جامعة سيدي محمد بن عبد الله بفاس
UNIVERSITÉ SIDI MOHAMED BEN ABDELLAH DE FES
كلية العلوم والتقنيات فاس
FACULTÉ DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE FÈS

Centre d'Etudes Doctorales : Sciences et Techniques de l'Ingénieur

N° d'ordre 54/2021

THESE DE DOCTORAT

Présentée par

Mr : KARIM MSATEF

Discipline : Géo-ressources et Environnement

Spécialité : Eau et Environnement

Sujet de la thèse : Variabilité climatique et sécheresse hydrologique dans le bassin versant de l'oued Ouergha.

Formation Doctorale : Sciences et Génie de la matière, de la Terre et de la Vie

Thèse présentée et soutenue le 10/07/2021 Devant le jury composé de :

Nom Prénom	Titre	Etablissement	
Abdelkader EL GAROUANI	PES	Faculté des Sciences et Techniques de Fès	Président
Jamal Eddine STITOU EL MESSARI	PES	Faculté des Sciences de Tétouan	Rapporteur
Abdelhadi EL OUALI	PES	Faculté des Sciences de Meknès	Rapporteur
Abderrahim LAHRACH	PES	Ecole Nationale des Sciences Appliquées de Fès	Rapporteur
Ourania TZORAKI	PH	Université Lesvos Grèce	Examinateur
Lahcen BENAABIDATE	PES	Faculté des Sciences et Techniques de Fès	Directeur de thèse

Youssef BROUZIYNE	UM6	Invité

Laboratoire d'accueil : Ecologie Fonctionnelle et Génie de l'Environnement.

Etablissement : Faculté des Sciences et Techniques de Fès.

Dédicace

C’est avec un grand plaisir que je dédie ce travail

Aux êtres les plus chers de ma vie

Ma Mère, Choukri Halima

A mon père, Msatef houssine

Qui n’ont jamais cessé de m’encourager de m’avoir aidé avec leur soutien moral leurs conseils et surtout l’éducation qui m’ont apporte

Que dieu leurs préserve une très bonne santé et une longue vie plein de joie et de bonheur.

Aussi à mes frères et à tous les membres de ma famille.

A tous mes collègue et amis sans exception.

Msatef karim

Remerciements

Je tiens à remercier Monsieur Lahcen Benaabidate, Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de Fès, qui m'a fait partager ses brillantes intuitions et qui m'a encadré tout au long de cette thèse. Qu'il soit aussi remercié pour sa disponibilité permanente, sa gentillesse et pour les nombreux encouragements qu'il m'a prodiguée.

J'adresse tous mes remerciements à Monsieur Jamal Eddine STITOU EL MESSARI Professeur à la Faculté des Sciences de Tétouan, Monsieur Abdelhadi EL OUALI Professeur à la Faculté des Sciences Meknès, Monsieur Abdelkader EL GAROUANI Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de Fès et Monsieur Abderrahim LAHRACH Directeur de l'Ecole Nationale des Sciences Appliquées de Fés qui m'ont fait l'honneur d'être rapporteurs de ma thèse, ils ont pris le temps de m'écouter et de discuter avec moi. Leurs remarques m'ont permis d'envisager mon travail sous un autre angle. Pour tout cela je les remercie.

J'exprime ma gratitude à Madame Ourania TZORAKI, Professeur à l'Université de Lesvos Grèce, qu'elle a bien voulu être examinateur.

Je remercie toutes les personnes avec qui j'ai partagé mes études et notamment ces années de thèse.

.

Résumé

Les sécheresses font partie des phénomènes météorologiques extrêmes résultant de la variabilité et l'irrégularité des précipitations et de l'effet des changements climatiques durant ces dernières décennies. Ces sécheresses engendrent de graves conséquences économiques, environnementales et sociales.

L'objectif de cette étude est de caractériser la sécheresse climatique au niveau du bassin versant de l'oued l'Ouergha, situé dans le Maroc septentrional, à travers le calcul de l'indice standardisé de précipitations (SPI) à multi échelle et basé sur les précipitations pour reproduire les sécheresses observées dans le bassin versant de l'oued l'Ouergha pour la période 1982-2014. Par ailleurs, d'autres indices de sécheresses ont été calculés, notamment DP, PN, Z-score-RAI et DI.

Les résultats obtenus après le calcul de l'indice SPI à différents échelles de temps de 1, 3, 6 et 12 mois montrent que les sécheresses dans le bassin versant de l'oued Ouergha étaient généralement d'intensité modérée à légère. Cependant, les sécheresses de 1987, 1995, 2001 et 2005 étaient des sécheresses sévères à extrêmes avec des périodes déficitaires d'une sécheresse sévère à extrême 1990-1995 et 2004-2008.

Les résultats de l'indice SPI conforte les résultats obtenus par les autres indices de sécheresses DP, PN, Z-score-RAI et DI. Ils affichent une sécheresse sévère à extrême précisément en 1995 et 2005, des périodes déficitaires avec une sécheresse sévère à extrême depuis 2004 à 2008 et aussi depuis 1990 à 1995 qui était la pire période déficitaire durant toute la période d'observation.

Mots clés : Sécheresse, Intensité, Changement climatique, l'indice standardisé précipitations (SPI), bassin versant de l'oued l'Ouergha.

Abstract

Droughts are among the extreme weather phenomena resulting from the variability and the irregularity of precipitation and the effect of climate changes in recent decades. These droughts have serious economic, environmental and social consequences.

The objective of this study is to characterize the climatic drought in the Ouergha, located in the Northern part of Morocco, through the calculation of the standardized precipitation index (SPI) for multi-scale based on rainfall to reproduce the observed droughts in the Ouergha watershed for the period 1982-2015 with the use of other drought indices (DP, PN, Z-score-RAI and DI). The obtained results after calculating the SPI index at different time scales of 1, 3, 6 and 12 months show that droughts in the Ouergha watershed were generally moderate to mild in intensity, Indeed, the droughts of 1987, 1995, 2001 and 2005 were severe to extreme with shortage periods of severe to extreme drought 1990-1995 and 2004-2008.

The results of the SPI index confirm the obtained results for the other drought indices DP, PN, Z-score-RAI and DI), severe drought to extreme precisely in 1995 and 2005, deficit periods with severe to extreme drought since 2004 to 2008 and also 1990 to 1995 was the worst deficit period during the entire studied period.

Key words : Drought, Intensity, Climate change, the standardized precipitation index (SPI), Ouergha watershed.

Table des matières

Dédicace I
Remerciements II
Résumé III
Abstract……..……..IV
Table des matières V
Liste des abréviations utilisées……VI
Liste des figures VII
Liste des tableaux VIII

Introduction Générale 1

Chapitre I : Caractéristiques générales du bassin de l'Ouergha

1. Introduction 3
2. Situation géographique 3
3. Les caractéristiques physiques du bassin versant 5
A. La forme 5
B. Le relief 7
1) Carte hypsométrique 7
2) Courbe hypsométrique 8
C. Le rectangle équivalent 11
D. Les caractéristiques d'altitudes 12
1) Altitudes minimale et maximale 12
2) L'altitude moyenne 13
3) Altitude médiane 13
E. La pente 13
1) La réalisation de la carte des pentes 13
2) Pente moyenne du bassin versant 16
3) Indice de pente global 17
4. Le réseau hydrographique 18
5. Contexte géologique de la zone d'étude 19
A. Géologie de la chaîne du Rif 19
B. Aperçu sur la géologie du bassin versant versant de l'Ouergha 22
1) Les dépôts post-nappe 22
2) Zone Intra-Rifaine 22

3) Unité de Ketama 22
4) Unité de Tanger 22
5) Zone Méso-Rifaine 23
C. Tectonique 23
D. Facies Litho stratigraphie 23
1) Les formations secondaires 23
2) Le Crétacé 24
3) Les formations tertiaires et quaternaires 24
6. Conclusion 26

Chapitre II : Etude Climatique du bassin de l'Ouergha

1. Introduction 27
2. Précipitation 28
A. Variation temporelle des précipitations 28
1) Précipitations annuelles 29
2) Précipitations saisonnières 29
3) Précipitations moyennes mensuelles 30
B. Evaluation de la lame d'eau moyenne tombée sur le bassin 31
1) Méthode arithmétique 31
2) Méthodes des polygones de Thiessen 32
3) Méthode des isohyètes 34
C. Estimation de la moyenne de la lame d'eau calculée par les trois méthodes 36
3. Etudes des températures 37
A. Température moyenne mensuelle 37
B. Relation température et précipitation 38
1) L'indice Xérothermique de Gaussen 38
2) L'indice d'aridité annuelle de De Martonne et les indices mensuelles d'aridité 39
3) Quotient pluviométrique d'Emberger 41
4. Evapotranspiration 42
A. L'évapotranspiration potentielle 43
B. Evapotranspiration réelle 45
1) Méthode de Turc 46
2) Méthode de Coutagne 46
3) Méthode du bilan de Thornthwaite 46
C. Bilan hydrique 48
5. Conclusion 49

Chapitre III : Etude de la relation pluie débit dans le bassin de l'Ouergha

1. Introduction 51
2. Etude du régime du débit 52
A. Débits annuels 52
1) Variation des débits annuels par la méthode des écarts à la moyenne 54
2) L'irrégularité interannuelle des débits par la méthode du simple cumul 57
3) Coefficient et indice de la variabilité des débits 60
3.1.1. Coefficient d'hydraulicité (CH) 60
3.1.2. Coefficient d'immodération (CI) 61
3.1.3. Coefficient de variation (CV) 62
B. Débits moyens mensuels 62
1) Module mensuel 62
2) Coefficient mensuel des débits 65
C. Débits journalières 67
1) Débit journaliers d'une année humide 67
2) Débits journaliers d'une année moyenne 67
3) Débits journaliers d'une année sèche 68
3. Relation entre les débits et les précipitations 68
A. Relation entre les débits et les précipitations mensuelles 68
B. Coefficient de ruissellement (Cr) 71
C. Bilan Hydrologique 71
1) Ecoulement total 72
2) Le ruissellement 72
3) Infiltration 73
4. Conclusion 73

Chapitre IV: Etude de la sécheresse climatique de l'Ouergha

1. Introduction 75
2. Etude d'homogénéité des séries 77
A. Tests graphiques : 77
1) Le simple cumul 77
2) Le double cumul 78
3) La méthode du cumul des résidus 78
B. Tests numériques : 78
1) Méthodes statistiques 78
2) Test de Pettitt 79

3) Test de Buishand pour l'homogénéité 79
C. Traitement des données pluviométriques : 80
3. Calcul des indices de sécheresses 83
A. L'indice de précipitations normalisé (SPI) 83
B. Déciles des précipitations (DP) 92
C. Le pourcentage à la normale (PN) 94
D. Statistique Z-Score 95
E. Comparaison entre PN et DP et Z-score 97
F. Indice d'anomalie de pluviosité (RAI) 98
G. Intensité de la sécheresse (DI) 99
4. Conclusion 100
Conclusion générale 102
Références bibliographiques……...……108

Liste des abréviations utilisées

ABHS : Agence du Bassin Hydraulique de Sebou

CH : Coefficient d'hydraulicité

CI : Coefficient d'immodération

CV : Coefficient de variation

DA : Déficit agricole

DI : Intensité de la sécheresse

DP : Déciles des précipitations

ETP : Evapotranspiration potentiel

ETR : Evapotranspiration réel

I : L'indice d'aridité annuelle de De Martonne

OMM: Organisation mondiale de la météorologie

PN : Le pourcentage à la normale

RAI : Indice d'anomalie de pluviosité

RFU : Reserve facilement utilisable

SPI : L'indice de précipitations normalisé

Listes des tableaux

Tableau 1 : Répartition de la surface totale par tranche d'altitude au bassin versant de l'Oued l'Ouergha 9
Tableau 2 : Tableau de fréquences et des pourcentages cumulés au-dessus de la limite inférieure au bassin versant de l'Oued l'Ouergha 9
Tableau 3: les Classes des pentes 14
Tableau 4: Superficies, fréquences et fréquences cumulées en fonction des classes des pentes au bassin versant de l'Oued l'Ouergha 14
Tableau 5: la Classification du relief selon Ig donné par l'ORSTOM 17
Tableau 6 : Caractéristiques morphologiques du bassin versant de l'Ouergha 26
Tableau 7: Coordonnées des stations pluviométriques du bassin versant de l'Ouergha 27
Tableau 8: Calcul de la lame d'eau tombée par la méthode de Thiessen au bassin versant de l'Oued l'Ouergha 34
Tableau 9: Calcul de la lame d'eau tombée par la méthode des Isohyètes au bassin versant de l'Ouergha 36
Tableau 10: Estimation de la lame d'eau moyenne au bassin versant de l'Ouergha 36
Tableau 11: ETP mensuel selon la méthode de Thornthwaite au bassin versant de l'Ouergha au cours de la période (1981 à 2014) 44
Tableau 12: calcul de l'ETR mensuelle par la méthode de Thornthwaite au bassin versant de l'Ouergha au cours de la période 1981 à 2014 48
Tableau 13: Simple cumul des lames d'eau écoulées pour la station de Galaz (1983 à 2020) 57
Tableau 14: Simple cumul des lames d'eau écoulées pour la station de Tabouda (1981 à 2020) 58
Tableau 15 : Simple cumul des lames d'eau écoulées pour la station d' Ain Aicha (1981 à 2020) 59
Tableau 16: Stations pluviométriques retenues pour l'étude 76
Tableau 17: Les résultats du test de point de changement de Pettitt effectué sur la pluviométrie annuelle moyenne des stations 83
Tableau 18: Classification de la sècheresse en rapport avec la valeur de l'indice de précipitations normalisé (McKee et al. 1993) 84
Tableau 19: Classification des déciles de précipitation 93
Tableau 20: Classification de PN 94
Tableau 21: classification de Z-scores 96
Tableau 22: classification de RAI 98
Tableau 23: classification de DI 99

Listes des figures

Figure 1 : Situation géographique du bassin versant de l'Oued l'Ouergha 4
Figure 2 : Indice de compacité (Musy, 2001) 6
Figure 3 : Carte morphologique du bassin versant de l'oued Ouergha 7
Figure 4 : Carte hypsométrique du bassin versant de l'Ouergha 8
Figure 5 : Courbe hypsométrique du bassin versant de l'Ouergha 10
Figure 6 : Interprétation de la courbe hypsométrique (Larue, 2005) 11
Figure 7: Rectangle équivalent du bassin versant de l'Ouergha 12
Figure 8 : Histogramme des fréquences cumulées des pentes en (Km²) 15
Figure 9: Carte des pentes du bassin versant de l'Ouergha 16
Figure 10: Carte du réseau hydrographique du bassin versant de l'Ouergha 18
Figure 11: la carte géologique du Maroc (1951) 21
Figure 12: Carte géologique et lithologique du bassin versant de l'Ouergha 25
Figure 13: carte de situation géographique des stations pluviométriques étudiées dans ce chapitre au bassin versant de l'oued l'Ouergha 28
Figure 14: les précipitations moyennes annuelles dans le bassin versant de l'oued l'Ouergha au cours de la période 1981 à 2014 29
Figure 15: les précipitations moyennes saisonnières dans le bassin versant de l'oued l'Ouergha au cours de la période 1981 à 2014 30
Figure 16: les précipitations moyennes mensuelles dans le bassin versant de l'oued l'Ouergha au cours de la période 1981 à 2014 31
Figure 17: Carte des polygones de Thiessen au bassin versant de l'Ouergha 33
Figure 18: Carte des isohyètesau bassin versant de l'oued l'Ouergha 35
Figure 19: les températures moyennes mensuelles au niveau de la station de Hajria au cours de la période 1981 à 2014 38
Figure 20: Diagramme ombrothermique de Gaussen au niveau de la station Hajria au cours de la période 1981 à 2014 39
Figure 21: L'indice d'aridité mensuelle au niveau de la station de Hajria au cours de la période 1981 à 2014 40
Figure 22: Climagramme d'Emberger dans le bassin versant de l'oued l'Ouergha au niveau de la station Hajria 42
Figure 23: Evolution de l'ETP en fonction de Précipitation et Température au niveau de la station Hajria au cours de la période 1981 à 2014 45
Figure 24: Bilan hydrique du bassin versant de l'oued l'Ouergha au niveau de Hajria, estimé à partir de précipitations, L'ETP et l'ETR par la méthode de Thornthwaite au cours de la période 1981 à 2014 49
Figure 25: carte de situation géographique des stations pluviométriques étudiées dans ce chapitre au bassin versant de l'oued l'Ouergha 51
Figure 26: les débits moyens annuels au niveau de la station de Tabouda 53
Figure 27: les débits moyens annuels au niveau de la station de Galaz 53
Figure 28: les débits moyens annuels au niveau de la station d'Ain Aicha 54
Figure 29: les écarts des débits moyens annuels et interannuels au niveau de la satation de Tabouda 55

Figure 30: les écarts des débits moyens annuels et interannuels au niveau de la station de Galaz..... 56
Figure 31: les écarts des débits moyens annuels et interannuels au niveau de la station d'Ain Aicha..... 56
Figure 32: Simple cumul des lames d'eau écoulées pour la station de Galaz (1983 à 2020).. 58
Figure 33: Simple cumul des lames d'eau écoulées pour la station de Tabouda (1981 à 2020) 59
Figure 34: Simple cumul des lames d'eau écoulées pour la station d'Ain Aicha (1981 à 2020) 60
Figure 35: Variation du coefficient d'hydraulicité dans le bassin versant de l'Ouergha..... 61
Figure 36: les débits mensuels au niveau de la station de Tabouda 63
Figure 37: les débits mensuels au niveau de la station de Galaz..... 63
Figure 38: les débits mensuels au niveau de la station d'Ain Aicha 64
Figure 39: les débits moyens saisonniers dans le bassin versant de l'Ouergha 65
Figure 40: Variation du coefficient mensuel des débits au bassin versant de l'Oued l'Ouergha 66
Figure 41: Débits journaliers au niveau de la station d'Ain Aicha pour l'année humide, moyenne et sèche 68
Figure 42 : Evolution des précipitations et des débits pour la station de Tabouda..... 69
Figure 43 : Evolution des précipitations et des débits pour la station de Galaz..... 69
Figure 44: Evolution des précipitations et des débits pour la station d'Ain Aicha..... 70
Figure 45: carte de situation géographique des stations pluviométriques étudiées dans ce chapitre au bassin versant de l'oued l'Ouergha..... 76
Figure 46: Le contrôle des totaux annuels des précipitations en (mm) par la méthode des doubles cumuls 81
Figure 47: Test de Pettitt d'homogénéisation à 99% de confiance appliqué à la station Galez 81
Figure 48: Test de Pettitt d'homogénéisation à 99% de confiance appliqué à la station Ain Aicha..... 82
Figure 49: Test de Pettitt d'homogénéisation à 99% de confiance appliqué à la station Jbel Oudka 82
Figure 50: Evolution d'indice SPI a une échelle de temps de 1mois dans le bassin versant de l'oued Ouergha..... 88
Figure 51: Evolution d'indice SPI a une échelle de temps de 3mois dans le bassin versant de l'oued Ouergha..... 89
Figure 52: Evolution d'indice SPI a une échelle de temps de 6mois dans le bassin versant de l'oued Ouergha..... 90
Figure 53: Evolution d'indice SPI a une échelle de temps de 12mois dans le bassin versant de l'oued Ouergha..... 91
Figure 54: Evolution du (DP) pour des durées annuelles..... 93
Figure 55: Evolution du (PN) pour des durées annuelles..... 95
Figure 56: Evolution du z-score pour des durées annuelles 97
Figure 57: comparaison entre DP12, PN12 et Z-score12 97
Figure 58: Evolution du RAI pour des durées annuelles..... 99

Figure 59: Evolution du DI pour des durées annuelles 100

Introduction Générale

Le réchauffement global de la terre ou le changement climatique fait l'objet d'une grande attention aujourd'hui de la part de divers chercheurs du monde entier. Décideurs, gouvernements et Scientifiques du monde entier cherchent à comprendre la nature des changements et des défis auxquels ils doivent faire face. Les événements météorologiques extrêmes sont devenus de plus en plus répandus et de plus en plus fréquents. Cela a rappelé à la communauté scientifique internationale une évidence première, le climat de notre planète est très variable dans le temps et dans l'espace.

Dans cette optique, l'organisation météorologique mondiale (OMM) et le Groupe Intergouvernemental des experts du climat (GIEC, 2007) estiment qu'il est nécessaire actuellement, d'entreprendre des études de diagnostic pour déterminer empiriquement et statistiquement les caractéristiques du système climatique et sa variabilité pour différentes régions du globe. Par ailleurs, durant ces dernières décennies, le prolongement des épisodes secs est devenu une réalité dans cette partie du globe, notamment le Maroc (Sebbar et al. 2011). En effet, au Maroc ces dernières années, la sécheresse s'est manifestée d'une manière sévère, persistante, préoccupante et avec une intensité remarquable.

Ce travail a comme objectif de faire l'étude de la sécheresse dans le bassin versant de l'oued l'Ouergha, d'autres études au bassin versant de l'oued l'Ouergha comme (Boukrim, 2011) et (Msatef et al, 2018) avaient conclu à un déficit pluviométrique depuis 1982, donc la période d'étude de sécheresse dans ce bassin a été choisi depuis 1982 à 2014, à travers l'indice standardisé de précipitations (SPI) à différents échelles de temps de 1, 3, 6 et 12 mois et aussi d'autres indices de sécheresses DP, PN, Z-score-RAI et DI.

Cette étude est structurée comme suit :

- Une introduction générale explique de contenu du travail.

- Une introduction générale explicative du contenu du travail.

-Le premier chapitre concerne la situation géographique, les caractéristiques physiques, et la géologie du bassin versant.

-Le deuxième chapitre porte sur le contexte climatique du bassin (précipitation, température, évapotranspiration et le bilan hydrique.

- Le troisième chapitre est consacré au cotexte hydrologique (relation entre débit et précipitation)

- Le dernier chapitre est destiné pour le calcul des indices de sécheresse et la discussion des résultats.

-Une conclusion générale qui synthétise les résultats obtenus.

Chapitre I : Caractéristique du bassin versant

Introduction

Le fonctionnement du bassin versant est comme un percepteur chargé de recevoir les pluies et de les métamorphoser en écoulement à l'exutoire. Cette métamorphose va exister avec des pertes en eau et ces pertes dépendent des caractéristiques physiques et des conditions climatiques du bassin versant (Haida,2000).

On peut constater que le bassin versant est caractérisé par la couverture végétale et la nature du sol, la morphologie (réseau de drainage, forme, relief).

On va étudier dans ce chapitre, la situation géographique du bassin versant de l'Oued l'Ouergha, qui nous permettra d'avoir une vision des facteurs qui influencent les eaux de pluies et les transforment en écoulement jusqu'à la fin du parcours et aussi déterminer quelque indices qui permettent de savoir les caractéristiques du bassin versant.

On va étudier dans ce chapitre aussi la géologie qui est un facteur primordial des écoulements superficiels, elle nous permettra de savoir la perméabilité des formations, la couverture végétale, la densité du drainage et l'infiltration des eaux superficiels.

1. Situation géographique

Le bassin versant d'Oued Sebou a une forme de cuvette, il se situe entre l'océan Atlantique à l'Ouest, la zone de Fès Taza à l'Est, le moyen Atlas et la Meseta au Sud et le Rif au Nord. Le bassin versant de l'Ouergha représente 16.5% du bassin versant de l'oued Sebou, il couvre une grande partie de la montagne rifaine.

Le bassin versant de l'oued ouergha couvre une superficie de 6190 Km² et se situe au Nord du Maroc entre les longitudes -5°24' et -3°45' et les latitudes 34°25' et 35°25' (Fig.1).

Il est limité à l'Est par les affluents de la Moulouya et du Sebou du Périf oriental, au Nord par la crête rifaine passant par Ketama, Bab Bourred et Bab Taza, distant de la méditerranée d'environ 30 Km et au Sud par les bassins versants des affluents prérifains du Sebou.

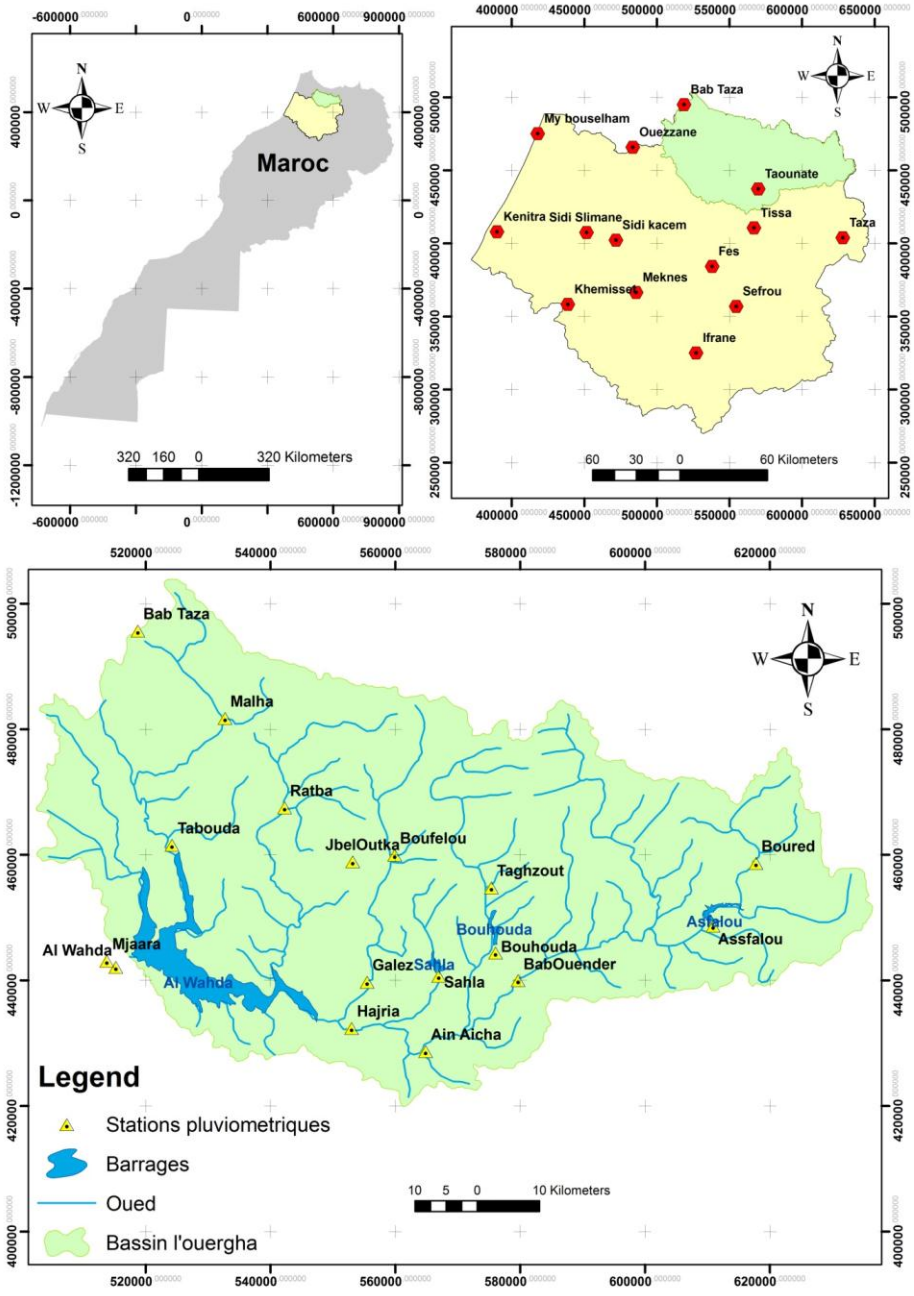

Figure 1 : Situation géographique du bassin versant de l'Oued l'Ouergha

L'exutoire du bassin versant se situe au niveau du barrage ALWAHDA, la capacité de stockage du barrage AL WAHDA (3,7 milliards de m^3) avec un apport moyen annuel de 3 300 Mm^3 et un module annuel d'environ 105m^3/s.

2. Les caractéristiques physiques du bassin versant

Les caractéristiques physiographiques d'un bassin versant dépendent du dynamisme des cours d'eau et leur hydrologie correspondant. Les paramètres primordiaux d'une étude physique d'un bassin versant pour désigner son attitude par rapport aux différentes unités géologiques qu'il a parcouru est le réseau hydrographique, le relief, la forme (Musy et Higy, 1998).

A. La forme

Le bassin versant de l'oued l'ouergha a une forme allongée avec une orientation Est-Ouest. L'écoulement de l'Oued a une orientation Est-Ouest au Sud du bassin versant et recueille des affluents importants de sa cote droite en origine du nord suivant une orientation Nord-Sud (Fig.3).

L'indice de compacité de Gravelius (KG) nous permet de déterminer la forme du bassin versant qui influence l'allure du l'hydrogramme à l'exutoire du bassin versant et aussi l'écoulement du cours d'eau. L'indice de compacité de Gravelius est défini par le rapport du périmètre du bassin au périmètre du cercle ayant la même surface :

$$\mathbf{KG} = 0{,}28\frac{P}{\sqrt{A}}$$

Avec :

- P : le périmètre du bassin versant (Km) ;
- A : surface du bassin versant (Km^2).

La figure nous montre les différentes formes en fonction des indices de compacité (Fig.2), si l'indice de compacité rapproche de 1, donc on peut considérer que le bassin versant est bien drainé.

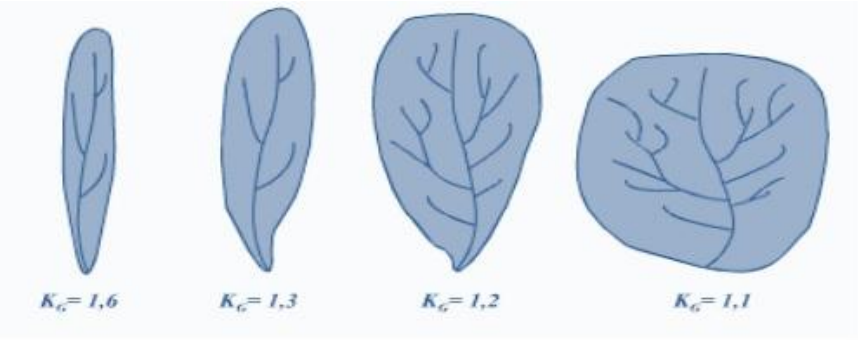

Figure 2 : Indice de compacité (Musy, 2001)

Pour le bassin versant de l'oued Ouergha: A = 6190 km ² et P= 462 km, Donc l'indice de compacité est égal à **1,64**.

