 0,25.

➤ Débits retenus :

Tableau 11 : Débits calculés par la méthode rationnelle.

Nom du bassin versant	Débits calculés par la méthode rationnelle (m ³ /s)			
Oued RHERAYA	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
	377.40	461	567.76	650.70

c) Ajustement Statistique :

Cette méthode probabiliste a été effectuée dans le but de déterminer les débits de pointe (débits de pointe de bassin jaugé) Ou plutôt à ajuster les débits maximaux instantanés enregistrés au niveau de la station de jaugeage « **TAHANAOUT** », (Voir annexe 3), à des lois statistiques conçues spécialement pour le traitement des données hydrologiques extrêmes.

Les résultats des calculs seront transposés vers le village de « **TAHANAOUT** » .

Afin de découvrir la structure des variations des débits et des précipitations et pour faire une analyse statistique des séries de données, l'ajustement des lois statistiques se 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.

Les lois statistiques appliquées dans cette étude sont : *Loi de GEV, loi de log normale (3param), loi de Fuites.*

- **Méthode visuelle (analyse des graphes) :**

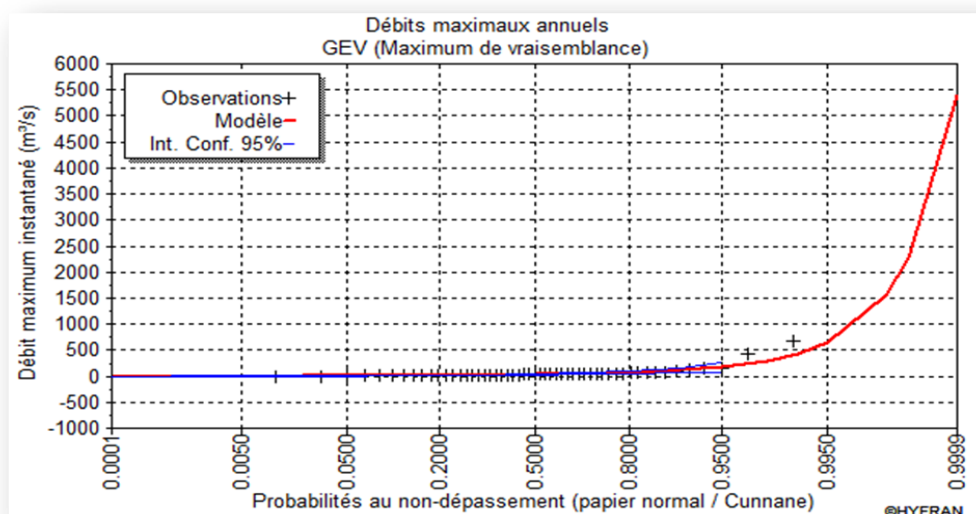


Figure 17 : Ajustement graphique des débits maximaux annuels par la loi GEV.

