

## MEMOIRE

*Présenté pour obtenir le titre de :*

***Licence es Sciences et Technique***

**Eau et environnement**

***Hydromorphologie du bassin versant d'Issil  
et crues de l'oued en amont de Marrakech***



**Par : Souad ED-DAOUDI & Youssef BOULOUMOU**

*Encadrés par :*

- **Mr SAIDI Mohamed El Mehdi** (Faculté des Sciences et Techniques)
- **Mr SAID LKIHHEL** (Agence du Bassin Hydraulique du Tensift)

Soutenu le 27/06/2012 devant la commission d'examen composée de :

- **Mr SAIDI M. E.** Professeur, FST Marrakech (Encadrant)
- **Mr AGOUSSINE M.** Professeur, FST Marrakech (Examineur)
- **Mr IGMOUILLAN B.** Professeur, FST Marrakech (Examineur)

**2011-2012**

## **Remerciements**

Au terme de ce stage de fin d'études, il nous est agréable d'exprimer nos sincères remerciements à tous ceux qui nous ont aidés à le mener à terme, que ce soit au département des sciences de la terre de la Faculté de Sciences et Techniques de Marrakech ou à l'Agence de Bassin Hydraulique de Tensift.

Nous voudrions, en premier lieu, remercier nos professeurs, particulièrement notre encadrant Mr. M.E SAIDI, pour leur aide et assistance.

Nos remerciements vont également à nos encadrants à l'ABHT : Mr. M. E. H. ARESMOUK, Chef de la division des ressources en eau ainsi que Mr. S. LKIHAL, et tous les techniciens qui ont contribué à notre assimilation du sujet par leurs conseils et leurs apports bibliographiques.

Nos sincères remerciements vont également aux membres du jury qui ont accepté de juger notre travail.

Nos chaleureux remerciements à nos familles pour leur soutien matériel et moral, ainsi qu'à nos amis pour leurs encouragements.

Enfin, merci à toutes les personnes de la Faculté des Sciences et techniques qui ont participé à notre formation ou celles qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

## Sommaire

Introduction.....	6
<b>Chapitre I : géographie et morphométrie générales du bassin versant de l'oued Issil .....</b>	<b>7</b>
I- Situation géographique et stations de mesure .....	7
1- Situation géographique.....	7
2- Stations de mesure dans le bassin versant de l'oued Issil .....	7
II- Délimitation du bassin versant.....	9
III- L'indice de forme .....	10
IV- Le temps de concentration .....	11
V- Hypsométrie et pentes .....	11
1- Carte hypsométrique .....	12
2- La courbe hypsométrique .....	13
3- La pente moyenne du bassin versant .....	14
VI- Le rectangle équivalent.....	15
VII- Réseau hydrographique et densité de drainage .....	15
VIII- Lithologie et géologie générale.....	18
IX- Le climat global et le couvert végétal.....	19
<b>Chapitre II : Le régime pluviométrique du bassin versant.....</b>	<b>20</b>
I- Régime pluviométrique du bassin.....	20
1- Précipitations moyennes mensuelles.....	20
2- Précipitations moyennes saisonnières.....	21
3- Les précipitations moyennes annuelles .....	23
4- Précipitations moyennes annuelles à l'échelle du bassin versant .....	26
II- Corrélations entre les précipitations des trois stations (Tahnaout, Aghbalou et Agaiouar) .....	27
1- Corrélations entre les précipitations annuelles des stations.....	27
2- Corrélation entre les précipitations mensuelles aux 3 stations.....	29
3- Corrélation entre les précipitations mensuelles particulières.....	31

III- Analyse statistique des pluies journalières aux trois stations .....	32
1- Station d'Agaiouar .....	34
2- Station de Tahnaout .....	35
3- Station d'Aghbalou .....	36
<b>Chapitre III : Etude dynamique des crues et analyse des hydrogrammes .....</b>	<b>38</b>
I- Introduction .....	38
II- Historique des crues à Marrakech .....	38
III- Analyse des hydrogrammes des crues de l'oued Issil.....	38
1- La crue du 25 mars 2011 .....	39
2- La crue du 2 mai 2011 .....	40
3- La crue du 2 au 5 avril 2012 .....	40
<b>Chapitre IV : Conséquences des crues et plans d'aménagement pour la lutte contre l'inondation de la ville de Marrakech.....</b>	<b>42</b>
I- Conséquences géographiques des crues de l'oued Issil sur la ville de Marrakech .....	42
1- Contexte général et problématique des inondations de l'oued Issil.....	42
2- Conséquences des crues de l'oued.....	42
II- Les schémas d'aménagement de l'oued Issil.....	45
1- Plans d'aménagement proposés pour la protection de la ville de Marrakech .....	45
2- Les aménagements programmés actuellement pour la protection de la ville de Marrakech des inondations de l'oued Issil.....	47
Conclusion.....	49
Bibliographie.....	50

## Liste des figures

Figure 1 : Situation géographique du bassin versant de l'oued Issil.....	7
Figure 2 : Carte topographique montrant la délimitation du bassin versant de l'oued Issil .....	10
Figure 3 : Carte hypsométrique du bassin versant de l'oued Issil.....	12
Figure 4 : Courbe hypsométrique du bassin de l'oued Issil.....	13
Figure 5 : Rectangle équivalent du bassin versant de l'oued Issil.....	15
Figure 6: Carte du réseau hydrographique du bassin versant de l'oued Issil .....	16
Figure 7 : Carte géologique simplifiée du bassin versant de l'oued Issil.....	18
Figure 8 : Précipitations moyennes mensuelles aux trois stations (1970-2004).....	21
Figure 9 : Précipitations moyennes saisonnières aux trois stations (1970-2004).....	22
Figure 11 : Précipitations moyennes annuelles à Aghbalou de 1970 à 2004.....	24
Figure 12 : Précipitations moyennes annuelles à Tahannaout de 1970 à 2004.....	24
Figure 13 : Relation altitude-précipitations des stations du Haut Atlas de Marrakech .....	25
Figure 15 : Corrélation entre les précipitations annuelles d'Aghbalou et de Tahannaout.....	28
Figure 16 : Corrélation entre les précipitations annuelles d'Agaiouar et d'Aghbalou .....	28
Figure 17 : Corrélation entre les précipitations annuelles d'Agaiouar et de Tahannaout.....	29
Figure 18 : Corrélation entre les précipitations mensuelles d'Agaiouar et d'Aghbalou.....	29
Figure 19 : Corrélation entre les précipitations mensuelles d'Aghbalou et de Tahannaout.....	30
Figure 20 : Corrélation entre les précipitations mensuelles d'Agaiouar et de Tahannaout.....	30
Figure 21 : Corrélation entre les précipitations mensuelles particulières d'Agaiouar et d'Aghbalou.....	31
Figure 22 : Corrélation entre les précipitations mensuelles particulières d'Aghbalou et de Tahannaout.....	31
Figure 23 : Corrélation entre les précipitations mensuelles particulières d'Agaiouar et de Tahannaout.....	32
Figure 24 : Variations annuelles des précipitations journalières maximales à Agaiouar .....	34
Figure 25 : Ajustement par la loi Gumbel aux pluies maximales journalières d'Agaiouar .....	35
Figure 26 : Ajustement par la loi Gumbel aux pluies maximales journalières de Tahannaout.....	36
Figure 27 : Ajustement par la loi Weibull aux données d'Aghbalou .....	37
Figure 28 : Hyétogramme et hydrogramme de la crue de l'oued Issil à Ait Bouzguia le 25 mars 2011.....	39
Figure 29 : Hyétogramme et hydrogramme de la crue de l'oued Issil à Ait Bouzguia le 2 mai 2011.....	40
Figure 30 : Hyétogramme et hydrogramme de la crue de l'oued Issil à Ait Bouzguia du 2 au 5 avril 2012.....	41
Figure 31 : Projet de ceinture de fossés pour déverser les eaux sur trois oueds .....	45

## **Liste des photos**

<i>Photo 1 : Station hydrométrique d'Ait Bouzguia sur l'oued Issil</i> .....	8
<i>Photo 2 : Equipment de la station d'Ait Bouzguia</i> .....	8
<i>Photo 3 : Système de réception des données hydropluviométriques à l'ABHT</i> .....	9
<i>Photo 4 : Les eaux de la crue du 25/03/2011 inondant les voies de circulation de la ville de Marrakech</i> .....	43
<i>Photo 5 : Les terrains agricoles endommagés par la crue d'Issil du 25 mars 2011</i> .....	43
<i>Photo 6 : Affouillement d'une berge de la rive gauche d'Issil et endommagement du mur de protection</i> .....	44
<i>Photo 7 : Dépôt clandestin de gravats de démolition et de construction dans le lit de l'oued Issil à Marrakech</i>	46
<i>Photo 8 : Travaux de construction d'un pont élevé sur l'oued Issil à Marrakech</i> .....	47
<i>Photo 9 : Travaux de construction de murs de protection et de renforcement des berges de l'oued</i> .....	48

## **Liste des tableaux**

<i>Tableau 1 : Les caractéristiques morphométriques du bassin versant de l'oued Issil</i> .....	17
<i>Tableau 2 : Les coordonnées Lambert (m) des trois stations</i> .....	20
<i>Tableau 3 : Précipitations moyennes mensuelles des trois stations</i> .....	20
<i>Tableau 4 : Précipitations moyennes saisonnières à Tahannaout</i> .....	21
<i>Tableau 5 : Précipitations moyennes saisonnières à Agaiouar</i> .....	22
<i>Tableau 6 : Précipitations moyennes saisonnières à Aghbalou</i> .....	22
<i>Tableau 7 : Précipitations moyennes annuelles des trois stations</i> .....	26
<i>Tableau 8 : Précipitations maximales journalières des trois stations</i> .....	33
<i>Tableau 9 : Les lois d'ajustement utilisé et leurs critères de comparaison</i> .....	34
<i>Tableau 10 : Période de retour et les valeurs des précipitations obtenue par la loi de Gumbel</i> .....	35
<i>Tableau 11 : Les lois d'ajustement utilisé et leurs critères de comparaison</i> .....	35
<i>Tableau 12 : Période de retour et les valeurs des précipitations obtenue par la loi Gumbel</i> .....	36
<i>Tableau 13 : Les lois d'ajustement utilisé et leurs critères de comparaison</i> .....	36
<i>Tableau 14 : Période de retour et les valeurs des précipitations obtenue par les lois de probabilité à Tahannaout</i> .....	37

## Introduction

L'oued Issil est un cours d'eau qui prend naissance sur le Haut Atlas à des altitudes avoisinant 2150 m. Après un parcours en montagne, il débouche en plaine avant de longer la ville de Marrakech par l'est. Ce passage de l'oued par cette grande ville touristique attire souvent l'attention par ses crues brutales et puissantes qui inondent de nombreux quartiers de la ville. Le samedi 25 mars 2011 par exemple, en peu de temps toute la zone Est de Marrakech et les voies de circulation ont été envahies par les eaux de l'oued. La crue faisait suite à une averse brutale qui s'est abattue en amont du bassin.

C'est pour cela que nous avons décidé d'entreprendre une étude hydrologique et morphologique du bassin versant de l'oued Issil à la station d'Ait bouzguia. Cette station hydrométrique n'a été installée que récemment dans le but de mesurer les hauteurs des eaux et les débits de l'oued. Elle a, à cet effet, enregistré les crues des deux dernières années. Par ailleurs, nous disposons de données pluviométriques de trois stations en amont du bassin ainsi que des documents cartographiques.

Toutes ces données nous ont permis d'entamer cette étude que nous avons articulée autour de trois grands axes. A savoir, une étude morphométrique du bassin versant, une analyse pluviométrique et enfin une étude hydrologique, qui mettra l'accent sur les crues de l'oued. Les effets des crues sur le milieu naturel ainsi que les aménagements infrastructurels mis en place seront également passés en revue pour voir dans quelles mesures ce cours d'eau est redoutable et à quel point les infrastructures de lutte ont endigué ses effets destructeurs.

# Chapitre I : géographie et morphométrie générales du bassin versant de l'oued Issil

## I- Situation géographique et stations de mesure :

### 1- Situation géographique :

Le secteur d'étude est le bassin versant de l'oued Issil, localisé entre les latitudes 31°14' et 31°28' Nord et entre les longitudes 7°56' et 7°47' Ouest. Il s'étend sur une superficie d'environ 201 Km<sup>2</sup> jusqu'à Ait Bouzguia.

Le bassin versant de l'oued Issil, affluent rive gauche de l'oued Tensift, longe la ville de Marrakech du côté Est sur une longueur de 12 km. Sa caractéristique principale est le rythme irrégulier de ses débits.

L'oued Issil prend sa source dans l'Atlas. La moitié du bassin versant est située dans la plaine du Haouz avec une altitude entre 625 à l'exutoire et 800m. L'autre moitié s'étend en montagne où un point culmine à 2144m. L'oued est à sec sur de longues périodes et ne coule que lorsqu'une pluviométrie conséquente s'abat sur le bassin versant.

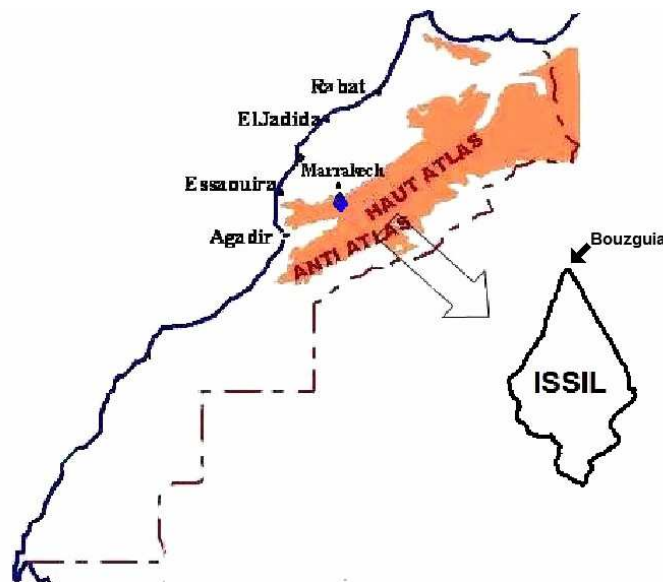


Figure 1 : Situation géographique du bassin versant de l'oued Issil

### 2- Stations de mesure dans le bassin versant de l'oued Issil:

La vulnérabilité de la ville de Marrakech aux inondations, a conduit l'Agence du Bassin Hydraulique de Tensift à installer deux stations hydrométriques et pluviométriques au niveau de l'oued Issil ; Ait Bouzguia (625 m) et Ouaguejdit (1150m).

Ces deux stations ont pour objectifs :

- L'évaluation et le suivi des écoulements de surface.
- La constitution de base de données devant servir à la conception de projets.
- La fourniture des informations en temps réels en vue d'une meilleure gestion des ressources en eau.
- L'estimation du transport solide au niveau des bassins hydrauliques.
- L'élaboration des annuaires hydrologiques.





**Photo 1 : Station hydrométrique d'Ait Bouzguia sur l'oued Issil**

Ces deux stations de jaugeage sont équipées de :

- Une (ou plusieurs) batteries d'échelle.
- Un équipement de jaugeage (téléphérique).
- Un limnigraphe.
- Un pluviomètre (et pluviographe).
- Un poste radio d'annonce de crues.
- Un local technique pour les équipements de mesure.
- Un local d'habitation pour l'observateur.



**Photo 2 : Equipement de la station d'Ait Bouzguia**



*Photo 3 : Système de réception des données hydropluviométriques à l'ABHT*

## **II- Délimitation du bassin versant :**

Le bassin versant représente, en principe, l'unité géographique sur laquelle se base l'analyse du cycle hydrologique et de ses effets.

Plus précisément, c'est une surface élémentaire hydrologiquement close, c'est-à-dire qu'aucun écoulement n'y pénètre de l'extérieur et que tous les excédents de précipitations s'évaporent ou s'écoulent par une seule section à l'exutoire.

Le bassin versant en une section droite d'un cours d'eau, est donc défini comme la totalité de la surface topographique drainée par ce cours d'eau et ses affluents à l'amont de cette section. Il est entièrement caractérisé par son exutoire.

La plupart du temps, ce contour passe par les crêtes des montagnes, ou « ligne de partage des eaux superficielles ». Le bassin versant correspond dans ce cas au bassin topographique délimité par la ligne des crêtes.

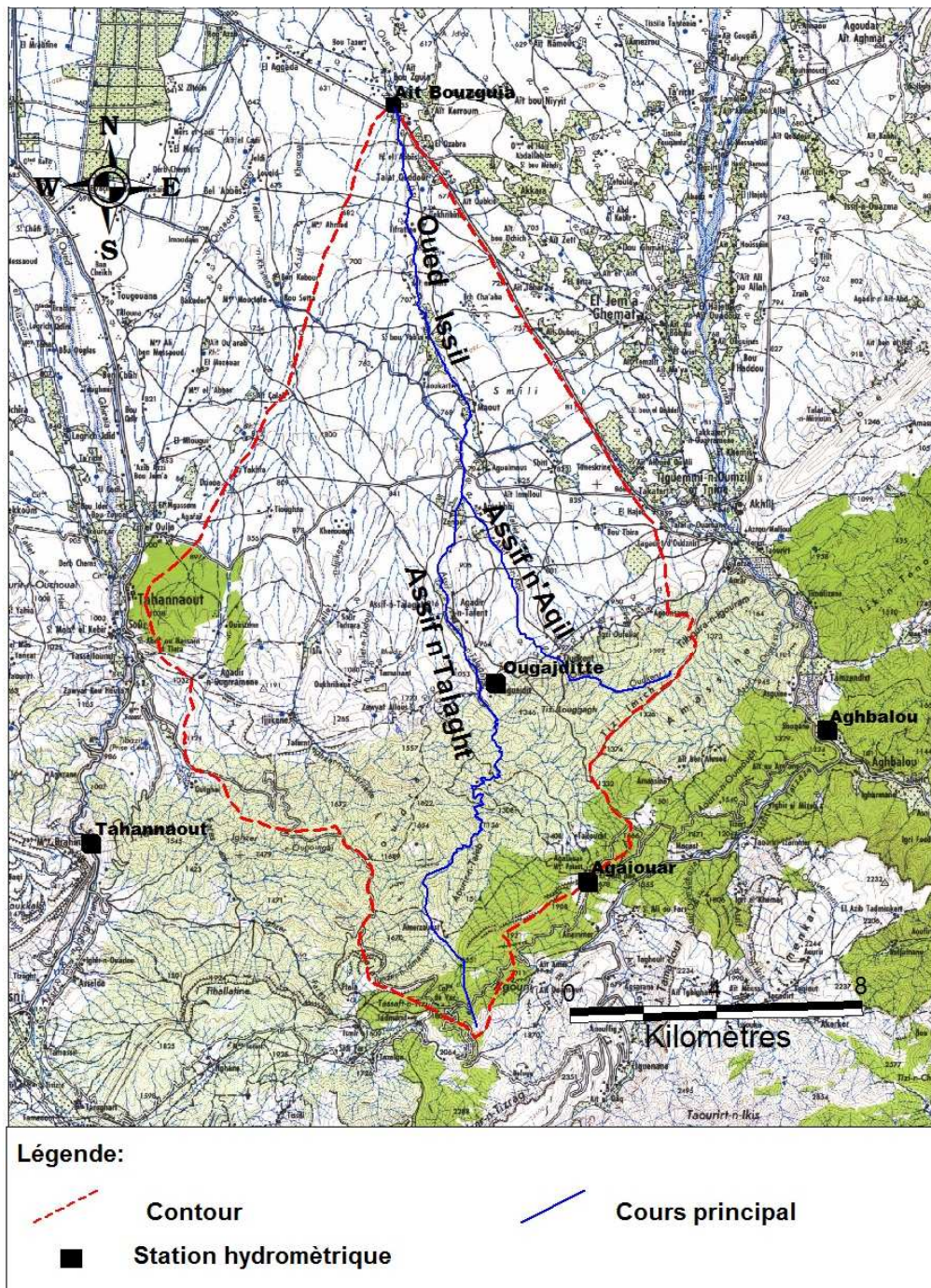


Figure 2 : Carte topographique montrant la délimitation du bassin versant de l'oued Issil

### III- L'indice de forme :

La forme du bassin versant peut avoir des conséquences hydrologiques importantes, notamment la relation pluie-débit et l'évolution des écoulements en période de crue. Autrement dit la forme d'un bassin versant a une influence sur la forme des hydrogrammes. Plusieurs formules et indices permettent de chiffrer les caractéristiques morphologiques des bassins versants.