On peut considérer que le bassin versant de l'Ouergha a une forme allongée. Le bassin versant de l'oued ouergha est comme une gouttière dissymétrique, la majeur partie de la superficie est au nord, 70% de la superficie du bassin versant de l'oued l'Ouergha est situé au Nord.

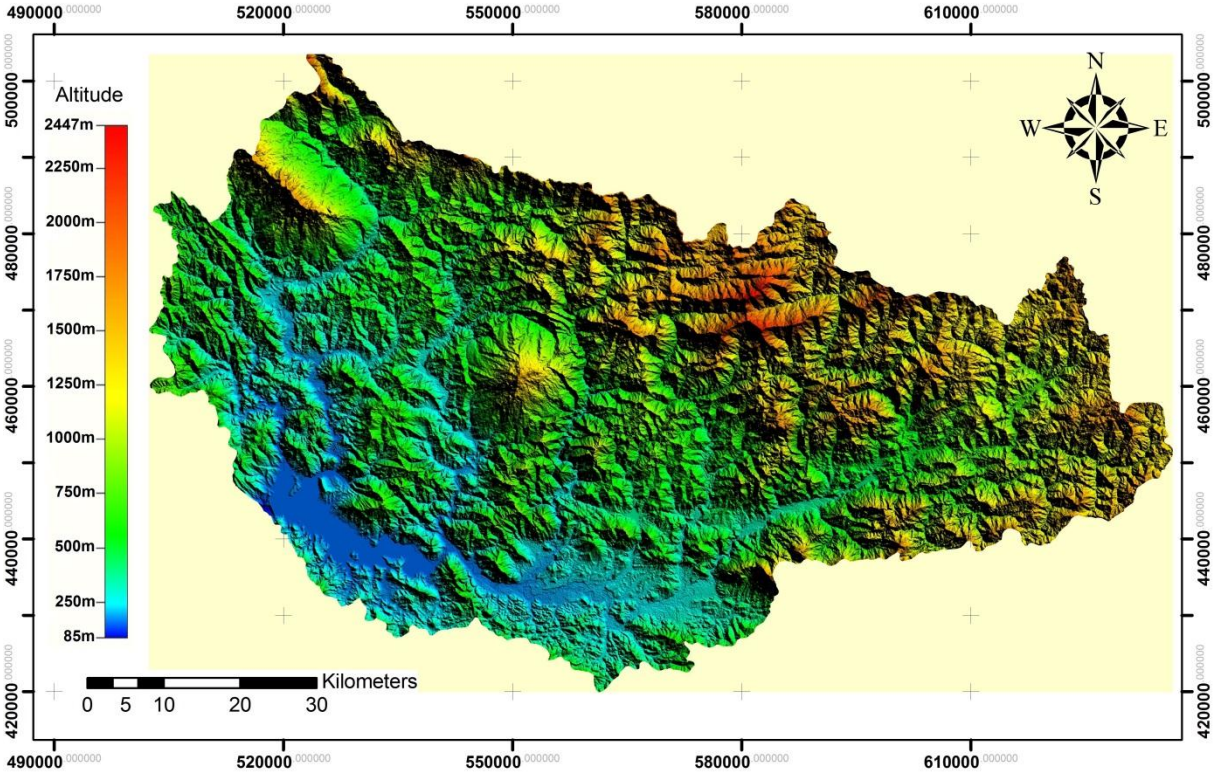

Figure 3 : Carte morphologique du bassin versant de l'oued Ouergha

B. Le relief

La morphologie et l'altitude du bassin versant influencent beaucoup de paramètres hydrométéologiques. Les courbes de niveau a la carte nous montre le relief, on peut définir les multiples paramètres du relief en déterminant les tranches d'altitudes qui permettent d'avoir la répartition du bassin versant.

Une carte topographique au 500000ème nous a permis de déterminer les tranches d'altitudes et le logiciel Arc Gis nous a aidés à trouver la surface entre deux courbes de niveau.

1) Carte hypsométrique

La carte hypsométrique nous montre des surfaces situées entre des courbes de niveau avec des couleurs dissemblables (Fig.4), des zones de basses altitudes d'environ 80m et celles de hautes altitudes environ 2400m.

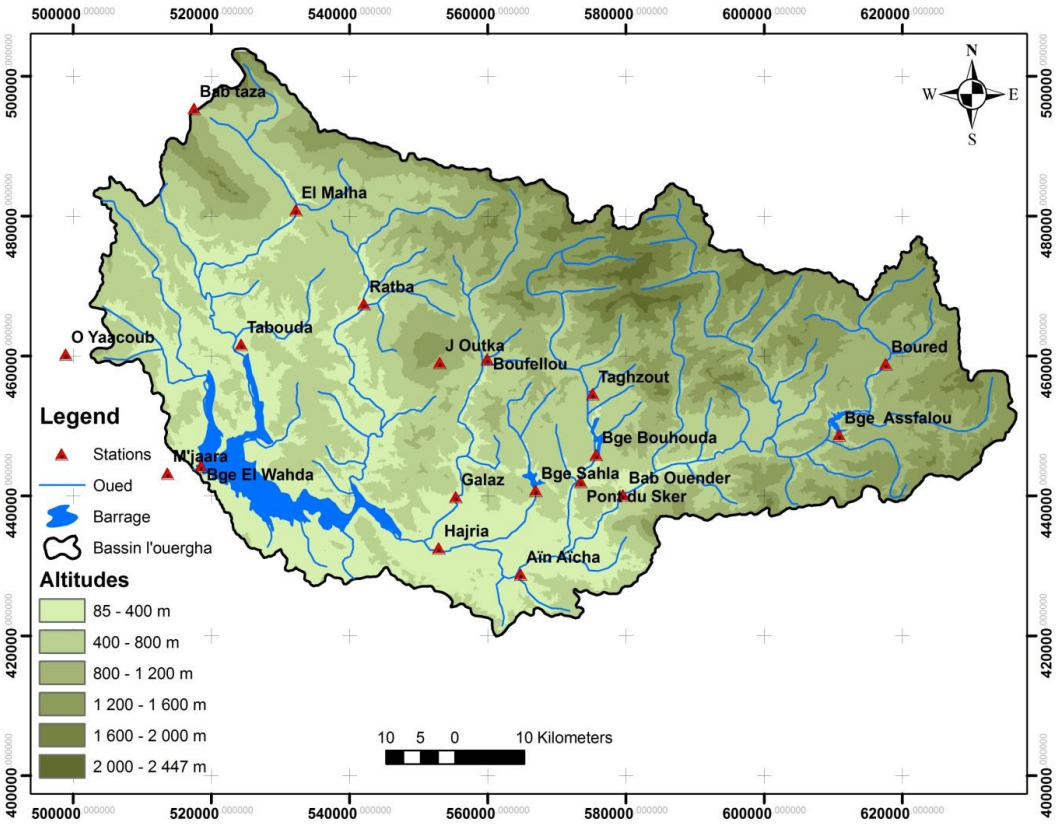

Figure 4 : Carte hypsométrique du bassin versant de l'Ouergha

La carte hypsométrique nous montre des classes d'altitudes équidistantes de 400m. Les calasses de hautes altitudes se situent au nord du bassin versant de l'Ouergha et les classes de basses altitudes se situent au Sud-ouest du bassin versant près de l'exutoire au barrage EL WAHDA.

2) Courbe hypsométrique

La courbe hypsométrique nous permet de caractériser le relief d'un bassin versant, cette courbe nous montre la répartition de la surface dans un bassin versant en fonction de l'altitude (Fig.5).

Le tableau nous résume la répartition des surfaces dans le bassin versant de l'oued Ouergha en pourcentage et en kilomètre carré en fonction de son altitude (Tab.1).

Tableau 1 : Répartition de la surface totale par tranche d'altitude au bassin versant de l'Oued l'Ouergha

Classe d'altitude (m)	Surface (Km²)	Pourcentage de la surface (%)
85 - 478	2027,26	32,75
478 - 872	1825,73	29,49
872 - 1266	1258,24	20,32
1266 - 1659	890,97	14,39
1659 - 2053	171,15	2,76
2053 - 2447	16,62	0,26
Total	6190	100

Ce tableau nous aide à avoir la courbe hypsométrique en calculant les superficies cumulées et leurs pourcentages aux différentes altitudes (Tab.2).

Tableau 2 : Tableau de fréquences et des pourcentages cumulés au-dessus de la limite inférieure au bassin versant de l'Oued l'Ouergha

Classe d'altitude (m)	Surface (Km²)	surface (%)	Surface cumuléé	Altitude (m)	surface cumulée(%)
85 - 478	2027,26	32,75	6190,00	85,00	100,00
478 - 872	1825,73	29,49	4162,71	478,00	67,25
872 - 1266	1258,24	20,32	2336,98	872,00	37,75
1266 - 1659	890,97	14,39	1078,74	1266,00	17,43
1659 - 2053	171,15	2,76	187,77	1659,00	3,03
2053 - 2447	16,62	0,26	16,62	2053,00	0,27
Total	6190,00	100,00	0,00	2447,00	0,00

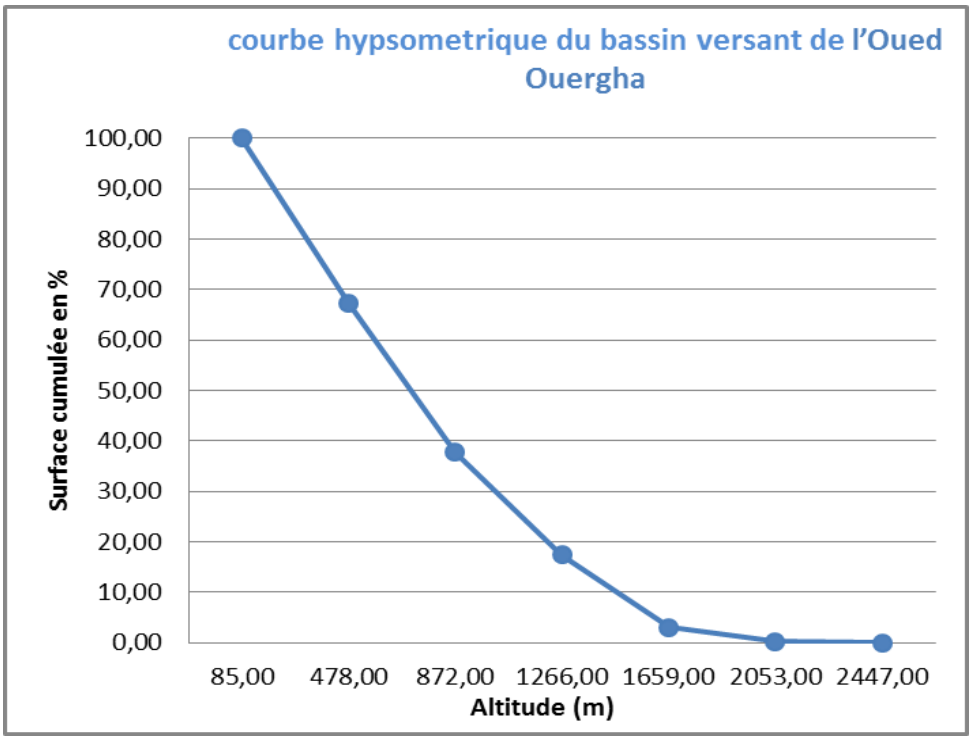

Figure 5 : Courbe hypsométrique du bassin versant de l'Ouergha

On a trois cas pour l'interprétation de la courbe hypsométrique :

- Le premier cas, le bassin jeune (courbe 3), ce bassin est caractérisé par sa superficie qui est faible par rapport au changement de son altitude.
- Le deuxième cas, le vieux bassin (courbe 1), ce bassin est caractérisé par une grande superficie avec une très faible altitude.
- Le troisième cas, le bassin mature (courbe 2), c'est un bassin ou l'échelle d'érosion est parallèle à son âge.

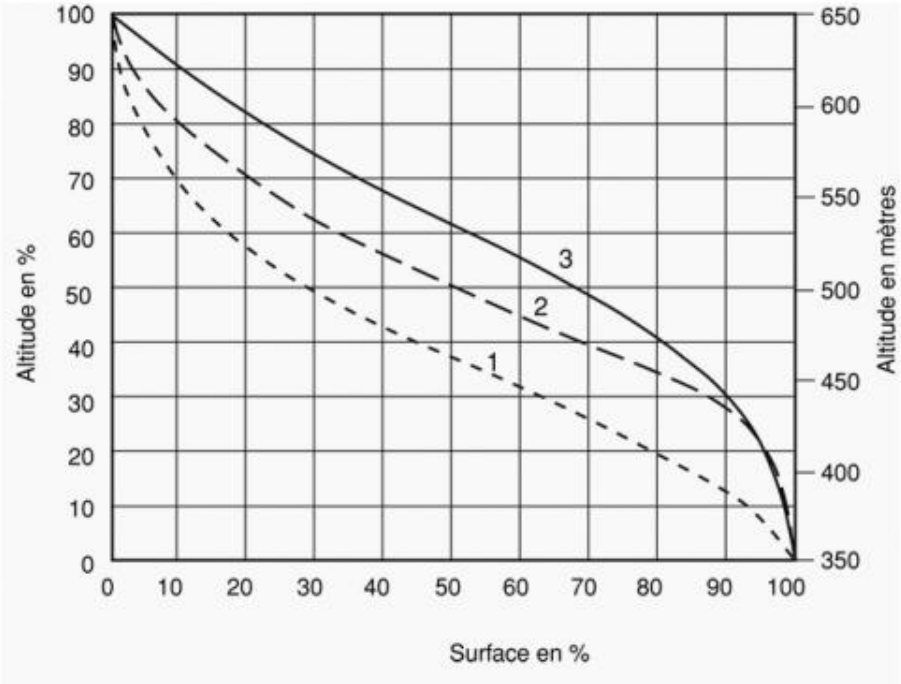

Figure 6 : Interprétation de la courbe hypsométrique (Larue, 2005)

L'analyse de ces courbes pour les deux figures (Fig.5) et (Fig.6) nous confirme que le bassin versant de l'oued l'Ouergha est un vieux bassin qui est caractérisé par une faible superficie par rapport à son altitude.

L'analyse de la courbe et la carte hypsométrique nous indique que le bassin versant de l'oued Ouergha est un bassin ou les eaux circulent d'une grande facilité à cause des altitudes qui sont très importantes ce qui amène par la suite a une forte érosion.

C. Le rectangle équivalent

Le bassin versant est transformé en rectangle équivalent par une représentation géométrique du contour du bassin, le rectangle équivalent est tracé à travers la largeur et la longueur du bassin versant. Les répartitions hypsométriques sont respectées en traçant les courbes de niveau qui sont parallèles. Le rectangle équivalent est créé pour faire une comparaison morphologique des bassins versants (Afkir, 1985).

Cette figure nous montre que le rectangle équivalent du bassin versant Ouergha (Fig. 7), le rectangle équivalent sera bien drainé si le rectangle est moins allongé.

Cette formule nous permet de calculer les dimensions du rectangle équivalent :

$$L = \frac{K_G\sqrt{A}}{1.12} \times \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_G}\right)^2}\right] \; et \; l = \frac{K_G\sqrt{A}}{1.12} \times \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_G}\right)^2}\right]$$

KG : indice de compacité Gravelius

A : superficie du bassin en (Km²)

L : longueur du rectangle équivalent en (Km)

l : largeur du rectangle équivalent en (Km)

l = 31 Km et L =199 Km

La largeur est plus petite six fois que la longueur.

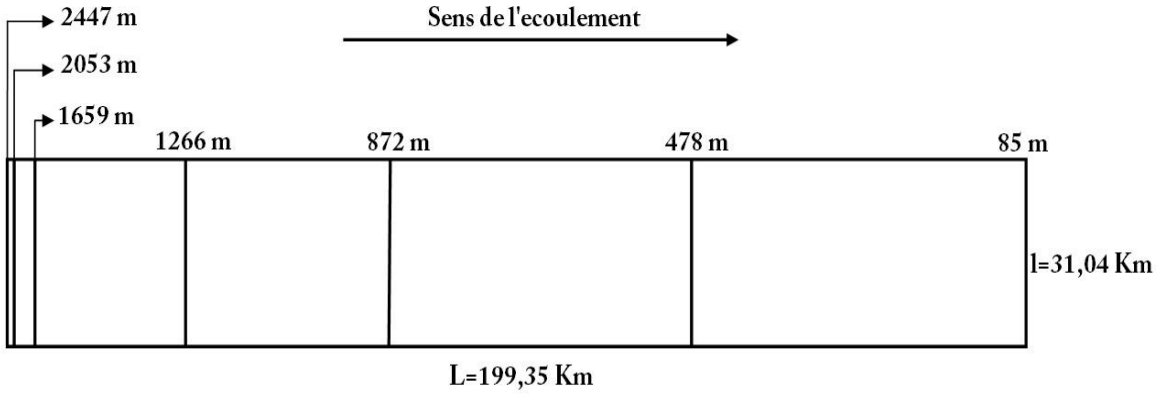

Figure 7: Rectangle équivalent du bassin versant de l'Ouergha

D. Les caractéristiques d'altitudes

1) Altitudes minimale et maximale

La carte topographique nous permet d'obtenir les altitudes maximales et minimales, les altitudes minimales représentent le point le plus bas du bassin versant et les altitudes

maximales reflètent le point le plus élevé du bassin versant. Pour le bassin versant de l'oued l'Ouergha, l'altitude maximale est de 2447m et l'altitude minimale est de 85m.

2) L'altitude moyenne

L'altitude moyenne est calculée par cette formule :

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

A_i : Aire comprise entre deux courbes de niveau (Km²)

h : Altitude moyenne entre deux courbes de niveau (m)

A : Surface totale du bassin versant (Km²)

H_{moy}=776 m

On peut servir l'altitude moyenne dans un model hydrologique ou bien aussi dans le calcul de quelque paramètre hydrométéorologique.

3) Altitude médiane

L'altitude médiane présente l'altitude a un point de la moitié de la surface totale du bassin versant. L'altitude médiane du bassin versant de l'oued l'Ouergha est de **710m.**

E. La pente

La pente influence beaucoup le cycle hydrologique du bassin versant. Elle a un effet sur le ruissellement, l'infiltration et aussi la perméabilité. Le partage entre l'infiltration et l'écoulement superficiel sur le bassin versant est en fonction de la pente (Abdellah, 1997).

1) La réalisation de la carte des pentes

La carte des pentes est réalisée par le logiciel SIG (Système d'Information Géographique), ce logiciel nous a permis de découpé la carte du Model Numérique de Terrain (MNT) afin d'avoir des classes des pentes.

Tableau 3: les Classes des pentes

Classe	Type de pente
1	Nulle à faible (0-3%)
2	Modérée (3%-12%)
3	Abrupte (12%-20%)
4	Très abrupte (20%-35%)
5	Extrême (>35%)

Pour les types de pente abrupte a très abrupte, on a comme résultat 21% et de 31%. Et pour les classes 1 et 2, le résultat est de 3% et 12% (Tab.3).

Tableau 4: Superficies, fréquences et fréquences cumulées en fonction des classes des pentes au bassin versant de l'Oued l'Ouergha

Classe	Surface (Km^2)	Fréquence cumulée	%de la surface	% cumulé
0 - 3	215,41	215,41	3,48	3,48
3 - 12	763,23	978,64	12,33	15,81
12 - 20	1933,14	2911,78	31,23	47,04
20 - 35	1335,80	4247,58	21,58	68,62
>35	1941,18	6190	31,36	100
Totale	6190			

On a comme résultat, un pourcentage de 3% de la surface du bassin versant de l'Ouergha qui représente une pente moins de 3% et un pourcentage de 84% de surface qui dépasse une pente de 12%. Donc notre bassin versant en générale a une pente extrêmement élevé (Tab.4).

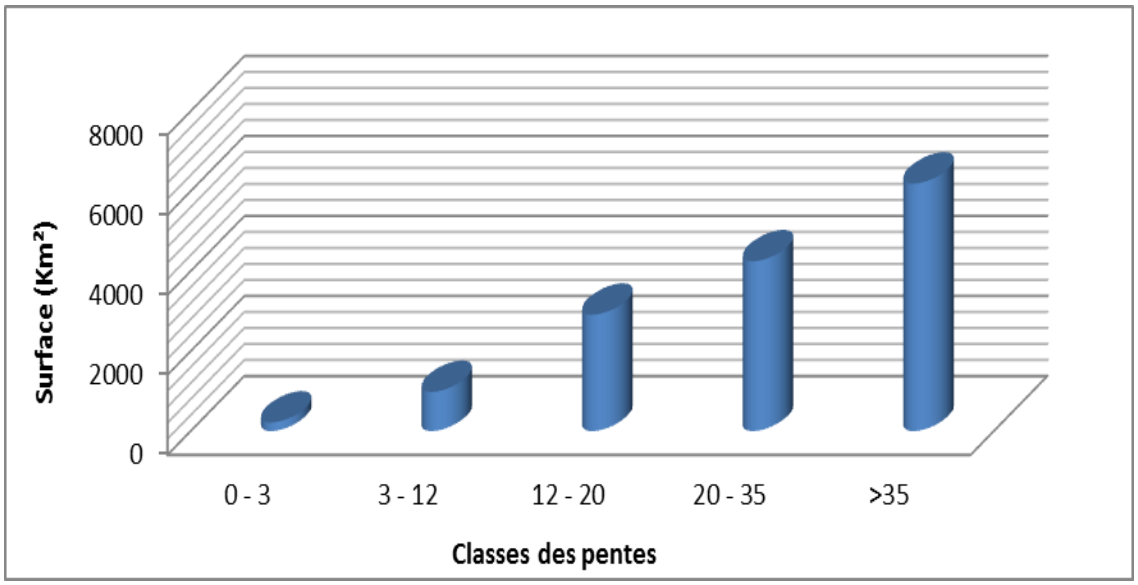

Figure 8 : Histogramme des fréquences cumulées des pentes en (Km²)

Cette figure nous indique une augmentation des surfaces de classes de pentes de notre bassin, cette augmentation est parallèle avec l'élévation de degré de pente (Fig.8). Par contre par rapport à la carte des pentes (Fig.9), elle ne confirme pas cet ordre d'augmentation des surfaces de pentes parallèlement avec le de degré de pente, ce qui peut être expliquer par la géologie de notre bassin versant et aussi la force qui est appliquée par les eaux qui influence gravement le terrain surtout avec ce degré de pente qui est très accidenté sur la majorité de la surface du bassin versant à part une minorité de surface située auprès de barrage EL WAHDA qu'elle a une pente faible.

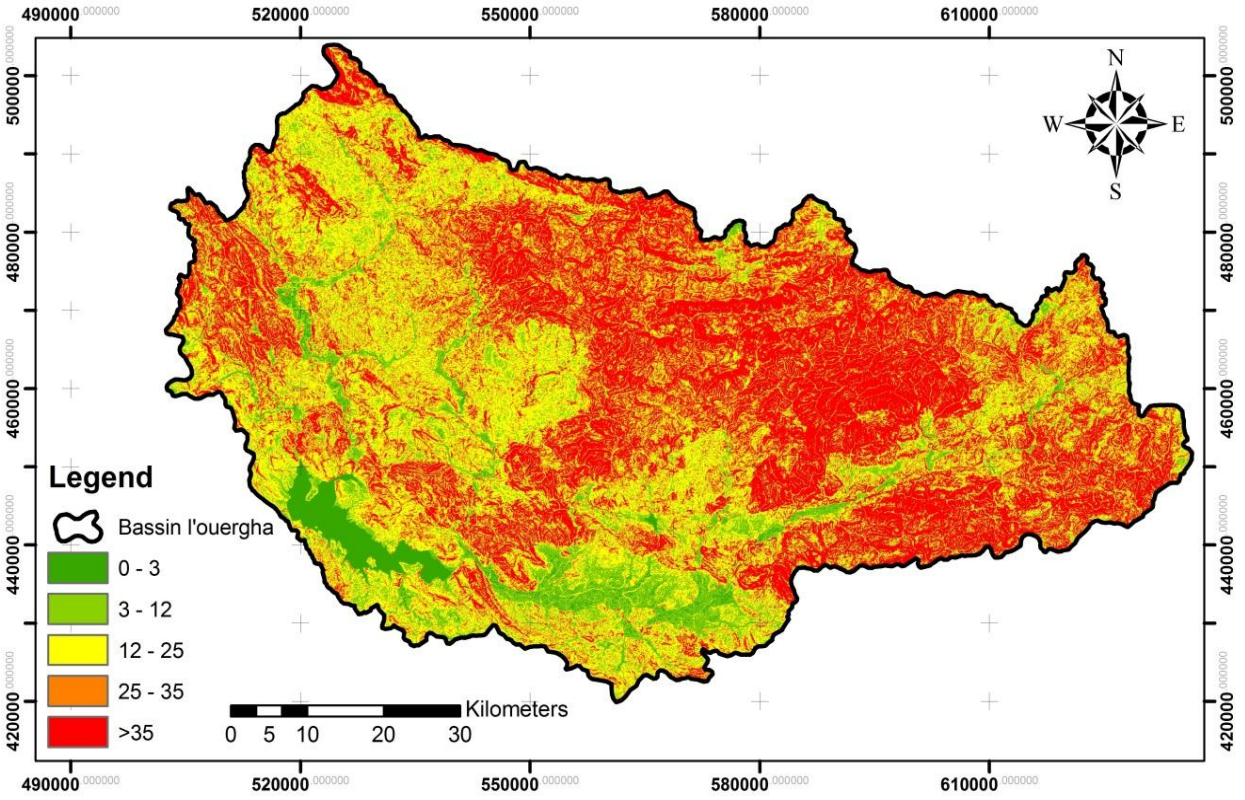

Figure 9: Carte des pentes du bassin versant de l'Ouergha

2) Pente moyenne du bassin versant

On peut avoir une idée sur la topographique de notre bassin versant à partir de la pente moyenne, elle nous donne une idée de la durée du ruissellement et aussi elle influence le débit de pointe.

La formule de la pente moyenne :

$$P_{moy} = \frac{\Delta H}{L} = \frac{H_{max} - H_{min}}{L}$$

P_{moy} : La pente moyenne

ΔH : L'altitude moyenne en (m)

L : La longueur du rectangle équivalent en (Km)

P_{moy} = 5.9

Puisque la pente moyenne a un pourcentage de 0,06%, Donc le bassin versant de l'oued l'Ouergha a un fort relief.

3) Indice de pente global

L'indice de pente global (I_g) nous donne les caractéristiques de relief du bassin versant. L'indice de pente global c'est le rapport entre le dénivellement utile et la longueur du rectangle équivalent du bassin versant.

La formule de l'indice de pente global :

$$I_g = \frac{DU}{L_{eq}} = \frac{H_{5\%} - H_{95\%}}{L}$$

I_g : Indice de pente global

DU : La dénivelée $H_{5\%}$ - $H_{95\%}$

L_{eq}: Longueur du rectangle équivalent

$H_{5\%}$: Altitude correspond à 5% de la surface totale du BV

$H_{95\%}$: Altitude correspond à 95% de la surface totale du BV

L'indice de pente global est égal à **7** ou bien **0,07%.** Suivant la classification du relief l'ORSTOM (Tab.5), Donc notre bassin versant a **un relief fort**.

Tableau 5: la Classification du relief selon Ig donné par l'ORSTOM

Relief	Valeur d'Ig
Relief très faible	Ig<0,002
Relief faible	0,002 ≤ Ig < 0,005
Relief assez faible	0,005 ≤ Ig < 0,01
Relief modéré	0,01 ≤ Ig < 0,02
Relief assez fort	0,02 ≤ Ig < 0,05
Relief fort	0,05 ≤ Ig < 0,5
Relief très fort	Ig > 0,5

3. Le réseau hydrographique

La carte topographique nous a permis de déterminer les limites du bassin versant et aussi de savoir les caractéristiques physiques du bassin, afin de déterminer ensuite une carte du réseau hydrographique (Fig.10).

La carte de réseau hydrographique nous indique l'assemblage des cours d'eau qui participent à l'écoulement, ces eaux peuvent être artificiels ou naturels, temporaires ou permanents (Roche, 1936).