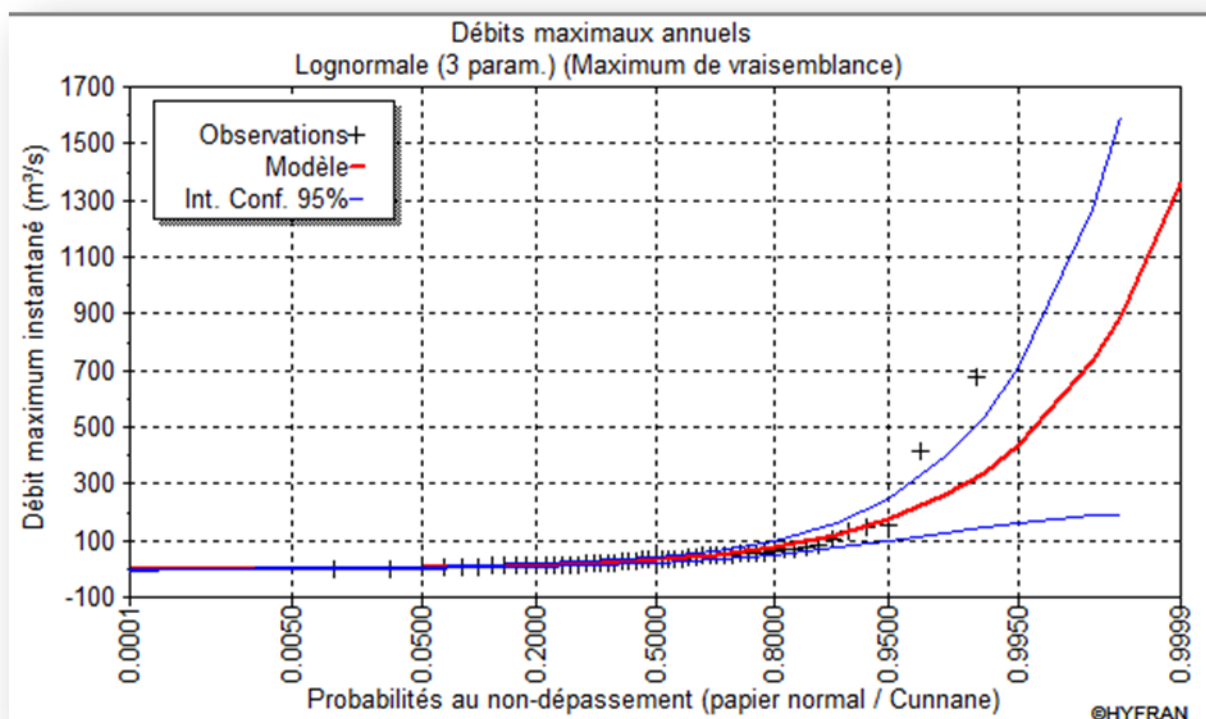


Figure 18 : Ajustement des débits maxima annuels par la loi Lognormale (3 paramètres)

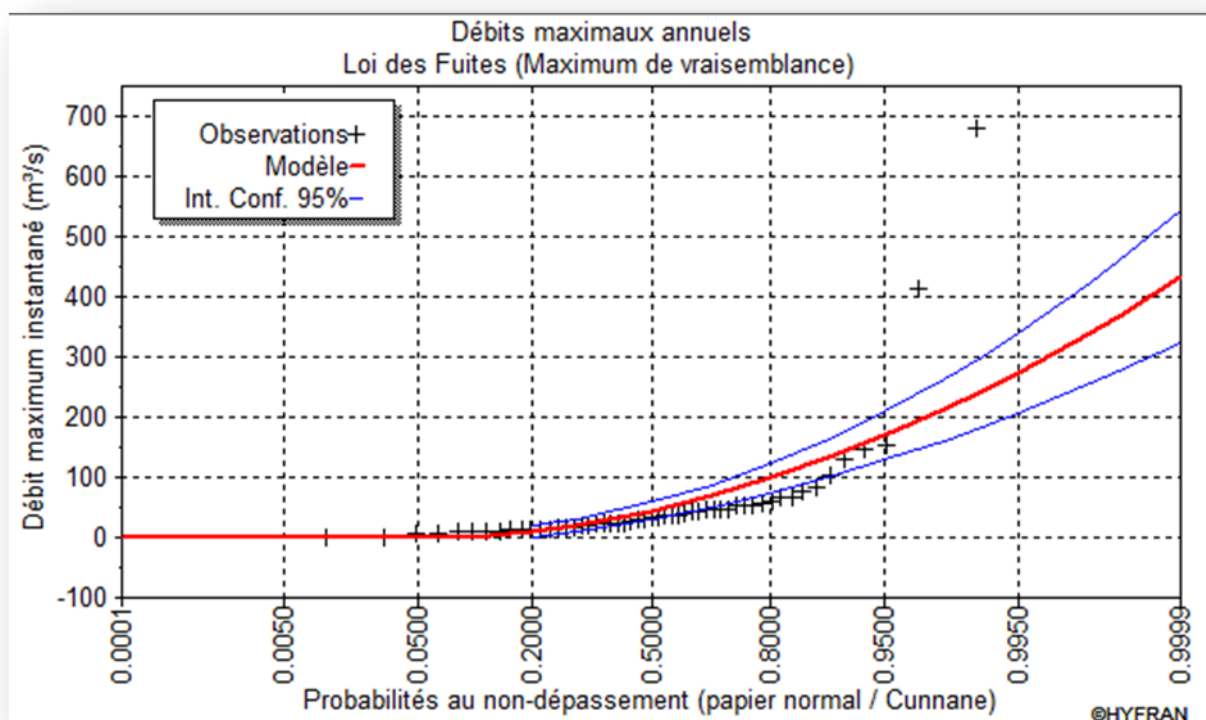


Figure 19 : Ajustement graphique des débits maximaux annuels par la loi des Fuites.