La forme du bassin, par exemple est généralement caractérisée par l'indice de compacité de GRAVELLIUS : Ce coefficient de compacité  $K_G$  est destiné à comparer la forme d'un bassin à celui d'un cercle de même surface :

$$K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} \approx 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Avec :

- $K_G$  est l'indice de compacité de Gravéllius.
- A : L'aire du bassin versant [ $\text{km}^2$ ].
- P : Le périmètre du bassin [km].

La surface du bassin versant de l'oued Issil à Ait Bouzguia est de l'ordre de  $201 \text{ Km}^2$  pour un périmètre de 66.5 Km. Pour cela,  $K_G=1.31$ . Le bassin versant de l'oued Issil est donc trois fois plus long que large, c'est donc un bassin moyennement allongé.

#### IV- Le temps de concentration :

Le temps de concentration des eaux sur un bassin versant se définit comme le maximum de durée nécessaire à une goutte d'eau pour parcourir le chemin hydrologique entre un point du bassin et l'exutoire de ce dernier.

Pour ce paramètre on tient compte des caractéristiques géométriques et morphologiques du bassin. On le calcule à partir de la relation de Giandoht :

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

Avec :

- S : La surface du bassin versant ( $\text{km}^2$ ).
- L : La longueur du rectangle équivalent (km).
- $H_{moy}$  : L'altitude moyenne du bassin(m).
- $H_{min}$  : L'altitude de l'exutoire (m).

Pour le bassin versant de l'oued Issil :

$S=201.18 \text{ km}^2$ ,  $L= 25.2 \text{ Km}$ ,  $H_{min}= 625 \text{ m}$ ,  $H_{moy}= 1177 \text{ m}$

Le temps de concentration pour le bassin de l'oued Issil :  $TC = 5$  heures.

C'est un temps relativement court engendrera un rassemblement rapide des eaux vers l'exutoire et le risque de remontée brutale des niveaux des eaux et des débits de l'oued à l'entrée de la ville de Marrakech.

#### V- Hypsométrie et pentes :

L'analyse des principales caractéristiques morphologiques et hydrographiques du bassin de l'oued Issil, peut commencer par l'étude de la répartition des altitudes qui se fait d'après une carte en courbe de niveau. En mesurant au planimètre et en cumulant les aires situées entre chaque deux courbes successives on obtient un histogramme de fréquence d'altitudes et la courbe hypsométrique. Une carte hypsométrique donnera enfin une idée sur les proportions des tranches d'altitudes.

## 1- Carte hypsométrique :

La répartition du bassin versant par tranches d'altitude donne une importance capitale pour les études hydrologiques du fait que la plupart des facteurs météorologiques et hydrologiques sont influencés par l'altitude.

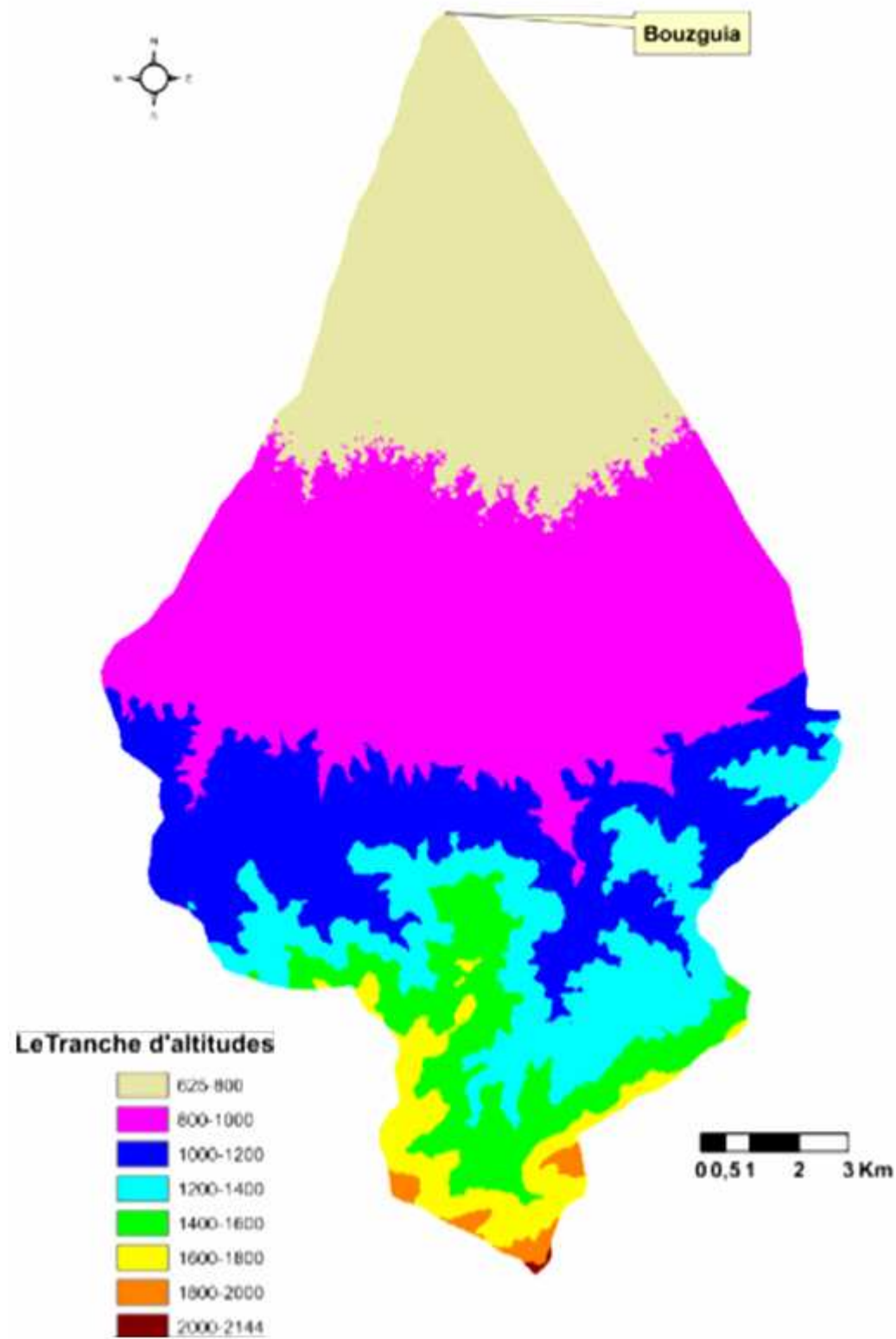


Figure 3 : Carte hypsométrique du bassin versant de l'oued Issil

La figure 3 illustre cette carte. Elle met en lumière une répartition différentielle des tranches d'altitudes. Les tranches [625-700] et [800-1000] occupent à elle seuls 59% du bassin versant. Cette partie du bassin est caractérisée par une pente assez faible à l'opposée de la seconde partie plus en amont. Au-delà de 1000 m, les tranches d'altitudes sont plus serrées mettant en évidence des dénivellations et des pentes importantes.

## 2- La courbe hypsométrique :

La courbe hypsométrique est obtenue en mesurant les surfaces comprises entre les courbes de niveaux et en leur attribuant des pourcentages de la surface totale du bassin.

On trace un diagramme avec les tranches d'altitudes en ordonnées et les superficies cumulées en abscisses.

### Tranches d'altitudes (m)

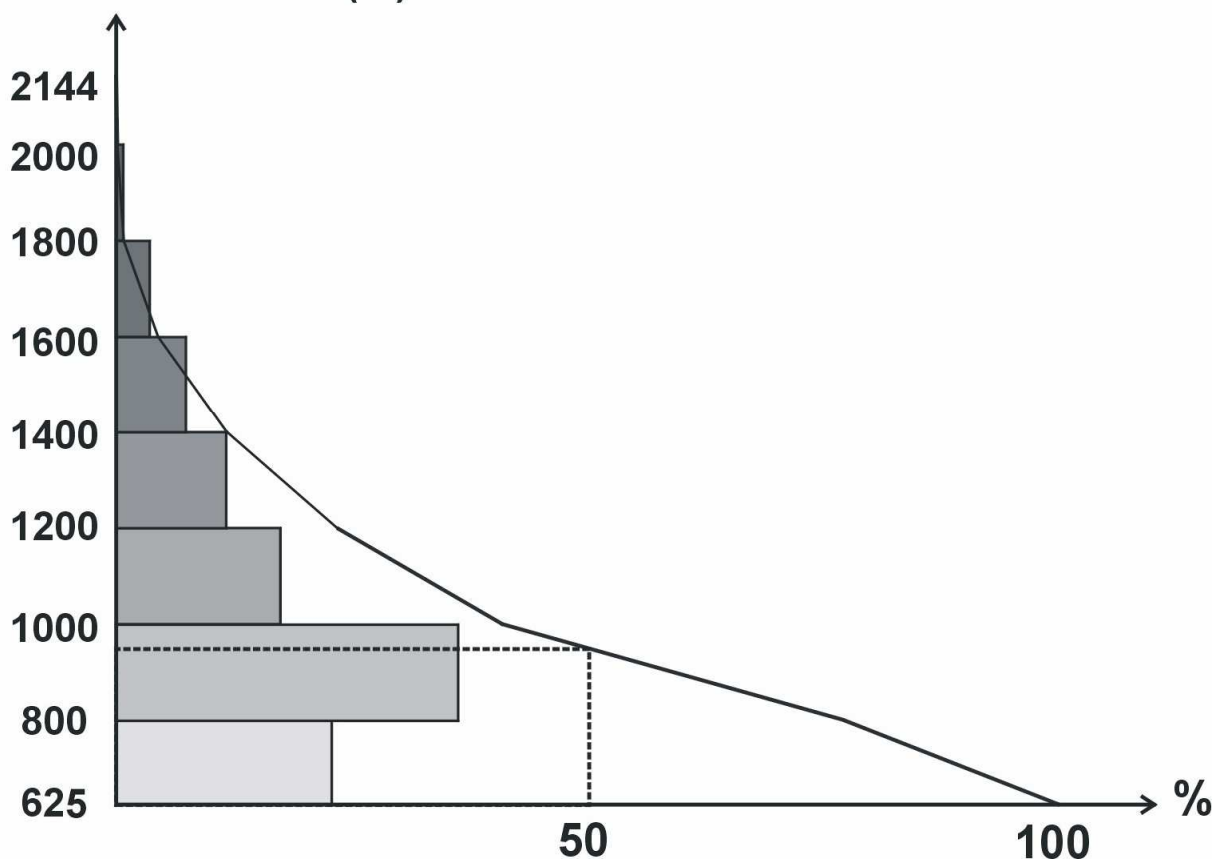


Figure 4 : Courbe hypsométrique du bassin de l'oued Issil

La courbe donne une idée sur le profil du bassin versant. Elle montre une élévation rapide des altitudes vers l'amont et vers le point culminant. Le profil est pour cela assez raide dans cette partie du bassin.

Par ailleurs, l'examen de la courbe permet de déduire :

a. L'altitude moyenne :

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

Avec :

- $H_{moy}$  : L'altitude moyenne du bassin [m].
- $A_i$  : L'aire comprise entre deux courbes de niveau [ $\text{km}^2$ ].
- $h_i$  : L'altitude moyenne entre deux courbes de niveau [m].
- $A$  : La superficie totale du bassin versant [ $\text{km}^2$ ].

L'altitude moyenne est parfois utilisée dans l'évaluation de certains paramètres hydrométéorologiques ou dans la mise en œuvre de modèles hydrologiques.

L'altitude moyenne du bassin d'Issil s'élève à 1177 m.

b. L'altitude médiane :

C'est l'altitude lue, sur la courbe hypsométrique, au point d'abscisse 50% de la surface totale du bassin.

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

Pour le bassin d'Issil :  $H_{moy}=1177$  m  $H_{médiane}=945$  m.

L'altitude moyenne est supérieure à l'altitude médiane donc la pente du bassin est irrégulière. Elle est trop forte en amont du bassin (avec la présence de hauts reliefs) et s'adoucit en descendant vers la plaine.

### 3- La pente moyenne du bassin versant :

La pente est une caractéristique importante qui renseigne sur la topographie du bassin, la vitesse des ruissellements et les temps de concentration. La pente influence directement le débit de pointe lors d'une averse.

Plusieurs méthodes ont été développées pour estimer la pente moyenne d'un bassin.

La méthode la plus simple consiste à mesurer la dénivelée totale du bassin avec la longueur du rectangle équivalent.

$$P_m = \frac{Dt}{L} = \frac{(2144 - 625)}{25.2}$$

Avec :

$P_m$  : La pente moyenne [%].

$L$  : La longueur du rectangle équivalent.

$Dt$  : La dénivelée totale.

L'indice de la pente moyenne du bassin versant de l'oued Issil :  $P_m=6,1\%$ .

La pente globale du bassin semble importante, mais il est évident qu'elle est beaucoup plus grande en amont qu'en plaine autour de Marrakech.

Une étude récente montre qu'il est difficile d'envisager de créer un barrage dans la plaine afin de retenir l'eau en amont de Marrakech car les pentes sont justement trop faibles et le coût des travaux serait très élevé (Laplace 2008).

## VI- Le rectangle équivalent :

Le Rectangle équivalent est une représentation géométrique du contour du bassin versant transformé en rectangle de même surface. Celui-ci est tracé à partir de la longueur et de la largeur du bassin. Les courbes de niveau  $y$  sont parallèles et sont tracées en respectant les répartitions hypsométriques. Ce rectangle est conçu pour pouvoir comparer les bassins versants du point de vue morphologique.

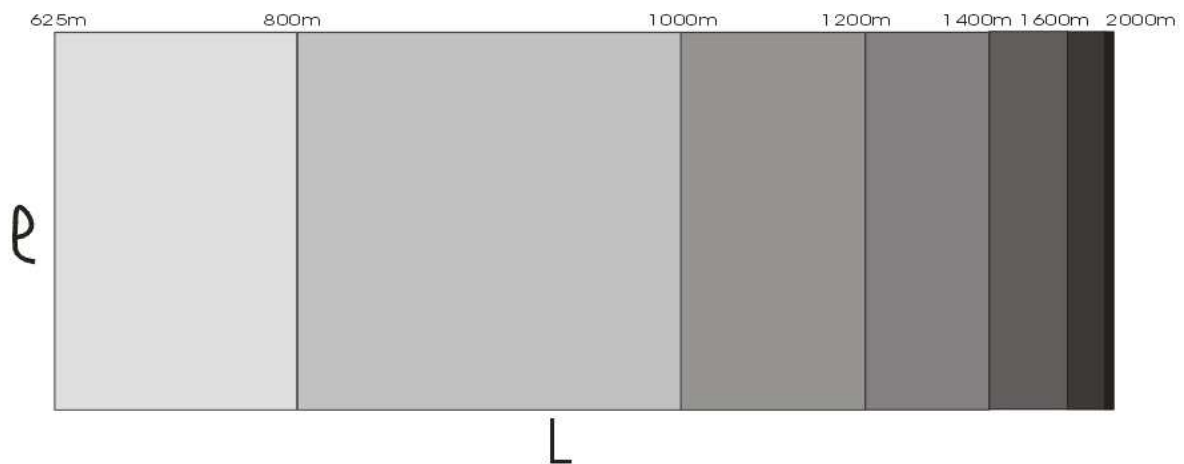


Figure 5 : Rectangle équivalent du bassin versant de l'oued Issil

La longueur du rectangle équivalent du bassin d'Issil est de l'ordre de 25.2 Km et la largeur de 8 Km. Cette représentation est illustrée par la figure 5 sur laquelle sont portées également les tranches d'altitudes et les « droites » de niveau. Ces dernières sont assez serrées en amont du bassin versant témoignant d'une pente importante dans cette partie du bassin et d'un relief élevé, montré par les altitudes de ces droites.

## VII- Réseau hydrographique et densité de drainage :

Le réseau hydrographique est l'ensemble des cours d'eau qui recueillent les eaux des sources et de ruissellement des versants. Il est composé du cours principal et des affluents appelés aussi tributaires.

La configuration en plan du réseau est très variée d'un bassin à l'autre, elle dépend de la combinaison de nombreux facteurs tels que le climat, la géologie, la topographie et l'érosion et résulte d'une longue évolution.



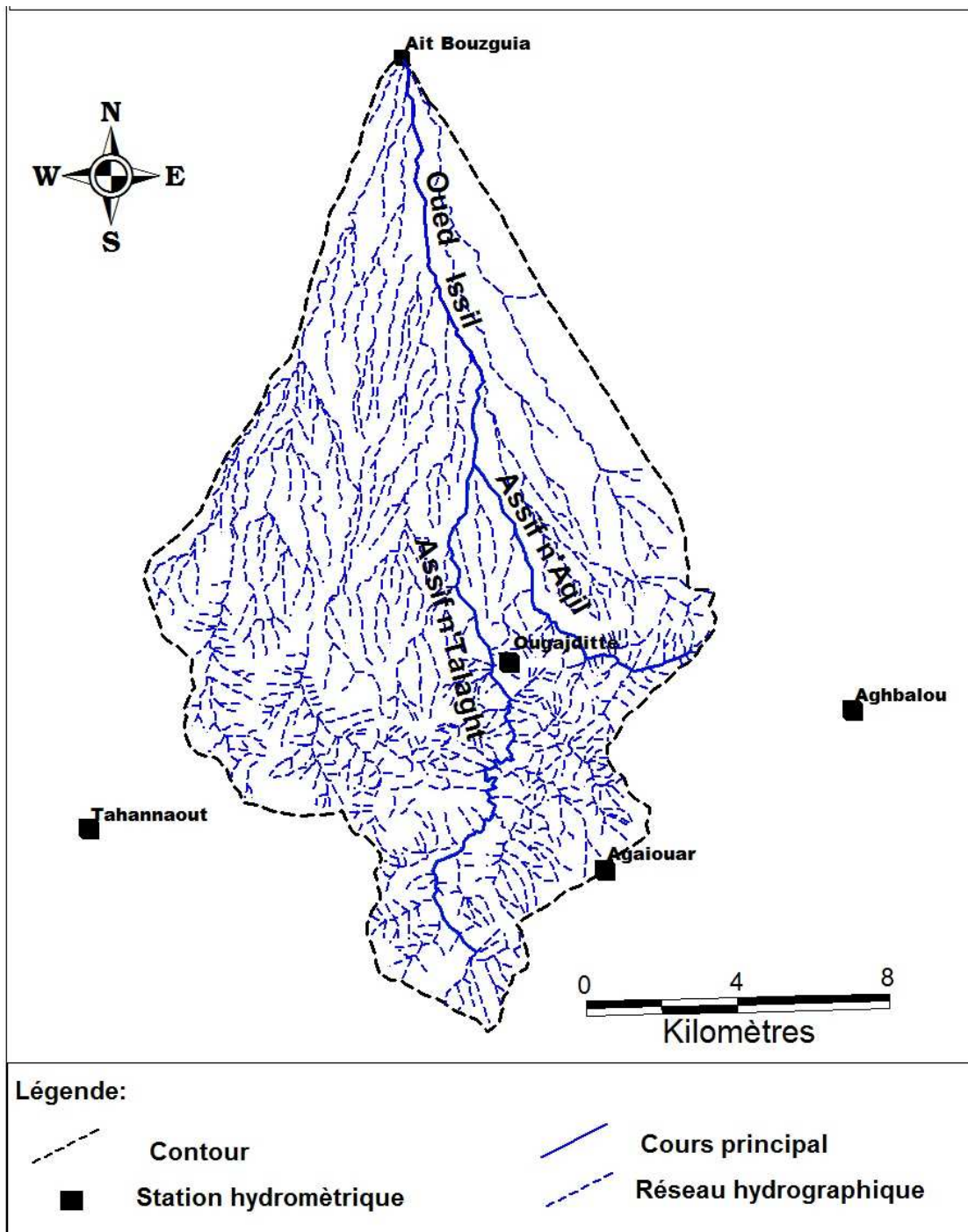


Figure 6: Carte du réseau hydrographique du bassin versant de l'oued Issil

La longueur totale du réseau hydrographique telle qu'elle a été calculée à partir d'une carte topographique digitalisée au 100 000<sup>e</sup> est de 567.72 km, à cet effet, la densité de drainage, qui représente la longueur moyenne du réseau hydrographique en km par km<sup>2</sup> de bassin est de l'ordre de : 2.82

$$Dd = \frac{\sum l_i}{A}$$

Avec :

Dd : La densité de drainage en km/km<sup>2</sup>.