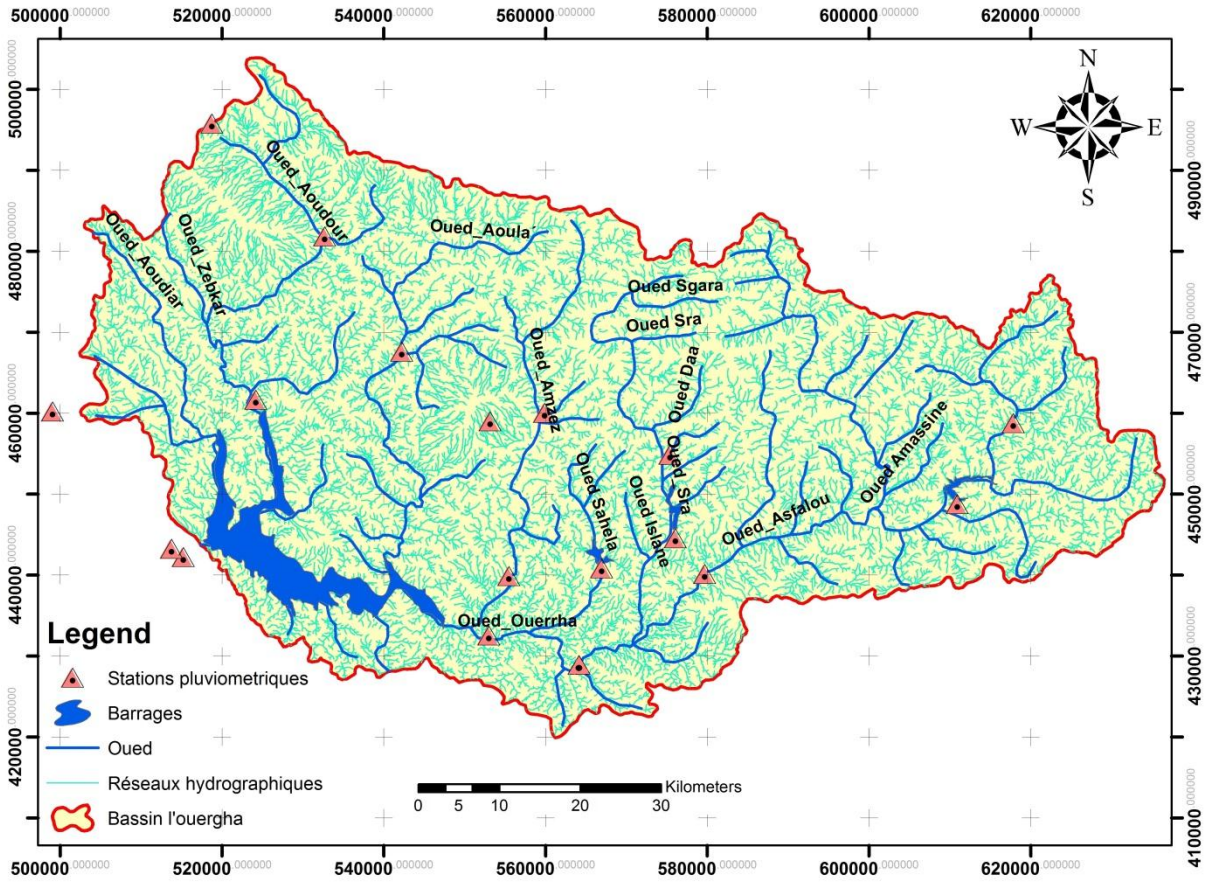

Figure 10: Carte du réseau hydrographique du bassin versant de l'Ouergha

L'écoulement du réseau hydrographique du bassin versant de l'oued l'Ouergha est Nord-Est vers le Sur-Ouest.

Parmi les affluents les plus importants d'oued Sebou c'est l'oued l'ouergha qui est considéré comme le 2éme affluent de l'oued Sebou.

L’assemblage des deux oueds Sra et Asfalou nous forme l’Oued ourgha du cote gauche, du cote droite l’oued Ouergha recueilli de importants affluents en passant par la station Bab Ouender.

Les affluents d’Oued l’Ouergha :

- Oued Sra qui est mesuré par la station pont du Sker.
- Oued Aoulai qui est mesuré par la station de Rhafsai.
- Oued Aoudour qui est mesuré par la station Tafrant.
- Oued Aoudyar qui est pres du barrage AL WAHDA, mesuré par la station de M’Jara

4. Contexte géologique de la zone d’étude

A. Géologie de la chaîne du Rif

Les chaines alpines de la Méditerranée occidentale contiennent la chaîne rifaine qui s’étale à l’Est vers l’algerie en formant forme les maghrébides(Fig.11) (Auboiun et Debelmas, 1980 ; Durant et Delga, 1980 ; In Frizon et al. 1991).

Depuis le nord vers le Sud, on remarque 3 domaines :

Les rides sud rifaines, les zones externes, les zones internes. La zone interne (Sebtides métamorphiques, Dorsale calcaire, Ghomarides paléozoïques) appartient au terrain d'Alboran qui s’étale jusqu’il dépasse le détroit de Gibraltar au Cordillères bétiques. Le socle de la mer d'Alboran est formé par les zones internes, qui appartiennent aux deux chaines (Frizon et al, 1991). Un empiliement de nappes a causé la constitution de ces zone, une distinction de deux ensembles litholo-structuraux, le complexe Ghomaride et le complexe Sebtide qui font partie au dorsale calcaire (Didon et al. 1973).

L’attachement des deux domaines interne et externe indique que la dorsale calcaire et les Ghomarides se reposent sur les unités externes et sont verticalisées (Favre, 1995).

La marge téthysiènne du continent africain représente le domaine. Les séries sédimentaires qui sont d'âge cénozoïque, sont devisées en 3 unités : pré-rifaines, intra-rifaines et méso-rifaines. Entre les unités intra-rifaines de Kétama-Tanger au Sud et les zones internes se trouvent les nappes des flyschs, la nappe d'Ouazzane, la nappe de Senhadja, la nappe d'Aknoul et la nappe de Temsamane (Hottinger et Suter, 1961) (Suter, 1967,1980).

Le Crétacé a subit un renversement tectonique au Jurassique, un chevauchement de faille normales qui a eu lieu au Jurassique, après ces failles ont subi été suivie par un décrochement NordEst-SudOuest et NordOuest-SudEst. Dans le domaine subrifain (Asebry et al. 1987) (Asebry et al. 1992).

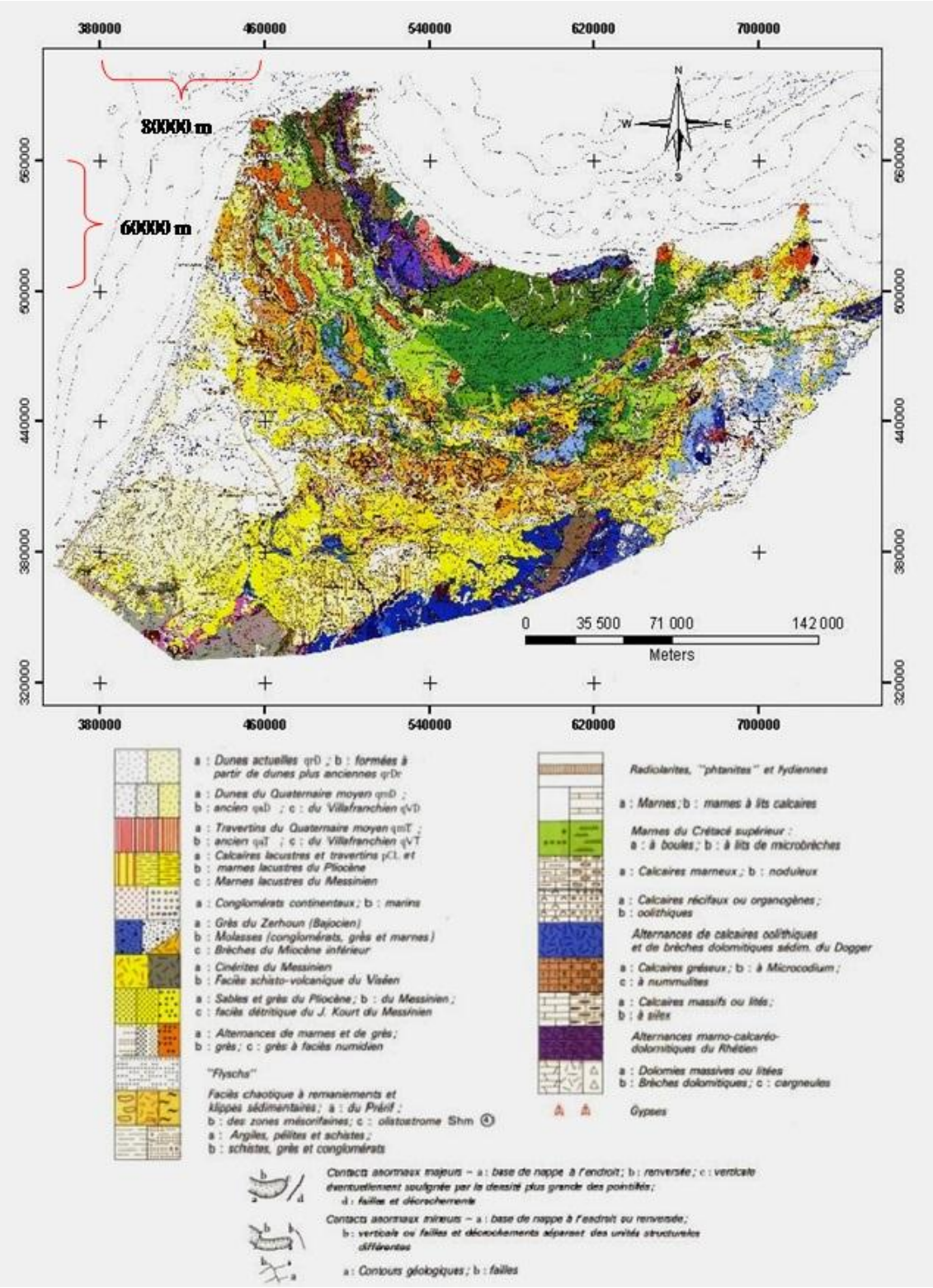

Figure 11: la carte géologique du Maroc (1951)

B. Aperçu sur la géologie du bassin versant de l'Ouergha

Dans le bassin versant de l'Oued l'Ouergha il excite 3 unités morpho-structurales depuis l'amont jusqu'à l'aval, on a les unités intra-rifaines, les unités méso-rifaines et les formations post-orogéniques (Fig.12).

1) Les dépôts post-nappe

Le Miocène est une formation autochtone durant la transgression tortonienne qui contient des dépôts post-nappe qui sont constitués a la base par des sédiments grossiers du conglomérat. Cette formation molassique indique un très fort pendage orienté vers le Sud-Est-ce qui explique la déformation tectonique. Une épaisse série d'argile des marnes bleues qui sont formé à partir de ces formations qui sont transformé en grés, par la suite des roches sédimentaires continentales qui se placent au-dessus de ces formations marneuses. Suite à un effondrement de la partie nord de la chaîne moyen atlasique un ensemble de bassins de subsidence qui sont formés au Tortonien.

Pour notre zone d'étude, la ride mésorifaine de Taounate sépare deux bassins, le bassin de Tahar Souk au Nord et le bassin de Taounate entre la partie sud de la ville et Aïn Aïcha.

2) Zone Intra-Rifaine

Deux nappes de charriage forment la zone Intra-Rifaine, L'unité de Tanger et celle de Ketama. Elles sont des formations para-autochtones mobiles, formées par des particules du Trias jusqu'au Tortonien inférieur.

3) Unité de Ketama

L'Unité de Ketama se situe dans le Rif oriental, elle affleure une patrie du bassint versant de l'Oued Amzazelle, elle contient un épais flysch schisto-gréseux du Crétacé inférieur.

4) Unité de Tanger

L'Unité de Tanger se situe a cote de la partie occidentale du Rif. Elle couvre l'Unité de Ketama, elle est construite par un Crétacé supérieur de calcaires et de schistes et aussi par un Crétacé moyen.

5) Zone Méso-Rifaine

La zone Mézo-Rifaine est constituée par des marnes. Une formation molassique constituée de grés et de conglomérat qui surmontent ces marnes.

C. Tectonique

Des failles actives séparent et découpent le Rif. Des nappes de flyschs chevauchent vers le Nord à l'unité intra-rifaine de Tanger-Ketama. L'unité méso-rifaine est chevauchée vers le sud par des nappes de flyschs (Andrieux, 1971).

Des séries jurassico-crétacées constituent le méso-rif. Ces zones sont généralement en position d'autochtone relatif sous les nappes Intra-Rifaine et aussi rifaines (Suter et Marçais, 1966).Dans le Prérif externe la nappe rifaine d'Ouezzane est considérée comme une nappe de glissement.

D'une manière générale l'orientation du réseau hydrographique est influencé par ce canevas structural de notre région d'étude.

D. Facies Litho stratigraphie

1) Les formations secondaires

- Le Trias :

Au sud du bassin versant de l'oued de l'Ouergha se trouve le Trias qui est gypsifère, imperméable et salé. Les nappes qui sont en contact avec des argiles du Trias deviennent inexploitables, ces argiles de trias influencent aussi les nappes alluviales et les eaux superficielles.

- Le Lias :

Le lias se situe entre le sud et le nord de l'oued l'Ouergha. Les dolomites et les calcaires du Lias jouent un rôle très important à la constitution d'aquifère pour l'alimentation.

2) Le Crétacé

Dans le bassin versant de l'oued l'Ouergha les formations crétacées se situent un peu près sur l'ensemble du bassin.

3) Les formations tertiaires et quaternaires

Depuis le Jurassique le Miocène transgressif est déposé sur la causse. Le Miocène transgressif est formé sur les anciennes structures, ces structures sont fossilisées à cause du Miocène transgressif qui sera lui aussi plissé après

Le Miocène Supérieur est concordant sur le Miocène inférieur. Il est construit par des séries épaisses transgressives qui comblent les bassins du haut et moyen de l'Oued l'Oeurgha.

Le Miocène inférieur est formé par une série marno-gréseuse détritique. Il se situe à la zone de Tafrant, Rhafsa et mois Taounate.

Le Pliocène commence par une série détritique qui repose sur le Tortonien, il est surmonté d'un calcaire tufeux et caractérisé par gonflement. Le Pliocène se situe au bas du bassin versant Ouergha.

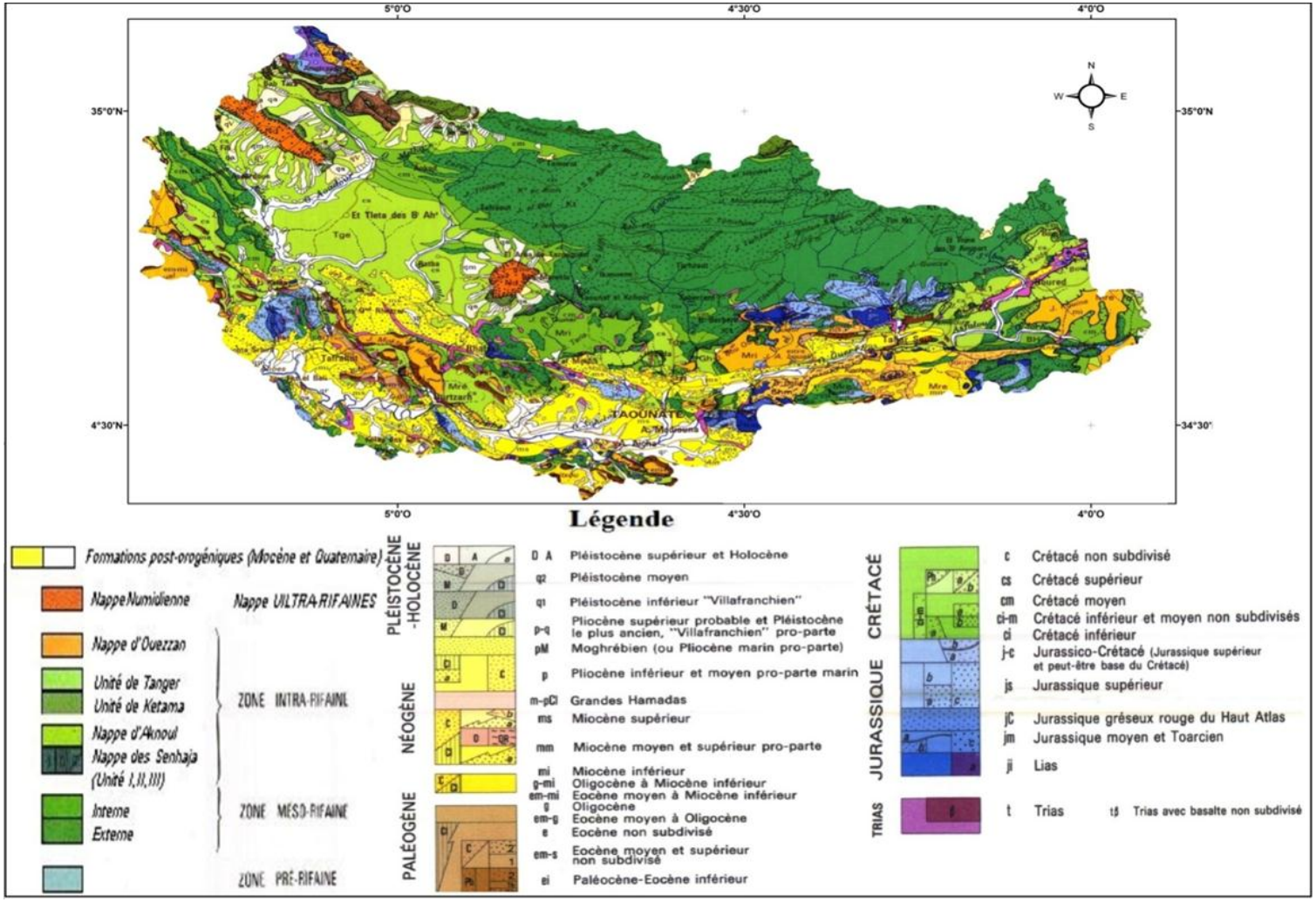

Figure 12: Carte géologique et lithologique du bassin versant de l'Ouergha

5. Conclusion

Les caractéristiques topographiques du bassin versant de l'oued l'ouergha sont déterminées par différents paramètres physiques de notre bassin (Tab.6):

Tableau 6 : Caractéristiques morphologiques du bassin versant de l'Ouergha

Paramètres	Valeurs
Surface	6190 Km²
Périmètre	462 Km
Indice de compacité de Gravelus	1.64
Longueur du cours d'eau principale	255 Km
Longueur du rectangle équivalent	199.35 Km
Largeur du rectangle équivalent	31,04 Km
Altitude maximale	2447 m
Altitude minimale	85 m
Altitude moyenne	1266 m
Pente moyenne	0.06%

Le bassin versant de l'oued Ouergha a un fort relief ce qui favorise la circulation des eaux dans le bassin versant.

Le bassin versant de l'oued Ouergha a un écoulement orienté du Nord-Est vers le Sur-Ouest. On remarque des failles qui sont produites par des mouvements et des déformations épirogéniques au tertiaire et secondaire.

Une déformation dans le domaine rifaine qui caractérise l'évolution structurale, cette déformation antérieure produit des nappes pré-rifaines qui sont dominée par des failles de socle.

Chapitre II : Caractéristique Climatique

1. Introduction

Dans notre zone d'étude, le climat est lié directement avec l'éloignement les côtes atlantiques et méditerranéennes, il est lié aussi avec le climat aride saharien et l'anticyclone des Açores qui influencent le climat général du pays (Benaabidate et al, 2006).

Le climat a un rôle très important et typique dans le cycle hydrologique. La détermination des paramètres climatiques (température, précipitation et évaporation) est nécessaire pour définir le climat, l'étage et les conditions climatiques de notre zone d'étude.

Dans ce chapitre, on va étudier les températures et les précipitations qui nous permettent d'avoir le contraste spatio-temporel.

Ce tableau nous indique les stations qu'on a utilisées dans cette étude, pour une période de 33ans, depuis 1981 à 2014 (Tab.7) :

Tableau 7: Coordonnées des stations pluviométriques du bassin versant de l'Ouergha

Station	N° Station	X(Km)	Y(Km)	Z(m)
Mjaara	5128	513,6	443,2	92
Ain aicha	236	564,7	428,8	230
Bab ouander	1568	579,5	440,1	312
Bab taza	1586	518,5	495	902
Boured	2338	617	458	815
Jbel oudka	4626	553	459	1115
Tabouda	7283	524,25	461,6	180

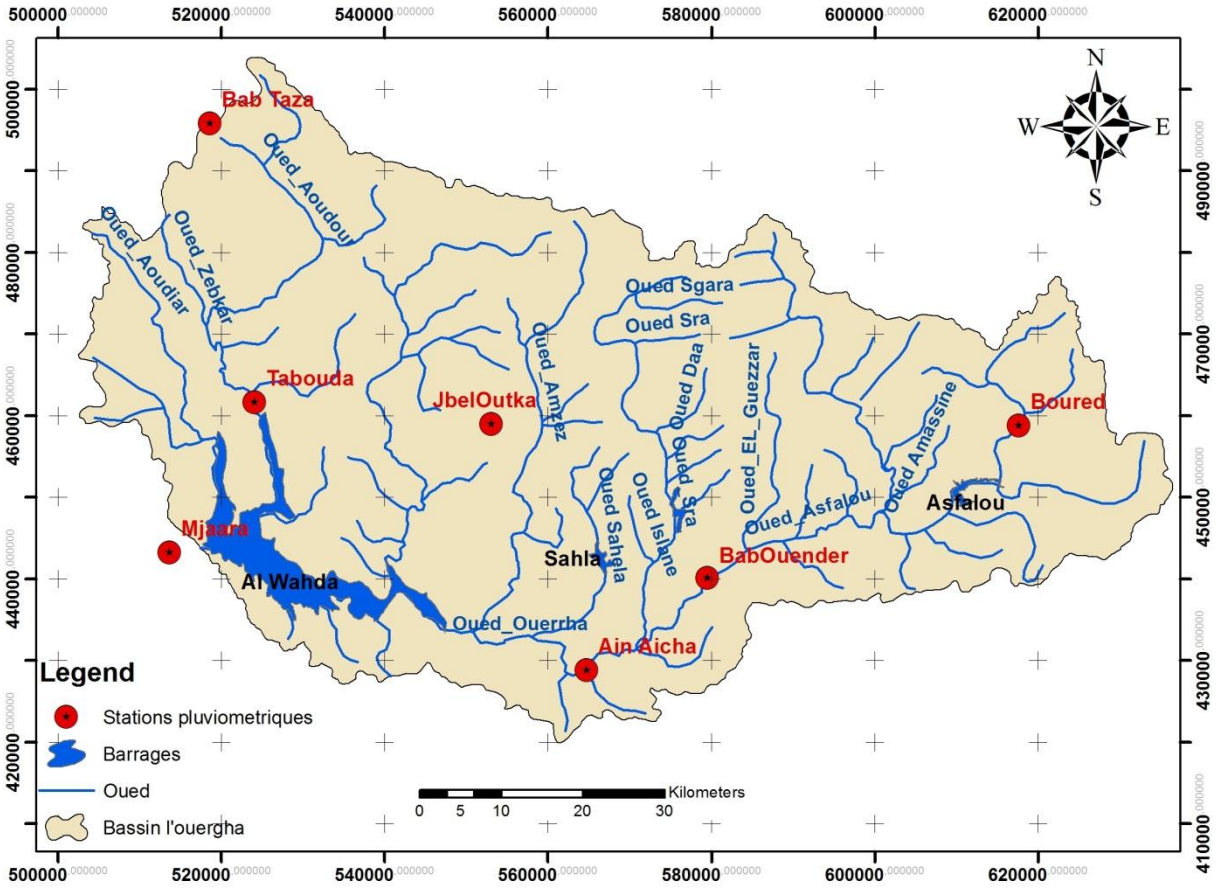

Figure 13: carte de situation géographique des stations pluviométriques étudiées dans ce chapitre au bassin versant de l'oued l'Ouergha

2. Précipitation

Les précipitations sont définit par les eaux météoriques, solide ou bien liquide qui chute sur la surface de la terre. Ces eaux météoriques sont produites par le changement de pression ou de température.

A. Variation temporelle des précipitations

Pour avoir des résultats fiable pour le calculer de la lame d'eau tombée sur la totalité d'un bassin versant, il faut avoir des données de précipitations bien répartis sur la totalité du bassin versant. On va utiliser pour le calculer de la lame d'eau tombée sept stations répartis sur tout le bassin versant avec plusieurs méthodes, la méthode des polygones de Thiessen, des isohyètes et la méthode arithmétique.

1) Précipitations annuelles

L'analyse des précipitations moyennes annuelles dans le bassin versant de l'oued l'Oeurgha nous indique un maximum de précipitation pour la station pluviométrique Jbel oudka (1435,7 mm) et un minimum pour la station pluviométrique d'Ain aicha (522,1 mm). On remarque une diminution des précipitations moyennes annuelles en allant de l'amont vers l'aval (Fig.14).

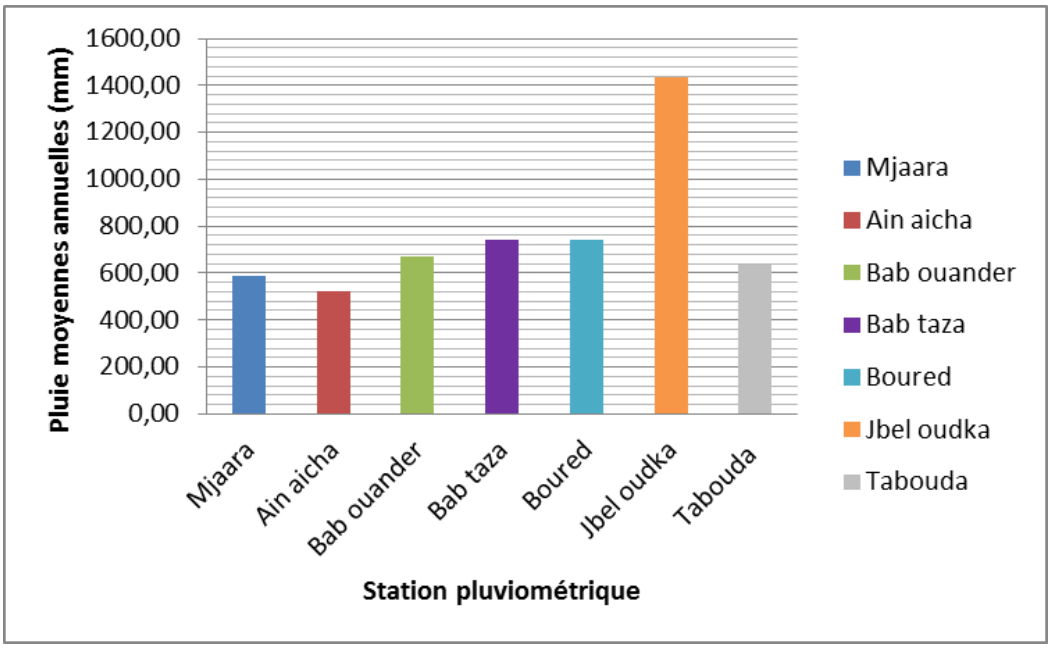

Figure 14: les précipitations moyennes annuelles dans le bassin versant de l'oued l'Ouergha au cours de la période 1981 à 2014

2) Précipitations saisonnières

Les précipitations moyennes saisonnières dans le bassin versant de l'Ouergha nous indiquent que les mois de décembre, janvier et février sont les plus pluvieuses et la saison la plus sèche est la saison d'été (Fig.15). On peut donc constater que le bassin versant de l'oued l'Ouergha a un régime pluviométrique de type méditerranéen.

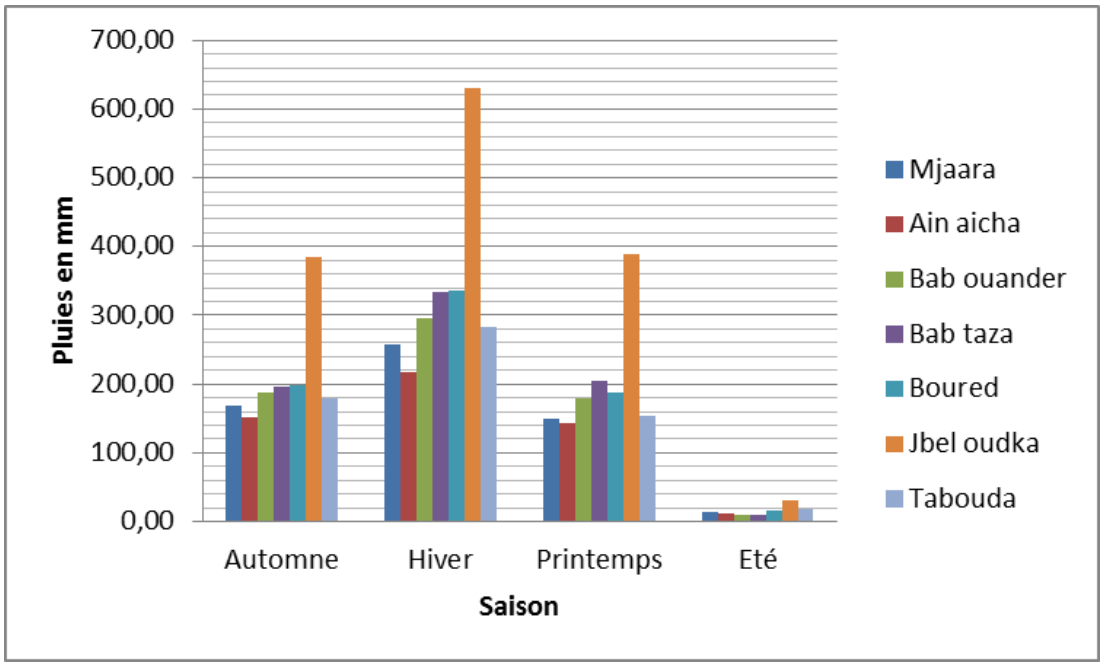

Figure 15: les précipitations moyennes saisonnières dans le bassin versant de l'oued l'Ouergha au cours de la période 1981 à 2014

3) Précipitations moyennes mensuelles

Les précipitations moyennes mensuelles dans le bassin versant de l'oued l'Ouergha nous montre que la majorité de la précipitation mensuelle qui représente un pourcentage supérieure à 90 est enregistré dans la période pluvieuse qui prend l'effet à partir du mois d'Octobre jusqu'au Mai (Fig.16). Cette figure nous indique aussi que le mois de décembre est celui qui reçoit le maximum de précipitations pour toutes les stations du bassin versant de l'oued l'Ouergha et le mois de Juillet est le mois le plus sec.