Visuellement on remarque que les lois GEV, log normale (3 PARAM) et loi des fuites présentent les meilleurs ajustements de la variable débit maximum instantané.

- **Méthode numérique (Analyse statistique) :**

Tableau 12 : Ajustements numériques des lois aux débits maximaux annuels pour une période de 100 ans.

Modèle	AIC	BIC
GEV (maximum de vraisemblance)	527.316	533.227
Lognormale 3 param. (maximum de vraisemblance)	529.939	535.850
Loi des fuites (maximum de vraisemblance)	568.819	669.760

La comparaison entre les résultats graphiques nous a permis de savoir que le meilleur résultat d'ajustement visuel est trouvé pour la loi de GEV, car elle a les plus faibles valeurs des critères AIC et BIC.

➤ **Estimation des débits maximaux annuels pour différentes périodes de retour :**

Tableau 13 : Débits retenus par la loi de GEV.

Nom du bassin versant	Débits retenus par la loi GEV (m ³ /s)			
Oued RHERAYA	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
	112	173	296	438

d) DEBITS PAR FRANCOU-RODIER :

•Enoncé de la formule :

L'énoncé de la formule de Franco-Rodier est comme suit :

$$\frac{Q_T}{10^6} = \left(\frac{S}{10^8} \right)^{\left(1 - \frac{K_T}{10} \right)}$$

- Q_T = débit de pointe de période de retour T en m³/s.
- T = Période de retour en ans.
- S = superficie du bassin versant en km².
- K_T = coefficient régional fonction du climat.

Le coefficient K_T est déduit par raisonnement inverse des valeurs des débits de pointes des crues pour des stations hydrologiques voisines.

$$K = 10 \cdot \left[1 - \left(\frac{\ln \frac{Q}{10^6}}{\ln \frac{S}{10^8}} \right) \right]$$

- K = coefficient régional fonction du climat : inconnu (adimensionnel).
- Q = Débit connu en m³/s.
- S = superficie du bassin versant en km².

On a synthétisé les valeurs du coefficient K, à partir des ajustements des lois probabilistes, aux séries des données des stations hydrologiques de TAHANAOUT, Le tableau suivant en résume le contenu :

Tableau 14 : Débits calculés par FRONCO-RODIER.

Calcul des débits par transposition					
Bassin versant	Surface (Km ²)	Transposition à partir de la station de TAHANAOUT			
		S' = 222	S' = 222	S' = 222	S' = 222
		Q= 112	Q= 173	Q= 296	Q= 438
		K=3.012	K=3.346	K=3.759	K=4.060
		T 10	T 20	T 50	T 100
RHERAYA	321	144.92	221 .11	372.61	545.27

Les résultats obtenus par les différentes méthodes utilisées pour le calcul des crues sont synthétisés dans le tableau suivant :

Tableau 15 : Récapitulatif des débits de pointe des crues pour une période de retour T.

METHODE	Débits de pointe de la crue de période de retour T			
	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
MALLET GAUTHIER	281.23	342.46	409.59	453.83
HAZAN LAZAREVIC	291.11	349.53	426.76	485.18
FULLER II	303.92	344.59	398.34	439.00
RATIONNELLE	377.40	461	567.76	650.70
FRANCO-RODIER	144.92	221.11	372.61	545.27
Débits retenus pour la simulation hydraulique	279.71	343.74	435.01	514.80

Les méthodes de MAILLET-GAUTHIER, HAZAN LAZAREVIC et FULLER II donnent des valeurs de débits proches entre elles, par contre celles obtenues par la méthode RATIONNELLE sont plus grandes ($Q_{100} = 650.70 \text{ m}^3/\text{s}$).

On remarque aussi que les valeurs de débits obtenus par la méthode de FRANCOU-RODIER sont grandes sauf Q_{10} et Q_{20} qui sont petits par rapport aux autres méthodes, cette différence est due aux caractéristiques morphologiques différentes entre les deux bassins transposés.

CONCLUSION GENERALE

Le bassin versant de RHERAYA est étendu sur une superficie de 321 Km² et un périmètre de 108.9 Km.