$\sum l_i$  : La longueur totale du réseau hydrographique (567,7 km).

A : Surface du bassin (201 km<sup>2</sup>).

C'est une densité assez importante pour un milieu semi-aride et qui permettra une collecte aisée des eaux de pluie et un acheminement important des ruissellements vers l'exutoire.

L'oued Issil, est un affluent rive gauche de l'oued Tensift. La longueur du cours principal jusqu'à Ait Bouzguia est de l'ordre de 31 Km. Et elle est de l'ordre de 56 Km jusqu'à la confluence avec oued Tensift.

Le réseau hydrographique du bassin versant est assez dense et bien ramifié surtout sur sa partie montagneuse (la carte). Le cours d'eau est pourvu de deux principaux affluents:

- ❖ Assif n'Aquil : au sud-est du bassin versant, qui prend naissance à une altitude de 1400 m.
- ❖ Assif Talaght : au sud du bassin, qui prend naissance à 2000 m d'altitude.

Pour conclure nous avons résumé sur le tableau récapitulatif suivant les caractéristiques morphométriques du bassin :

Superficie à l'exutoire (Km <sup>2</sup> )	201.18
Périmètres (Km)	66.5 1
Indice de compacité	1.31
Altitude moyenne (m)	1177
Altitude maximal (m)	2144
Altitude minimale (m)	625
L de rectangle équivalent (km)	25.2
l de rectangle équivalent (km)	8
Pente moyenne (%)	6.1
Temps de concentration (heures)	5
Longueur du cours principal (Km)	31

**Tableau 1 : Les caractéristiques morphométriques du bassin versant de l'oued Issil**

## VIII- Lithologie et géologie générale :

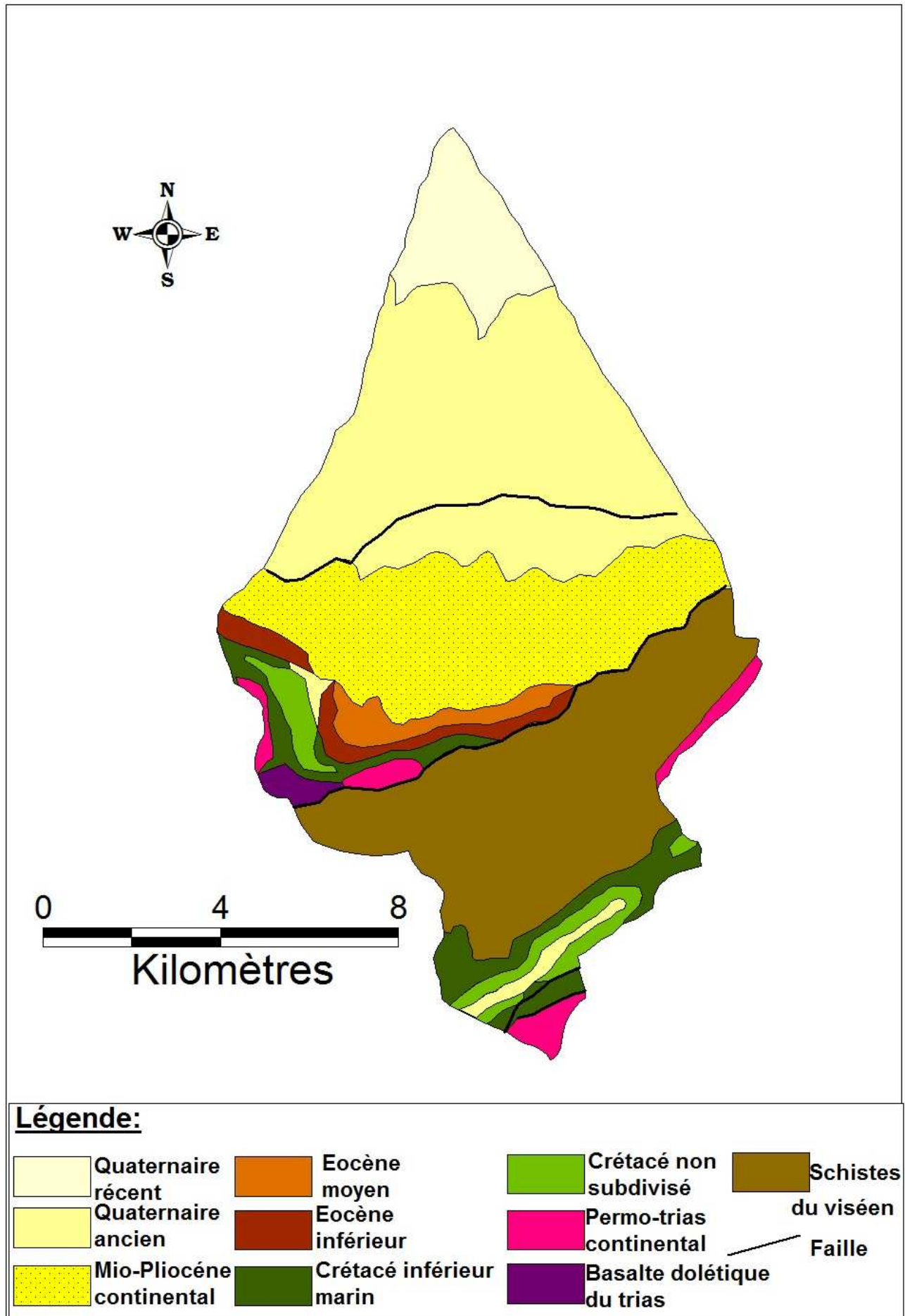


Figure 7 : Carte géologique simplifiée du bassin versant de l'oued Issil

Sur le plan géologique, les affleurements du bassin versant de l'oued Issil sont constitués de faciès très diversifiés d'âge compris entre le Primaire et le Quaternaire. La disposition peut être subdivisée en deux parties : amont et aval.

- ❖ La partie aval est composée de quaternaire récent, de quaternaire ancien et de miopliocène continentale. Il est formé globalement de formations alluvionnaires et des conglomérats détritiques relativement perméables.
- ❖ La partie amont est constituée de l'éocène moyen et inférieur, mais également de formations calcaires et marnocalcaires du crétacé, et du permotrias qui est parfois associé à des roches schisteuses. Le faciès, fortement coloré, rouge, parfois violacé, est représenté principalement par des grès.  
La plus grande partie est cependant occupée par des schistes noirs du viséen, qui sont d'anciens pélites légèrement métamorphosées (métapélites).

L'évolution des faciès de l'amont vers l'aval s'effectue selon l'âge (le viséen et le permotrias en amont et le quaternaire récent en aval, avec le crétacé et l'éocène entre les deux). Nous avons, par ailleurs noté la présence des contacts anormaux entre les différentes formations (l'éocène, le crétacé et les schistes carbonifères) avec un jeu de failles généralement orientées SW-NE. Elles suivent donc le sens de l'accident majeur du Haut Atlas.

La partie montagneuse est constituée de formations anciennes de crétacé, permotrias et viséen. Le sol est relativement imperméable. L'eau de pluie s'infiltré donc peu, elle ruisselle, érode, ravine les sols de montagne, prend de la vitesse puis débouche dans la plaine.

## **IX- Le climat global et le couvert végétal :**

Le climat de la région est de type semi-aride, avec des amplitudes thermiques importantes entre l'hiver et l'été (45° comme maxima et 5° comme mini ma). La pluviométrie moyenne varie entre 250 mm/an en plaine et 600 mm/an en haute montagne avec des variations importantes interannuelles et intersaisons. De violents orages éclatent pendant la saison chaude, pouvant atteindre des hauteurs de pluie de 50 mm en une heure.

La couverture végétale ajoute également son influence sur la rapidité du ruissellement, le taux d'évaporation et sur la capacité de rétention du bassin. Sur les berges de l'oued, on rencontre des petites parcelles en culture, des oliveraies bordées de haies sèches, mais aussi une végétation qui semble spontanée et qui correspondrait aux étages Thermo-méditerranéen et Infra-méditerranéen. On rencontre des Acacias et la caractéristique Laurier rose qui couvre parfois complètement les berges des oueds permanents.

L'oued se resserre parfois et la végétation arbustive et arborée apparaît, puis il s'ouvre à nouveau pour laisser la place aux cultures des douars (Laplace, 2008).

## Chapitre II : Le régime pluviométrique du bassin versant

Les données pluviométriques ont été fournies par l'Agence de Bassin Hydraulique de Tensift (ABHT). Elles concernent les stations d'Agaiouar, Tahannaout et Aghbalou.

Malgré la discontinuité de certaines séries, l'analyse a été réalisée de telle façon à tirer le maximum d'informations des données. Un autre problème réside dans l'intervalle de temps qui n'est pas similaire pour les trois stations.

Pour le traitement de ces données pluviométriques, nous avons choisi de travailler à différents pas de temps pour aboutir à une comparaison aux échelles mensuelles, saisonnières et annuelles.

Le bassin dispose d'une station pluviométrique installée en amont. Il s'agit de la station d'Agaiouar située à 1650 m d'altitude et gérée par l'administration des Eaux et Forêts.

Par ailleurs, le bassin a récemment été équipé par deux stations hydro-pluviométriques : Ouaguejdit et Ait Bouzguia, mais ces deux stations n'ont véritablement commencé à bien fournir des données fiables que de puis deux ans. C'est ainsi que pour l'analyse pluviométrique du bassin et en raison de manque de données des stations précitées nous avons eu recours à deux autres stations proches de notre bassin à savoir Tahannaout et Aghbalou.

Les coordonnées des stations pluviométriques étant :

Stations	X	Y	Z
Tahannaout	255 900	80 400	925
Aghbalou	276 150	83 050	1070
Agaiouar	269 500	79 000	1649

Tableau 2 : Les coordonnées Lambert (m) des trois stations

### I- Régime pluviométrique du bassin :

#### 1- Précipitations moyennes mensuelles :

Les hauteurs des précipitations illustrées correspondent à des moyennes mensuelles de la période 1970-2004 pour Tahannaout et Aghbalou et de la période 1970 à 1998 pour Agaiouar.

Mois	Aghbalou	Tahannaout	Agaiouar
Septembre	16.2	11.5	27.2
Octobre	49	33.8	54.4
Novembre	55.4	37.4	52.5
Décembre	46.5	32.6	56.6
Janvier	61.7	49.7	59.8
Février	66.4	49.5	77.7
Mars	85.6	56.2	104
Avril	86.3	56.8	85.3
Mai	49.3	29.4	35.2
Juin	14.9	12.7	15.8
Juillet	3.6	3	4.6
Août	6.5	4.3	9.7

Tableau 3 : Précipitations moyennes mensuelles des trois stations

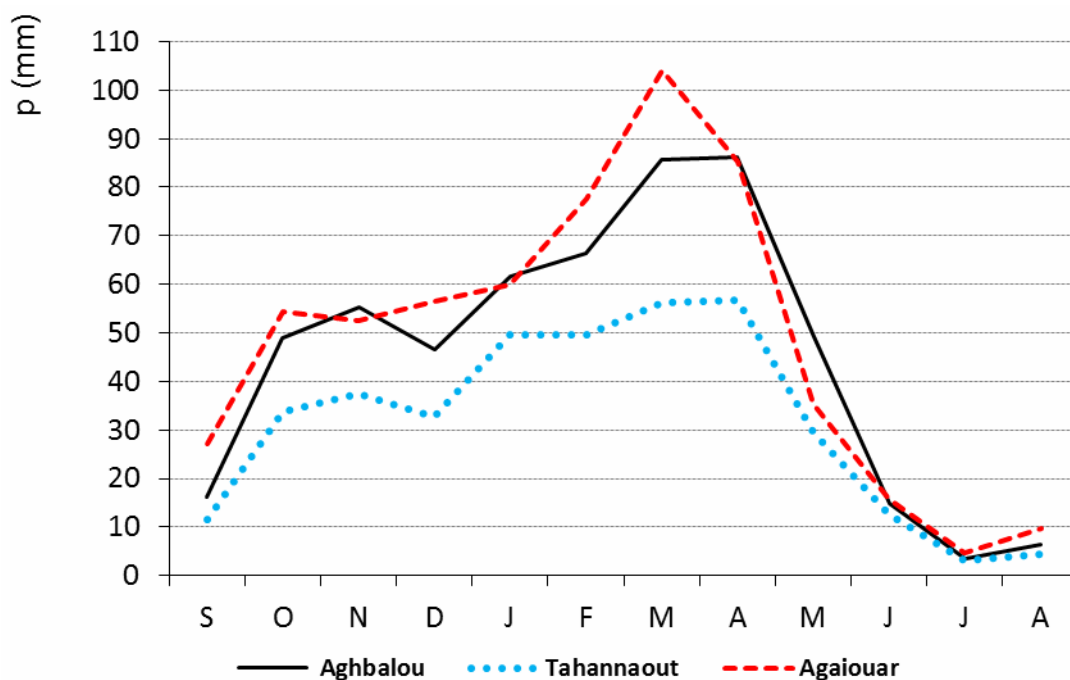


Figure 8 : Précipitations moyennes mensuelles aux trois stations (1970-2004)

A première vue, nous remarquons que la variation mensuelle des pluies sur les trois stations est identique: le maximum se situe aux mois de mars et avril qui dépassent de très peu le mois de février.

Pour les mois les plus humides (février, mars, avril) la moyenne des précipitations mensuelles est de l'ordre de 74,2 mm. La période sèche dure 3 mois (Juin à Août) avec un minimum de précipitations établi aux mois de Juillet et Août.

Agaiouar est cependant la station la plus pluvieuse à l'échelle annuelle et durant plusieurs mois. Aghbalou arrive en premier durant les mois de novembre, janvier, avril et mai. Tahannaout reçoit tous les mois des hauteurs plus faibles que celles enregistrées à Aghbalou et à Agaiouar pour des raisons d'altitude plus faible.

## 2- Précipitations moyennes saisonnières:

Les valeurs des précipitations saisonnières sont obtenues en calculant la somme des moyennes mensuelles sur une période de 34 ans (1970-2004) pour Aghbalou et Tahannaout.

Saisons	Automne			Hiver			Printemps			Eté		
Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
Moy. mensuelle	11.5	33.8	37.8	32.6	49.7	49.5	56.2	56.8	29.4	12.7	3.0	4.3
Moy. saisonnière	83.1			131.8			142.4			20		

Tableau 4 : Précipitations moyennes saisonnières à Tahannaout

Saisons	Automne			Hiver			Printemps			Eté		
Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
Moy. mensuelle	27.2	54.4	52.5	56.6	59.8	77.7	104.0	85.3	35.2	15.8	4.6	9.7
Moy. saisonnière	134.1			194.1			224.5			30.1		

Tableau 5 : Précipitations moyennes saisonnières à Agaiouar

Saisons	Automne			Hiver			Printemps			Eté		
Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
Moy. Mensuelle	16.2	49.0	55.4	46.5	61.7	66.4	85.6	86.3	49.3	14.9	3.6	6.5
Moy. Saisonnière	120.6			174.6			221.2			25		

Tableau 6 : Précipitations moyennes saisonnières à Aghbalou

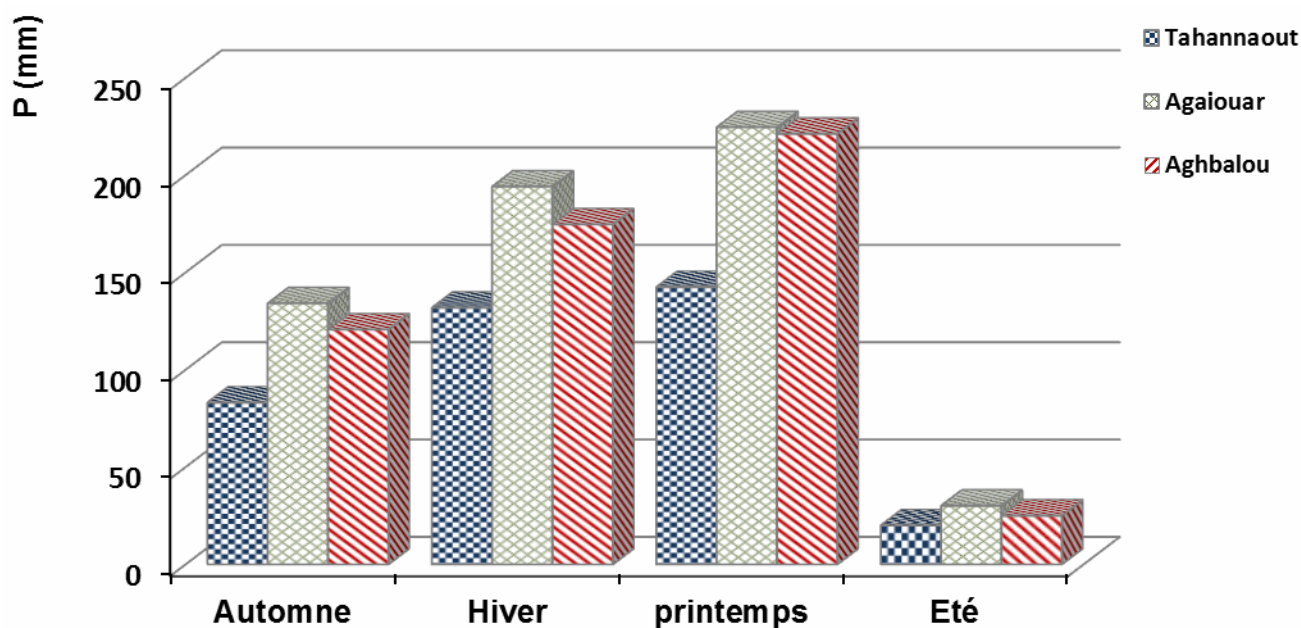


Figure 9 : Précipitations moyennes saisonnières aux trois stations (1970-2004)

La variation saisonnière, paraît identique sur l'ensemble des stations. Le printemps reste la saison la plus arrosée suivie par l'hiver et ensuite l'automne. Les pluies d'été sont très faibles, elles s'abattent généralement en amont du bassin sous forme d'orages rarement enregistrés par les stations à cause de leurs caractère très localisés.