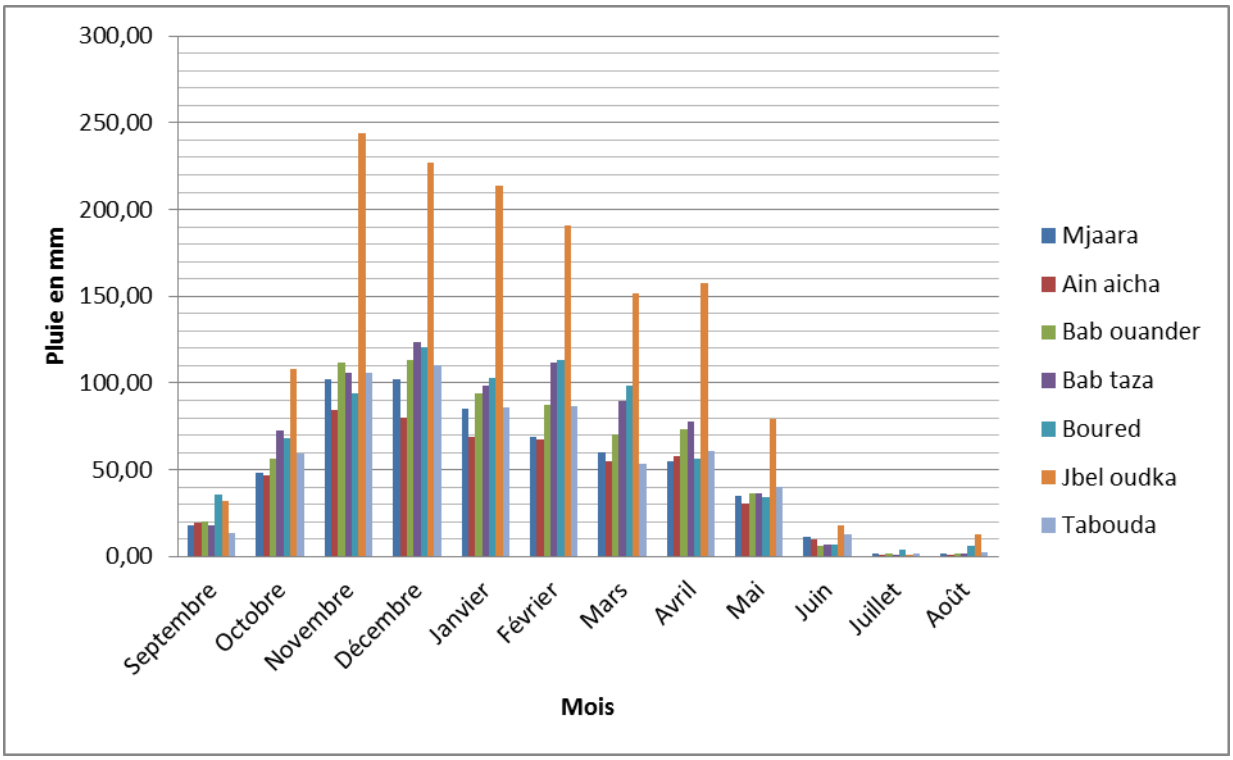

Figure 16: les précipitations moyennes mensuelles dans le bassin versant de l'oued l'Ouergha au cours de la période 1981 à 2014

B. Evaluation de la lame d'eau moyenne tombée sur le bassin

Pour le calcul de la lame d'eau moyenne tombée dans le bassin versant de l'oued l'Ouergha, On a choisi 3 méthodes les plus pratiquées :

- ❖ Arithmétique
- ❖ Les polygones de Thiessen
- ❖ Les isohyètes

1) Méthode arithmétique

La méthode arithmétique est la plus facile pour le calcul de la lame d'eau moyenne tombée dans le bassin versant de l'oued l'Ouergha.

La formule de la méthode arithmétique :

$$P_{moy} = \frac{\sum_{i=1}^{n} P_i}{n}$$

Avec :

P_{moy} : Précipitation moyenne dans le BV en (mm)

P_i : Hauteur des précipitations à la station en (mm)

n : Nombre des stations dans le BV

Donc **P_{moy}=763 mm**

La méthode arithmétique ne donne pas la hauteur exacte des précipitations tombées dans tous le bassin versant, étant donné que dans le bassin versant le relief n'est pas homogène et aussi pour la diversion de répartition des stations dans le bassin versant. Donc, on estime l'erreur avec une méthode :

$$E = \frac{c_v}{\sqrt{n}} \text{ Avec } c_v = \frac{\partial}{P_{moy}}$$

E : Erreur

Cv : Coefficient de variation

P_{moy} : Précipitation moyenne dans le BV (P_{moy}=763 mm)

∂ : Ecart type (∂ = 307 mm)

n : Nombre des stations dans le BV

Donc **E= 15 %**

C'est pour cette raison qu'on a utilisé la méthode de Thiessen et celle des isohyètes pour avoir plus de fiabilité au résultat.

2) Méthodes des polygones de Thiessen

La méthode des polygones de Thiessen permet d'estimer des valeurs pondérées des précipitations pour chaque station pluviométrique dans le bassin versant. Sur une carte

topographique, les differentes zones d'influence sont déterminées par un découpage géométrique du bassin versant.

Les polygones sont tracés en se basant au positionnement des 7 stations pluviométriques du bassin versant de l'oued Ouergha (Fig.17).

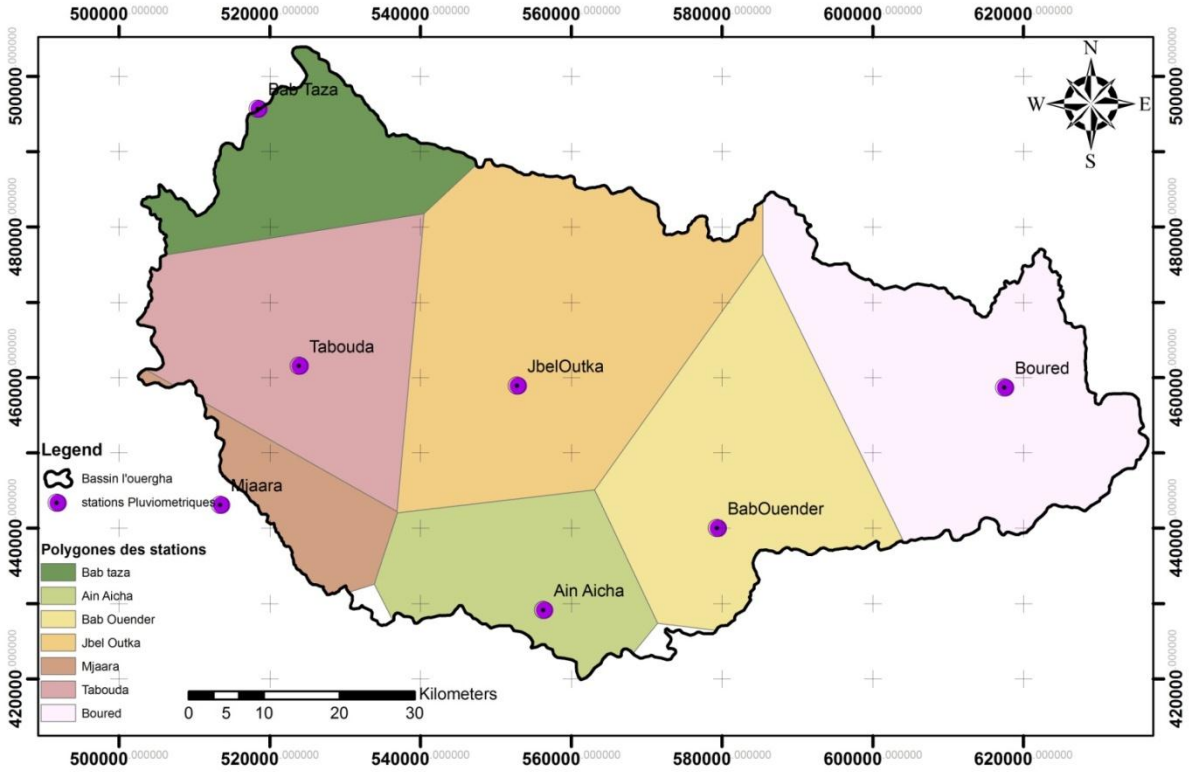

Figure 17: Carte des polygones de Thiessen au bassin versant de l'Ouergha

Le logiciel ArcGis nous permet de déterminer la superficie des polygones dans le bassin versant de l'oued Ouergha. La formule de la méthode des polygones des Thiessen :

$$P_{moy} = \frac{\sum_{i=1}^{n} A_i P_i}{A}$$

P_{moy} : Précipitation moyenne dans le BV en (mm)

P_i: Précipitation à la station i en (mm)

A_i: Superficie du polygone qui appartient à la station i en (Km^2)

A : aire totale du BV (Km^2)

Donc :

P_{moy}=843,5mm

Tableau 8: Calcul de la lame d'eau tombée par la méthode de Thiessen au bassin versant de l'Oued l'Ouergha

Station	Pi (mm)	Ai (Km^2)	Pi*Ai
Mjaara	589,33	281,23	165736,51
Ain aicha	522,11	582,72	304246,27
Bab ouander	672,78	1032,41	694587,97
Bab taza	744,02	543,11	404082,43
Boured	740,48	1208,89	895153,25
Jbel oudka	1435,71	1501,99	2156416,15
Tabouda	633,25	949,18	601071,43
Total	5337,67	6190	5221294,00
Pmoy	**843,50**		

3) Méthode des isohyètes

La méthode des isohyètes est basée sur l'intercalation des précipitations moyennes enregistrées aux stations pluviométriques dans le bassin versant et aussi celles qui sont à cote de ses limites pour une durée précise.

Les isohyètes représente des lignes de valeurs des précipitations annuelles qui sont égaux (Fig.18).

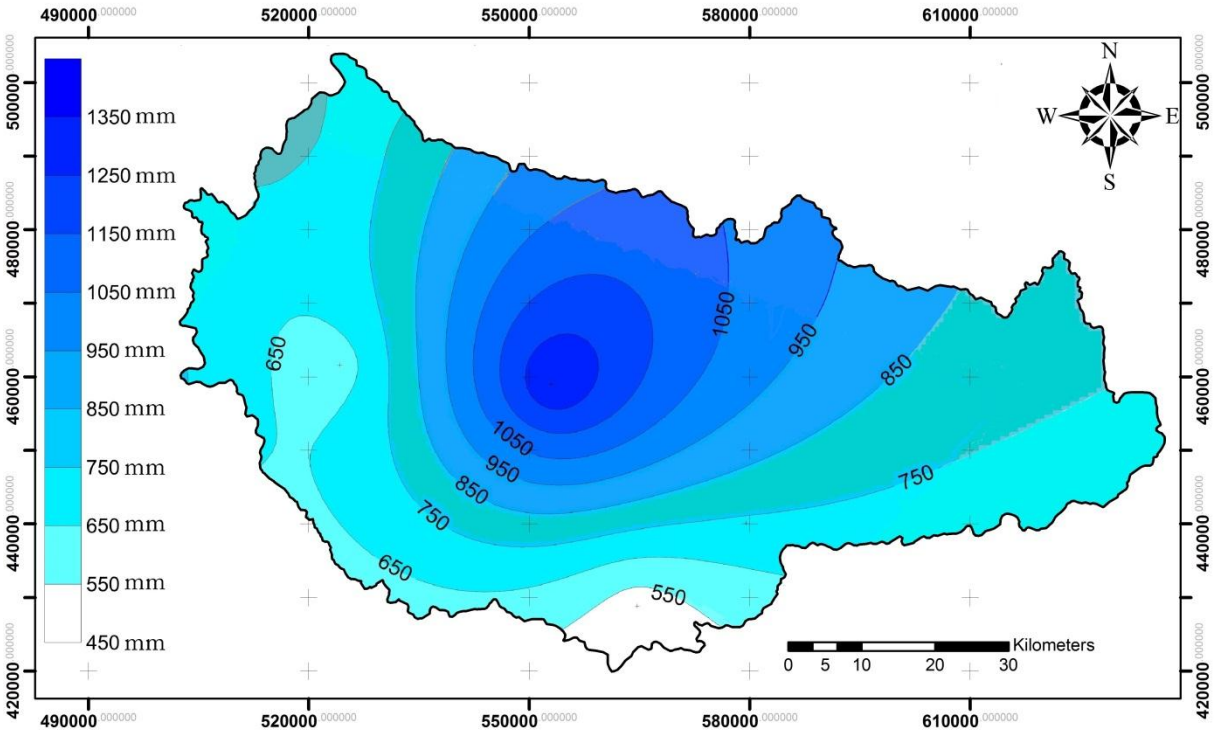

Figure 18: Carte des isohyètesau bassin versant de l'oued l'Ouergha

Le logiciel ArcGis nous permet de calculer la superficie entre deux isohyètes (Tab.9), pour la précipitation moyenne de notre bassin versant, elle est calculée par cette formule :

$$P_{moy} = \frac{\sum_{i=1}^{n} A_i P_i}{S_T} \text{ Avec } P_i = \frac{h_i + h_{i+1}}{2}$$

P_{moy} : Précipitation moyenne du BV en (mm)

S_T : Surface totale du BV en (Km²)

A_i : Surface entre les deux isohyètes h_i et h_{i+1} en (Km²)

n : nombre total des isohyètes au BV

P_i : Hauteur moyenne entre les deux isohyètes en (mm)

Tableau 9: Calcul de la lame d'eau tombée par la méthode des Isohyètes au bassin versant de l'Ouergha

Isohyètes	Pi (mm)	Ai (Km²)	Ai*Pi
<550	522	129,65	67692,98
550-650	600	568,83	341298,20
650-750	700	1793,65	1255554,36
750-850	800	1267,21	1013768,76
850-950	900	781,71	703542,95
950-1050	1000	702,95	702945,46
1050-1150	1100	614,26	675681,17
1150-1250	1200	60,68	72818,40
>1250	1436	271,06	389163,14
Total	8257,82005	6190,00	5222465,41
Pmoy	**843,7**		

Pour la méthode des isohyètes, la précipitation moyenne du bassin versant de l'oued Ouergha : $\mathbf{P_{moy}}$ **= 843,7 mm**

C. Estimation de la moyenne de la lame d'eau calculée par les trois méthodes

L'estimation de la moyenne de la lame d'eau calculée par la méthode arithmétique, la méthode des polygones de Thiessen et la méthode des isohyètes est calculée dans ce tableau (Tab.10):

Tableau 10: Estimation de la lame d'eau moyenne au bassin versant de l'Ouergha

	Méthode arithmétique	Méthode Polygones de Thiessen	Méthode des isohyètes
Precipitation moyenne (mm)	763	843,5	843,7
L'ame d'eau moyenne	816,7		

Le volume d'eau tombé dans le bassin versant de l'oued Ouergha est déterminé par cette formule :

$$\mathbf{V = P_{moy} \times S_T}$$

$V = 816{,}7 \times 10^{-3} \times 6190 \times 10^{6}$

$\mathbf{V = 5055{,}3 \times 10^{6}\ m^{3}}$

Donc :

Le volume d'eau qui reçoit le bassin versant est de 5 milliards de mètre cube par an.

3. Etudes des températures

L'étude des températures est très importante pour déterminer le climat du bassin versant. La relation entre la température et la précipitation nous permet de déterminer les caractéristiques du cycle hydrologique, l'evatranspiration et les indices climatiques. Pour le bassin versant de l'oued Ouergha les données de la température sont disponibles juste au niveau de la station Hajria.

A. Température moyenne mensuelle

La température moyenne mensuelle dans cette figure nous montre la saison chaude et froide durant les mois de l'année au cours d'une période de longue durée (1981 à 2014). Pour les mois de Juin, Juillet, Août et Septembre sont les mois les plus chauds avec un maximum au moi Août de 30,3°C. Au contraire les mois de Juin, Juillet, Août et Septembre représentes la saison froide avec un minimum au mois de Février de 11,57 °C (Fig.19).

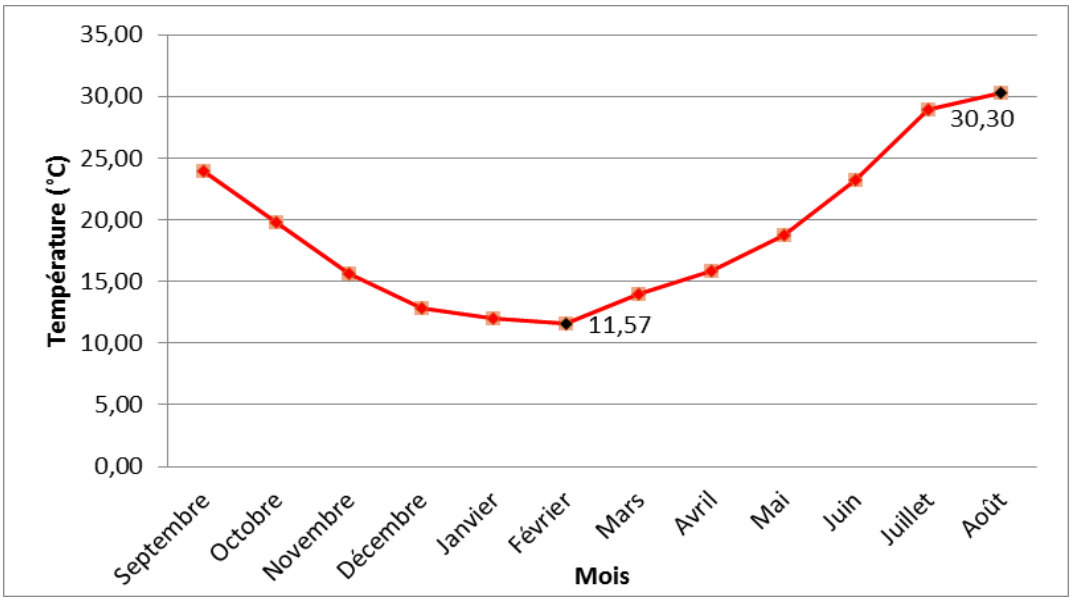

Figure 19: les températures moyennes mensuelles au niveau de la station de Hajria au cours de la période 1981 à 2014

B. Relation température et précipitation

La relation précipitation et température nous permet de calculer des indices qui nous permettra après de déterminer les caractéristiques climatiques de notre bassin versant de l'oued Ouergha, ces indices sont :

- L'indice Xérothermique de Gaussen ou bien Diagramme ombrothermique
- Les indices mensuels d'aridité et L'indice d'aridité de De Martonne
- Le quotient pluviométrique d'Emberger

1) L'indice Xérothermique de Gaussen

L'indice Xérothermique de Gaussen nous permet de déterminer la période pluvieuse et la période sèche. Pour la période humide, les précipitations sont supérieures au double des températures (P>2T). Par contre la période sèche c'est le cas inverse (2T>P). Les besoins d'eau sont satisfaisants, dans le cas où elles sont égales (2T=P) (Fig.20).

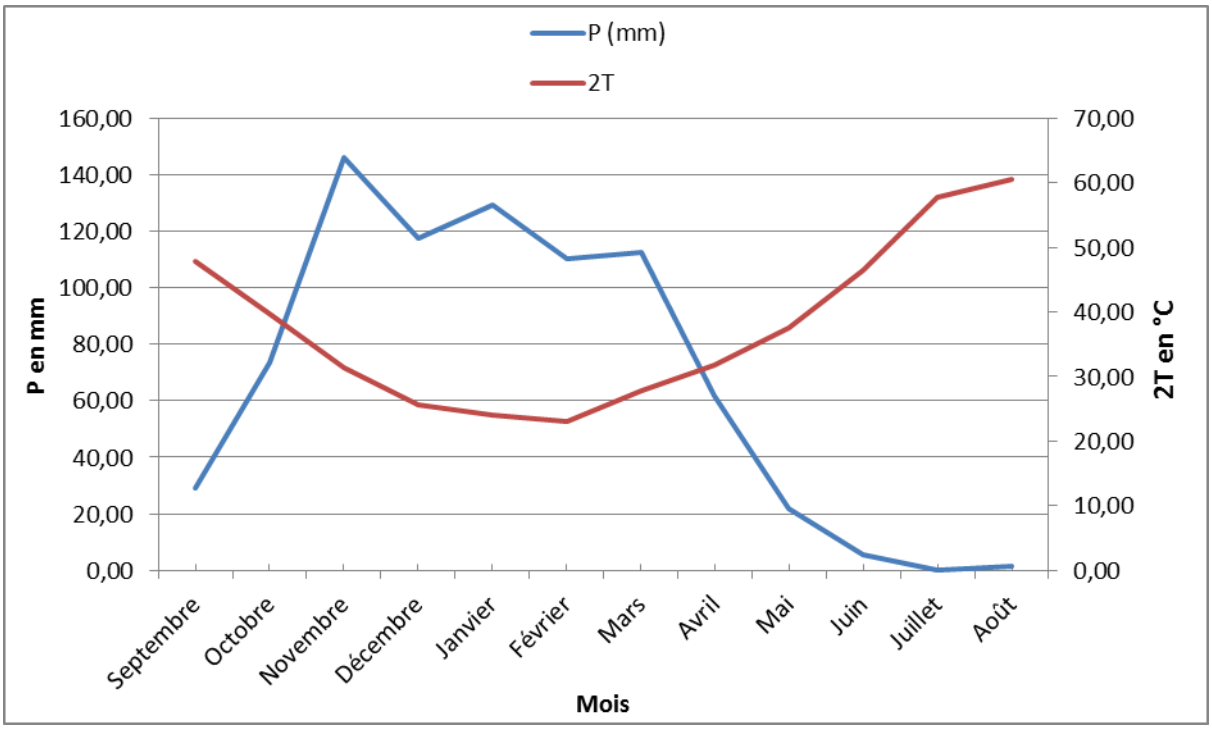

Figure 20: Diagramme ombrothermique de Gaussen au niveau de la station Hajria au cours de la période 1981 à 2014

Ce diagramme nous montre que la période sèche prend l'effet à partir du mois Avril jusqu'au mois d'Octobre. Pour la période humide, elle prend l'effet à partir du mois Octobre jusqu'au mois d'Avril.

2) L'indice d'aridité annuelle de De Martonne et les indices mensuels d'aridité

L'indice d'aridité annuelle de De Martonne et l'indice mensuel d'aridité sont parmi les indices qui nous permettent aussi de déterminer le climat de notre zone. Pour l'indice d'aridité annuelle de De Martonne, il est calculé par la formule suivante :

$$I = \frac{P}{T + 10}$$

P : Précipitation moyenne annuelle dans le bassin versant en (mm)

T : Température moyenne annuelle dans le bassin versant en (°C)

I= 27,98

Donc le bassin versant de l'oued Ouergha est caractérisé par un climat **semi humide** (20<i<30).

Pour l'indice mensuel d'aridité, il est calculé par la formule suivante :

$$i = \frac{12 \times P}{t + 10}$$

P : précipitation moyenne mensuelle dans le bassin versant (mm)

t : température moyenne mensuelle dans le bassin versant (°C)

Cette figure nous indique que l'indice d'aridité est inferieure à cinq pour les mois de Juin, Juillet et Août, donc ces mois ont un régime hyperaride. Un climat aride pour les mois de Mai et Septembre. Pour les mois qui reste, le régime climatique est humide a semi humide (Fig.21).

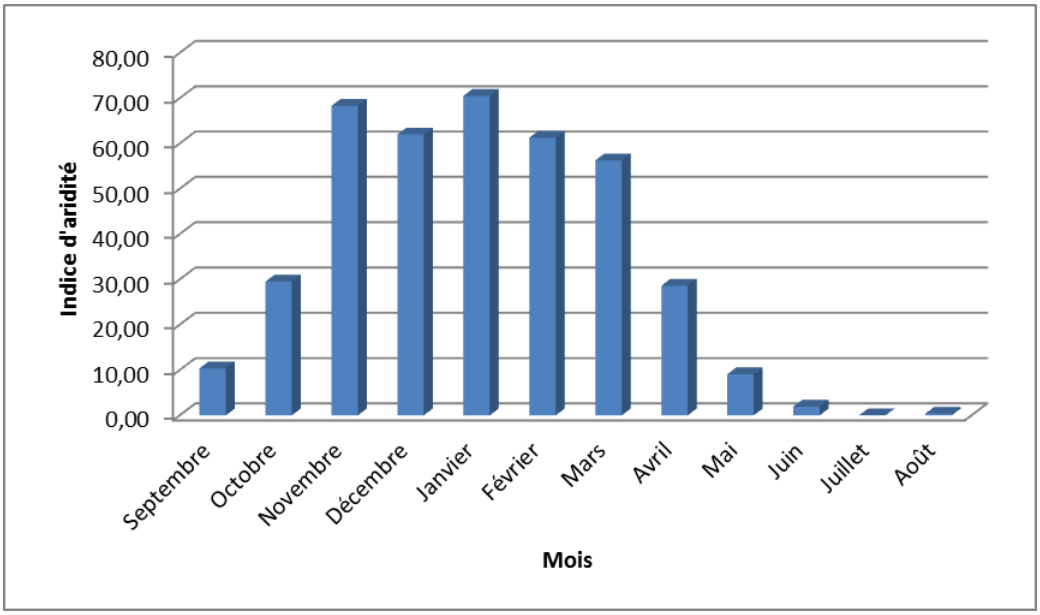

Figure 21: L'indice d'aridité mensuelle au niveau de la station de Hajria au cours de la période 1981 à 2014

3) Quotient pluviométrique d'Emberger

Le quotient pluviométrique d'Emberger ressemble à une formule synthétique du climat méditerranéen en prenant en considération la moyenne annuelle de la température et la précipitation (Sauvage, 1960). Le quotient pluviométrique d'Emberger est calculé par la formule suivante :

$$Q_2 = \frac{P}{\frac{(M+m)(M-m)}{2}} \times 1000$$

Q_2 : Le quotient pluviométrique d'Emberger

P : Précipitation moyenne annuelle dans le bassin versant (P= 808,56mm)

M : Moyenne des maxima du moi le plus chaud au bassin versant (M=303,15°Kelvin)

m: Moyenne des minima du mois le plus froid au bassin versant (m= 284,15°Kelvin)

Q_2 =144

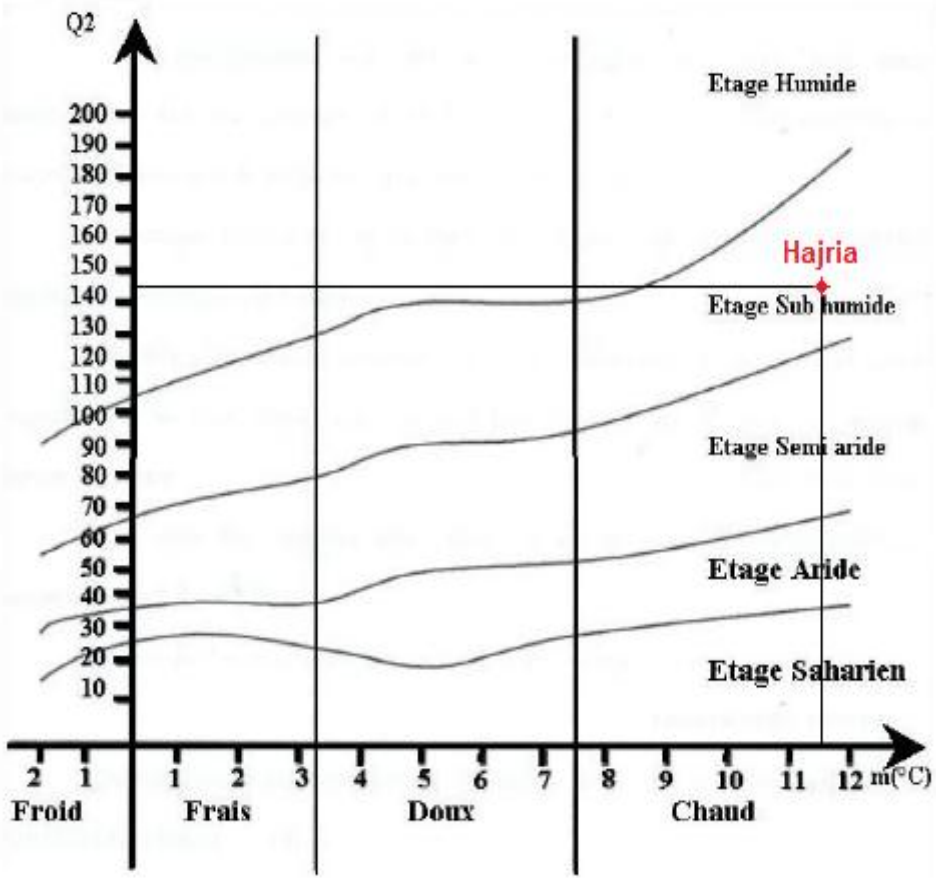

Figure 22: Climagramme d'Emberger dans le bassin versant de l'oued l'Ouergha au niveau de la station Hajria

Le Climagramme d'Emberger nous indique que le bassin versant de l'Ouergha appartient à un étage climatique **semi humide**.

4. Evapotranspiration

L'évapotranspiration est parmi les éléments initiaux de l'hydrologie, pour déterminer le potentiel hydrologique d'une zone, il est nécessaire de savoir et faire une étude sur L'évapotranspiration.

L'évapotranspiration est une association de deux éléments la transpiration et l'évaporation.

L’évaporation est une transformation progressive d’eau de l’état liquide à l’état gazeux. Ce phénomène absorbe l’énergie thermique ce qui amène à réduire le degré de température de l’environnement.

La transpiration est processus continu provoqué par l’évaporation des eaux à travers les plantes vers l’atmosphère.

L’évapotranspiration est la somme de l’évaporation (des surfaces d’eau libre et des sols) et de la transpiration du couvert végétale.

L’estimation des pertes des eaux par l’évapotranspiration est représentée par deux notions :

- L’évapotranspiration potentielle
- L’évapotranspiration réelle

A. L’évapotranspiration potentielle

L’évapotranspiration potentielle (ETP) est une mesure de la capacité de l’atmosphère à éliminer l’eau de la surface d’un sol avec couvert végétal disposant de l’eau en abondance.