Le bassin versant de RHERAYA est allongé, dont l'hypsométrie est caractérisée par des altitudes qui décroissent du Sud Sud-Est vers le Nord Nord-Ouest D'après la courbe hypsométrique, les altitudes moyennes et faibles occupent la majorité de la surface du bassin.

Ce bassin versant comporte 3 zones géologiques la zone sub-atlasique, le horst de RHERAYA et la zone axiale, qui présentent différentes formations dominantes (Grés, granite et l'andésite).

Pour la pluviométrie on a étudié le régime pluviométrique à différentes échelles (Mensuelles, saisonnières et annuelles) durant la période de (1968/69 à 2015/16). Les pluies moyennes annuelles dépassent les 500 mm/an sur tout le bassin.

En ce qui concerne l'hydrologie, on a étudié le régime hydrologique aussi à l'échelle annuelle, mensuelle et saisonnière dans ce bassin versant pendant la période (1961/62 à 2015/16).il est caractérisé par l'abondance pluviale à très forts débits hivernaux, donc des fortes crues.

L'étude hydrologique nous a permis de trouver un temps de concentration moyen (moyenne des temps de concentrations proches) qui est égale à 2.58 h et 154.8 min, afin d'estimer les débits de pointe obtenus par différentes méthodes (méthodes usuelles (méthodes empiriques, la méthode rationnelle) probabilistes (l'ajustement statistiques) et la méthode de FRONCO-RODIER) dans différentes périodes de retour.

Les débits retenus pour la simulation hydraulique (La moyenne des débits par différentes méthodes) sont comme suit :

Débit décennal : 279.71 m³/s

Débit vingtenal : 343.74 m³/s

Débit cinquentenal : 435.01 m³/s

Débit centenal : 514.80 m³/s

Notre stage à ABHT nous a permis d'une part d'exploiter les notions scientifiques qu'on a acquis durant notre formation universitaire, et d'autre part de nous familiariser avec le monde professionnel afin de développer le sens de la responsabilité et de la recherche.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Agence du Bassin Hydraulique de Tensift (2007), Atlas zones inondables Marrakech, 162p.
- Cheggour, A. (2008). *Mesures de l'érosion hydrique à différentes échelles spatiales dans bassin versant montagneux semi aride et spacialisation par des SIG : Application au bassin versant de la RHERAYA,Haut atlas,Maroc*. thèse de doctorat, Faculté des sciences Semlalia, Marrakech, 231p.
- HAIDA, S. (2000). *Transport de la matière et bilan de l'érosion mécanique et de l'altération chimique sur le bassin versant de la zone semi aride : Le Sebou*. Thèse de Doctorat, Université Ibn Tofail, Kénitra.
- HIQUI, A. (2015). *Les évènements Hydrologiques exeptionnels du Haut Atlas de Marrakech.Analyse Fréquentielle,simulation et application au cas de Novembre 2014*. Mémoire de fin d'études Master Eau et Environnement , Faculté des sciences et techniques de Marrakech. Université Cadi Ayad, Marrakech, 65p.
- MUSY, A. (2001). *Cours d'Hydrologie générale*. Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPEL), Suisse, 200p.
- OUGOUG, E. (2012). *Protection des riverains contre les inondations de l'Oued Goudji à Al Haouz, Etude Hydrologique*. Agence du Bassin Hydraulique de Tensift, Marrakech, 47p.
- SALIK, I. (2014). *Modélisation hydrologique des crues de Novembre 2014 du bassin de la RHERAYA,Région de Marrakech*. Mémoire de fin d'études, Master Science et Techniques (Hydrologie de la surface et qualité des eaux)., Université Sidi Mohamed Ben Abdellah Faculté des Sciences et Techniques , Fés, 66p.
- Stampfli, N. (2007). *Evaluation des débits de pointe pour les petits bassins versants agricoles Quebec*. Université MCGILL, Centre Brace pour la gestion des ressources hydriques , 6p.

ANNEXES

N° Station: 7512.

Station : TAHANNAOUT RHERAYA.

Unité : mm

Annexe 1 : Série des pluies

mensuelles.