### 3- Les précipitations moyennes annuelles:

#### a. Station d'Agaiouar :

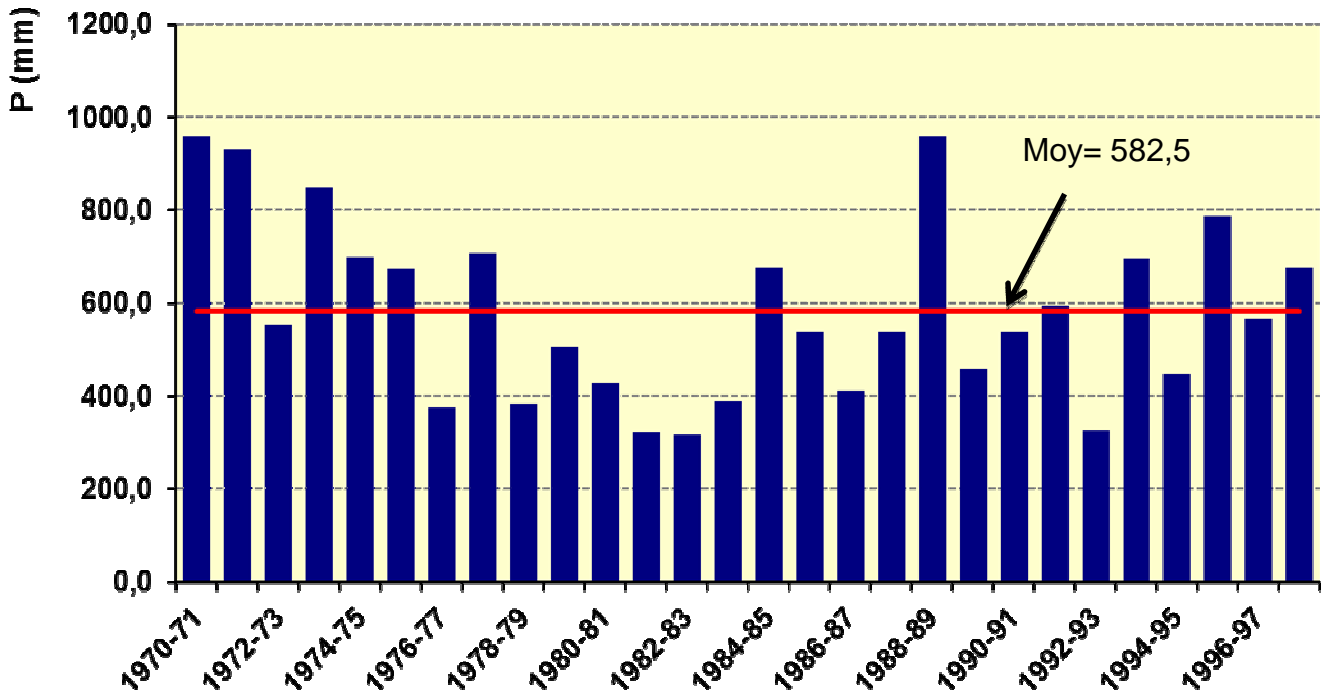


Figure 10 : Précipitations moyennes annuelles à Agaiouar (en mm) période de 1970 -1998

La figure illustre une forte variation dans le temps des hauteurs de pluies annuelles à la station d'Agaiouar, avec une pluviométrie moyenne de l'ordre 582.5 mm, un écart-type de 193.8 et un coefficient de variation de 33%. Cette station est caractérisée par des hauteurs de pluies importantes vue sa situation à une haute altitude ( $Z=1649$  m) et sa position sur un versant montagneux exposé vers le Nord-Ouest. C'est-à-dire qu'elle est bien exposée aux perturbations pluvieuses en provenance de l'océan atlantique.

#### b. Station d'Aghbalou :

Pour la station d'Aghbalou (située à 1070 m) la série de données disponible de 1970-2004, montre un maximum de 1053.5 mm en 1970-71 et un minimum absolu de 276.9 mm en 1992-93. Les années 1970-71, 1971-72 et 1973-74 sont caractérisées par une forte pluviométrie, alors que les autres années sont caractérisées par des précipitations plus ou moins proches de la moyenne interannuelle qui est de l'ordre de 541.2 mm. L'écart-type est de 169.7 et le coefficient de variation est de l'ordre de 31%.



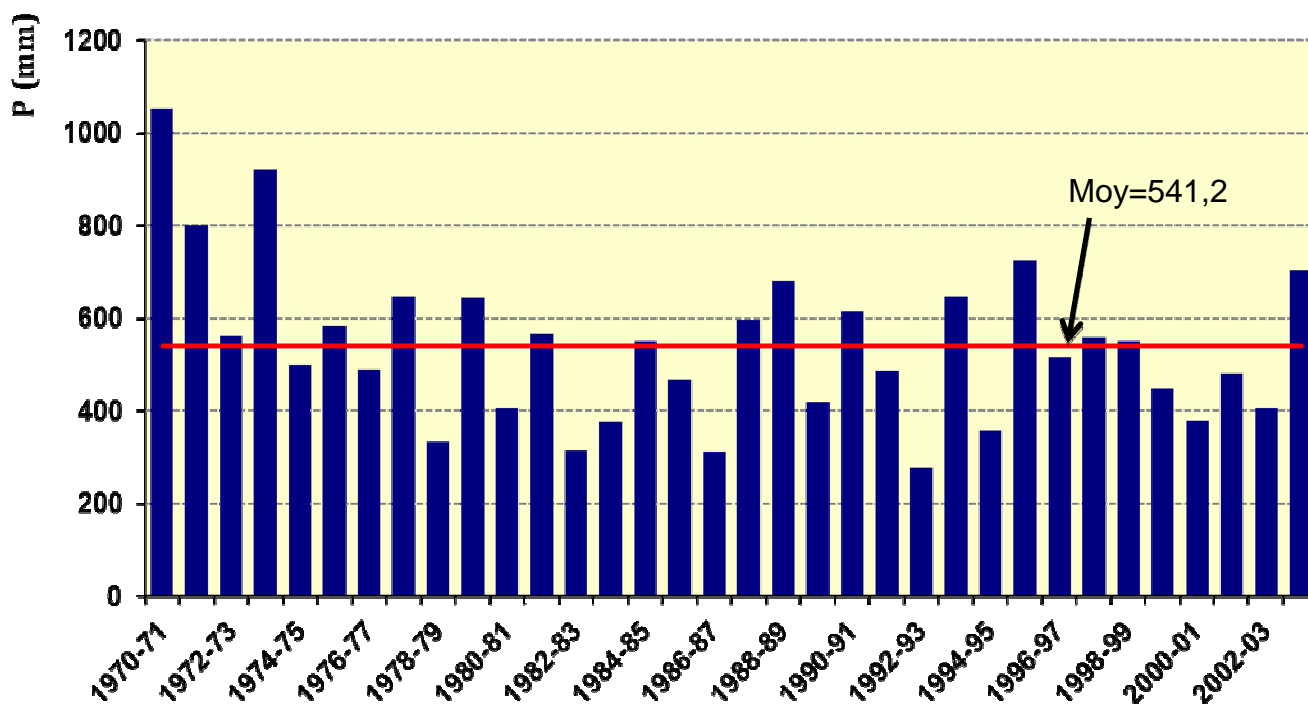


Figure 11 : Précipitations moyennes annuelles à Aghbalou de 1970 à 2004

c. Station de Tahannaout :

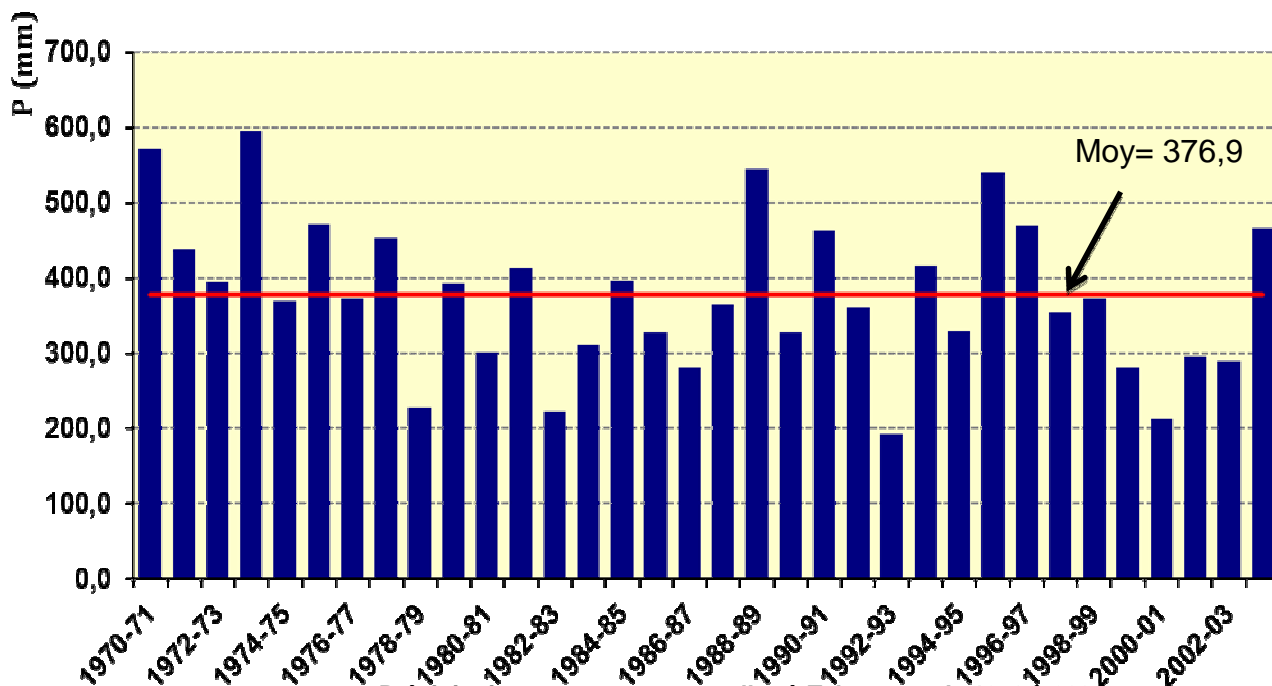


Figure 12 : Précipitations moyennes annuelles à Tahannaout de 1970 à 2004

La série de données disponibles de la station de Tahannaout illustre une alternance des années sèches et des années pluvieuses avec des précipitations moyennes de 376.9 mm, un écart-type de 100.6 et un coefficient de variation égal à 27%.

Le maximum pluviométrique avoisine les 600 mm en 1973-74 et le minimum de la série d'observation était de 192 mm en 1992-93.

Cette station est caractérisée par une pluviométrie plus faible que celles observées à Aghbalou et surtout à Agaiouar. Ceci principalement à cause de son altitude plus faible que les deux autres stations (respectivement 925 m contre 1070 m et 1649 m).

En effet, il y a une corrélation significative entre les hauteurs des pluies et les altitudes des stations du Haut Atlas de Marrakech. Selon une étude préalable (Saidi 2006), le coefficient de corrélation entre les deux paramètres est de l'ordre de 0.79. Les hauteurs de pluies augmentent significativement en montant en altitude (figure 13).

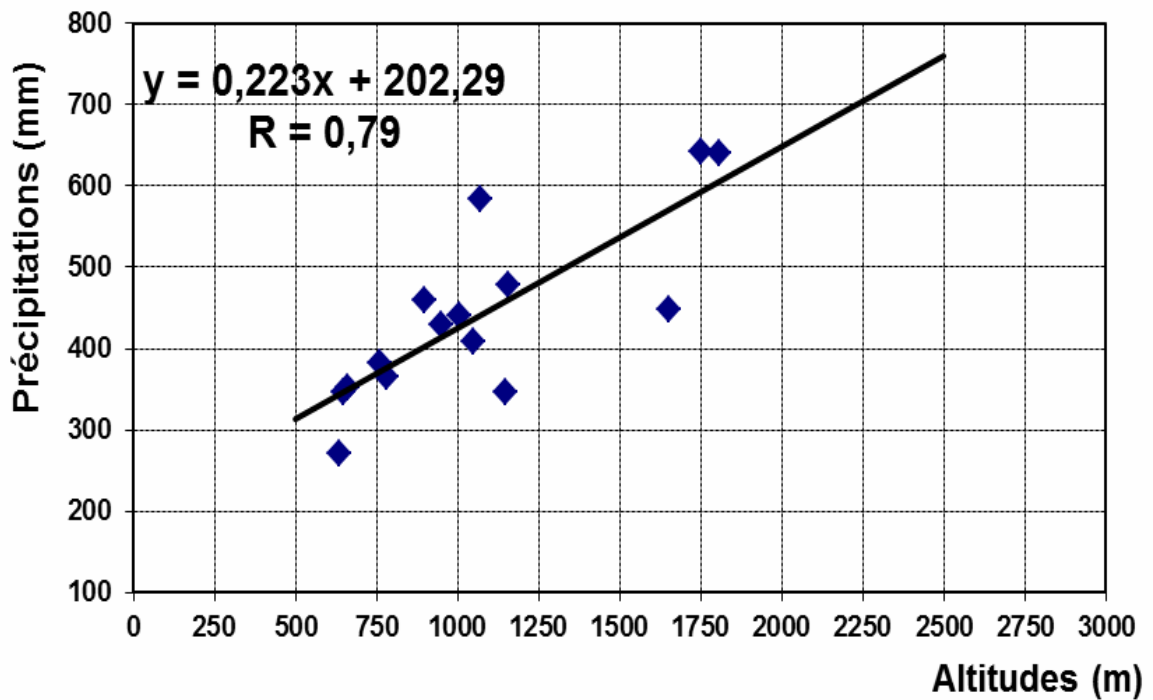


Figure 13 : Relation altitude-précipitations des stations du Haut Atlas de Marrakech

#### 4- Précipitations moyennes annuelles à l'échelle du bassin versant :

ANNEE	Aghbalou	Tahnaout	Agaiouar	Moyenne
1970-71	1053.5	571.2	960.2	861.6
1971-72	802	437.6	932.2	723.9
1972-73	563.3	394.6	552.6	503.5
1973-74	921.4	595.2	849.7	788.8
1974-75	499.1	369.4	700.1	522.9
1975-76	583.8	470.7	674.3	576.3
1976-77	489	373.3	374.2	412.2
1977-78	647.9	452.5	708.2	602.9
1978-79	334.4	227.0	384.3	315.2
1979-80	646.5	393.2	506.0	515.2
1980-81	407.7	301.7	427.1	378.8
1981-82	567.7	412.3	323.5	434.5
1982-83	314.9	221.8	316.6	284.4
1983-84	376.3	311.6	388.0	358.6
1984-85	551.8	395.5	676.0	541.1
1985-86	467.5	327.0	539.9	444.8
1986-87	313.8	280.1	410.5	334.8
1987-88	596.1	365.0	539.7	500.3
1988-89	680.9	544.6	959.4	728.3
1989-90	421.1	327.8	457.0	402.0
1990-91	617.1	462.0	537.7	538.9
1991-92	487.2	360.6	592.6	480.1
1992-93	276.9	192.2	325.4	264.8
1993-94	647.8	416.0	696.0	586.6
1994-95	359.4	329.6	447.4	378.8
1995-96	725.1	539.0	788.1	684.1
1996-97	515.2	469.4	566.7	517.1
1997-98	560.3	354.8	677.5	530.9
1998-99	552.4	372.9	-	462.7
1999-00	449.4	280.2	-	364.8
2000-01	379.6	212.1	-	295.9
2001-02	481.9	296.2	-	389.1
2002-03	406.1	289.7	-	347.9
2003-04	704.7	466.9	-	585.8

Tableau 7 : Précipitations moyennes annuelles des trois stations

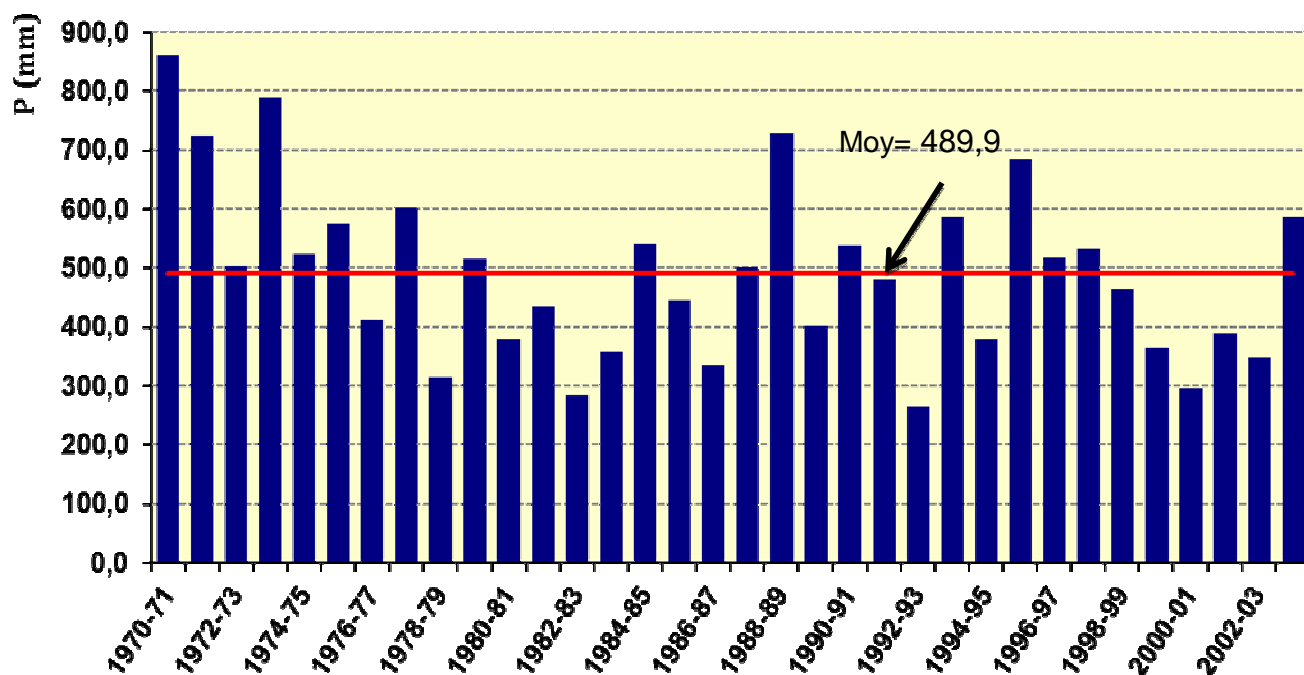


Figure 14 : Précipitations moyennes annuelles du bassin versant d'Issil

La figure illustre les variations dans le temps des hauteurs de pluies sur l'ensemble du bassin versant de l'oued Issil. Cette distribution irrégulière des précipitations est marquée par une très grande variation durant toute la période de 1970 à 2004. Les précipitations annuelles moyennes sont de l'ordre de 489.9 mm, L'écart type est de 145.3 et le coefficient de variation est de 30%.

## II- Corrélations entre les précipitations des trois stations (Tahnaout, Aghbalou et Agaiouar):

### 1- Corrélations entre les précipitations annuelles des stations :

La corrélation va nous renseigner sur le degré de liaison entre les pluies des trois stations sur une période de 34 ans (pour Tahnaout et Aghbalou) et 28 ans pour Agaiouar. Cette liaison est mise en lumière par un diagramme de dispersion où sont portés les indices annuels de précipitations des 3 stations. Chaque couple de valeurs x et y (respectivement pluies annuelles de deux stations) relatifs à une même année, représente l'abscisse et l'ordonnée d'un point par rapport aux systèmes d'axes Ox et Oy.

Sur les figures 15, 16 et 17, qui illustrent cette corrélation, le nuage des points expérimentaux a pris la forme d'une fonction linéaire inclinée par rapport aux axes; la relation est donc linéaire, et la droite de régression sera de la forme :  $y = ax + b$ .

Le calcul du coefficient de corrélation R, est une autre façon plus précise de qualifier la liaison entre les pluies annuelles sur un bassin versant. Il renseignera sur la qualité d'ajustement à la droite de régression et confirmera le résultat obtenu graphiquement.