L’évapotranspiration potentielle est estimée par Thornthwaite (1948) avec l’équation suivante :

$$ETP = 16 \times \left(\frac{10 \times T_k}{I}\right)^{\alpha} \times K$$

ETP : L’évapotranspiration potentielle dans le BV en (mm)

K: coefficient d’ajustement mensuel donné par la table de Gerber et Brocher

T_K: Température moyenne du mois considéré en °C

$i_K=(\frac{TK}{5})^{1.514}$: Indice thermique mensuel

$I=\sum iK$: Indice thermique annuel (I= 93,47)

$\alpha=\left(\frac{1.6\times I}{100}\right)+0.5$: Coefficient exprimé en fonction de i_K (α=1.99)

Selon la méthode de Thornthwaite, le résultat du calcul de l'évapotranspiration potentiel mensuelle au bassin versant de l'Ouergha est indiqué dans le tableau suivant (Tab.11):

Tableau 11: ETP mensuel selon la méthode de Thornthwaite au bassin versant de l'Ouergha au cours de la période (1981 à 2014)

	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août
K	1,05	0,91	0,75	0,75	0,73	0,79	1,02	1,15	1,32	1,33	1,33	1,24
T_K	23,94	19,83	15,69	12,79	11,99	11,57	13,95	15,84	18,72	23,21	28,89	30,30
iK	10,71	8,05	5,65	4,15	3,76	3,56	4,73	5,73	7,38	10,22	14,23	15,30
ETP	108,14	64,58	33,48	22,34	19,13	19,29	36,07	52,31	83,51	128,87	198,77	203,57
P	29,32	73,40	146,26	117,73	129,24	110,20	112,32	61,63	21,72	5,35	0,13	1,25

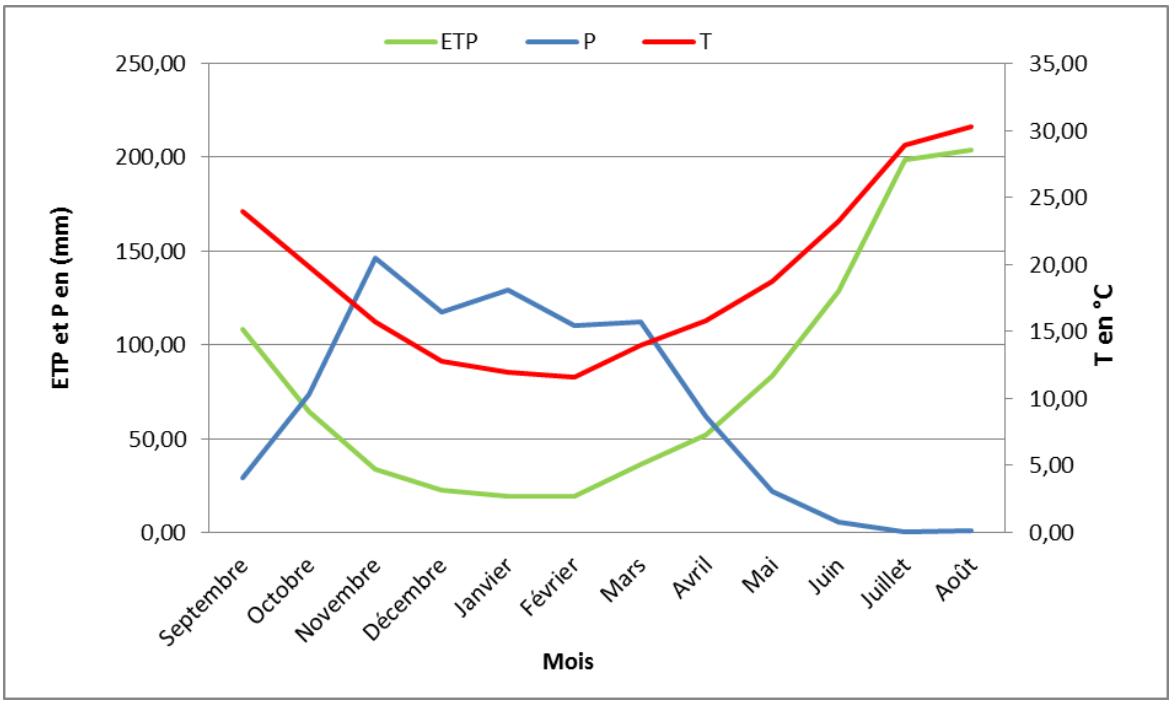

Figure 23: Evolution de l'ETP en fonction de Précipitation et Température au niveau de la station Hajria au cours de la période 1981 à 2014

Les résultats obtenus pour l'évapotranspiration potentielle mensuelle au bassin versant nous indiquent plusieurs changements pendant toute la période de l'année, une valeur maximale est enregistrée au mois d'aout de 203,57 mm et une valeur minimale au mois de Janvier de 19,13mm (Fig.23).

B. Evapotranspiration réelle

L'évapotranspiration réelle nous permet de déterminer la quantité d'eau retirée à l'état réel d'une surface en considération du processus de transpiration et d'évaporation lorsqu'il y a un manque d'eau.

Plusieurs méthodes sont pratiquées pour le calcul L'évapotranspiration réelle, la méthode de Coutagne (1954), Thornthwaite (1955) et de Turc (1961).

1) Méthode de Turc

La formule pour calculer l'évapotranspiration réelle par la méthode de Turc :

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

Avec :

ETR : évapotranspiration réelle dans le bassin versant en (mm)

P : précipitation moyenne annuelle dans le bassin versant en (mm)

$L = 300 + 25T + 0,05T^3 = 1149,27$

T : température moyenne annuelle au bassin versant en (°C)

ETR = **686 mm/an.**

2) Méthode de Coutagne

La formule pour calculer l'évapotranspiration réelle par la méthode de Coutagne :

$$ETR = P - \gamma P^2 \quad \textbf{Avec} \quad \gamma = \frac{1}{0,8+0,14\times T}$$

Avec :

ETR : évapotranspiration réelle dans le bassin versant en (mm)

P : précipitation moyenne annuelle dans le bassin versant en (mm)

T : température moyenne annuelle au bassin versant en (°C)

ETR = **618 mm/an.**

3) Méthode du bilan de Thornthwaite

Le calcul de l'ETR dans le tableau (Tab.12) est effectué par une méthode qui se base sur le bilan hydrique du sol, c'est en effet la méthode du bilan de Thornthwaite. Pour cette

méthode le sol est saturé à 100 mm de précipitation absorbée, ce qu'on appelle la quantité du confort hydrique ou bien de la réserve facilement utilisable (RFU).

La méthode du bilan de Thornthwaite contient 2 périodes differentes :

- La période sèche, c'est le cas où on a l'évapotranspiration potentielle est supérieur à la précipitation, donc l'évapotranspiration réelle dans ce cas égale à la somme de la précipitation et la réserve facilement utilisable.
- La période humide, c'est le cas où on a la précipitation est supérieur à l'évapotranspiration potentielle, donc l'évapotranspiration réelle dans ce cas égale à l'évapotranspiration potentielle, ce surplus de précipitation rempliera la réserve facilement utilisable.

D'autre cas ou on peut trouver que l'évapotranspiration potentielle est égale à l'évapotranspiration réelle lorsque la réserve facilement utilisable est rempli, donc la RFU égale à l'évapotranspiration potentielle moins la précipitation. Le cas contraire, la réserve facilement utilisable est faible ou bien nulle, donc cela provoque la création du déficit agricole (DA) qui égale à l'évapotranspiration potentielle mois l'évapotranspiration réelle.

Dans la période humide, la valeur obtenue de la précipitation moins l'évapotranspiration potentielle va alimenter la réserve facilement utilisable jusqu'à le maximum de 100mm (puisque le bassin versant de l'oued Ouergha selon les résultats qu'on a obtenu a un climat semi humide), après on aura un excès d'eau pour le ruissèlement et l'infiltration. Pour la période sèche, la réserve facilement utilisable va alimenter l'évapotranspiration réelle. Dans la plupart de temps à cette période la réserve facilement utilisable est nulle.

Tableau 12: calcul de l'ETR mensuelle par la méthode de Thornthwaite au bassin versant de l'Ouergha au cours de la période 1981 à 2014

	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août
P	29,32	73,40	146,26	117,73	129,24	110,20	112,32	61,63	21,72	5,35	0,13	1,25
ETP	108,14	64,58	33,48	22,34	19,13	19,29	36,07	52,31	83,51	128,87	198,77	203,57
RFU	0	8,82	100	100	100	100	100	100	38,21	0	0	0
ETR	29,32	64,58	33,48	22,34	19,13	19,29	36,07	52,31	83,51	43,56	0,13	1,25
Excèdent	-	-	21,6	95,39	110,11	90,91	76,25	9,32	-	-	-	-
Déficit	78,82	-	-	-	-	-	-	-	-	85,31	198,64	202,32

L'évapotranspiration réelle mensuelle est très élevée en saison de printemps et d'automne. Après, L'évapotranspiration potentielle augmente jusqu'au maximum durant la saison sèche. L'évapotranspiration réelle annuelle au bassin versant de l'oued Ouergha par la méthode du bilan de Thornthwaite égale a **404,9 mm/an**.

Donc l'évapotranspiration réelle annuelle dans le bassin versant par les 3 méthodes égale à **569,6 mm/an,** ce qui représente **70.4%** des précipitations moyennes annuelles du bassin versant de l'oued Ouergha.

C. Bilan hydrique

Le bilan hydrique est la relation entre les flux d'eau entrants (Précipitation) et sortants (évaporation, transpiration) d'un système sur une période donnée. Pour le bassin versant de l'oued Ouergha le bilan hydrique permet de désigner plusieurs phases au cours de l'année (Fig.24) :

- D : c'est la phase déficitaire, elle prend l'effet à partir du mois Juin jusqu'au Septembre.
- R : cette phase apparait au mois d'Octobre, elle est considérée comme une période de reconstitution des réserves d'eau.
- S : cette phase prend l'effet à partir du mois Novembre jusqu'au mois d'Avril. Dans cette période les précipitations sont supérieures à l'évapotranspiration, cet excès d'eau alimentera après les nappes.

- E : cette phase prend l'effet à partir du mois Avril jusqu'au mois de Juin. Dans cette période, les réserves d'eau se réduisent doucement sous l'effet de l'evatranspiration jusqu'au l'épuisement total au mois de Juillet.

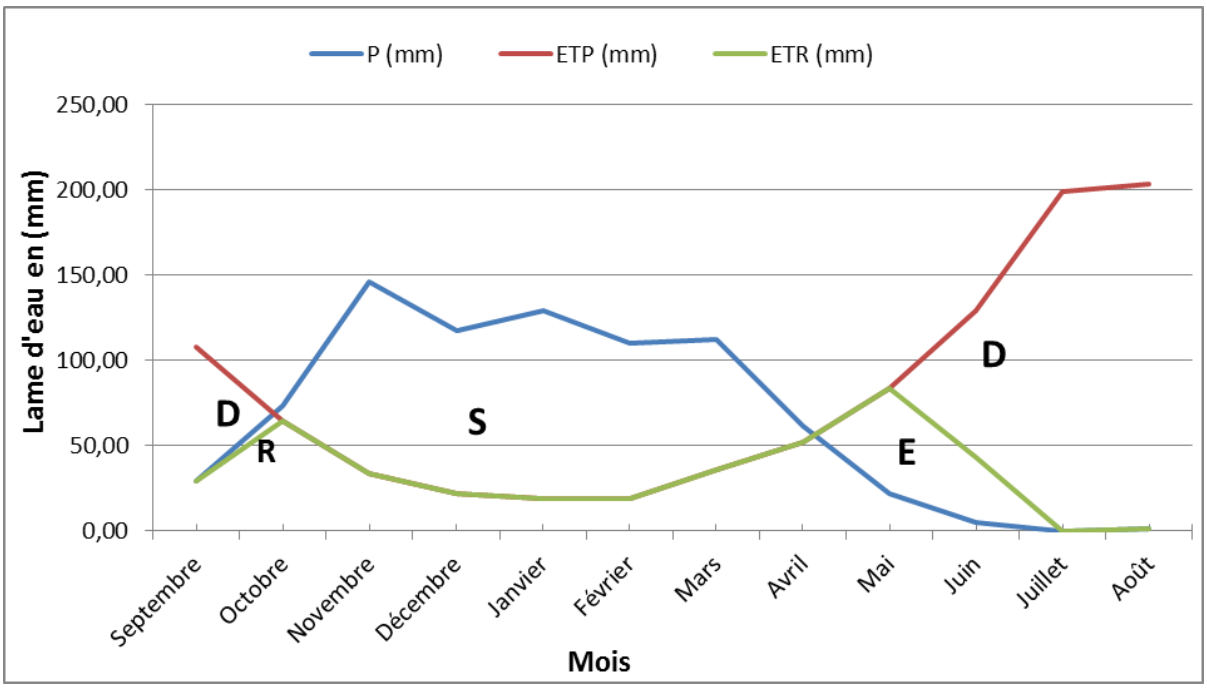

Figure 24: Bilan hydrique du bassin versant de l'oued l'Ouergha au niveau de Hajria, estimé à partir de précipitations, L'ETP et l'ETR par la méthode de Thornthwaite au cours de la période 1981 à 2014

5. Conclusion

L'analyse des précipitations dans le bassin versant de l'oued Ouergha nous indique qu'il y a un abaissement progressif des précipitations au niveau des stations sur toute la trajectoire de l'oued Ouergha à partir de l'amont vers l'aval. Pour toutes les stations du bassin versant, les mois les plus secs sont les mois de la saison d'été, ce qui nous permet de conclure que notre bassin versant a un régime pluviométrique de type méditerranéen.

Pour les températures dans le bassin versant de l'oued Ouergha, le mois le plus chaud est le mois d'Août avec une température moyenne de 30.3 °C et le mois le plus froid est le mois d'Avril avec une température moyenne de 11,5°C. La relation précipitation et température nous a permis de conclure que le climat au niveau du bassin versant de l'oued Ouergha est semi humide.

La valeur annuelle moyenne de l'ETR au bassin versant de l'oued Ouergha est de 569,6 mm, ce qui représente **70.4%** des précipitations moyennes annuelles qui de 808 mm.

Le bilan hydrique a déterminé 4 phases au niveau du bassin versant d'Ouergha, une première phase déficitaire qui prend l'effet à partir du mois Juin jusqu'au Septembre. Une 2ème phase qui apparait au mois d'Octobre, elle est considérée comme une période de reconstitution des réserves d'eau. La 3ème phase qui prend l'effet à partir du mois Novembre jusqu'au mois d'Avril. Dans cette période les précipitations sont supérieures à l'évapotranspiration, cet excès d'eau alimentera après les nappes et la 4ème phase qui prend l'effet à partir du mois Avril jusqu'au mois de Juin. Dans cette période, les réserves d'eau se réduisent doucement sous l'effet de l'evatranspiration jusqu'au l'épuisement total au mois de Juillet.

Chapitre III : Caractéristique Hydrologique

1. Introduction

Le bassin versant de l'oued l'Ouergha a une direction d'écoulement ENE-OSO. Le débit varie d'une année à une autre et d'un mois à un autre dans tous les oueds du bassin. On a réalisé l'étude hydrologique du bassin versant à la base des données hydrométriques des stations (Fig.25) :

- Oued Aoudour 1981 à 2020 a la station Station Tabouda
- Oued Amzez 1981 à 2020 a la Station Galaz
- Oued Ouergha 1981 à 2020 a la Station Ain Aicha

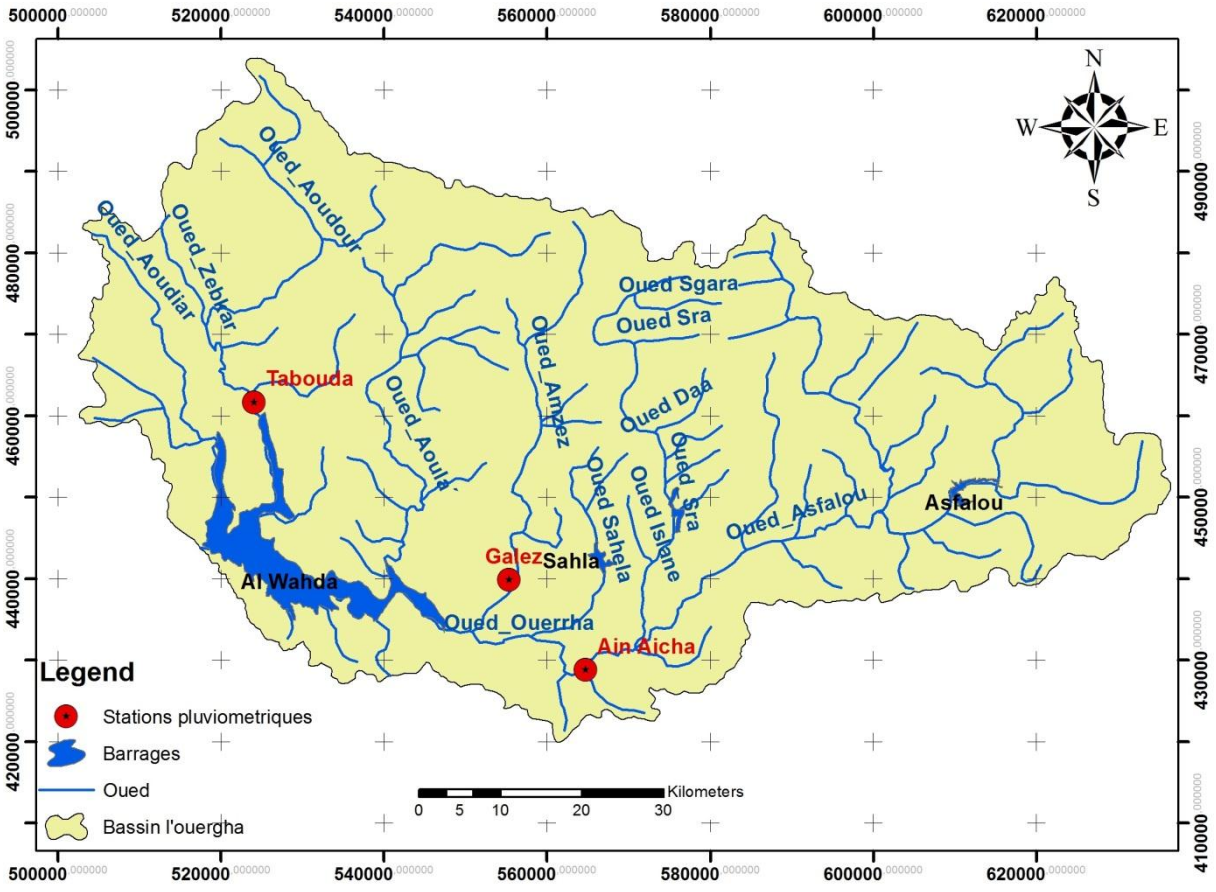

Figure 25: carte de situation géographique des stations pluviométriques étudiées dans ce chapitre au bassin versant de l'oued l'Ouergha

Pour l'étude du bilan hydrologique du bassin versant de l'oued l'Ouergha, ainsi que son fonctionnement, On a analysé la relation entre les débits et les précipitations pour ces stations et aussi l'étude du régime des débits et leurs fluctuations. Apres, nous étudions la genèse des étiages, les crues et les caractéristiques du bilan hydrologique.

2. Etude du régime du débit

A. Débits annuels

En tenant compte des variations interannuelles dans les stations, l'évolution des débits moyens annuels reflètent les irrégularités spatiotemporelles. La situation amont-aval et en relation direct avec les irrégularités spatiales. Autrement, en relief une succession de période sèche et période humide est mise par les irrégularités temporelles (Fig.26), (Fig.27) et (Fig.28).

Pour la station d'Ain Aicha le débit moyen annuel est de (20.44 m^3/s) et pour les stations Tabouda (11.87 m^3/s) et Galaz (8.53 m^3/s) qu'ils ont un débit moyen annuel moins important par rapport à la station Ain aicha. Ce qui explique la succession de période humide et de période sèche et la reflète la situation amont–aval.

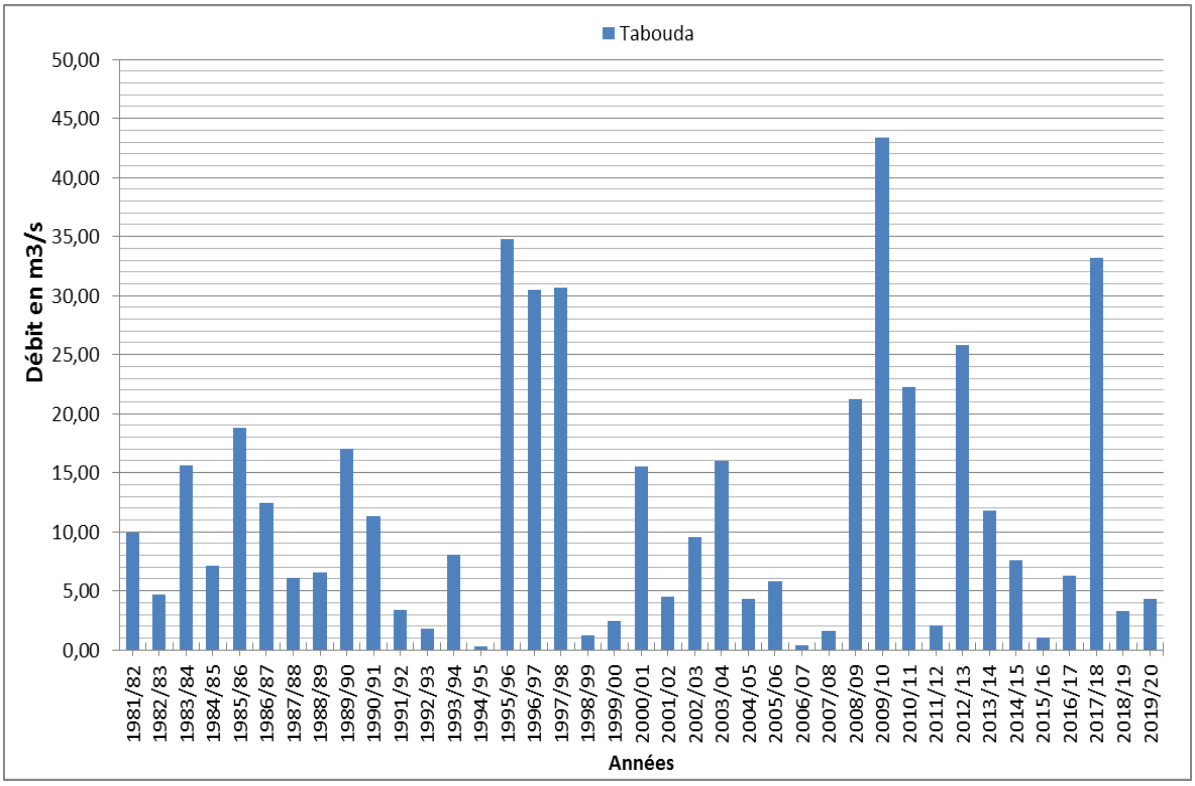

Figure 26: les débits moyens annuels au niveau de la station de Tabouda

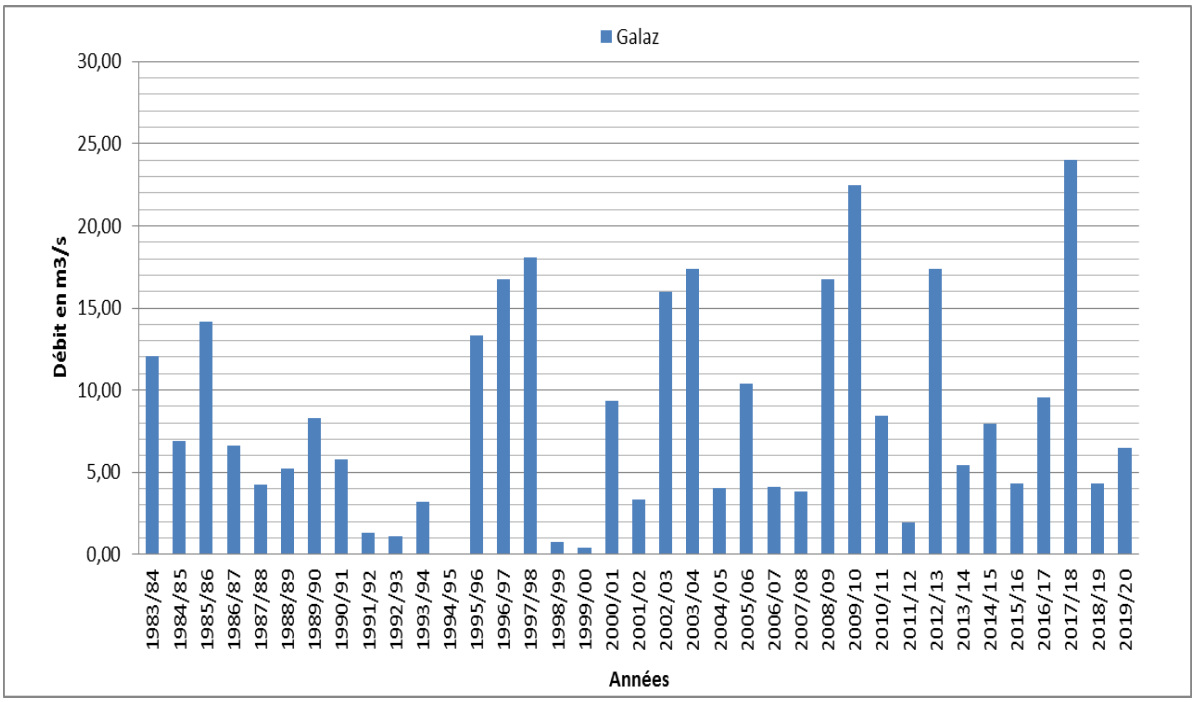

Figure 27: les débits moyens annuels au niveau de la station de Galaz

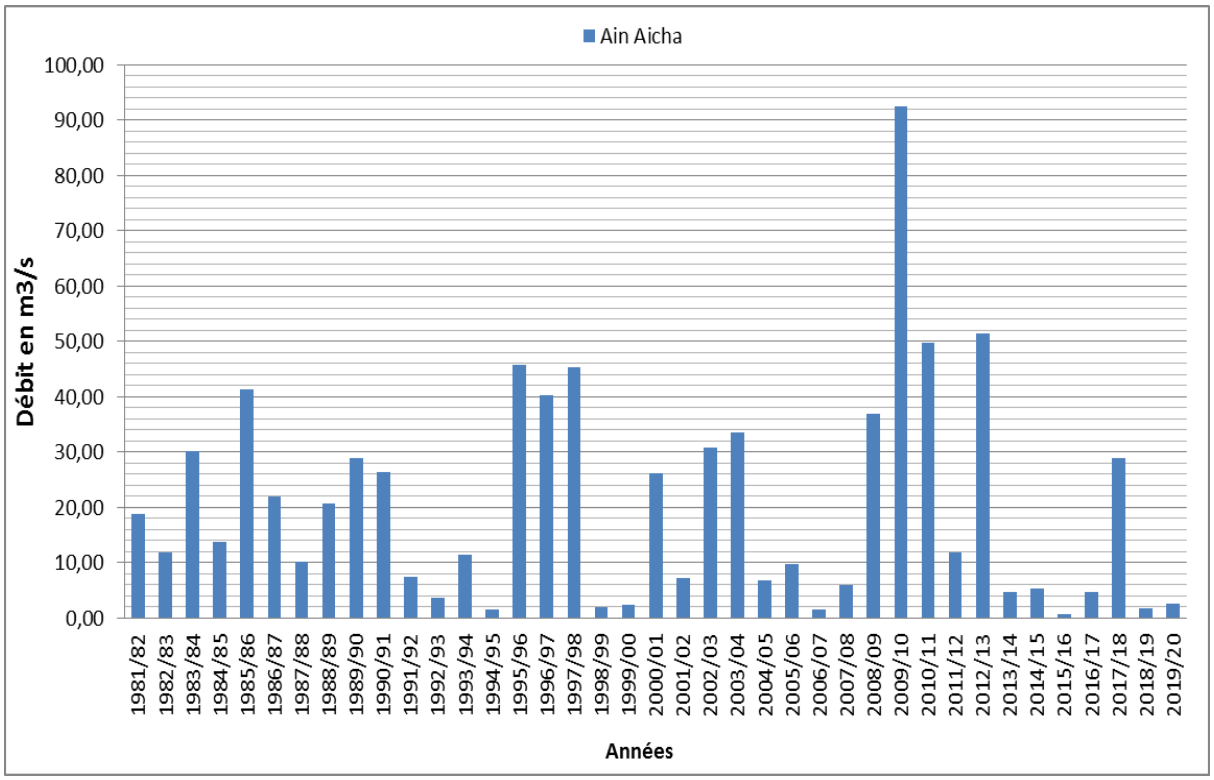

Figure 28: les débits moyens annuels au niveau de la station d'Ain Aicha

1) Variation des débits annuels par la méthode des écarts à la moyenne

Le bassin versant est affecté par des fluctuations hydroclimatiques et pour le mettre en évidence la méthodologie la plus efficace c'est les écarts des débits moyens annuels aux débits moyens interannuels qui permet de distinguer les périodes déficitaires ou sèches (Ec <0) et les périodes excédentaires ou humides (Ec > 0).

La formule utilisée :

$$E_c = \frac{Q_{ma} - Q_{mi}}{Q_{mi}} \times 100$$

Q_{mi} : Débit moyen interannuel

Q_{ma}: Débit moyen annuel

Les (Fig.29, Fig.30 et Fig.31) montrent une alternance des séries des périodes sèches ou déficitaires et des périodes humides ou excédentaires au niveau de chaque station.

Ces stations n'ont pas eu une conformité d'alternance des séries de périodes sèches et des séries de périodes humides.

Les réservoirs hydrologiques sont vidées en périodes sèches et recharger en périodes humides par les fluctuations climatiques ce qui explique l'alternance de ces périodes.