Année	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Total
1968/69							41.8	165.7	116.8				324.3
1969/70	12.3	27.6	160.6	24.6									225.1
1970/71								39.6	79.3		0.0	9.4	136.8
1971/72	1.2	12.6	47.0	7.5	69.1	77.5	60.8	34.3	63.4	60.7	3.5		437.6
1972/73	13.3	51.8	69.7	38.0	28.3	31.4	79.3	55.5	10.6	11.2		3.7	392.8
1973/74		28.6	82.3	85.1	11.3	103.6	112.5	136.1	4.5	19.3		1.2	584.5
1974/75	17.8	21.4	6.2	8.2	42.0	20.4	46.4	149.7	42.0	10.2	0.5	4.6	369.4
1975/76	29.8	0.0	23.4	8.5	23.2	60.6	58.1	128.8	111.3			17.8	461.5
1976/77	11.4	71.3		38.4	0.0	41.2	32.1	5.2	0.0	3.3			202.9
1977/78	55.3	51.6	45.2	58.9	73.6	21.9	1.6	69.9	28.3	37.4	0.0	8.8	452.5
1978/79	4.4	32.4	1.5	83.1	0.0	62.7	9.1	20.0	1.4	8.9	3.5	0.0	227.0
1979/80	20.0	120.1	4.4	4.4	40.9	56.1	85.8	54.2	0.0	6.4		0.0	392.3
1980/81		56.1	61.3	3.9	17.2	61.0	46.4	38.4	3.7	6.6	0.0	2.1	296.7
1981/82	12.9	18.0	0.0	16.0	70.0	44.6	22.5	135.5	70.8	1.6	20.4	0.0	412.3
1982/83	5.5	8.1	23.5	20.2	1.0	77.5	30.2	33.1	21.4	0.0	0.0	1.3	221.8
1983/84	0.7	18.2	29.5	22.9	23.9	1.5	71.2	46.1	96.2	0.0	1.4	0.0	311.6
1984/85	7.5	7.9	54.9	0.0	196.2	18.4	10.0	56.2	37.0	1.1	6.3	0.0	395.5
1985/86	0.0	8.0	32.8	42.7	63.3	57.9	38.5	19.7	37.9	22.1	4.1	0.0	327.0
1986/87	3.7	22.7	58.2	0.0	28.5	113.3	26.6	4.0	5.0	11.9	0.0	6.2	280.1
1987/88	12.1	50.3	43.5	22.5	87.2	70.4	29.1	4.5	19.9	2.0	23.2	0.3	365.0
1988/89	1.3	63.5	133.0	0.0	33.0	51.5	120.9	95.6	6.3	5.4	6.0	28.1	544.6
1989/90	1.8	65.4	28.2	62.0	44.3	0.0	43.4	24.4	28.0	18.0	3.9	8.4	327.8
1990/91	14.5	2.1	4.6	49.5	0.0	159.4	179.9	21.2	4.7	9.5	8.7	7.9	462.0
1991/92	28.1	20.8	11.3	23.1	0.0	46.4	83.2	70.5	11.5	58.4	0.7	6.6	360.6
1992/93	4.8	46.3	11.6	5.0	23.7	28.0	28.2	26.4	16.9	0.0	0.0	1.3	192.2
1993/94	2.7	22.1	92.4	30.1	85.4	119.4	46.5	5.2	12.0	0.0	0.0	0.2	416.0
1994/95	1.3	30.3	8.3	0.0	0.0	89.1	56.0	138.6	0.0	6.0	0.0	0.0	329.6
1995/96	12.9	26.3	28.8	48.9	142.4	58.2	161.7	8.7	32.8	18.3	0.0	0.0	539.0
1996/97	6.9	7.8	60.5	89.6	55.7	6.4	45.6	169.5	20.2	7.1	0.1	0.0	469.4
1997/98	82.4	36.8	48.2	71.0	10.8	13.2	21.6	27.2	41.0	1.4	0.0	1.2	354.8
1998/99	10.6	15.0	0.0	58.9	95.0	86.4	68.9	4.9	17.9	0.5	0.0	14.8	372.9
1999/00	3.0	101.1	28.3	33.2	9.4	0.0	2.6	61.2	41.4	0.0	0.0	0.0	280.2

Date d'extraction : 26/09/2017

Unité : m^3/s

Annexe 2 : Série des débits mensuels.