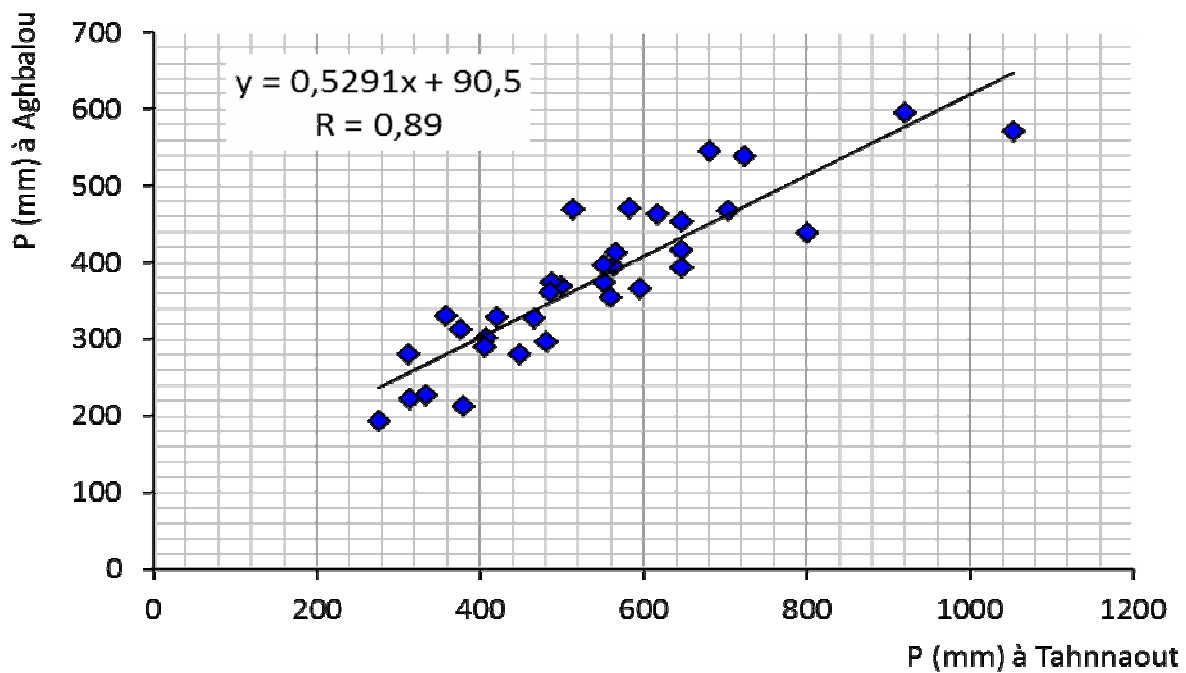


Figure 15 : Corrélation entre les précipitations annuelles d'Aghbalou et de Tahnaout

Pour les deux stations si dessus, le coefficient de corrélation est égal à 89%. Il montre donc une bonne liaison entre les précipitations annuelles de Tahnaout et Aghbalou.

Les fortes perturbations pluvieuses qui touchent une station intéressent l'autre station bien qu'avec des hauteurs différents, et les années sèches à Tahnaout ne connaissent pas un meilleur sort à Aghbalou.

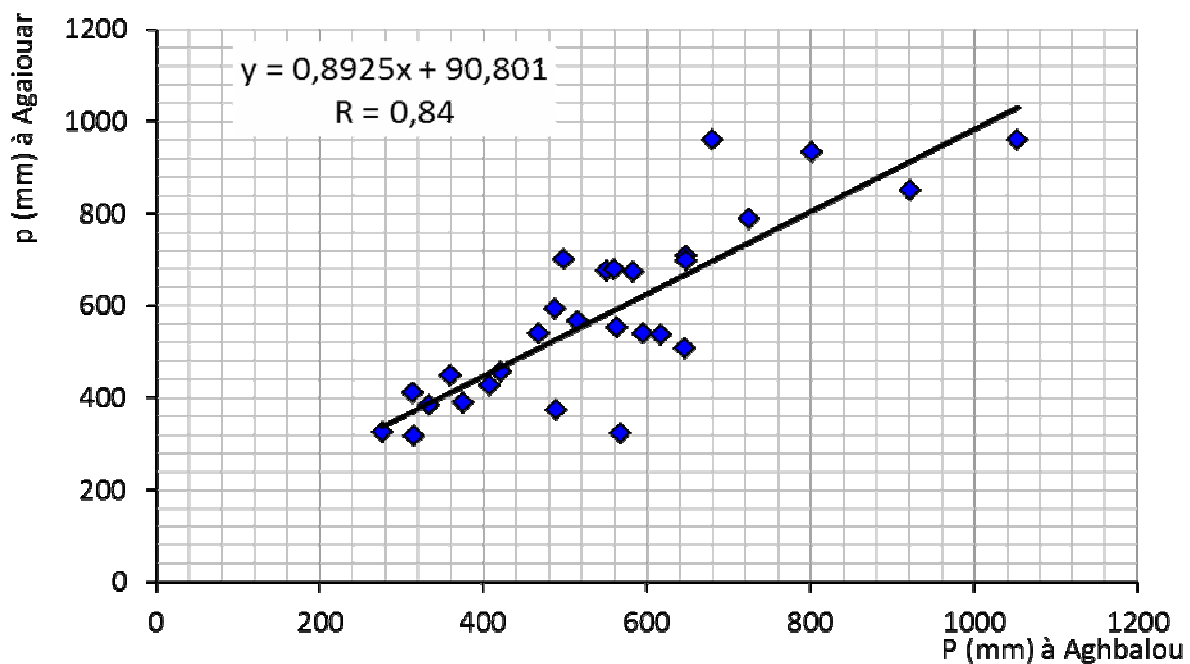


Figure 16 : Corrélation entre les précipitations annuelles d'Agaïouar et d'Aghbalou

Pour les stations (d'Aghbalou et Agaïouar), le coefficient de corrélation est de l'ordre de 0,84. Il montre également une corrélation relativement bonne entre les précipitations de ces deux stations.

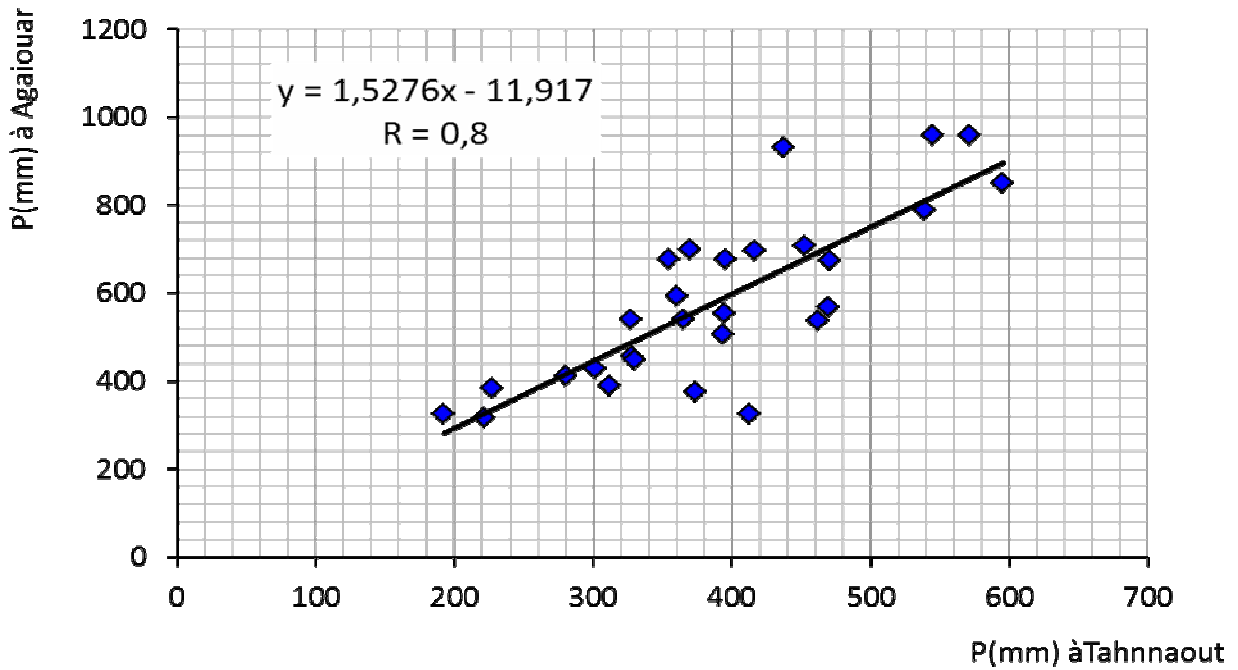


Figure 17 : Corrélation entre les précipitations annuelles d'Agaïouar et de Tahannaout

Pour les stations de Tahannaout et d'Agaïouar, la corrélation est assez bonne (bien que moins importante que les deux premiers) les 3 stations sont pluviométriquement liées. Elles appartiennent légèrement au même domaine pluviométrique: celui du Haut Atlas de Marrakech.

## 2- Corrélation entre les précipitations mensuelles aux 3 stations :

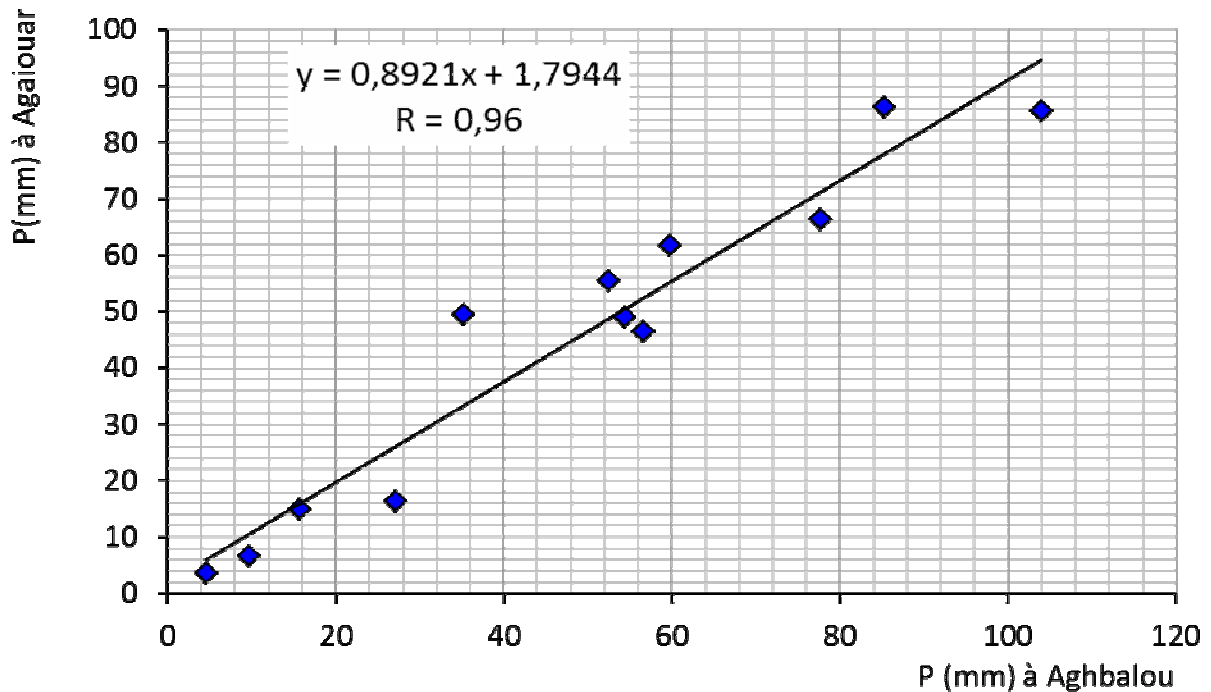


Figure 18 : Corrélation entre les précipitations mensuelles d'Agaïouar et d'Aghbalou

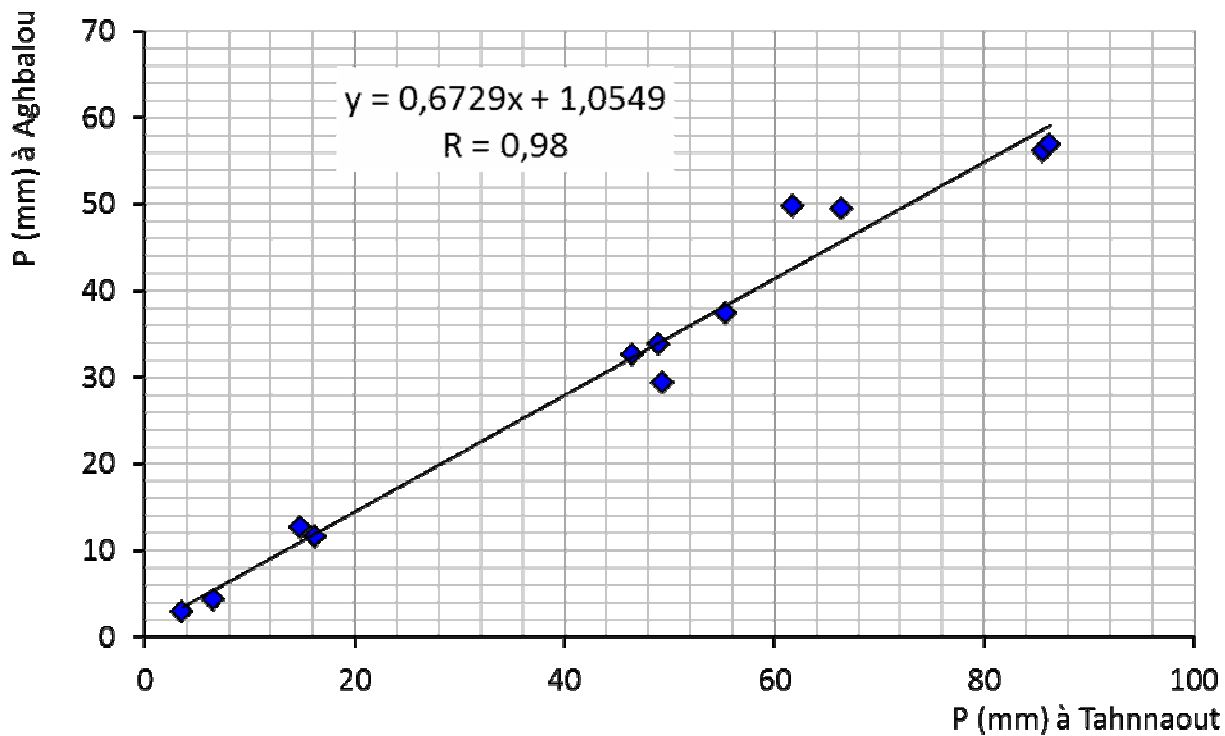


Figure 19 : Corrélation entre les précipitations mensuelles d'Aghbalou et de Tahnaout

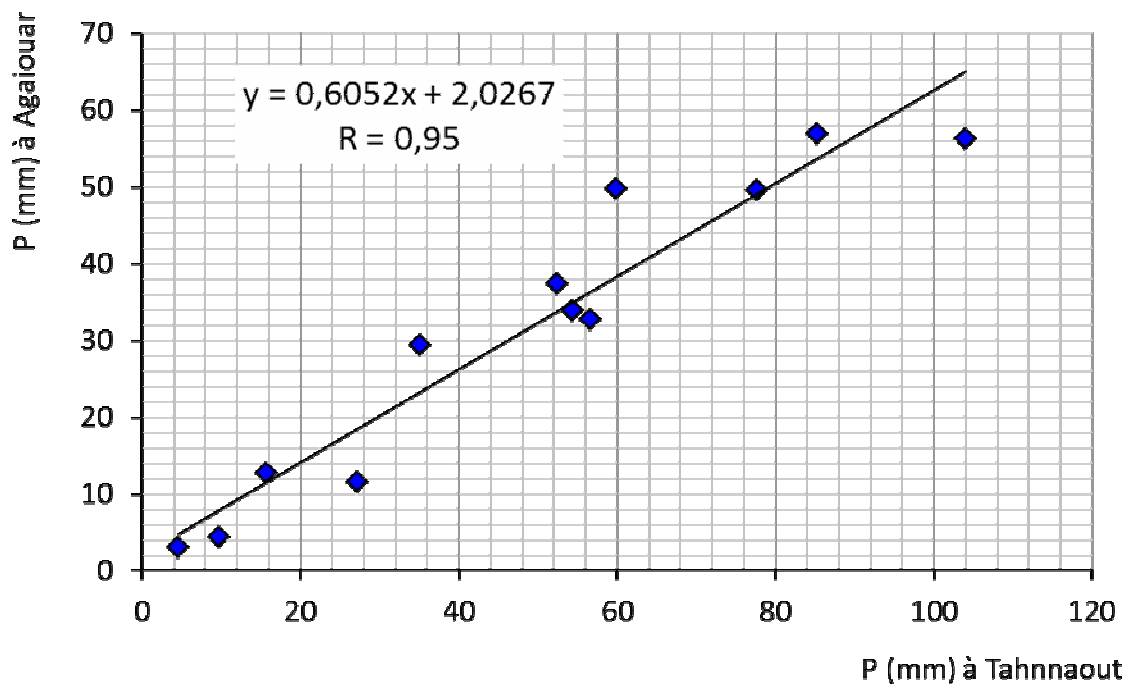


Figure 20 : Corrélation entre les précipitations mensuelles d'Agaiouar et de Tahnaout

Les trois figures illustrent une très bonne corrélation entre les précipitations mensuelles des trois stations, avec des coefficients de corrélations très élevés. La relation entre les précipitations aux trois stations semble linéaire avec des droites de régressions de formes  $y = ax + b$ .