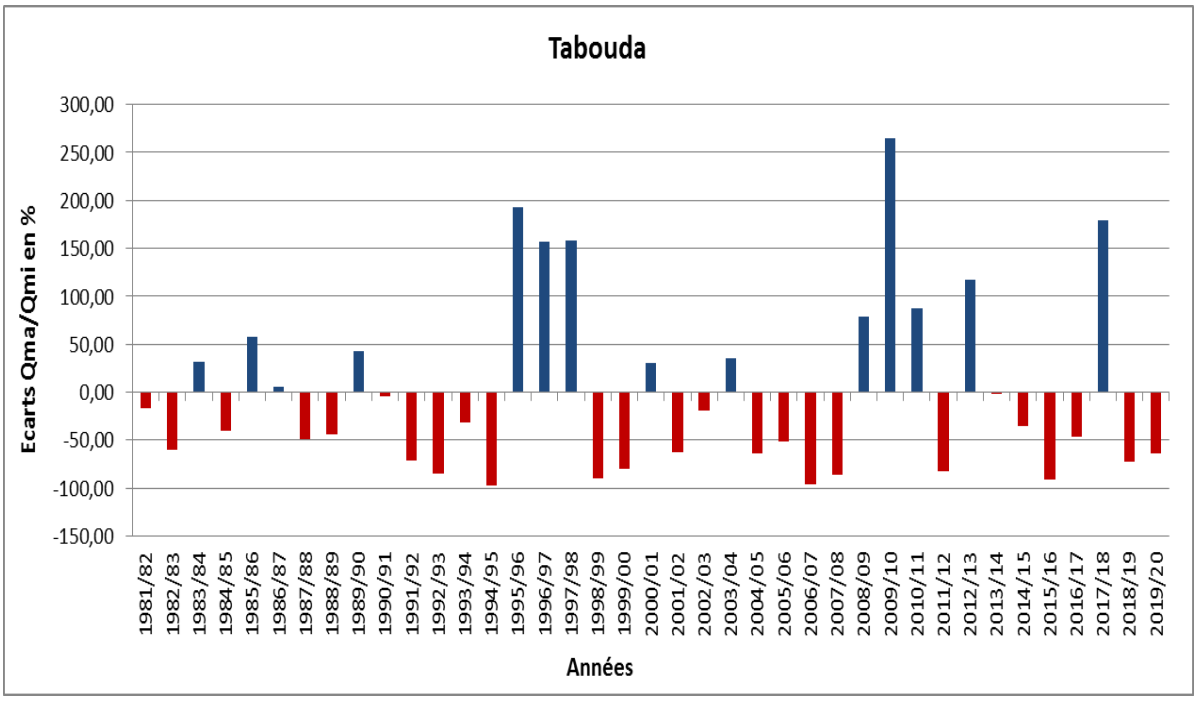

Figure 29: les écarts des débits moyens annuels et interannuels au niveau de la satation de Tabouda

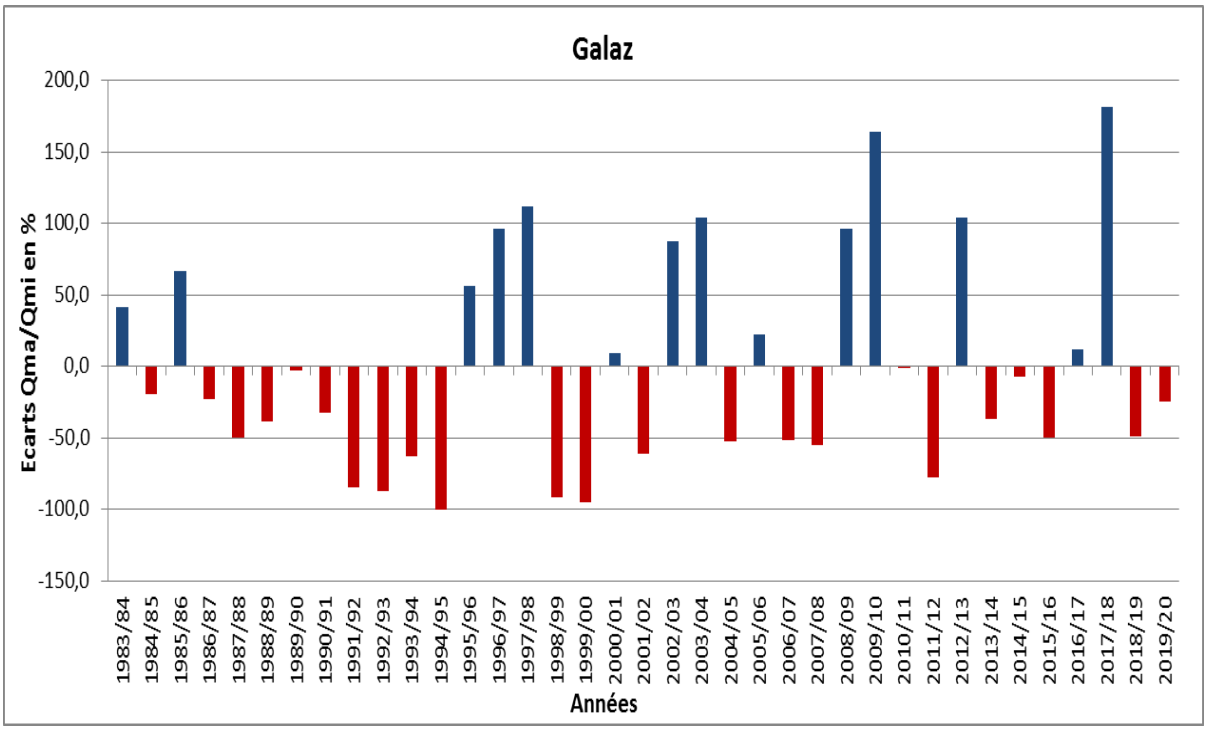

Figure 30: les écarts des débits moyens annuels et interannuels au niveau de la station de Galaz

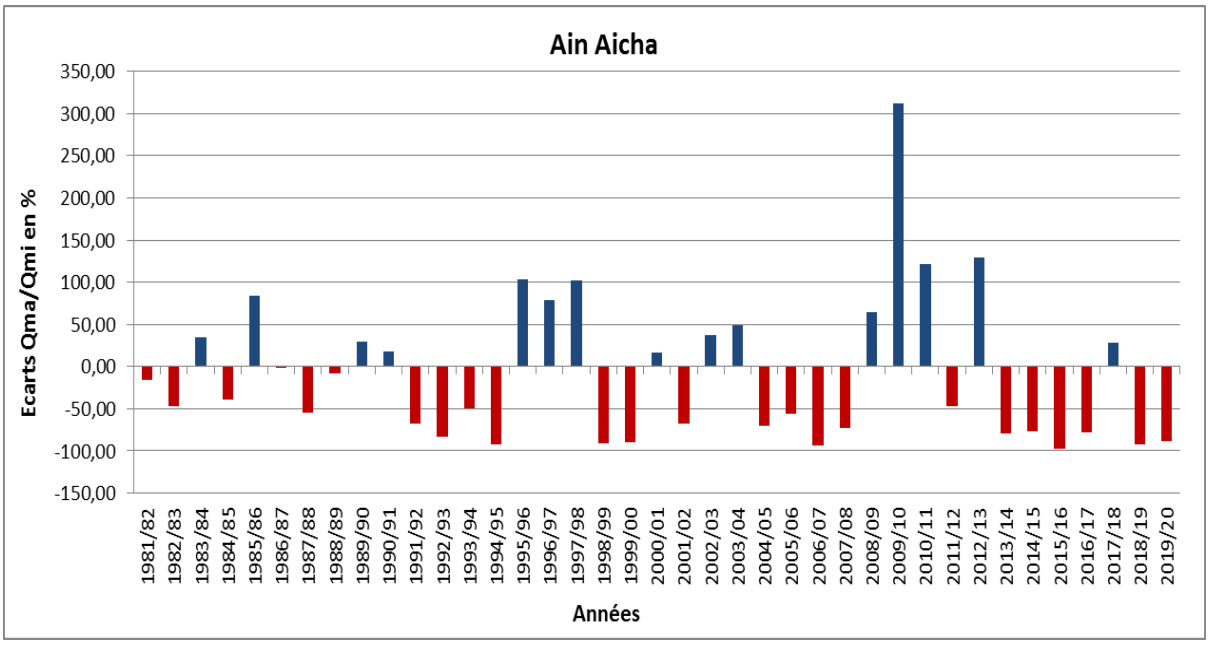

Figure 31: les écarts des débits moyens annuels et interannuels au niveau de la station d'Ain Aicha

2) L'irrégularité interannuelle des débits par la méthode du simple cumul

L'analyse des lames d'eaux écoulées dans le bassin versant nous permet d'avoir une idée sur l'irrégularité interannuelle des débits par la méthode du simple cumul au niveau des trois stations étudier. Cette méthode montre les ruptures des pentes qui correspondent au contraste d'homogénéité au cours de la période d'observation entre les séries de ces lames et qui caractérisent le profil de la lame d'eau écoulée.

Les points de rupture de pente qui sont détectés aux figures (Fig.32), (Fig.33) et (Fig.34) montrent la manière d'alternance des phases humides et sèches. Ce qui explique un faible module annuel de débit et un module annuel de débit élevé sont caractérisés par l'alternance des années.

Tableau 13: Simple cumul des lames d'eau écoulées pour la station de Galaz (1983 à 2020)

Galaz				
Année	Débit moyen (m3/s)	Débit spécifique (l/s/Km2)	la lame d'eau écoulée (mm)	la lame d'eau écoulée cumuléé(mm)
1983/84	**12,05**	1,95	61,40	61,40
1984/85	**6,90**	1,11	35,16	96,56
1985/86	**14,18**	2,29	72,26	168,82
1986/87	**6,61**	1,07	33,67	202,49
1987/88	**4,27**	0,69	21,77	224,26
1988/89	**5,24**	0,85	26,67	250,94
1989/90	**8,27**	1,34	42,13	293,06
1990/91	**5,76**	0,93	29,34	322,40
1991/92	**1,32**	0,21	6,74	329,14
1992/93	**1,09**	0,18	5,54	334,68
1993/94	**3,20**	0,52	16,30	350,99
1994/95	**0,00**	0,00	0,00	350,99
1995/96	**13,34**	2,15	67,95	418,93
1996/97	**16,78**	2,71	85,46	504,40
1997/98	**18,11**	2,93	92,25	596,65
1998/99	**0,75**	0,12	3,84	600,49
1999/00	**0,42**	0,07	2,14	602,62
2000/01	**9,34**	1,51	47,58	650,20
2001/02	**3,33**	0,54	16,99	667,19
2002/03	**16,00**	2,58	81,50	748,69
2003/04	**17,39**	2,81	88,62	837,31
2004/05	**4,03**	0,65	20,55	857,86
2005/06	**10,41**	1,68	53,04	910,90
2006/07	**4,10**	0,66	20,87	931,76
2007/08	**3,82**	0,62	19,46	951,22
2008/09	**16,75**	2,71	85,31	1036,53
2009/10	**22,50**	3,63	114,62	1151,16
2010/11	**8,45**	1,37	43,07	1194,23
2011/12	**1,91**	0,31	9,74	1203,97
2012/13	**17,39**	2,81	88,57	1292,54
2013/14	**5,42**	0,87	27,59	1320,13
2014/15	**7,94**	1,28	40,43	1360,57
2015/16	**4,30**	0,69	21,91	1382,47
2016/17	**9,54**	1,54	48,62	1431,09
2017/18	**24,03**	3,88	122,43	1553,52
2018/19	**4,32**	0,70	22,02	1575,55
2019/20	**6,47**	1,04	32,94	1608,48

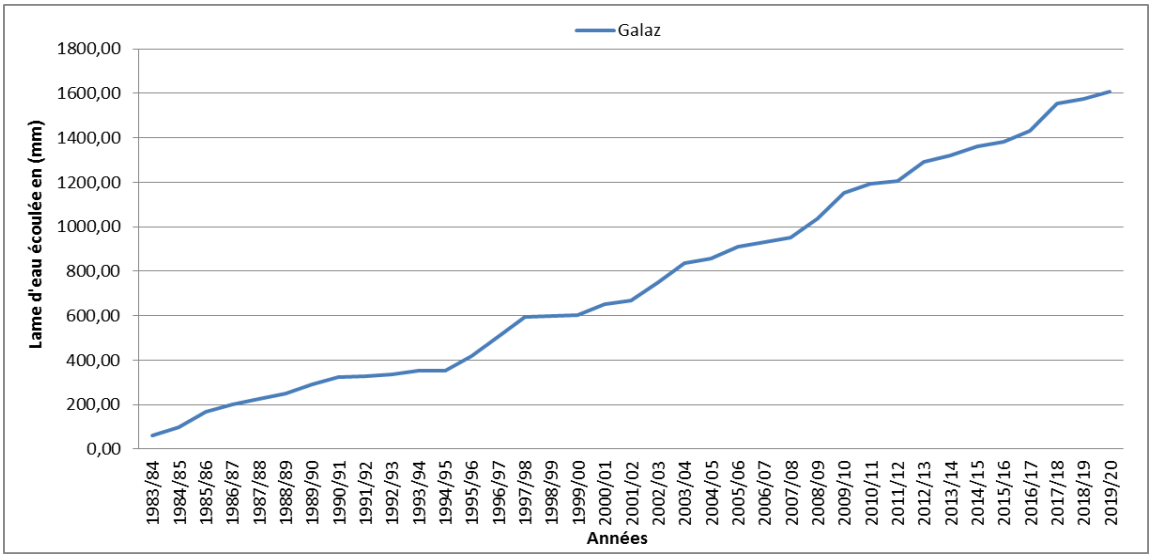

Figure 32: Simple cumul des lames d'eau écoulées pour la station de Galaz (1983 à 2020)

Tableau 14: Simple cumul des lames d'eau écoulées pour la station de Tabouda (1981 à 2020)

Tabouda				
Année	Débit moyen (m3/s)	Débit spécifique (l/s/Km2)	la lame d'eau écoulée (mm)	la lame d'eau écoulée cumuléé(mm)
1981/82	**9,92**	1,60	50,54	24,23
1982/83	**4,69**	0,76	23,88	48,11
1983/84	**15,67**	2,53	79,81	127,92
1984/85	**7,12**	1,15	36,29	164,21
1985/86	**18,78**	3,03	95,68	259,90
1986/87	**12,48**	2,02	63,59	323,49
1987/88	**6,12**	0,99	31,15	354,64
1988/89	**6,59**	1,06	33,57	388,21
1989/90	**16,98**	2,74	86,51	474,72
1990/91	**11,36**	1,84	57,88	532,61
1991/92	**3,39**	0,55	17,28	549,89
1992/93	**1,77**	0,29	9,00	558,89
1993/94	**8,07**	1,30	41,12	600,01
1994/95	**0,33**	0,05	1,70	601,71
1995/96	**34,76**	5,61	177,07	778,79
1996/97	**30,52**	4,93	155,46	934,25
1997/98	**30,67**	4,95	156,26	1090,51
1998/99	**1,25**	0,20	6,35	1096,86
1999/00	**2,42**	0,39	12,31	1109,17
2000/01	**15,51**	2,51	79,00	1188,17
2001/02	**4,51**	0,73	22,97	1211,15
2002/03	**9,54**	1,54	48,59	1259,74
2003/04	**16,04**	2,59	81,71	1341,45
2004/05	**4,32**	0,70	22,01	1363,46
2005/06	**5,81**	0,94	29,58	1393,03
2006/07	**0,40**	0,06	2,04	1395,07
2007/08	**1,59**	0,26	8,11	1403,18
2008/09	**21,20**	3,42	108,01	1511,19
2009/10	**43,37**	7,01	220,96	1732,14
2010/11	**22,24**	3,59	113,32	1845,47
2011/12	**2,07**	0,33	10,55	1856,02
2012/13	**25,80**	4,17	131,46	1987,48
2013/14	**11,79**	1,90	60,07	2047,55
2014/15	**7,61**	1,23	38,77	2086,32
2015/16	**1,01**	0,16	5,16	2091,48
2016/17	**6,30**	1,02	32,10	2123,58
2017/18	**33,15**	5,36	168,91	2292,49
2018/19	**3,27**	0,53	16,67	2309,16
2019/20	**4,36**	0,70	22,19	2331,35

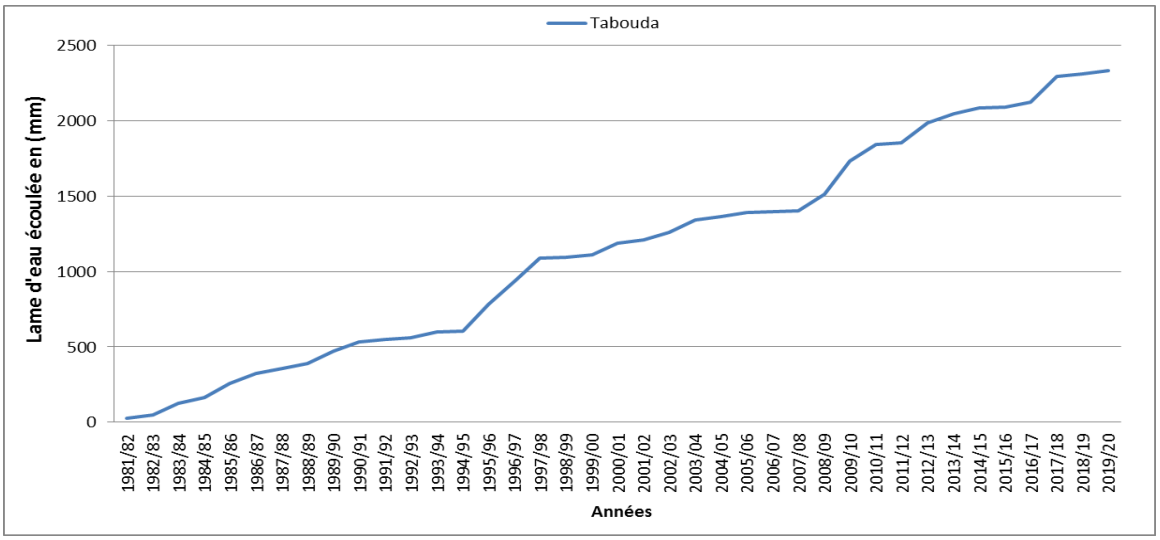

Figure 33: Simple cumul des lames d'eau écoulées pour la station de Tabouda (1981 à 2020)

Tableau 15 : Simple cumul des lames d'eau écoulées pour la station d' Ain Aicha (1981 à 2020)

Ain Aicha				
Année	Débit moyen (m3/s)	Débit spécifique (l/s/Km2)	la lame d'eau écoulée (mm)	la lame d'eau écoulée cumuléé(mm)
1981/82	**18,92**	3,06	96,37	96,37
1982/83	**11,93**	1,93	60,76	157,13
1983/84	**30,26**	4,89	154,17	311,30
1984/85	**13,72**	2,22	69,92	381,21
1985/86	**41,28**	6,67	210,31	591,52
1986/87	**22,04**	3,56	112,31	703,82
1987/88	**10,18**	1,64	51,84	755,66
1988/89	**20,73**	3,35	105,59	861,25
1989/90	**28,96**	4,68	147,52	1008,78
1990/91	**26,34**	4,25	134,18	1142,95
1991/92	**7,35**	1,19	37,46	1180,42
1992/93	**3,62**	0,58	18,42	1198,84
1993/94	**11,37**	1,84	57,94	1256,78
1994/95	**1,67**	0,27	8,49	1265,27
1995/96	**45,68**	7,38	232,75	1498,02
1996/97	**40,20**	6,49	204,81	1702,82
1997/98	**45,30**	7,32	230,80	1933,62
1998/99	**1,91**	0,31	9,73	1943,35
1999/00	**2,42**	0,39	12,35	1955,70
2000/01	**26,17**	4,23	133,34	2089,04
2001/02	**7,35**	1,19	37,42	2126,46
2002/03	**30,91**	4,99	157,46	2283,92
2003/04	**33,45**	5,40	170,43	2454,35
2004/05	**6,80**	1,10	34,64	2488,99
2005/06	**9,82**	1,59	50,03	2539,02
2006/07	**1,57**	0,25	8,01	2547,03
2007/08	**6,07**	0,98	30,94	2577,98
2008/09	**37,00**	5,98	188,49	2766,46
2009/10	**92,52**	14,95	471,35	3237,81
2010/11	**49,70**	8,03	253,23	3491,04
2011/12	**11,84**	1,91	60,30	3551,34
2012/13	**51,47**	8,32	262,24	3813,58
2013/14	**4,66**	0,75	23,75	3837,33
2014/15	**5,27**	0,85	26,85	3864,18
2015/16	**0,70**	0,11	3,54	3867,72
2016/17	**4,82**	0,78	24,53	3892,25
2017/18	**28,91**	4,67	147,26	4039,51
2018/19	**1,78**	0,29	9,06	4048,57
2019/20	**2,56**	0,41	13,03	4061,59

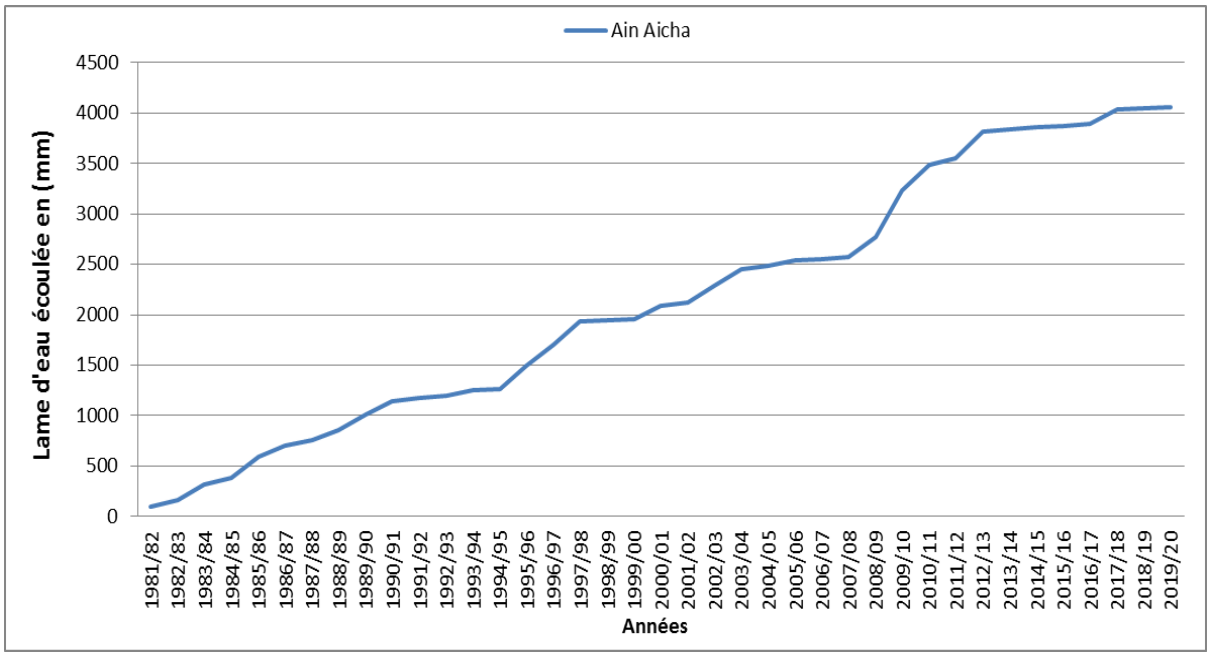

Figure 34: Simple cumul des lames d'eau écoulées pour la station d'Ain Aicha (1981 à 2020)

3) Coefficient et indice de la variabilité des débits

Le coefficient d'hydraulicité (CH) nous permet de mesurer l'irrégularité interannuelle de l'écoulement, c'est le rapport du débit d'une année donnée (Qi) sur le débit moyen d'une longue série d'observation (Qmoy). Il y a d'autre critères statistiques très simples pour la complétée comme le coefficient de variation (CV), le coefficient d'immodération (R) donné par rapport des modules extrêmes (R = QM/Qm), ainsi que l'écart type.

3.1.1. Coefficient d'hydraulicité (CH)

On peut définir le coefficient d'hydraulicité pour un cours d'eau par le débit d'une année donnée sur le débit moyen interannuel donné (Fig.35).

Lorsqu'on a un écoulement important avec une année humide, on parle d'un coefficient (CH> 1). Dans l'autre cas, lorsqu'on a une année sèche, Donc un faible cours d'eau ou bien un faible débit au bassin versant.

Les résultats obtenu par le coefficient d'hydraulicité nous confirment les fluctuations hydroclimatiques, ce qui été précédemment montré par l'autre méthode des écarts des débits moyens interannuels aux débits moyens interannuels.

On remarque que le nombre des années hydrologiques qui sont déficitaires dépasse les 50% pour les trois stations avec un déphasage d'hydraulicité pour la série commune entre les stations dans l'évolution du coefficient.

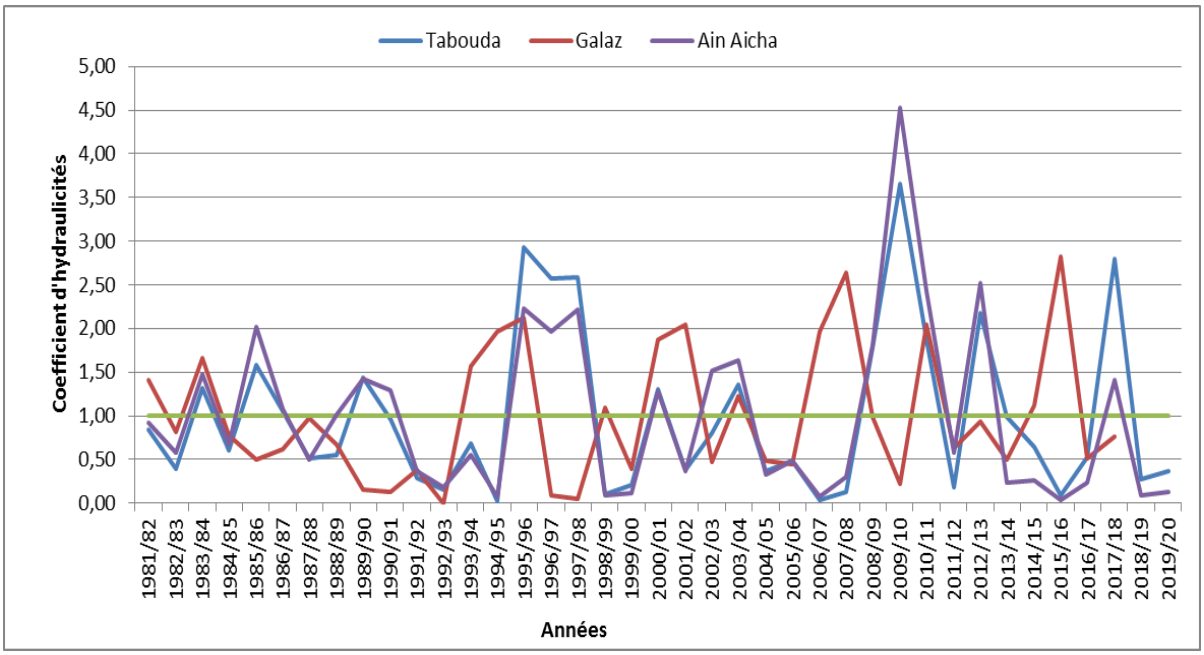

Figure 35: Variation du coefficient d'hydraulicité dans le bassin versant de l'Ouergha

3.1.2. Coefficient d'immodération (CI)

La définition du coefficient d'immodération est comme étant le rapport des modules extrêmes (CI=Qmax/Qmin). Pour la station de Tabouda la valeur du coefficient d'immodération est de 130, Pour la station d'Ain Aicha 59 et pour la station de Galaz 225.

La valeur du coefficient d'immodération pour la station de Galaz et Tabouda est supérieure au module le plus élevé de la série, avec une forte irrégularité des débits annuels. Par contre, la valeur du coefficient d'immodération pour la station d'Ain Aicha montre une variabilité à l'échelle spatiale des débits annuels et des irrégularités moins importantes.

3.1.3. Coefficient de variation (CV)

Le coefficient de variation est le rapport de l'écart type à la moyenne. Plus la dispersion autour de la moyenne est grande, plus la valeur du coefficient de variation est élevée. Il permet aussi de mettre en évidence les variations des débits.

Pour la station Ain Aicha la valeur du coefficient de variation est de 0.88, la station Galaz 0.75 et pour la station Tabouda 0.94, on remarque qu'elles sont légèrement élevées, contribuent à une variabilité des débits extrêmes.

B. Débits moyens mensuels

On peut caractériser le régime d'écoulement d'un cours d'eau par les débits moyens mensuels qui sont considérer comme des paramètres classiques et qui sont influencés par le régime pluviométrique.

1) Module mensuel

Les figures (Fig.36, Fig.37 et Fig.38) nous indiquent une irrégularité des fluctuations au cours de l'année. Pour la station Ain Aicha les débits augmentent progressivement à partir du mois de Septembre pour atteindre le maximum en Février, après on a une progressive diminution jusqu'au mois d'Août.

Pour les stations Galaz et Tabouda on assiste à une progressive augmentation des débits depuis le mois de Septembre jusqu'au maximum au niveau du Décembre après on assiste à une progressive diminution jusqu'au minimum au niveau du mois de Juillet.