Année	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Module
1961/62							3.70	7.48	6.84	5.36	2.09	0.383	4.31
1962/63	1.52	5.21	6.35	1.53	2.27	6.13	3.07	5.19	5.95	3.86	1.94	0.986	3.64
1963/64	0.480	0.345	0.512	1.11	1.01	1.18	1.59	5.16	5.01	1.27	0.602	0.357	1.55
1964/65	0.402	0.326	0.783	0.809	0.761	3.31	1.96	2.87	4.93	2.85	1.59	0.917	1.78
1965/66	1.03	3.12	2.84	0.787	0.614	0.375	0.654	0.945	1.43	0.622	0.222	0.174	1.07
1966/67	0.356	0.885	2.22	0.723	0.538	0.869	5.67	4.06	4.69	2.21	0.732	0.400	1.95
1967/68	1.16	2.00	6.51	2.43	1.96	1.55	2.34	3.50	4.84	4.15	1.96	0.438	2.74
1968/69	0.360	0.325	1.20	1.07	0.957	1.74	2.18	3.78	4.64	2.45	1.11	0.369	1.68
1969/70	0.336	1.02	1.16	1.15	1.75	1.36	1.69	1.90	2.08	1.71	0.499	0.251	1.24
1970/71	0.598	0.265	1.67	0.719	3.36	2.51	2.28	5.98	6.76	6.30	3.47	1.56	2.95
1971/72	0.670	0.488	1.81	1.49	1.73	2.07	3.55	4.54	5.45	4.79	2.13	0.732	2.45
1972/73	0.248	1.04	0.934	1.10	1.02	1.03	1.48	1.87	1.74	1.46	0.209	0.100	1.02
1973/74	0.136	0.137	0.572	0.705	0.702	0.970	3.75	6.06	6.10	3.80	0.976	0.565	2.04
1974/75	0.331	0.378	0.537	0.606	0.650	0.653	0.412	1.22	0.839	0.495	0.297	0.119	0.54
1975/76	0.073	0.074	0.088	0.147	0.242	0.757	1.14	2.66	5.46	3.30	0.883	0.299	1.26
1976/77	0.209	0.821	1.02	1.08	1.66	1.93	1.81	2.81	0.997	0.665	0.174	0.108	1.10
1977/78	0.706	0.350	0.794	0.645	2.13	2.11	1.20	3.31	2.88	2.60	0.512	0.217	1.44
1978/79	0.160	0.225	0.472	0.961	2.00	3.28	2.18	2.62	2.21	1.94	0.564	0.368	1.40
1979/80	0.466	0.446	0.294	0.290	0.337	0.973	6.25	6.94	4.66	2.39	0.630	0.323	2.00
1980/81	1.04	1.45	1.88	0.655	0.382	0.615	1.17	2.76	2.51	1.24	0.319	0.182	1.18
1981/82	0.172	0.358	0.209	0.197	0.634	0.720	0.642	2.75	6.22	2.36	0.401	0.247	1.24
1982/83	0.148	0.160	0.272	0.354	0.295	0.368	0.351	0.406	1.97	0.285	0.133	0.080	0.40
1983/84	0.156	0.311	0.404	0.433	0.431	0.294	0.505	0.901	3.16	0.709	0.263	0.088	0.64
1984/85	0.171	0.043	0.208	0.298	2.33	1.49	1.10	3.71	7.43	2.52	0.423	0.188	1.66
1985/86	0.117	0.705	0.538	0.635	0.683	0.765	1.18	1.04	2.21	0.971	0.220	0.106	0.77
1986/87	0.109	0.356	0.892	0.503	0.709	5.22	1.88	2.40	2.36	0.794	0.345	0.126	1.28
1987/88	0.096	1.30	9.52	1.66	1.49	2.24	3.42	3.57	1.30	1.55	0.489	0.606	2.26
1988/89	0.412	1.39	4.79	2.07	1.32	1.27	2.41	5.86	6.30	4.76	2.06	0.912	2.80
1989/90	0.772	5.71	2.29	2.93	3.45	2.72	5.67	2.59	4.65	2.41	0.717	0.325	2.86
1990/91	1.08	0.373	0.360	0.492	0.375	0.949	6.01	7.08	3.42	1.83	0.913	0.437	1.94
1991/92	0.351	0.543	0.157	4.62	0.230	0.296	1.02	13.1	15.2	7.26	0.992	0.764	3.72
1992/93	0.277	0.222	0.263	0.322	0.445	0.448	1.32	2.16	2.31	1.74	1.01	0.217	0.90