### 3- Corrélation entre les précipitations mensuelles particulières :

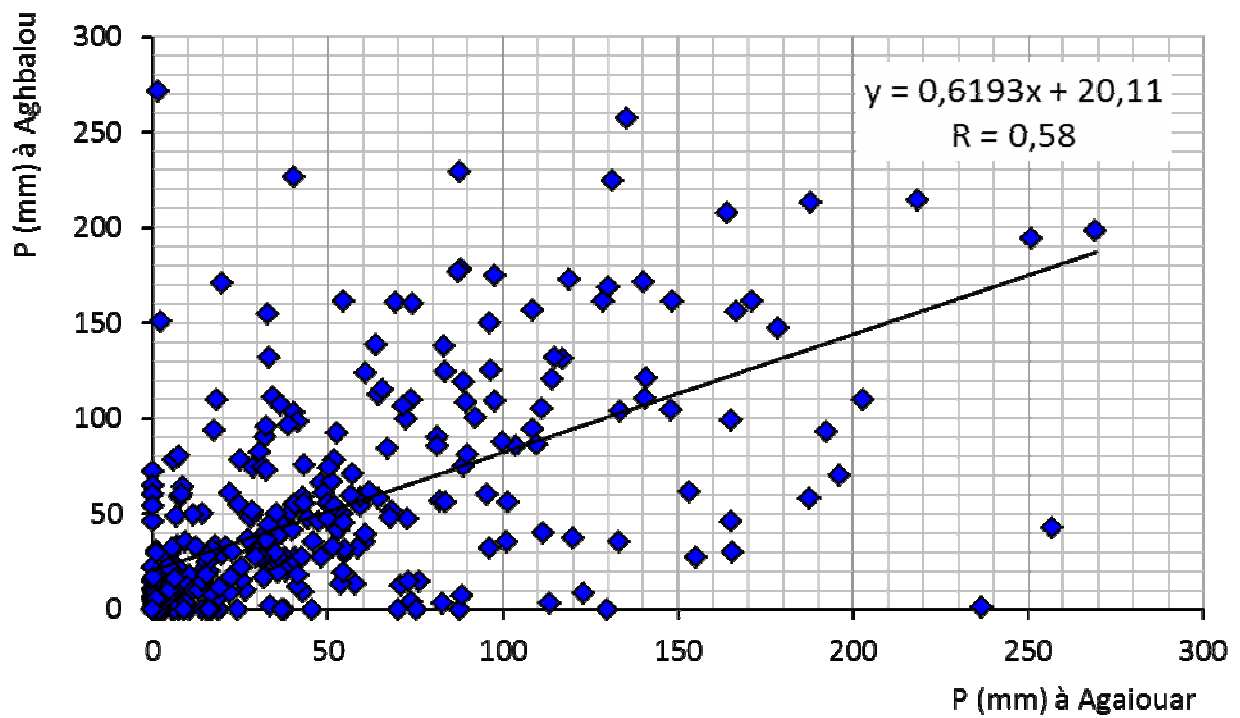


Figure 21 : Corrélation entre les précipitations mensuelles particulières d'Aгаiouar et d'Aghbalou

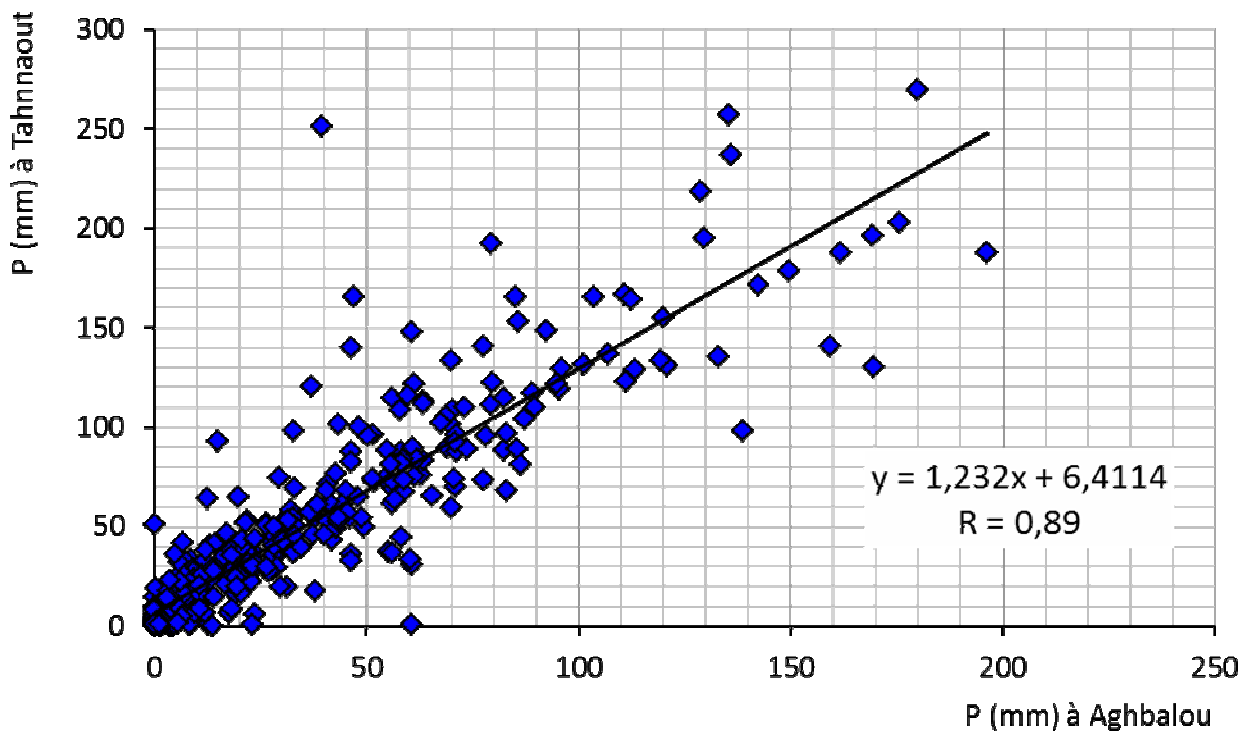


Figure 22 : Corrélation entre les précipitations mensuelles particulières d'Aghbalou et de Tahnaout



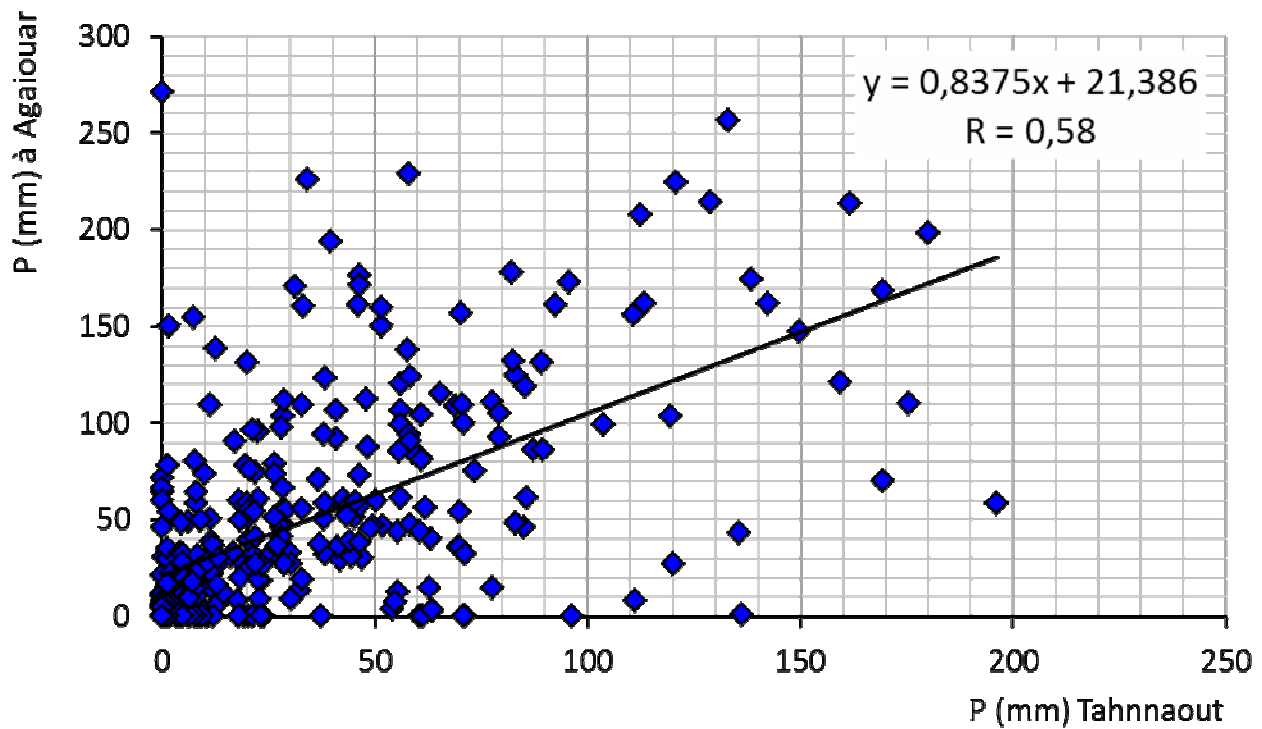


Figure 23 : Corrélation entre les précipitations mensuelles particulières d’Agaiouar et de Tahannaout.

Si on prend en considération les précipitations mois par mois, et non plus les moyennes mensuelles interannuel, on remarque que les corrélations entre les pluies des stations est plus faible : à peine 58% de liaison entre les pluies mensuelles d’Agaiouar d’une part et elle d’Aghbalou ou de Tahannaout d’autre part. Il y a des mois qui connaissent une pluviométrie très importante à Agaiouar sans que cette pluviométrie soit largement enregistrée à Aghbalou ou à Tahannaout. Cette station d’Agaiouar se distingue par sa bonne exposition et surtout par son haute altitude qui lui permet de recevoir des chutes pluviales plus abondante.

### III- Analyse statistique des pluies journalières aux trois stations :

Cette analyse à pour souci d’ajuster un certains nombres de loi mathématique aux pluies maximales journaliers dans le but de dégager les périodes de retour de ces évènements extrêmes ainsi que leurs probabilités d’occurrence. Nous disposons à cet effet de 2 échantillons de 33 valeurs de pluies maximales journalières pour les stations de Tahannaout et d’Aghbalou, et de 28 valeurs pour la station d’Agaiouar (Tableau 8).

Nous avons ajusté à chaque échantillon six lois d’ajustements (en se servant d’un programme informatique conçu pour les évènements hydroclimatiques extrêmes). Pour qualifier la qualité de l’ajustement ; on peut utiliser, entre autres, deux critères de comparaison : le Bayesian Information Criterion (BIC) qui est une minimisation du biais entre le modèle ajusté et la vraie distribution

inconnue, et l'Akaike Information Criterion (AIC) qui sélectionne le modèle réalisant le meilleur compromis biais-variance. La meilleure loi minimise ces deux critères.

ANNEE	Max journalier à Agaiouar	Max journalier à Tahnaout	Max journalier à Aghbalou
1970-71	56.2	28.6	63
1971-72	63	32.1	59.5
1972-73	50	39.9	35.1
1973-74	46	49.4	48.6
1974-75	45	39.4	46.7
1975-76	39	25	32
1976-77	28	38.6	48.9
1977-78	62.1	31.3	56.7
1978-79	40	22.5	37.8
1979-80	66	35	65.2
1980-81	35.2	37.7	39.8
1981-82	34.5	27.2	66.7
1982-83	43	33.1	32.2
1983-84	35	37.3	46.4
1984-85	75	37.3	55.4
1985-86	29.7	45.5	36
1986-87	73.5	23.7	57.1
1987-88	34	64.8	42.5
1988-89	73.5	36.2	67.2
1989-90	44	56.7	38.3
1990-91	55	39.6	71.6
1991-92	98.7	29.6	41.5
1992-93	37	46.6	22.7
1993-94	50	36.8	64.9
1994-95	51.3	42.4	67.8
1995-96	38.7	57	41.4
1996-97	48.9	31.5	39.3
1997-98	53.9	36.4	58.4
1998-99	-	27.5	67.9
1999-00	-	28.6	36.5
2000-01	-	31.3	41.9
2001-02	-	39.8	48.2
2002-03	-	49.4	49.4

**Tableau 8 : Précipitations maximales journalières des trois stations**

## 1- Station d'Agaiouar :

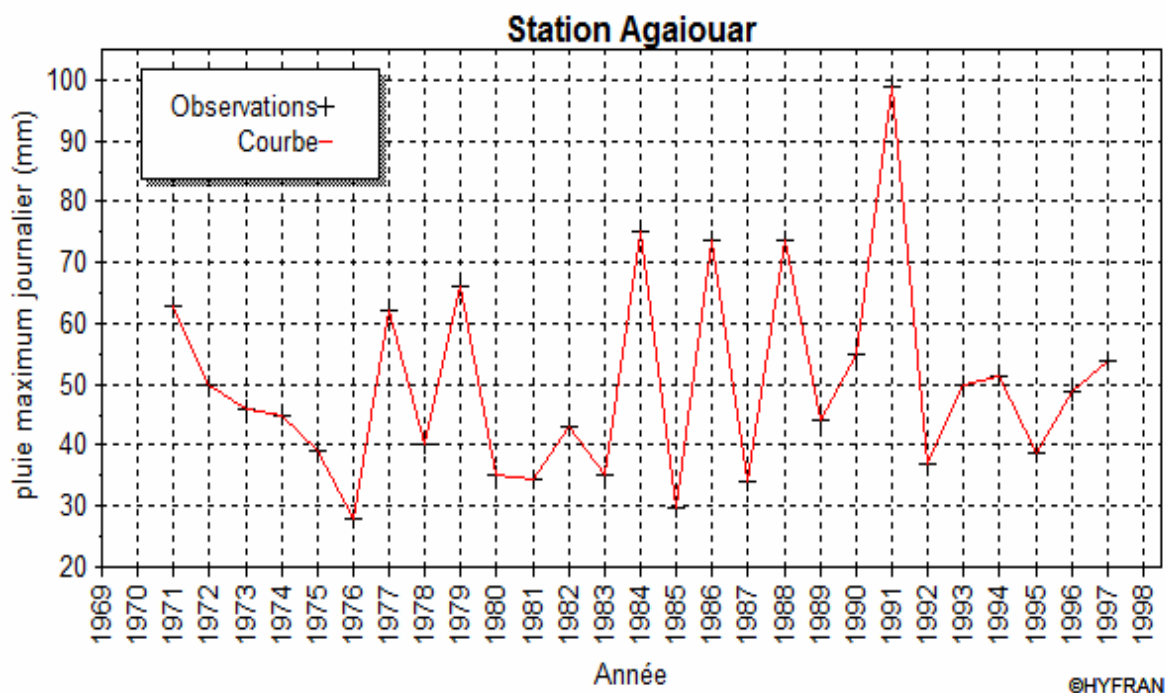


Figure 24 : Variations annuelles des précipitations journalières maximales à Agaiouar

Le choix de la meilleure loi d'ajustement est basé sur un classement des lois selon les critères BIC et AIC, la Comparaison graphique et examen visuel de toutes les lois, la comparaison des caractéristiques statistiques de la loi et de l'échantillon et la largeur de l'intervalle de confiance. Les critères BIC et AIC se présentent pour les six lois comme suit :

Modèle	BIC	AIC
Gumbel (Maximum de vraisemblance)	227.539	224.947
Pearson type III (Maximum de vraisemblance)	228.93	225.043
Gamma (Maximum de vraisemblance)	229.219	226.627
Exponentielle (Maximum de vraisemblance)	229.546	226.954
Normale (Maximum de vraisemblance)	234.039	231.448
Weibull (Maximum de vraisemblance)	234.091	231.499

Tableau 9 : Les lois d'ajustement utilisé et leurs critères de comparaison

Le tableau révèle via le BIC et l'AIC que c'est la loi de Gumbel qui est la plus adaptée à représenter notre échantillon de pluie maximale. Ce constat est confirmé par l'ajustement graphique de cette loi (figure 25) qui montre un alignement des points expérimentaux sur la courbe d'ajustement, l'inclusion de tous ces points dans l'intervalle de confiance.

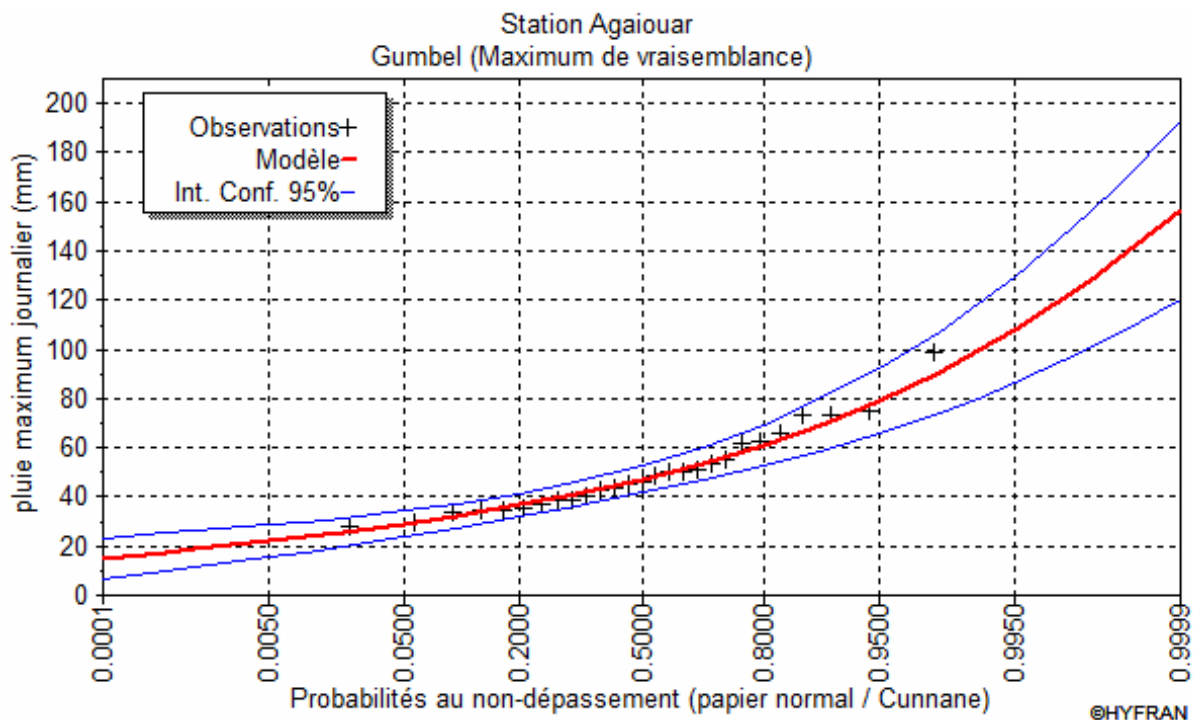


Figure 25 : Ajustement par la loi Gumbel aux pluies maximales journalières d'Agaiouar

Les hauteurs des quantiles et leurs périodes de retour ont été estimés par cette loi comme suit :

Quantiles	période de retour	probabilité	valeur (mm)
Pluie centennale	100 ans	0.01	99.3
Pluie cinquantennale	50 ans	0.02	90.7
Pluie vingtennale	20 ans	0.05	79.2
Pluie décennale	10 ans	0.1	70.3

Tableau 10 : Période de retour et les valeurs des précipitations obtenue par la loi de Gumbel

Les hauteurs de l'averse centennale est très élevée avec une valeur journalière avoisinant 100 mm. C'est une hauteur capable de générer une très forte crue en ce milieu montagnard penté. Même la hauteur décennale de 70,3 mm est assez importante. Il faut s'attendre donc à des crues fréquentes de l'oued Issil. C'est pour cela que plusieurs plans d'aménagements de lutte contre les inondations sont en cours comme on va le voir plus loin.

## 2- Station de Tahnaout :

Les précipitations journalière maximales varient à Tahnaout d'un minimum de 22,5 mm à un maximum de 64,8 mm. Le résultat de l'ajustement des lois statistiques est le suivant :

Modèle	BIC	AIC
Gumbel (Maximum de vraisemblance)	245.827	242.834
Gamma (Maximum de vraisemblance)	247.185	244.192
Pearson type III (Maximum de vraisemblance)	248.784	244.295
Normale (Maximum de vraisemblance)	250.971	247.978
Weibull (Maximum de vraisemblance)	252.986	249.993
Exponentielle (Maximum de vraisemblance)	253.795	250.802

Tableau 11 : Les lois d'ajustement utilisé et leurs critères de comparaison

Pour la station de Tahnaout, c'est aussi la loi Gumbel qui s'ajuste le mieux aux données de précipitations maximales journalières. Elle présente des valeurs faibles de BIC et AIC avec une très faible dispersion des valeurs autour de la courbe d'ajustement et à l'intérieur de l'intervalle de confiance.