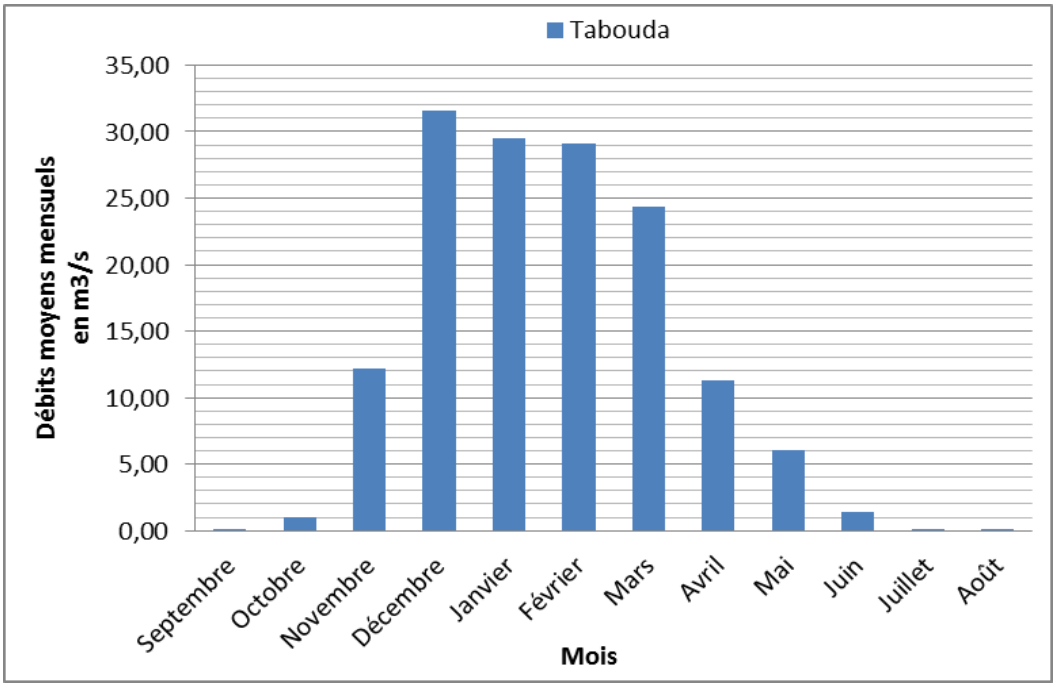

Figure 36: les débits mensuels au niveau de la station de Tabouda

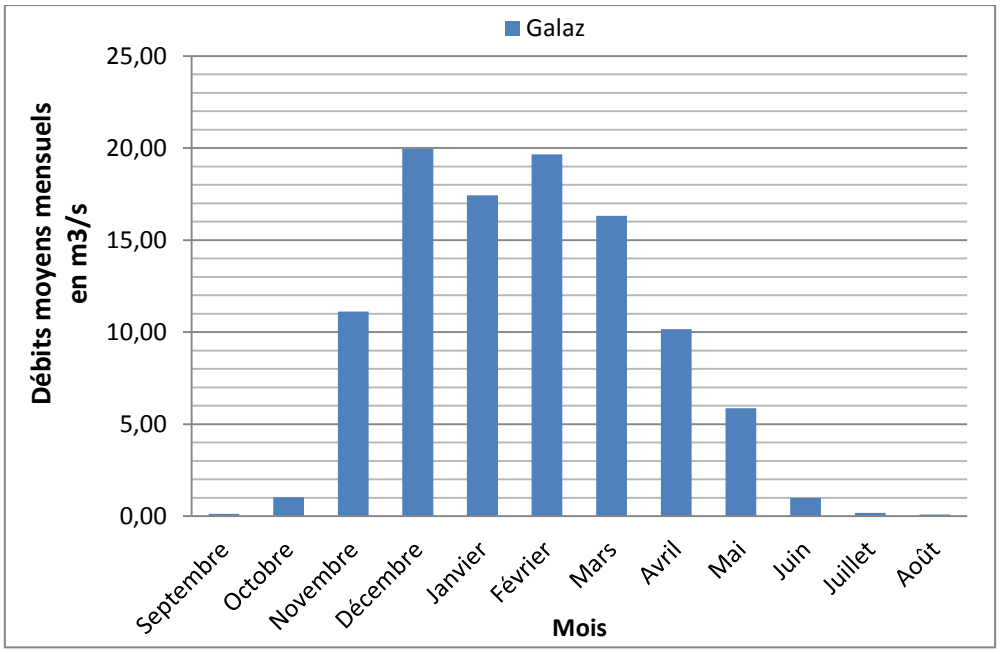

Figure 37: les débits mensuels au niveau de la station de Galaz

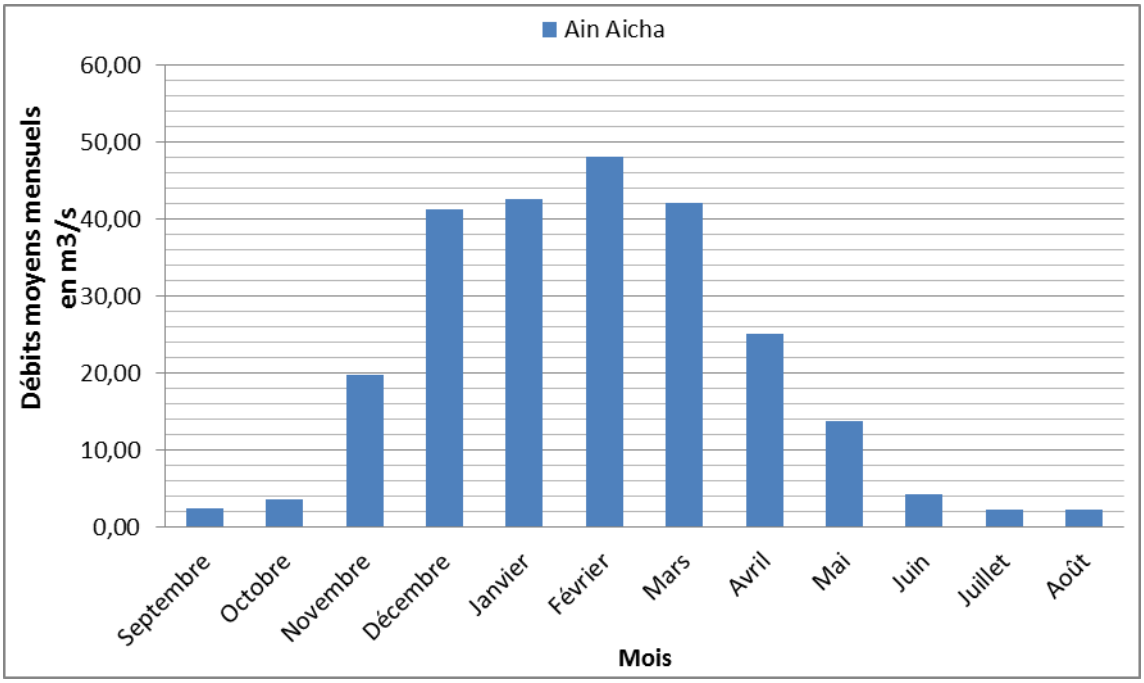

Figure 38: les débits mensuels au niveau de la station d'Ain Aicha

Il y a une grande liaison entre les débits moyens mensuels et les précipitations moyennes mensuelles. Dans ces stations, on remarque qu'il existe des différences des variations mensuelles des débits qui peuvent êtres dues à leurs situations géographiques, le réseau hydrographique et la surface des zones drainées, ou bien à la lithologie du terrain.

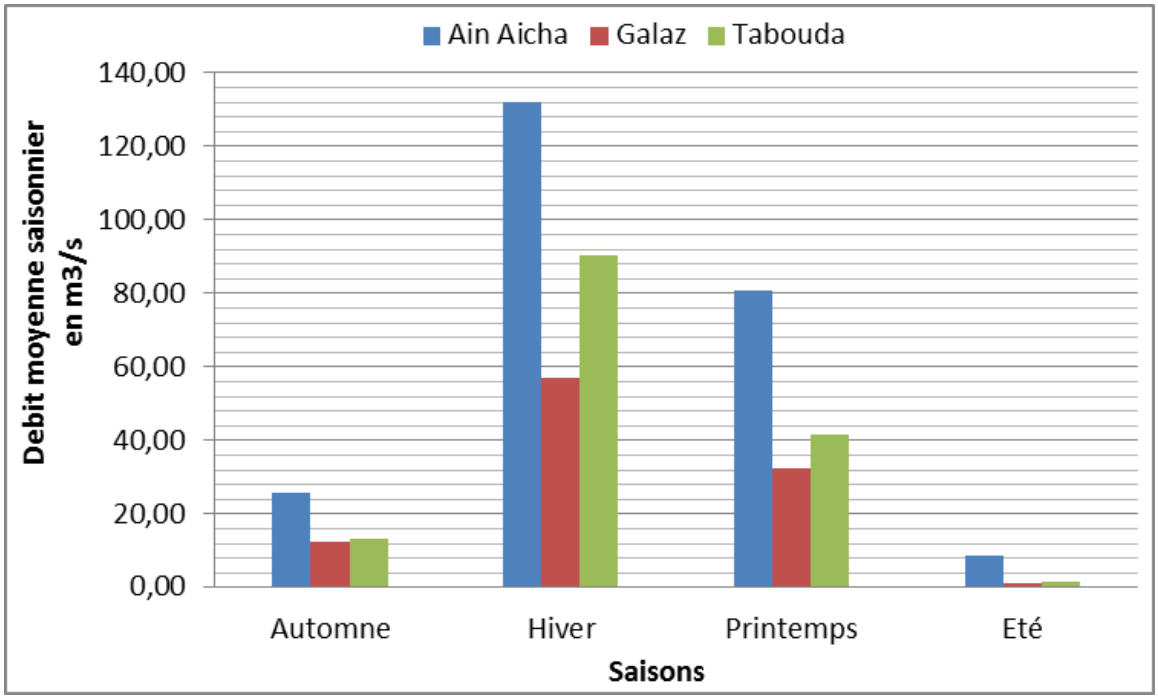

Figure 39: les débits moyens saisonniers dans le bassin versant de l'Ouergha

Dès l'automne, les pluies occasionnelles et les débits liquides de ces stations augmentent jusqu'au atteindre le maximum en hiver (Fig.39), donc à partir du mois de Décembre jusqu'au mois d'Avril le ruissellement extrême qui est favorisé par la saturation des sols va augmenter le débit de l'oued, cependant sous l'influence de l'écoulement souterrain et hypodermique, les débits diminues en suivant une loi exponentielle.

2) Coefficient mensuel des débits

La relation entre le module brut annuel et le débit moyen mensuel est le coefficient mensuel. Il montre l'influence d'un mois sur l'année et il met en clair la variabilité des écoulements qui se révèlent par des périodes de basses et hautes eaux. Le coefficient mensuel est définit par le rapport des débits moyens mensuels sur le débit moyen interannuel.

$$C = \frac{Q_m}{Q_{mi}}$$

Avec :

C : Coefficient mensuel des débits

Qm : Débit moyen mensuel

Qmi : Débit moyen interannuel

Les variations du coefficient mensuel des débits pour les trois stations indiquent que le régime hydrologique se détermine par une période des basses eaux (C <1) et des hautes eaux (C >1).

Pour la station d'Ain Aicha la période des eaux élevés prend l'effet à partir de Novembre jusqu'en Avril, Cette période cause des crues intenses désignant le mois Février et le mois Décembre pour la station de Galaz et Tabouda (Fig.40). En revanche, la période des eaux basses pour les trois stations prend l'effet à partir de Mai jusqu'en Novembre. Elle cause des étiages plus violents durant le mois de Juillet, Août et Septembre.

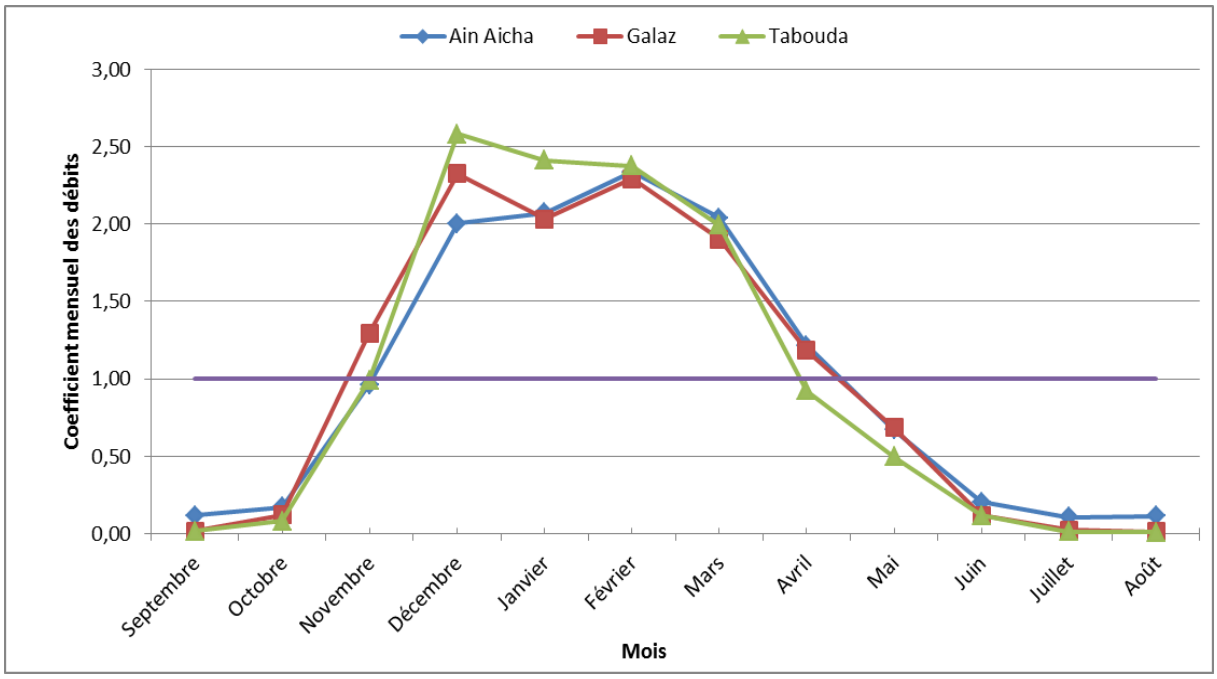

Figure 40: Variation du coefficient mensuel des débits au bassin versant de l'Oued l'Ouergha

Le coefficient moyen mensuel des débits détermine ces variations spatio-temporelles qui peuvent être expliquées par la propagation des eaux, les particularités hydrodynamiques du milieu, l'intensité pluviale et les caractéristiques physiques du bassin versant.

Pendant la période humide le coefficient mensuel des débits et très élevés, alors on peut considérer que l'oued de l'Ouergha a un régime hydrologique pluvial.

C. Débits journalières

La relation entre débits-précipitations et leurs variations, spatiales et journalières nous permet d'avoir une analyse des débits journaliers. On prend la station d'Ain Aicha pour une analyse des débits journaliers à partir de 1981/1982 jusqu'au 2019/2020. Cette analyse nous permet de savoir le type du régime d'écoulement (Fig.41).

1) Débit journaliers d'une année humide

L'évolution de la courbe des débits par rapport à l'année humide 2009/2010 (Fig.40) montre un régime saisonnier. On a des débits forts qui atteignent 1298 m3/s en hiver et en printemps. Pour l'été, les précipitations est très faibles avec une élévation intense de l'évapotranspiration et une augmentation de nombre de prélèvements anthropiques sur toute la longueur de l'oued ce qui ressemble à une saison de tarissement. Pour l'automne, une majeure partie de la lame d'eau précipitée ruisselle, sachant que le sol est entièrement sec et imperméable à cause d'une très longue période sèche et estivale.

2) Débits journaliers d'une année moyenne

Pour la saison d'automne l'évolution des débits journaliers d'une année moyenne est faible 1986/1987 (Fig.41). Les crues sont reproduites et intenses pour la saison du printemps et la saison d'hiver, elles atteignent un maximum de débit 812 m3/s. Pour la saison d'été reste continuellement sèche. La progression rapide des eaux et leur diminution progressive peut être expliqué par la nature lithologique, l'intensité des précipitations et de plusieurs sources qui soutient les cours d'eaux.

3) Débits journaliers d'une année sèche

La progression des débits journaliers d'une année sèche est dissemblable à celle d'une année humide. L'année la plus sèche au bassin versant est 2006/2007 (Fig.41), Les débits journaliers de cette année étaient à peu près inexistant.

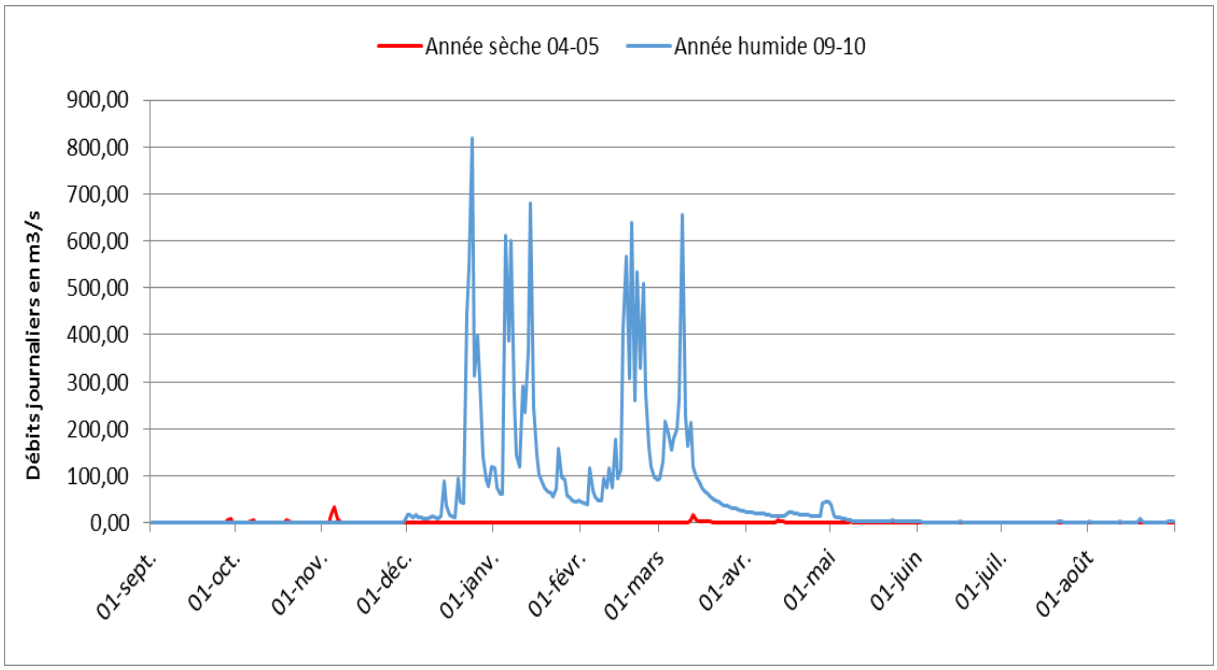

Figure 41: Débits journaliers au niveau de la station d'Ain Aicha pour l'année humide, moyenne et sèche

3. Relation entre les débits et les précipitations

A. Relation entre les débits et les précipitations mensuelles

La liaison entre la lame d'eau écoulée et la tranche d'eau précipitée, permet de mesurer celle entre les hauteurs mensuelles pluviométrique et l'évolution des débits.

Quand on fait une comparaison entre l'évolution des précipitations mensuelles et les variations mensuelles des débits au niveau des trois stations du bassin versant (Fig.42, Fig.43 et Fig.44), on remarque qu'il y a un synchronisme entre les précipitations et les débits mensuels.

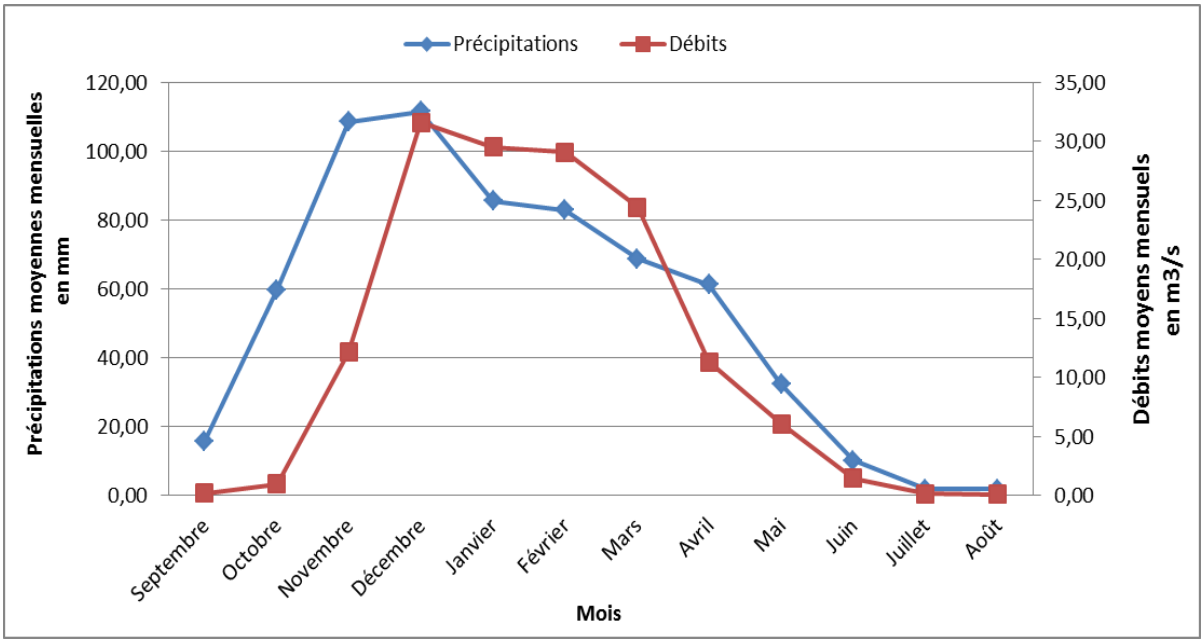

Figure 42 : Evolution des précipitations et des débits pour la station de Tabouda

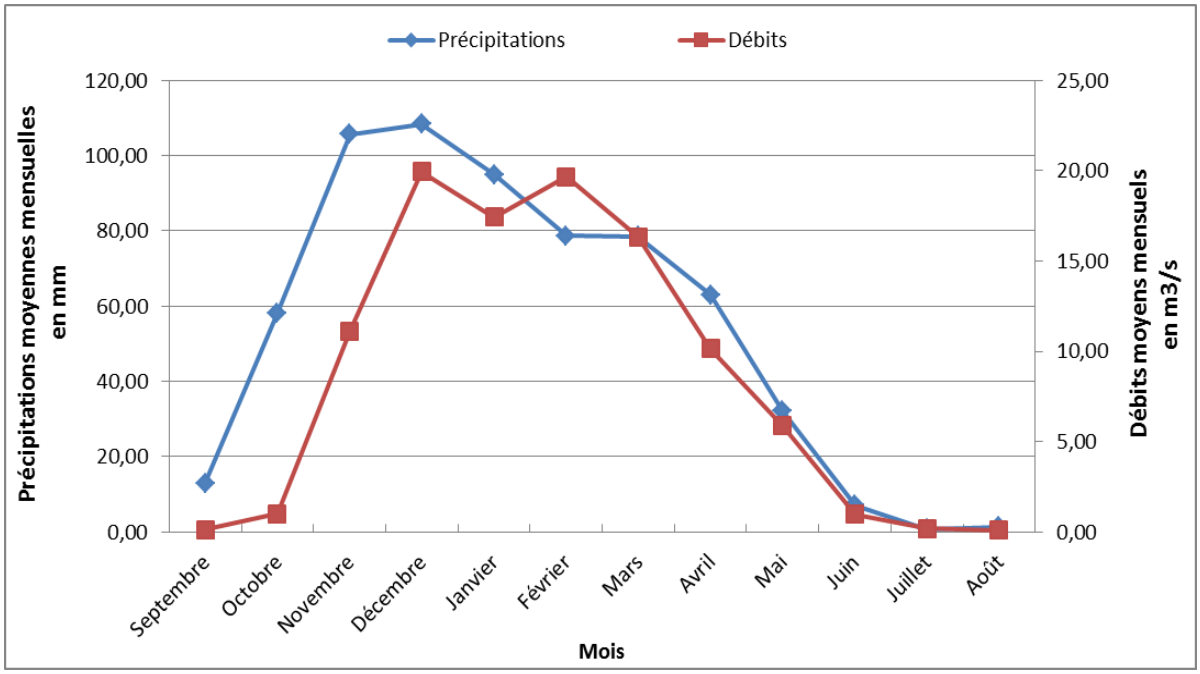

Figure 43 : Evolution des précipitations et des débits pour la station de Galaz

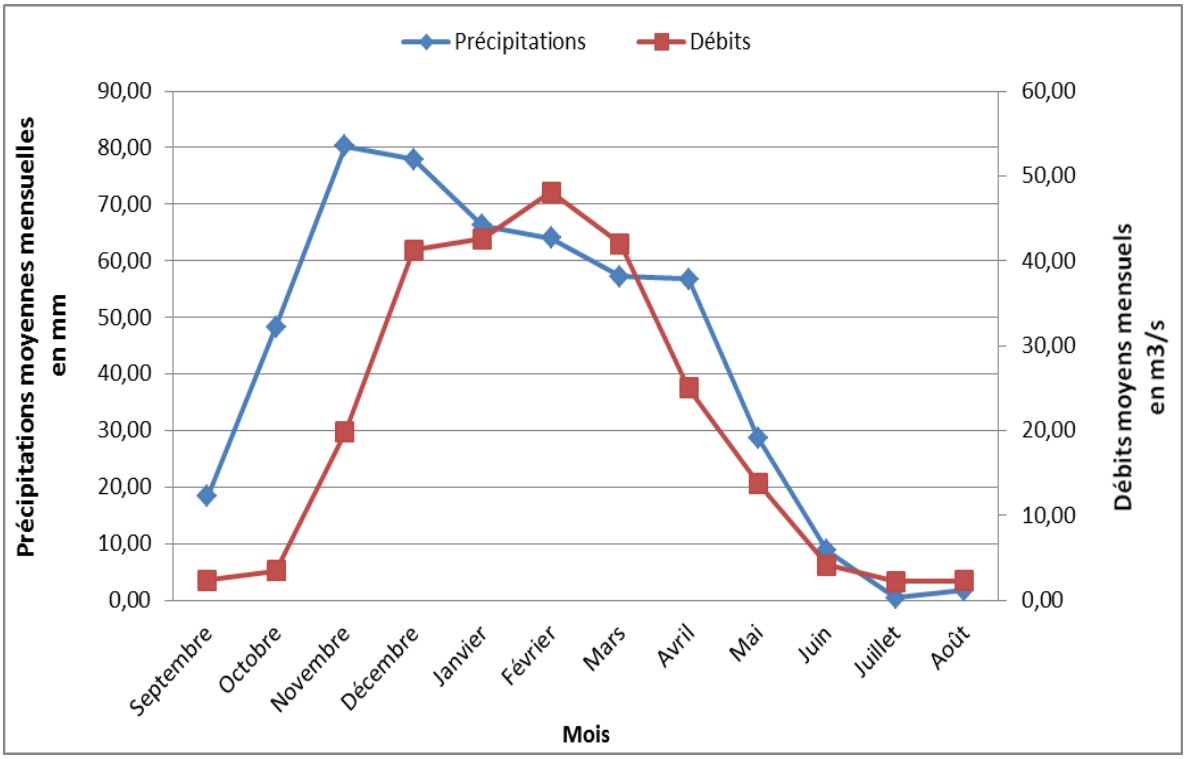

Figure 44: Evolution des précipitations et des débits pour la station d'Ain Aicha

Pour les stations Galaz et tabouda ces figures nous indiquent qu'il ya un enchainement des averses et des crues, on remarque au mois de décembre un maximum de débit et de précipitation, En revanche, on a un maximum en Novembre de précipitation suivi d'un maximum de débit avec deux mois de décalage en Février pour la station d'Ain Aicha. Ce retard on peut l'expliquer par les eaux qui se précipitent et ruissellent directement après leur tombée au sol, la nature lithologique du bassin versant de l'Oued Ouergha (semi-perméable à perméable). Le décalage qui sépare le commencement de l'averse et sa circulation après une tes faible infiltration ce qui cause l'imperméabilité du milieu.

Pour les trois stations la courbe des débits moyens mensuels indique que le ruissellement réagi seulement aux puissantes averses. Pour les faibles peuvent être interprété par l'irrigation ou bien l'évapotranspiration excessive.

B. Coefficient de ruissellement (Cr)

La définition du coefficient de ruissellement, c'est le rapport entre la hauteur d'eau ruisselée à la sortie d'une surface « pluie nette » et la hauteur d'eau précipitée « pluie brute ». L'intensité, le volume et la nature de la pluie est loin d'être constants, ainsi qu'avec les divers types de surface (Pratt et al, 1984; Schaake et al, 1967 in Zian 2011).

La valeur de Cr et de ces variations est difficile de déterminer précisément, donc on passe par des mesures sur site.

Pour déterminer le Cr, on adopte la méthode la plus simple, qui consiste à utiliser le rapport de la lame d'eau écoulée (H en mm) sur la lame précipité (P en mm).

$$Cr = \frac{H}{P}$$

Pour la station d'Ain Aicha la valeur du coefficient de ruissellement est de 23%, la station de Galaz 7% et la station de Tabouda 10%.

C. Bilan Hydrologique

Le bilan hydrologique permet de déterminer le dénombrement des apports et les sorties ou les pertes, en ramenant une période de référence nettement déterminée pour une unité de volume bien délimitée. En général, la formule du bilan s'écrit :

$$P = Q + ETR \pm \Delta R \text{ Avec } \Delta R = RFU + RH \text{ et } Q = R + I$$

Avec :

P : Précipitation moyenne annuelle (mm)

Q : Débit d'écoulement total (mm/an)

ETR : Evapotranspiration réelle en (mm)

R : Ruissellement du bassin versant (mm)

I : Infiltration du bassin versant (mm/an)

ΔR: Variation des reserves

1) Ecoulement total

$$P = ETR + Q \quad \Longrightarrow \quad Q = P - ETR$$

Avec :

P : Précipitation moyenne annuelle (mm)

ETR : Evapotranspiration réelle en (mm)

Q : Débit d'écoulement total du bassin versant (mm/an)

D'où Q est de 32% de P.

Donc, on peut déduire le volume écoulé (Ve) en se basant sur l'estimation de la moyenne de la lame d'eau tombée au chapitre de la climatologie et à partir du volume annuel précipité (Vp) déjà calculé.

$$Ve = 32 \times 10^{-2} \times Vp \quad \text{Avec } Vp = 5055{,}3 \times 10^{6}\ m^3/an$$

Donc : Ve=**$1617 \times 10^{6}\ m^3/an$.**

2) Le ruissellement

Le ruissellement est l'écoulement temporaire et instantané des eaux sur un bassin versant à la suite d'une averse, le ruissellement peut être estimé d'après la formule de Tixeront–Berkaloff :

$$R = \frac{P^3}{3(ETP)^2}$$

Avec

R : ruissellement (mm)

P : précipitation annuelle moyenne (mm)

ETP : évapotranspiration potentielle en (mm)

D'où R est de 23% de P

V_R=23x10^{-2} xVp Avec Vp=5055,3 × 10^6 m^3/an

Donc : **V_R=1162 × 10^6 m^3/an.**

3) Infiltration

L'infiltration est la quantité d'eau qui pénètre dans le sol et le sous-sol pour alimenter les aquifères. Ce paramètre est difficile à évaluer parce qu'il s'évade aux mesures directes. On peut déduire les infiltrations, grâce à l'équation du bilan hydrique :

$$P = ETR + R + I \iff I = P - (ETR + R)$$

Avec :

I : infiltration du bassin versant (mm)

R : ruissellement du bassin versant (mm/an)

ETR : Evapotranspiration réelle en (mm/an)

P : précipitation annuelle moyenne en (mm/an)

D'où I est de 15% de P

On a V_I=15 x10^{-2} xVp Avec Vp=5055,3 × 10^6 m^3/an

Donc **V_I=758 × 10^6 m^3/an.**

4. Conclusion

Le régime hydrologique d'après l'étude hydrologique est considéré comme un régime méditerranéen qui est caractérisé par la profusion pluviale avec des débits intenses hivernaux ce qui cause des crues intenses. On remarque une reproductivité du phénomène à l'échelle de l'année avec des saisons de profusion hydrologique.