1993/94	0.106	0.066	1.21	0.901	0.906	1.80	6.05	6.54	5.45	1.14	0.220	0.147	2.04
1994/95	0.064	0.094	0.368	0.349	0.338	0.520	0.979	3.42	2.40	0.393	0.244	2.44	0.97
1995/96	0.174	0.526	0.650	1.14	3.65	10.4	14.4	1.93	1.85	2.67	1.21	0.332	3.20
1996/97	0.328	0.397	0.370	0.607	0.492	0.327	0.460	2.97	2.32	1.64	0.469	0.217	0.88
1997/98	1.18	1.96	1.11	2.11	2.01	1.12	1.17	0.975	1.52	1.04	0.603	0.463	1.28
1998/99	0.251	0.041	0.057	0.063	0.236	1.18	0.999	1.43	1.08	0.459	0.239	0.325	0.53
1999/00	0.155	6.98	0.932	1.15	0.821	0.307	0.157	0.806	0.743	0.517	0.275	0.127	1.09
2000/01	0.068	0.044	0.067	0.119	0.144	0.133	0.120	0.090	0.075	0.056	0.041	0.038	0.08
2001/02	0.013	0.007	0.007	0.007	0.006	0.010	0.062	2.95	2.57	0.735	0.263	0.235	0.57
2002/03	0.184	0.160	0.340	0.565	0.537	0.480	0.547	0.810	0.757	0.575	0.297	0.434	0.47
2003/04	0.248	0.543	0.787	0.844	0.324	0.324	0.817	1.09	1.47	0.976	0.371	0.323	0.68
2004/05	0.317	0.144	0.449	0.468	0.405	0.428	1.15	1.25	1.06	0.958	0.856	0.770	0.69
2005/06	0.176	0.381	0.195	0.194	0.319	0.429	0.331	0.760	0.384	1.33	4.36	3.94	1.08
2006/07	0.434	0.697	1.38	1.05	0.595	1.62	1.18	1.94	2.30	0.924	0.323	0.564	1.08
2007/08	0.180	0.166	0.793	1.24	1.64	1.50	2.10	2.55	1.69	0.483	0.430	0.045	1.07
2008/09	1.59	1.92	2.42	0.866	2.51	3.42	4.74	6.43	3.91	3.57	0.621	0.274	2.67
2009/10	0.337	0.383	0.214	0.874	0.515	1.31	3.45	3.06	1.24	0.548	0.377	0.233	1.04
2010/11	0.577	1.09	2.07	2.96	2.30	2.31	3.32	5.75	17.4	0.672	0.202	0.193	3.25
2011/12	0.214	0.208	0.562	0.774	0.713	0.683	0.786	2.37	1.50	0.569	0.324	0.104	0.73
2012/13	0.692	2.10	2.12	1.25	0.949	0.606	1.01	1.35	0.704	0.375	0.182	0.079	0.95
2013/14	0.175	0.019	0.019	0.020	0.061	0.031	1.15	1.52	0.032	0.013	0.009	0.178	0.27
2014/15	1.23	0.922	8.48	7.05	4.90	1.51	2.37	1.91	2.01	1.56	1.73	1.87	2.97
2015/16													

Annexe 3 : Série des débits maximaux instantanés.

N°IRE : 1565/53

période de : 1962 à 2014

Station : TAHANNAOUT RHERAYA.

Unité : m³/s

Année	Qimax (m ³ /s)
1962	34.5
1963	13
1964	35.7
1965	37.3
1966	54.3
1967	56.4
1968	9.26
1969	8.69
1970	24.2
1971	15.6
1972	42.3
1973	48
1974	12
1975	16.2
1976	9.42
1977	21.6
1978	9.64
1979	39
1980	36
1981	33.73
1982	22.5
1983	30.9
1984	23.4
1985	54
1986	154.9

Année	Qimax (m ³ /s)
1987	145.8
1988	59
1989	103
1990	26.2
1991	67.6
1992	24.6
1993	45.7
1994	680
1995	68.2
1996	15.6
1997	31.55
1998	46
1999	414
2000	0.649
2001	15
2002	22.25
2003	18.515
2004	0
2005	131
2006	11.7
2007	12.9
2008	54.7
2009	7.7
2010	47.7
2011	5.6
2012	83.1
2013	44.8
2014	75.7