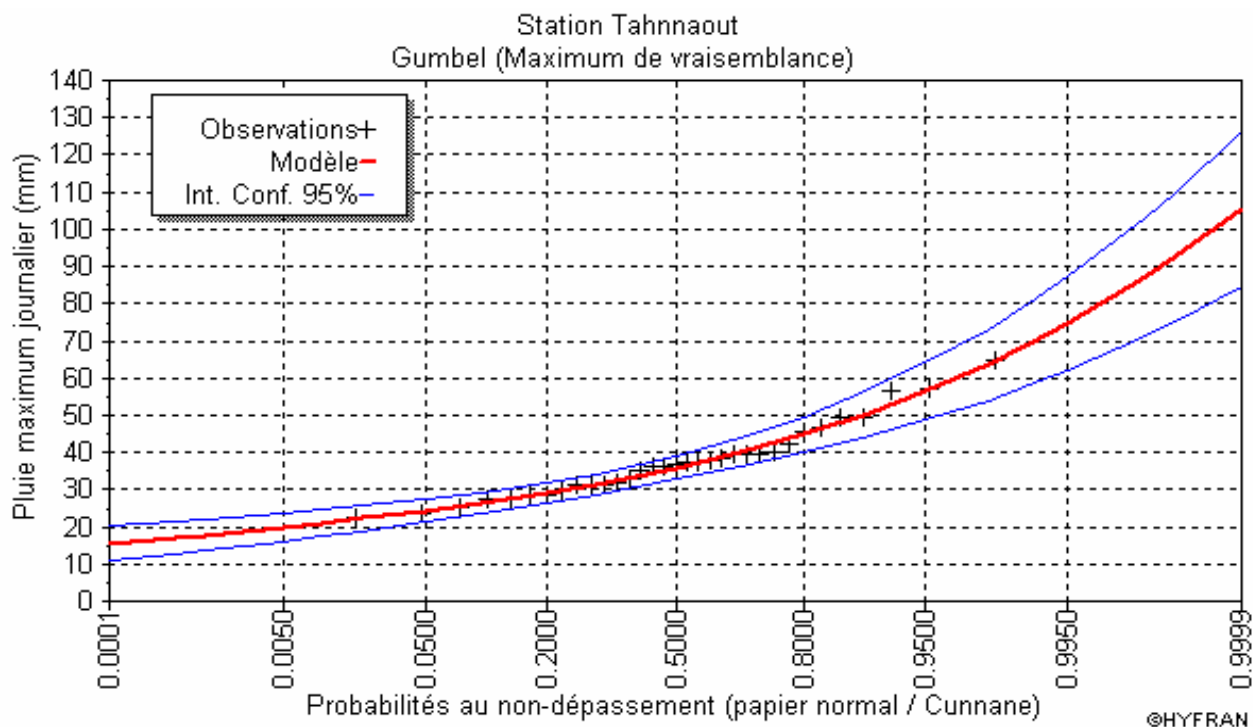


Figure 26 : Ajustement par la loi Gumbel aux pluies maximales journalières de Tahnaout.

Quantiles	période de retour	probabilité d'occurrence	valeur (mm)
Pluie centennale	100 ans	0.01	69.1
Pluie cinquantennale	50 ans	0.02	63.6
Pluie vingtennale	20 ans	0.05	56.3
Pluie décennale	10 ans	0.1	50.6

Tableau 12 : Période de retour et les valeurs des précipitations obtenue par la loi Gumbel

Les hauteurs des quantiles sont ici moins élevés qu'à Agaiouar (69 mm contre 99 mm pour la pluie journalière centennale par exemple). Comme pour le régime moyen, les pluies maximales dépendent de la latitude beaucoup plus importante à Agaiouar.

### 3- Station d'Aghbalou :

Modèle	BIC	AIC
Weibull (Maximum de vraisemblance)	268.344	265.351
Normale (Maximum de vraisemblance)	268.627	265.634
Gamma (Maximum de vraisemblance)	268.677	265.684
Gumbel (Maximum de vraisemblance)	270.654	267.661
Pearson type III (Maximum de vraisemblance)	271.972	267.483
Exponentielle (Maximum de vraisemblance)	291.542	288.549

Tableau 13 : Les lois d'ajustement utilisé et leurs critères de comparaison

Pour la station d'Aghbalou, c'est la loi de Weibull qui offre de BIC et AIC les plus faibles. Elle est donc la loi qui pourrait mieux représenter cet échantillon de pluies maximales.

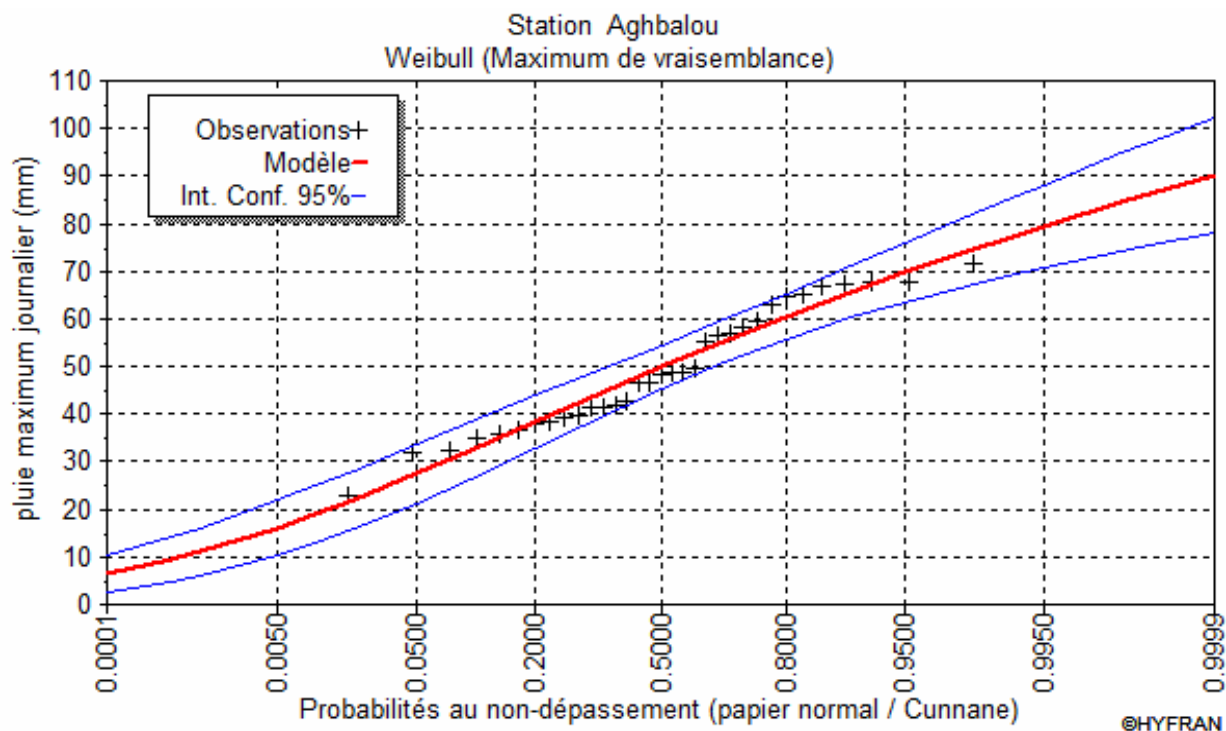


Figure 27 : Ajustement par la loi Weibull aux données d'Aghbalou

Quantiles	période de retour	probabilité d'occurrence	valeur (mm)
Crue centennale	100 ans	0.01	77.0
Crue cinquantennale	50 ans	0.02	74.2
crue vingtennale	20 ans	0.05	69.7
Crue décennale	10 ans	0.1	65.7

Tableau 14 : Période de retour et les valeurs des précipitations obtenue par les lois de probabilité à Tahnaout

Les hauteurs des quantiles sont ici plus élevées que ceux de Tahnaout et proches de ceux d'Agaiouar. C'est ainsi que la pluie journalières décennale est de l'ordre de 66 mm et celle qui reviendrait tous les 20 ans est d'environ 70 mm. Le risque de déclenches des crues importantes est donc prévisible à partir de ces grandes hauteurs.

## **Chapitre III : Etude dynamique des crues et analyse des hydrogrammes :**

### **I- Introduction :**

Dans tout projet d'aménagement des ressources en eau, la prédétermination des crues est nécessaire en raison des effets destructifs des inondations, et la nécessité de dimensionner certains ouvrages d'art, tels que les digues de protection, les évacuateurs de crues des barrages, les débouchés des ponts et les réseaux d'assainissement.

Une crue est un phénomène hydrologique qui s'exprime par une pulsation brutale dans le niveau des eaux d'un cours d'eau. Elle produit des débits exceptionnels dépassant largement les normes habituelles. Elle sera caractérisée par un débit maximum instantané, les durées élémentaires (temps de montée, temps de réponse et temps de base), le volume total écoulé, et la forme de l'hydrogramme de la crue.

### **II- Historique des crues à Marrakech :**

Historiquement, la ville de Marrakech connaît des crues récurrentes suite aux débordements de l'oued Issil. La mémoire des marrakchis a retenu de nombreux événements douloureux de ce cours d'eau. Le 27 avril 1982, par exemple, une crue d'une pointe hydrologique de 130 m<sup>3</sup>/s, a provoqué la destruction d'une centaine d'habitations. D'autres crues de la même importance ont été observées par les habitants du quartier Sidi Youssef Ben Ali en 1954, 1967 et 1971 puis en 1986, 1987, 1988 et 1989. Le débit que peut véhiculer l'oued suite au curage de 1986 est de 110 m<sup>3</sup>/s. Une nouvelle crue a été observée en 1994 avec un débit évalué à 70 m<sup>3</sup>/s. Les dégâts étaient de 8 logements effondrés, 75 menacés d'effondrement ainsi que divers autres dégâts matériels.

Toutefois, en l'absence d'enregistrement et de station hydrométrique sur l'oued pendant ces périodes, l'analyse de cet historique de crue est malheureusement impossible.

### **III- Analyse des hydrogrammes des crues de l'oued Issil :**

Une crue est caractérisée par son hydrogramme. C'est un diagramme qui représente la courbe du débit en fonction du temps  $Q=f(t)$ . Il reflète la vitesse des écoulements, les durées de crue et les volumes d'eau mobilisés.

## 1- La crue du 25 mars 2011 :

La crue du 25 mars 2011 est la première crue à avoir été automatiquement enregistrée par le dispositif de télémétrie installé à la station d'Aït Bouzguia. Elle faisait suite à une forte averse de 5 heures enregistrée en amont du bassin, à la station de Ouaguejdit. Les chutes de pluie ont commencé à 19h15 et ont connu un maximum à 19h45 avec une intensité de 18 mm en 5 minutes. Le débit de pointe a atteint à l'exutoire une valeur de 63.8 m<sup>3</sup>/s à 22h10, soit un temps de réponse de l'ordre de 2h30. C'est un temps relativement court du fait des fortes pentes en amont du bassin qui agissent sur les vitesses d'écoulement. La durée de la crue est également courte. A peine 8 heures après son déclenchement, la crue a baissé son débit jusqu'à 5 m<sup>3</sup>/s (figure 28).

Par ailleurs, c'est le temps de montée qui a été particulièrement bref. En 75 minutes, soit 1h15, les débits sont montés de zéro à 63.8 m<sup>3</sup>/s. Ce temps de montée très court constitue un des risques majeurs des crues d'Issil, en raison de la difficulté d'annoncer des alertes en temps convenables. D'où la nécessité de mettre en place des aménagements de protection efficaces et pratiques. D'autre part, en multipliant le débit moyen de la crue par le temps d'écoulement, on obtient le volume des eaux de la crue estimé ici à un volume important de 554 000 m<sup>3</sup>.

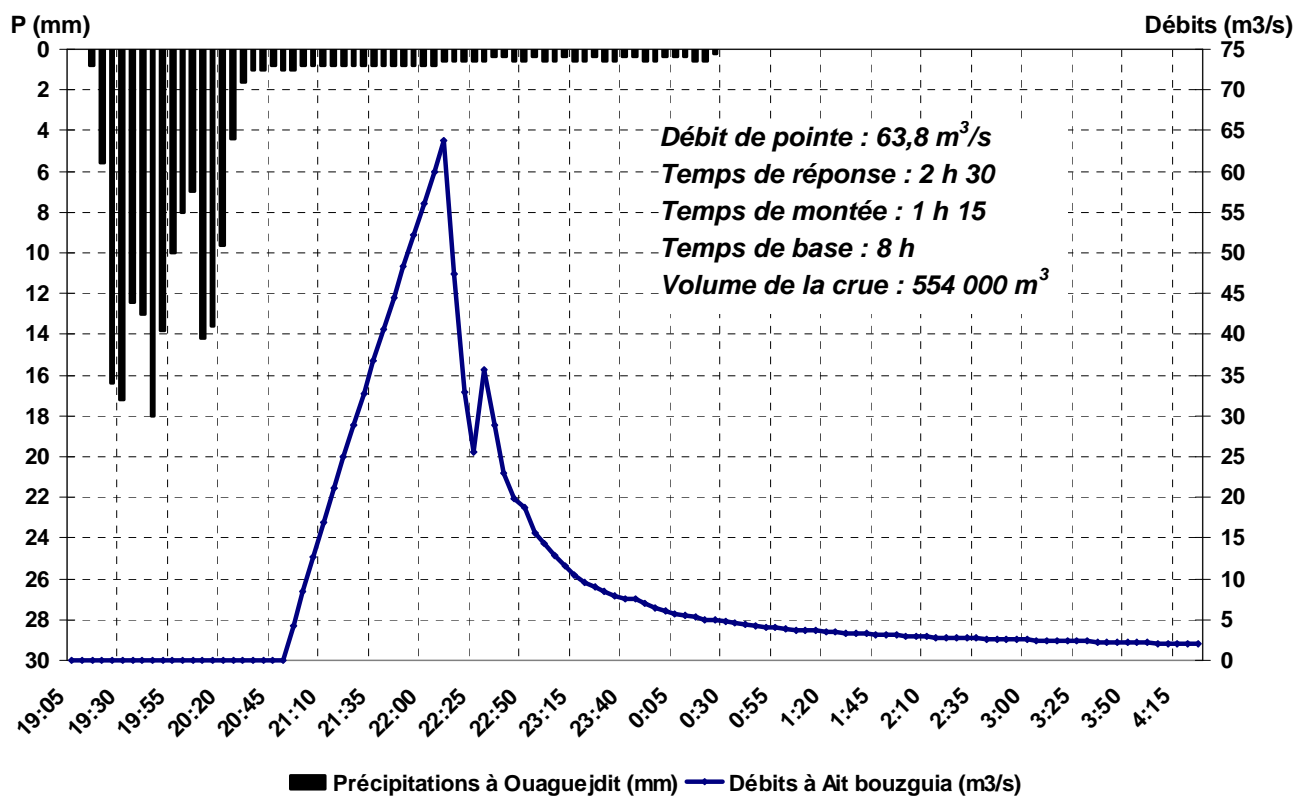


Figure 28 : Hyétogramme et hydrogramme de la crue de l'oued Issil à Aït Bouzguia le 25 mars 2011

L'hydrogramme de l'évènement met donc en lumière une crue simple monogénique, avec une seule montée et une seule décrue, un pic aigu et des temps de réponse et de montée assez courts. Cette typologie caractérise justement les crues éclairs des milieux montagnards semi-arides (Saidi 2003).



## 2- La crue du 2 mai 2011 :

La crue du 2 mai 2011 est également une crue simple caractérisée par un temps de montée très court d'1h30 (figure 29). Le décalage entre le maximum pluviométrique (3.6 mm en 5 minutes à 14h35) et le maximum hydrologique (17.1 m<sup>3</sup>/s à 18h30) est d'environ 4 heures. Soit un temps de réponse plus long que celui enregistré pour la précédente crue (2h30). Il reste cependant relativement bref pour un bassin versant de 201 km<sup>2</sup>. La décrue et le tarissement semblent persister longtemps et ont duré jusqu'au lendemain.

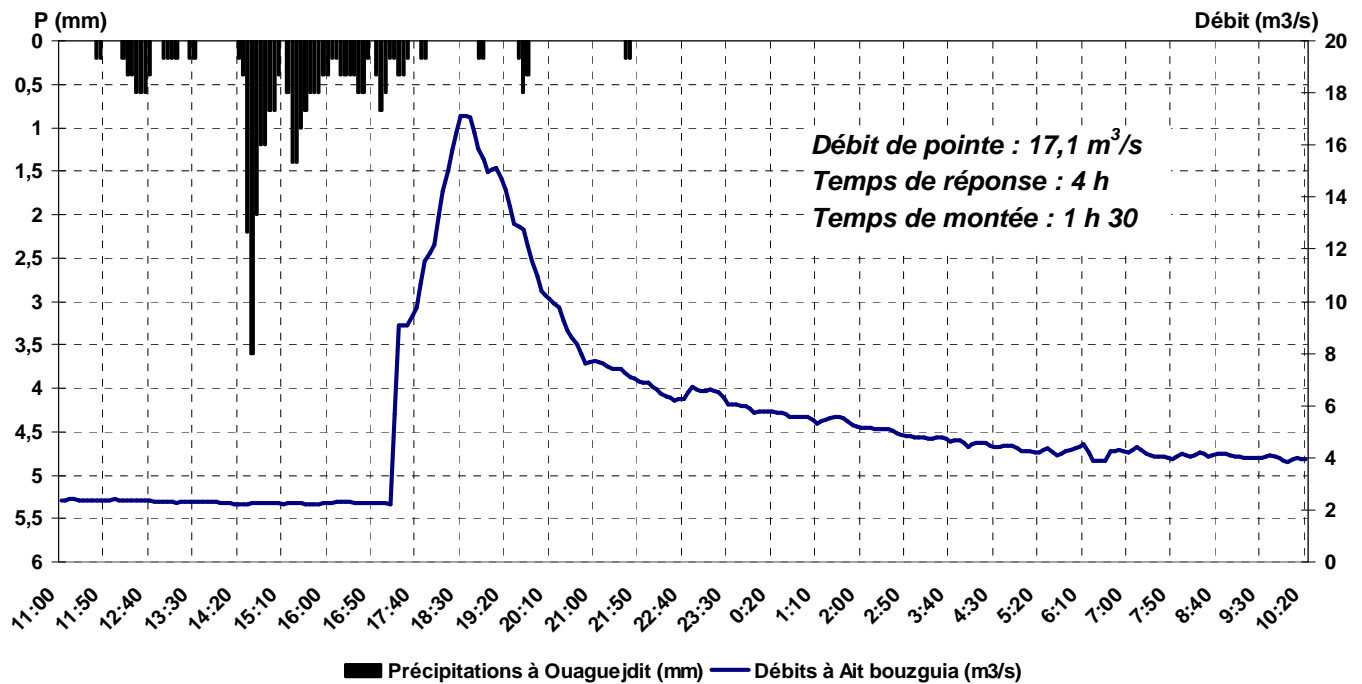


Figure 29 : Hyétogramme et hydrogramme de la crue de l'oued Issil à Ait Bouzguia le 2 mai 2011

## 3- La crue du 2 au 5 avril 2012 :

La crue du 2 au 5 avril mai 2012 se distingue des deux premières par son caractère complexe et polygénique. Elle est générée par une succession d'averses espacées dans le temps. On a alors obtenu des hydrogrammes étalés sur trois jours avec plusieurs hausses et plusieurs baisses des niveaux d'eau. Le premier hydrogramme a été caractérisé par des temps de réponse et de montée très courts (respectivement 2h30 et 2h10). L'averse responsable était d'une hauteur de 7.2 mm tombés en 1 heure, avec une intensité maximale de 4.6 mm en 5 minutes à 00h20. Le lendemain et le surlendemain, deux autres pulsations du cours d'eau ont élevé les débits à 14 puis à 20 m<sup>3</sup>/s. C'est donc une crue avec trois vagues d'inondation difficile à maîtriser en l'absence d'infrastructure de protection adéquate.

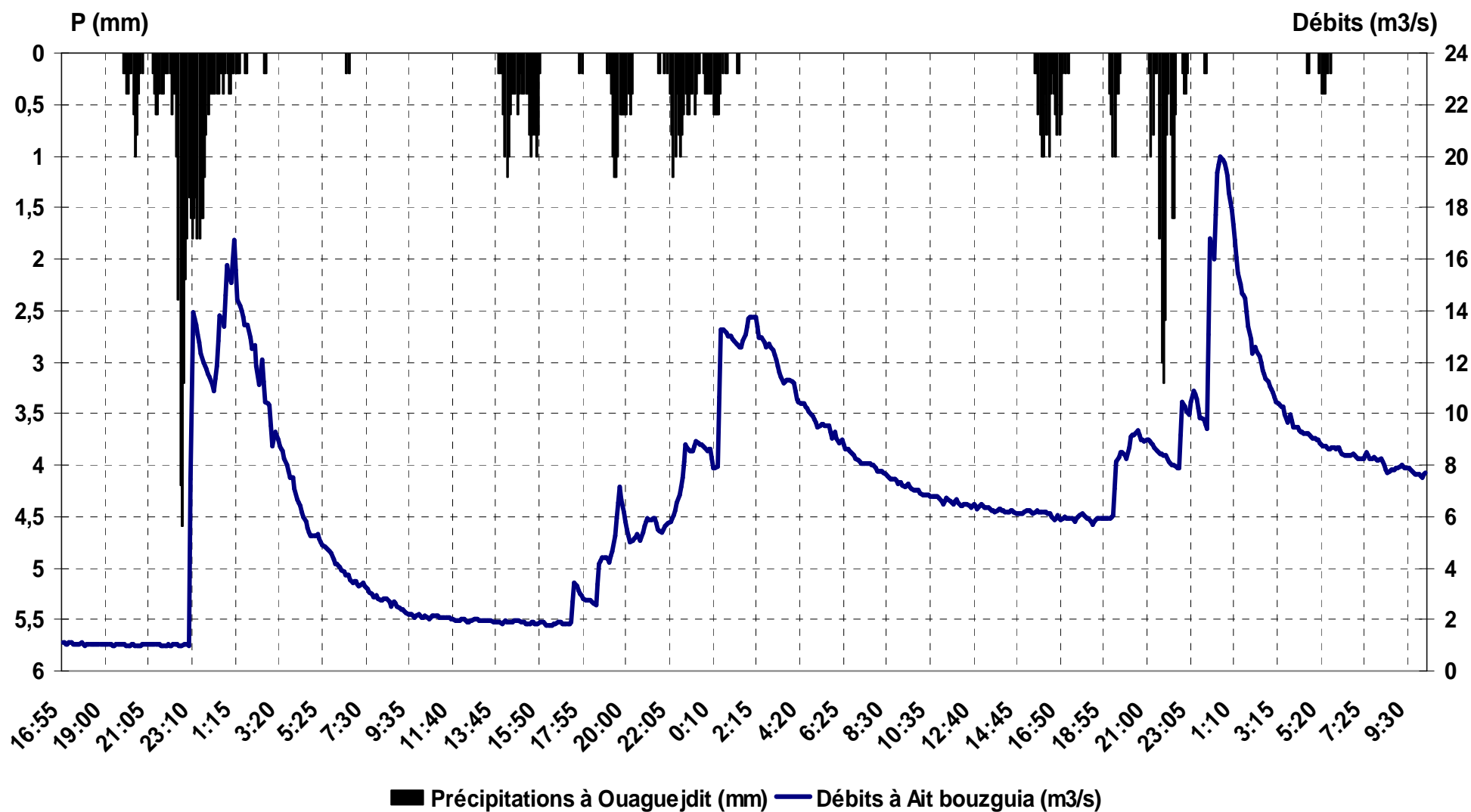


Figure 30 : Hyétogramme et hydrogramme de la crue de l'oued Issil à Ait Bouzguia du 2 au 5 avril 2012

## **Chapitre IV : Conséquences des crues et plans d'aménagement pour la lutte contre l'inondation de la ville de Marrakech :**

### **I- Conséquences géographiques des crues de l'oued Issil sur la ville de Marrakech :**

#### **1- Contexte général et problématique des inondations de l'oued Issil :**

La ville de Marrakech de par sa position géographique, géomorphologique au piémont du Haut Atlas, son climat et l'hydrologie de l'oued Issil qui la longe, se trouve dans une zone à haut risque d'inondation. Elle a connu plusieurs catastrophes d'inondations résultant des eaux pluviales provenant principalement du bassin de ce cours d'eau tumultueux.

Les inondations dans la ville sont localisées principalement sur les berges de l'oued Issil, menacées par les eaux de crues qui débordent sur la route des remparts et sur le quartier Sidi Youssef Ben Ali. Les dégâts humains et matériels constatés lors des crues de 1955, 1967, 1971 et notamment 1982 témoignent de la gravité d'exposition aux risques d'inondations de ces zones. La crue de 1982 a par exemple été responsable de la destruction d'une centaine d'habitations et de la perte de dizaines de personnes.

Le lit de l'oued est parfois au même niveau que les seuils des habitations du quartier de Sidi Youssef Ben Ali. La rive gauche limitant le quartier présente un profil accidenté avec des points bas facilitant les débordements des eaux de crues exceptionnelles. Le long des remparts entre la RP 331A et la RN8, le niveau de la route est très bas par rapport aux berges. En cas de crue, la route se trouve totalement inondée et le niveau d'eau peut atteindre les remparts, menaçant les monuments historiques, la route du golf Royal, le quartier Sidi Youssef Ben Ali et le douar Guennoune.

#### **2- Conséquences des crues de l'oued :**

##### **a. La crue du 25 mars 2011 :**

Des pluies torrentielles ont entraîné le 25 mars 2011 le débordement de l'oued Issil, qui traverse Marrakech, inondant plusieurs boulevards et rues de la ville. La vitesse d'écoulement et les hauteurs des eaux ont entraîné ces eaux à l'intérieur de la ville de Marrakech (photo 4). Elles ont détruit le pont de Bab Lakhmiss et ont envahi les voies de circulation et les maisons au bord de l'oued, mais aussi des quartiers plus éloignés comme Sakar, Sidi Youssef et même le siège de la wilaya.

Des quartiers entiers et des dizaines de maisons ont été inondés. Les flots ont entraîné sur leur passage un pont nouvellement construit et ravagé les terres agricoles en amont de Marrakech, causant d'importantes pertes (photo 5).



**Photo 4 :** Les eaux de la crue du 25/03/2011 inondant les voies de circulation de la ville de Marrakech



**Photo 5 :** Les terrains agricoles endommagés par la crue d'Issil du 25 mars 2011

### **b. Les crues du 2 mai 2011 et du 2 avril 2012 :**

Plusieurs quartiers de Marrakech, dont Belbekkar, Daoudiate, Nakhil et Amerchich, ont été inondés par les eaux de cette crue. Ce n'est pas la première fois que cette partie de la ville connaît des inondations de ce genre. En 2003 déjà, le débordement d'Oued Issil avait même fait des victimes humaines et causé des dégâts aussi graves. La ville de Marrakech, située au piémont d'une haute montagne, est classée parmi les zones les plus vulnérables aux inondations. Toutes les eaux pluviales qui tombent sur les montagnes se déversent dans la ville. Les résultats sont connus : une ville qui gère mal la situation lorsque les averses sont importantes. Plusieurs quartiers de Marrakech, ont été inondés par les eaux. Le réseau routier de la ville a également été perturbé suite aux fortes précipitations qui se sont abattues dans la région.

C'est à peu près ces dégâts coutumiers qui ont été enregistrés lors de la toute dernière crue d'Issil, daté du 2 au 5 avril 2012. Plusieurs dégâts infrastructurels ont été enregistrés, notamment la destruction de plusieurs murs de soutènement, la submersion de certains ponts et l'affouillement des berges et de leurs digues de protection (photo 6)



**Photo 6 : Affouillement d'une berge de la rive gauche d'Issil et endommagement du mur de protection**

## II- Les schémas d'aménagement de l'oued Issil :

### 1- Plans d'aménagement proposés pour la protection de la ville de Marrakech:

L'oued Issil est l'objet de plusieurs études et projets d'aménagement. Parmi les plans d'aménagement proposé en 2005, la construction d'un fossé allant de l'oued Ourika, vers oued Issil, pour absorber les eaux déversées, en cas de fortes pluies. L'idée était la construction d'une ceinture de fossés du côté sud avec des canaux pour déverser sur trois oueds à l'est et l'ouest : oued Issil, oued Harrya et oued Bahja. (Figure 31). Une solution qui nécessite la mise en place de trois fossés au pied des montagnes et aussi le calibrage des oueds. Le projet n'a jamais été réalisé. Par manque de fonds ou de volonté politique.

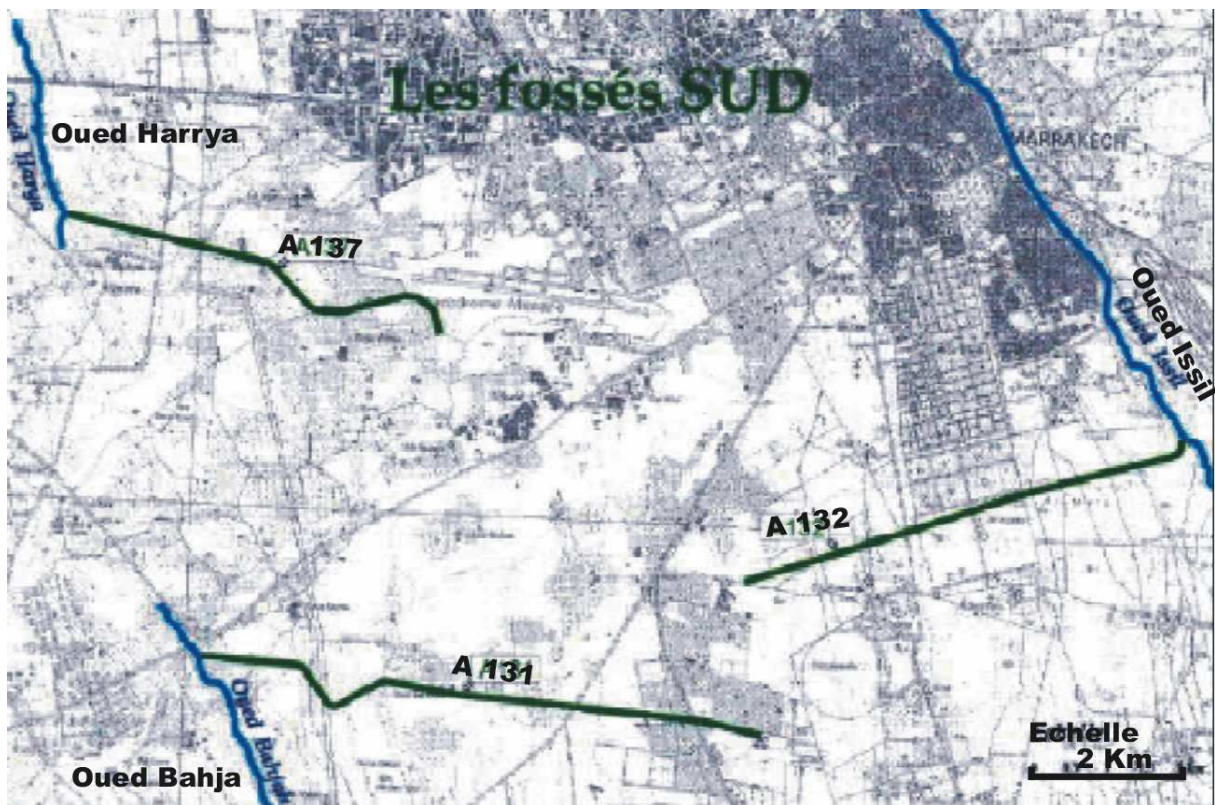


Figure 311 : Projet de ceinture de fossés pour déverser les eaux sur trois oueds

Par ailleurs, l'ampleur des inondations a conduit la Direction de l'Agence de Bassin Hydraulique de Tensift à se pencher sur le phénomène et chercher les mesures à mettre en œuvre pour la protection des berges de l'oued à l'intérieur de la ville de Marrakech sur une longueur de 8 kms. Ses investigations ont montré que les principales causes des débordements des eaux de l'oued Issil sont :

### **- Les étranglements des sections de l'oued :**

Plusieurs tronçons ont des sections insuffisantes pour véhiculer les crues dépassant la fréquence décennale, et certains ponts constituent des obstacles à l'écoulement. La route 31A traverse l'oued à Sidi Youssef Ben Ali par un pont dont les pertuis ne permettent pas l'évacuation des fortes crues. L'effet des remous causé par ce point en rehaussant les niveaux d'eau en amont aggrave la situation du quartier de Sidi Youssef Ben Ali. De même, les anciens ponts situés le long de la route des remparts permettant aux piétons de franchir l'oued, forment des obstacles et causent un effet de remous qui aggrave la situation pour la route des remparts.

### **- L'affouillement et l'érodabilité des berges :**

Sous l'effet de l'érosion en certains endroits fragiles, on constate des effondrements de berges, ce qui a pour conséquence l'instabilité des rives et l'érosion des terrains riverains augmentant ainsi les risques d'exposition aux inondations.

### **- Les dépôts de gravas et des ordures ménagères dans le lit de l'oued :**

L'oued Issil, malgré toute la vigilance des autorités de la ville, est utilisé comme zone de dépôt de gravats et de décharge des ordures ménagères rejetés par les riverains. (Photo 7) Ces dépôts ont pour conséquence directe, une réduction des sections de l'oued et donc une diminution de la débitance et l'augmentation des risques de débordement.



*Photo 7 : Dépôt clandestin de gravats de démolition et de construction dans le lit de l'oued Issil à Marrakech*

## 2- Les aménagements programmés actuellement pour la protection de la ville de Marrakech des inondations de l'oued Issil :

La stratégie adoptée est d'éviter au maximum que des débits engendrés par les crues de l'oued débordent au niveau du quartier de Sidi Youssef Ben Ali et de la route des remparts. La solution ainsi retenue consiste à élargir le lit de l'oued sous forme trapézoïdale, raccourcir les méandres et reprofiler la pente générale de l'oued. La surélévation des berges ne concernera que les zones où le recalibrage du lit se heurterait à des contraintes d'ordre foncier ou urbanistique. La solution ainsi définie permettra d'écouler la crue centennale. Cependant, tous les ponts existants seront submergés par les eaux de la crue cinquantennale. Leur réaménagement s'avère également nécessaire à moins d'admettre leur submersion et le risque de leur emportement.

A cet effet, des travaux de curage et de rehaussement des berges sur certains tronçons en rive gauche ont été entrepris en partenariat entre le Ministère des Travaux Publics et la Wilaya, et destinés à atténuer les débordements des eaux notamment pour la fréquence décennale à vingtennale. Egalement la construction de nouveaux ponts et des murs de protection et de renforcement des berges de l'oued (photos 8 et 9).



*Photo 8 : Travaux de construction d'un pont élevé sur l'oued Issil à Marrakech*





**Photo 9 : Travaux de construction de murs de protection et de renforcement des berges de l'oued**

Toutefois d'autres actions sont à mettre en œuvre et à programmer, notamment :

- Interdire tout dépôt d'ordures et de gravats dans le lit de l'oued, (photo 7)
- Reprofilage de l'oued le long du tronçon longeant la ville de Marrakech avec confortement des points critiques par un mur de soutènement.
- Confortement par un mur de soutènement des tronçons fragiles.
- Reprise des ponts des routes RN 8 et RP 31 A.
- Curage permanent de l'oued.
- Amélioration de l'environnement et création d'espaces verts.

Toutes ces propositions montrent la nécessité d'une coordination élargie qui impliquerait la Wilaya, l'administration de l'hydraulique et les municipalités, qui doivent placer la question de la gestion des risques et de leur prévention parmi les priorités de la collectivité.

## Conclusion

Le bassin versant de l'oued Issil domine et surplombe la ville de Marrakech et représente une menace permanente de cette ville en matière des inondations. Le cours principal prend naissance à des altitudes dépassant les 2000 m, soit une zone relativement pluvieuse et qui connaît des averses intenses capables de générer des crues soudaines et rapide.

Sur le plan morphologique, le bassin est assez compact ( $K_G=1,3$ ), les pentes sont importantes dans la partie amont, où le relief est marqué. Ceci est mis en lumière par l'hypsométrie générale du bassin qui montre un profil raide en amont. Cette partie montagneuse du bassin est également caractérisée par un substratum relativement imperméable et un réseau hydrographique dense et bien ramifié.

Sur le plan pluviométrique, les stations en amont du bassin enregistrent des hauteurs et des intensités importantes des précipitations. La moyenne annuelle à Agaiouar par exemple est de l'ordre de 582 mm par an, soit un ordre de grandeur similaire à celui rencontré en milieux subhumides.

Cette situation hydrogéomorphologique et pluviométrique est propice au déclenchement de crues brutales et de grande vitesse. La récente station hydrométrique d'Aït Bouzguia a enregistré pendant les deux dernières années des crues avec des temps de montée particulièrement courts (1h15 à 1h30). Et grâce aux enregistrements de station de Ouaguejdit en amont du bassin, nous avons relevé des temps de réponses du bassin de l'ordre de 2h30. Ce sont des temps assez courts qui représentent un risque majeur pour la difficulté d'annoncer ces crues en temps opportun.

Ces crues sont par ailleurs connues par leurs dégâts infrastructurels qu'ils ont l'habitude d'occasionner dans la ville de Marrakech, particulièrement dans les quartiers qui longent l'oued Issil. Ces dégâts sont souvent coûteux et provoquent parfois des pertes humaines. Il faut signaler ici que les débordements de l'oued sont facilités et parfois provoqués par les nombreux dépôts de gravats et d'ordures ménagères rejetés par les riverains dans le lit du cours d'eau. Ces dépôts réduisent les sections de l'oued et diminuent sa débitance. Ajouté à cela l'exiguïté de certains ouvrages d'évacuations des eaux, notamment les buses de pont, le risque s'agrandi.

Plusieurs plans d'aménagement ont été proposés, d'autres ont été exécutés et certains sont en cours. Ils consistent, entre autre, au curage et au rehaussement des berges sur certains tronçons et à la construction de nouveaux ponts et des murs de protection et de renforcement des rives de l'oued. Ces actions sont toutefois à renforcer par l'interdiction ferme de tout dépôt d'ordures et de gravats dans le lit de l'oued, ceci par la sensibilisation de la population riveraines de l'oued et l'amélioration de l'environnement global du cours d'eau en créant des espaces verts par exemple ; ainsi qu'une coordination élargie et fructueuse qui impliquerait la Wilaya, l'administration de l'hydraulique, les municipalités et la société civile.

## Bibliographie

- ❖ AL FEDDY Khadija (2005), Projet de protection de la ville de Marrakech des inondations, séminaire international sur la prévention des risques , Alger, 13 p
- ❖ BENTEKHICI Nadja (2006), Utilisation d'un SIG pour l'évaluation des caractéristiques physiques d'un bassin versant et leurs influences sur l'écoulement des eaux (bassin versant d'Oued El Maleh, Nord-Ouest d'Algérie) ; 10ème Conférence francophone ESRI ; 11 et 12 Octobre Issy-les-Moulineaux ; 17 p.
- ❖ Laplace Emilie (2008), l'oued Issil ; Projets paysages ; Blog internet ; 10 p
- ❖ DEBBI Fathallah (Avril 2004), profil environnemental de Marrakech, rapport d'étude, Ministère de l'aménagement du territoire, de l'eau et de l'environnement, 124 p.
- ❖ HYDROLEADER (2011), Protection de la ville de Marrakech contre les inondations de l'oued Issil. Rapport d'étude. Marrakech. 5 p.
- ❖ MUSY Andre (2001), Cours d'Hydrologie générale, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, (EPFL), Suisse, 200 p.
- ❖ SAIDI M, (2006), Effet de la morphologie et de l'exposition sur les ressources en eau superficielle de part et d'autre du Haut Atlas (Maroc) ; exemple des bassins versants de l'Ourika et du Marghène. Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Sciences de la Terre, n°28, 41-49.
- ❖ SAIDI M.E, DAOUDI L., ARESMOUK M.E.H. et BLALI A. (2003), Rôle du milieu physique dans l'amplification des crues en milieu montagnard, exemple de la crue du 17 août 1995 dans la vallée de l'Ourika (Haut-Atlas, Maroc). Sécheresse, Volume 14-2, p. 107-114, Paris,