Le débit au module annuel par rapport à la station de Tabouda et Galaz est moins important que celui d'Ain Aicha, ce qui traduit la situation amont-aval des stations et la succession des périodes sèches et de périodes humides qui sont confirmées aussi par le test de simple cumul.

Au niveau des trois stations, une non-conformité et alternance de périodes déficitaires et de périodes excédentaires est détectée par la méthodologie des écarts des débits annuels

moyens (Ec) aux débits moyens interannuels, avec une domination des périodes déficitaires par rapport aux périodes excédentaires.

Les variations du coefficient d'hydraulicité (CH), le coefficient d'immodération (R) et le coefficient de variation (CV) permettent de mesurées les irrégularités interannuelles de l'écoulement et aussi de conclure la variabilité des débits extrêmes, la variabilité à l'échelle spatiale et les fluctuations hydroclimatiques.

L'étude de la relation entre les lames d'eau écoulée et les précipitations montre une grande compatibilité avec des précipitations très importantes en Novembre et Décembre suivi de très importants débits avec un décalage entre un mois à deux mois en Février.

La formule du bilan hydrologique montre bien la relation entre le volume d'eau précipité au bassin versant et l'eau écoulé à l'exutoire du bassin versant. L'estimation du bilan hydrologique nous montre le pourcentage des différentes étapes d'écoulement. Pour l'infiltration 15%, l'écoulement total 32% et le ruissèlement 23%.

Chapitre IV: Caractérisation de la sécheresse

1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est de caractériser la sécheresse climatique au niveau du bassin versant de l'oued l'ouegha à travers le calcul des indices de sécheresses (l'indice standardisé de précipitations SPI a multi échelle, Déciles des précipitations DP, Le pourcentage à la normale PN, Statistique Z-Score, Indice d'anomalie de pluviosité RAI, Intensité de la sécheresse DI).

Les L'observation des évènements de la nature est un outil essentiel à la connaissance et à la compréhension des phénomènes naturels. Les mesures de ces évènements en général et en particulier en hydrologie constituent des éléments de référence indispensables pour toute l'étude. La quantification des paramètres hydro climatiques constitue un préalable à l'estimation des ressources en eau. Il Ya un problème des lacunes d'observation et de leur fiabilité dans l'étude des précipitations au Maroc. Ceci a été mis en évidence dans d'autres études hydrologiques et climatologiques. La faible densité du réseau pluviométrique dans les zones montagneuses constitue un handicap supplémentaire aux études.

Afin d'avoir un moyen fiable de comparaison et dans le but d'intégrer un ensemble de stations qui offrent des données de bonne qualité, il est nécessaire de se baser sur quelques critères pour éliminer les stations défectueuses. Les critères qui ont été adoptés son :

•Continuité des séries des stations retenues sur une période suffisamment longue

• Homogénéité des séries à étudier

• Synchronisation des séries

• Stations issues de réseaux professionnels

• Représentativité des stations pour toutes les grandes régions géographiques.

Après vérification des stations, nous avons constaté les difficultés Suivantes :

• Le problème des ruptures d'observations qui affectent un certain nombre de stations

• Les données manquantes

Les données pluviométriques proviennent de l'Agence de Bassin hydraulique de Sebou (ABHS). L'étude a été réalisée sur la base des données pluviométriques (Précipitations mensuelles) de trois stations météorologiques (Ain aicha, Galez et Jbel Oudka) (Fig.45).

La Série d'observations prise en considération s'étale sur 32 années (1982-2015), La localisation des stations est présentée dans le (Tab.16).

Tableau 16: Stations pluviométriques retenues pour l'étude

Station	N° Station	X (m)	Y (m)	Z (m)
Ain aicha	236	56470	42880	230
Jbel oudka	4626	55300	45900	1115
Galez	3924	55532	43985	214

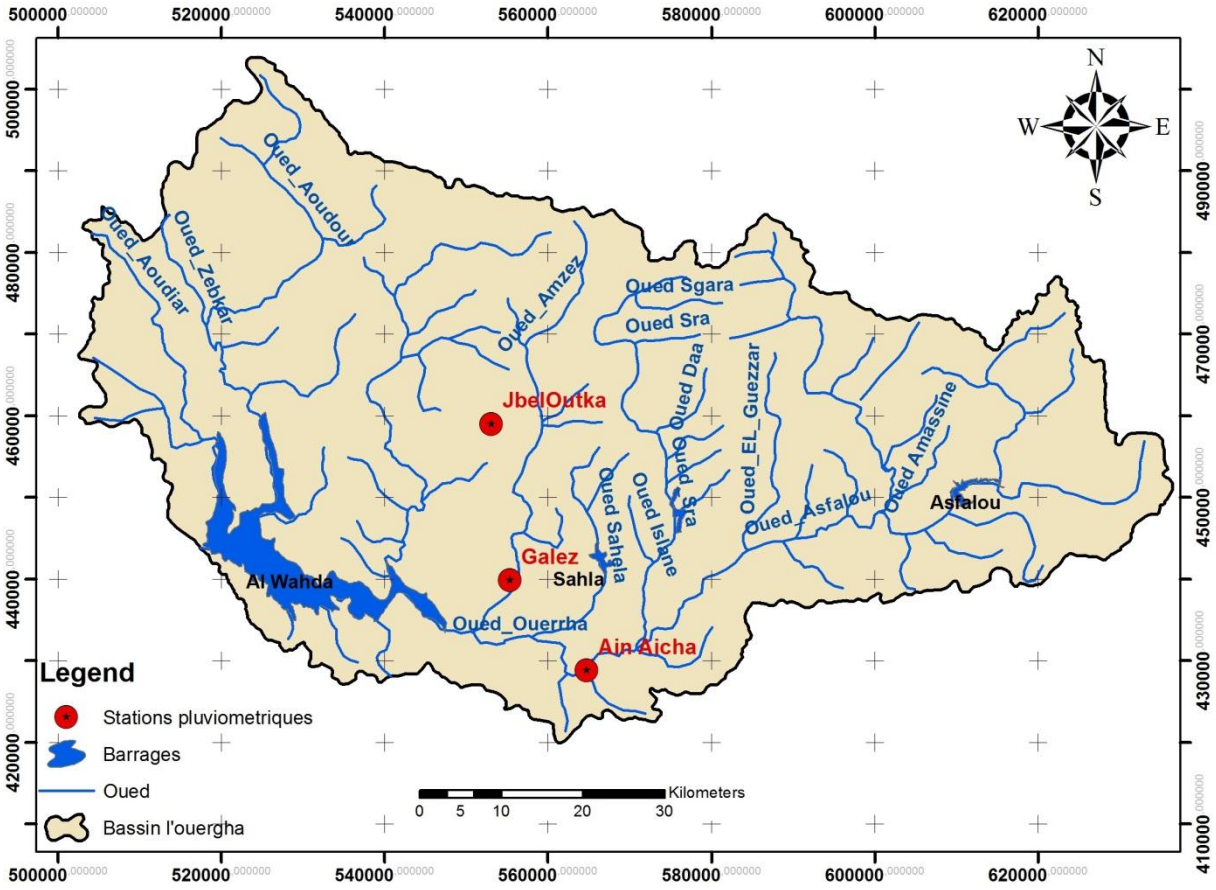

Figure 45: carte de situation géographique des stations pluviométriques étudiées dans ce chapitre au bassin versant de l'oued l'Ouergha

2. Etude d'homogénéité des séries

Diverses techniques d'homogénéisation ont été développées pour accommoder différents types de facteurs tels que la variable à homogénéiser, la variabilité spatiale, et temporelle des données selon l'endroit où les stations sont situées, la longueur des séries et le nombre de données manquantes, les métadonnées disponibles et la densité du réseau d'observation.

Les techniques d'homogénéisation varient également selon l'objectif pour lequel on les applique. Malgré la grande diversité des méthodes d'homogénéisation, elles peuvent néanmoins être classifiées en deux catégories principales qui les rejoignent toutes : Méthodes subjectives ou objectives. Lorsque l'emplacement d'une discontinuité est détecté à l'œil nu sur un graphique, la méthode appartient à la classe subjective même si des tests statistiques sont appliqués par la suite. Par contre, les méthodes objectives ne dépendent pas du jugement de l'utilisateur pour localiser les inhomogénéités.

Les méthodes bayésiennes, qui seront présentées plus loin, pourraient être considérées comme subjectives ou objectives selon qu'elles incorporent ou non l'opinion du modalisateur par le biais d'une distribution apriori informative. L'utilisateur des données doit connaître l'historique des stations d'observations ce qui permettra d'expliquer les causes de l'hétérogénéité lorsqu'elle existe. Cet historique comprend le nom de la station, les coordonnées, les périodes et le personnel d'exploitation et les détails sur son équipement. Avant d'aborder l'étude de l'homogénéité de nos séries et donner les résultats, nous allons présenter la méthode traitant cette question. Il existe des tests graphiques et numériques par exemple :

A. Tests graphiques :

1) Le simple cumul

Le principe consiste à cumuler les valeurs annuelles observées de chaque paramètre à traiter, une fois que les valeurs sont cumulées, il faut les mettre en ordonnées et le temps en abscisse.

À partir de cumuls en fonction du temps on dispose d'un nuage de points, ces derniers fluctuent autour d'une droite. Si on constate une cassure de la droite, on conclut que la série correspondante présente une tendance, des observations erronées ou des valeurs exceptionnelles. Lorsque la cassure est nette, on peut par simple lecture sur le graphique déterminer l'époque où s'est manifestée la tendance et contrôler dans les documents les causes de cette tendance.

La méthode du simple cumul ne permet pas de différentier dans le cas où l'on observerait une tendance, celle qui est propre à la station (hétérogénéité) d'une tendance climatique.

2) Le double cumul

Le principe de la méthode des doubles cumuls consiste à tracer progressivement le cumul d'un paramètre du poste à tester en fonction de celui du même paramètre de la série de référence.

Lorsque les séries sont homogènes, les points sont sensiblement alignés sur une droite. Les cassures dans la pente de la droite donnent les dates probables de rupture d'homogénéité.

3) La méthode du cumul des résidus

Dans la méthode du cumul des résidus, on calcule d'abord la régression entre la série étudiée et la série de référence. On peut alors former la série des résidus (le résidu étant l'écart entre la valeur vraie et la valeur estimée par régression). On effectue ensuite la somme de ces résidus que l'on pointe sur un graphe en fonction du temps. Si la série testée est homogène, la distribution de ces résidus est complètement aléatoire. Par contre, si la série est hétérogène, la courbe présente des portions anormalement croissantes ou décroissantes. Si elle sort d'une ellipse de significativité définie pour un intervalle de confiance donné, on peut conclure qu'une hétérogénéité est détectée à la cassure de la courbe.

B. Tests numériques :

1) Méthodes statistiques

Pour détecter l'existence d'une éventuelle tendance dans les séries de données pluviométriques, les tests non paramétriques de Spearman et Man-Kendal, qui permettent de franchir des contraintes imposées par d'autres méthodes paramétriques et qui ont montré leur efficacité dans ce genre d'application. Afin de consolider les résultats de ces deux tests, nous

avons utilisé le test de Pettitt, qui présente la particularité de localiser le moment de la rupture de la moyenne au sein de la série avec un niveau de signification qui traduit l'importance réelle du changement détecté. Ces calculs ont été appliqués aux données annuelles.

2) Test de Pettitt

Pour confirmer les résultats obtenus par la méthode classique, nous avons appliqué l'approche de Pettitt qui est non paramétrique et dérive du test de Man-Whitney. Ainsi, l'absence de rupture dans la série (xi) de taille N constitue l'hypothèse nulle (pas de cassure au sein de la série).

La mise en œuvre du test suppose que pour tout instant t compris entre 1 et N, les séries chronologiques (xi) i = 1 à t et t + 1 à N appartiennent à la même population. La variable à tester est le maximum en valeur absolue de la variable Ut, N définie par:

$$U_{t,N} = \sum_{i=1}^{t} \sum_{j=t+1}^{N} Dij$$

Où Dij = sgn (xi- xj) avec sgn(d)= 1 si x > 0; 0 si d = 0

Et -1 si d < 0, avec (d = xi- xj).

Si l'hypothèse nulle n'est rejetée, une estimation de la date de la cassure est donnée par l'instant « t » définissant le maximum en valeur absolue de la variable Ut,N.

3) Test de Buishand pour l'homogénéité

Le test de (Buishand, 1982) peut être utilisé sur des variables suivant des distributions quelconques. Néanmoins ses propriétés ont été particulièrement étudiées pour le cas normal.

L'article Buishand se concentre sur le cas du test bilatéral, mais pour la statistique Q présentée ci-dessous le cas unilatéral est aussi possible. Buishand a développé une seconde statistique R, pour laquelle seule une hypothèse bilatérale est possible. Dans le cas de la statistique Q, les hypothèses nulles et alternatives sont définies par :

- H0 : les T variables suivent une ou plusieurs distributions ayant une même moyenne.
- Test bilatéral : Ha : Il existe un temps t à partir duquel les variables changent de moyenne.
- Test unilatéral à gauche : Ha : Il existe un temps t à partir duquel la moyenne des variables diminue de D.

- Test unilatéral à droite : Ha : Il existe un temps t à partir duquel la moyenne des variables augmente de D.

C. Traitement des données pluviométriques :

L'un des défis de la communauté scientifique est la résolution du problème d'homogénéité des séries chronologiques observées dans certaines stations météorologiques. Pour cela nous avons utilisé deux méthodes, la méthode classique des doubles cumuls et l'application du test d'homogénéité de Pettitt à un intervalle de confiance 95 % (Wang et al. 2007). L'ajustement des séries a été effectué par le logiciel XLSTAT.

Généralement on utilise la méthode des doubles cumuls (Musy et Higy, 2003), dans le but de confirmer ou d'infirmer l'existence d'une hétérogénéité au sein d'une série pluviométrique d'une station donnée.

L'utilisation de cette méthode requiert la disponibilité d'une station de référence dite station témoin (X) dont les valeurs sont supposées complètes et homogènes, avec lesquelles on va comparer les valeurs de la station qu'on veut contrôler (Y), il est à noter que la comparaison ne se fait pas entre les valeurs observées, mais entre leur cumul, un effet de lisage est obtenu au cours de la comparaison, en fonction de la variable temps choisie (année, saison, mois, décade). Pour mieux illustrer cette méthode, nous donnons en exemple, les deux stations de «GALEZ » et «Ain Aicha».

Sur le graphique cartésien (Fig.46), nous portons en abscisse les totaux annuels des précipitations de la station de référence «Galez» et en ordonnée avec ceux de la station «Ain Aicha».

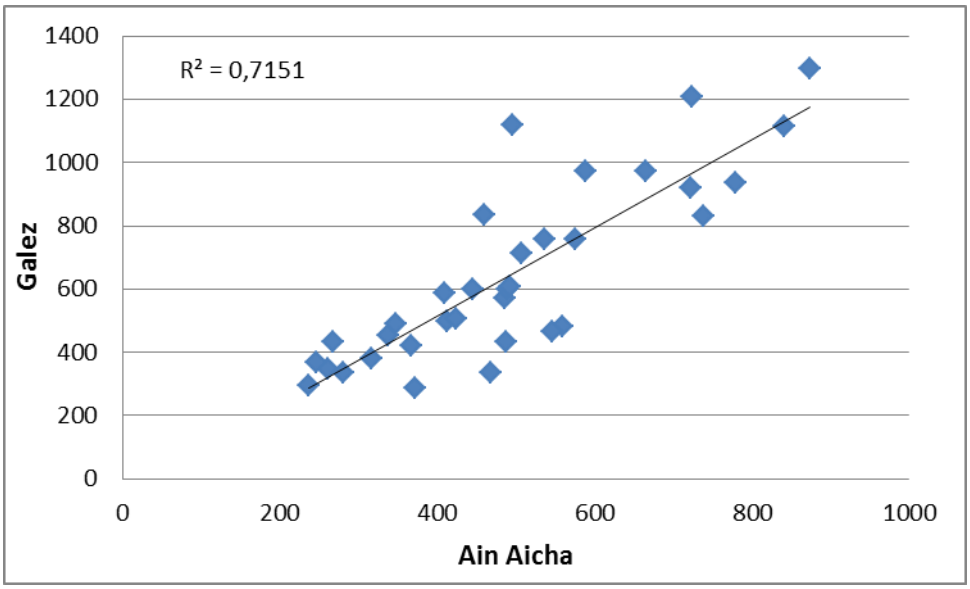

Figure 46: Le contrôle des totaux annuels des précipitations en (mm) par la méthode des doubles cumuls

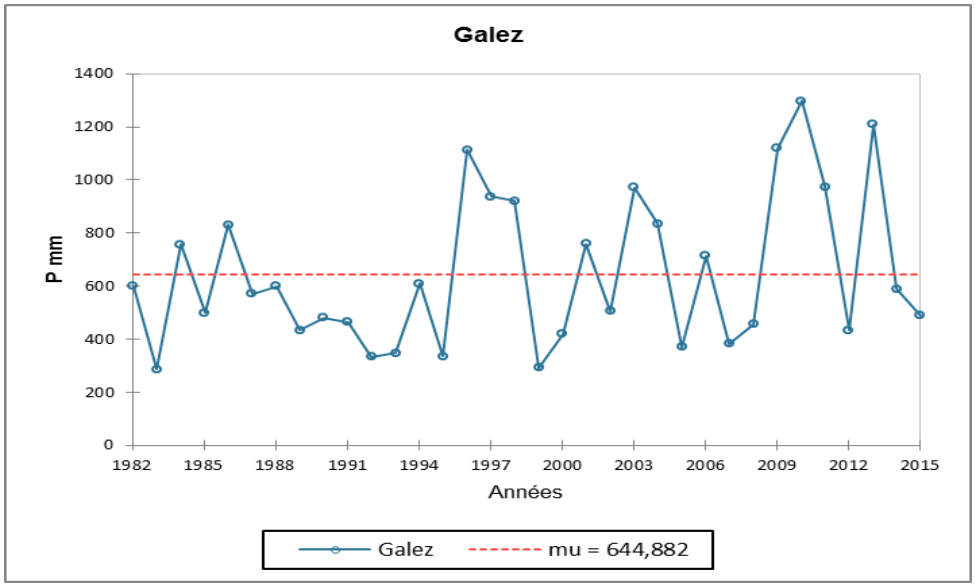

Figure 47: Test de Pettitt d'homogénéisation à 99% de confiance appliqué à la station Galez

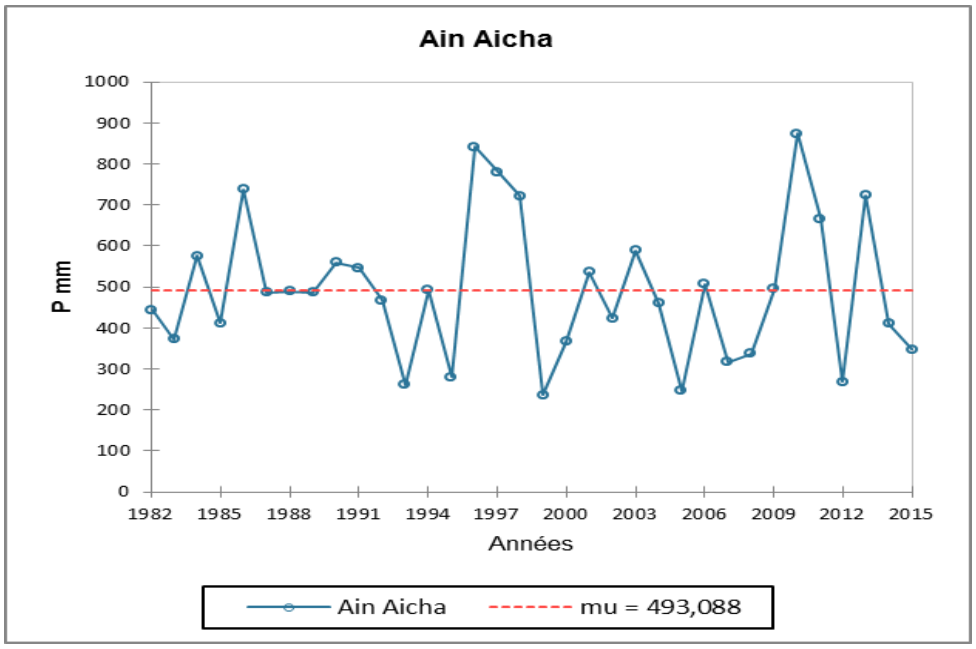

Figure 48: Test de Pettitt d'homogénéisation à 99% de confiance appliqué à la station Ain Aicha

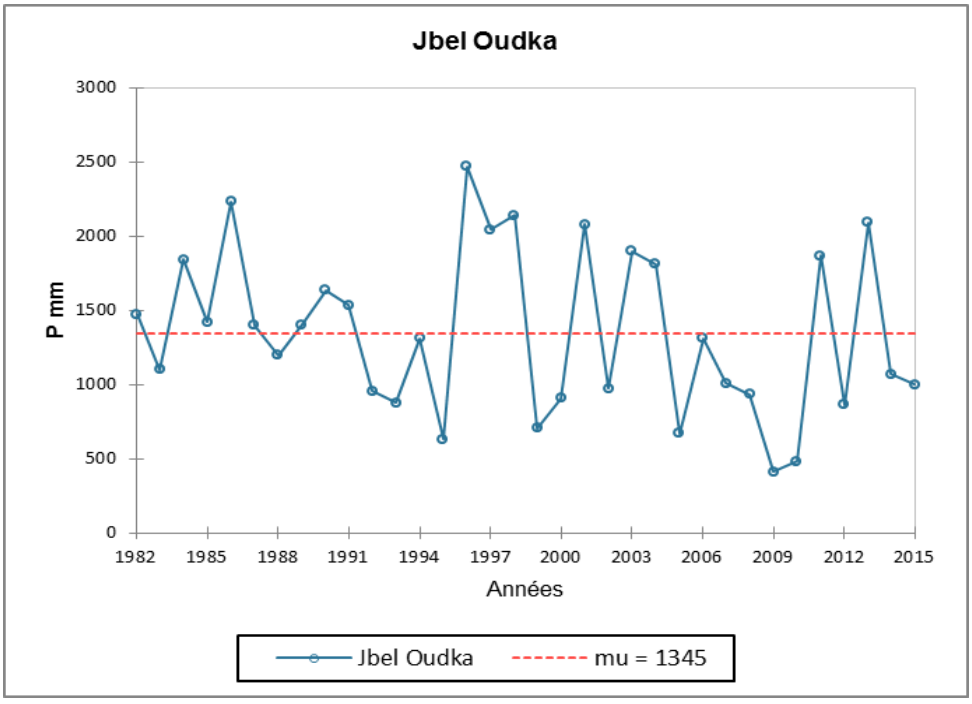

Figure 49: Test de Pettitt d'homogénéisation à 99% de confiance appliqué à la station Jbel Oudka

Les résultats montrent que les séries pluviométriques moyennes annuelles des trois stations sont homogènes, ils n'ont pas des points de changement et une seule moyenne (Fig.47, Fig.48, Fig.49).

Tableau 17: Les résultats du test de point de changement de Pettitt effectué sur la pluviométrie annuelle moyenne des stations

Station	p-value (Pettitt)	Observation
Galez	0,347	Homogène
Ain Aicha	0,645	Homogène
Jbel Oudka	0,429	Homogène

Le test de pettitt a indiqué que l'hypothèse d'homogénéité est valable dans les trois stations puisque des points de changement non significatifs ont été détectés dans leur série de précipitations (valeur $p \geq 0,05$) (Tab.17).

3. Calcul des indices de sécheresses

A. L'indice de précipitations normalisé (SPI)

L'indice de précipitations normalisé, ou en anglais Standardized Précipitation Index (SPI) (McKee et al. 1993, 1995) est un indice à la fois puissant, souple d'utilisation et simple à calculer. Il est basé sur des données pluviométriques adopté par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) en 2009, comme instrument mondial pour la mesure des sécheresses météorologiques. En outre, l'indice SPI se révèle tout aussi efficace pour analyser les périodes ou cycles humides que les périodes ou cycles secs.

Pour calculer l'indice SPI, il faut disposer idéalement de relevés mensuels s'étalant sur au moins 20 à 30 ans, mais de préférence sur 50 à 60 ans, voire plus, ce qui constitue la période optimale (Guttman, 1994).

McKee et al. (1993) ont utilisé le système de classification des valeurs de l'indice SPI pour définir l'intensité des épisodes de sécheresse en fonction de la valeur des indices. L'intensité de la sécheresse est définie par la valeur de SPI. En général, les valeurs de SPI supérieures à zéro représentent des supérieures à la normale, tandis que les valeurs de SPI inférieures à zéro représentent des valeurs négatives et indiquent des précipitations inférieures

à la normale. Le SPI peut être calculé pour différentes échelles de temps et peut fournir une alerte précoce en cas de sécheresse. La formule mathématique de SPI est la suivante :

$$SPI= (Pi - Pm) / \sigma$$

Pi : Précipitation de l'année i

Pm : Précipitation moyenne

σ : Écart-type

Ils ont aussi défini les critères d'un épisode de sécheresse pour une échelle de temps (Tab.18):

Tableau 18: Classification de la sècheresse en rapport avec la valeur de l'indice de précipitations normalisé (McKee et al. 1993)

Classes du SPI	Degré de la sècheresse
SPI>2	Humidité extrême
1<SPI<2	Humidité forte
0<SPI<1	Humidité modérée
-1<SPI<0	Sècheresse modérée
-2<SPI<-1	Sècheresse forte
SPI<-2	Sècheresse extrême

Sur les bases de données chronologiques historiques à long terme, l'analyste peut dire l'impact de ces anomalies sur les domaines susmentionnés. La durée peut être obtenue en comptant les mois du début à la fin des valeurs SPI négatives et leur magnitude en faisant la somme positive des valeurs SPI de tous les mois de la période de la sécheresse.

Les SPI pour la zone d'étude ont été calcules a des échelles de temps de 1 mois, 3 mois, 6 mois et 12mois. Les SPI à 1 mois reflètent relativement peu de temps l'humidité du sol pendant les saisons de croissance. Les SPI à 3 mois fournissent une comparaison des précipitations sur une période spécifique de 3 mois avec les totaux des précipitations de la même période de 3 mois pour toute la série. Les SPI à 6 mois peuvent êtres très efficaces pour montrer la pluie sur les stations distinctes. Les SPI à 12 mois reflètent les modèles de précipitations à long terme.

- Les avantages de la méthode SPI

L’indice SPI offre une bonne souplesse d’utilisation : il est possible de le calculer pour de multiples échelles de temps. Quand il porte sur un laps de temps relativement court (entre 1 et 3 mois), l’indice SPI permet de détecter rapidement les situations de sécheresse et évaluer leur gravité.

L’indice SPI présente une bonne cohérence spatiale, ce qui permet d’établir des comparaisons entre des zones différentes soumises à des climats différents. Sa nature probabiliste le place dans un contexte historique, ce qui convient bien à la prise de décision.

- Les inconvénients de la méthode SPI

Le bilan hydrique du sol n’étant pas pris en compte. L’indice ne permet pas le calcul du rapport : évapotranspiration/évapotranspiration potentielle (ET/ETP).L’indice SPI ne repose que sur les relevés des précipitations.

- **Indice SPI sur 1 mois**

Une carte de l’indice SPI calculé sur 1 mois ressemble beaucoup à une carte représentant le pourcentage de la normale des précipitations pour une période de 30 jours. L’indice dérivé offre en fait une représentation plus exacte des précipitations mensuelles, car la distribution est normalisée. À titre d’exemple, l’indice SPI sur 1 mois se terminant fin novembre établit la comparaison entre le total mensuel des précipitations pour novembre de l’année examinée et les totaux mensuels des précipitations en novembre de toutes les années pour lesquelles on dispose de relevés. Comme l’indice SPI sur 1 mois représente des conditions à courte échéance, ses applications sont en rapport étroit avec les sécheresses de type météorologique ainsi qu’avec l’humidité du sol à court terme et le stress hydrique subi par les cultures, en particulier au cours de la période végétative. L’indice SPI sur 1 mois peut fournir une approximation des conditions représentées par l’indice d’humidité des cultures, qui fait partie de la série d’indices que regroupe l’indice de sécheresse de Palmer.

Il est possible de mal interpréter l’indice SPI sur 1 mois si l’on ne tient pas compte des caractéristiques climatiques du lieu. Dans les régions où il est normal que les pluies soient faibles au cours d’un mois donné, il est possible d’obtenir des valeurs négatives ou positives importantes alors que l’écart par rapport à la moyenne est relativement faible. L’indice SPI sur 1 mois peut aussi induire en erreur lorsque les valeurs des précipitations sont inférieures à

la normale dans des régions où, pour le mois considéré, le total normal des précipitations est faible. Tout comme les cartes du pourcentage de la normale des précipitations, celles de l'indice SPI sur 1 mois fournissent des informations utiles, mais il faut faire preuve de prudence quand on les analyse.

- **Indice SPI sur 3 mois**

L'indice SPI sur 3 mois établit la comparaison entre le total des précipitations sur la période de trois mois examinée et les totaux des précipitations pour cette même période de trois mois de toutes les années pour lesquelles on dispose de relevés. En d'autres termes, l'indice SPI sur 3 mois se terminant fin février permet de comparer le cumul des précipitations des mois de décembre, janvier et février de l'année examinée aux cumuls de précipitations de décembre à février de toutes les années figurant dans l'historique des observations exécutées à la station étudiée.

Chaque nouvelle année, les données d'observation viennent s'ajouter à la série des relevés dont la durée gagne ainsi une année et les valeurs de toutes les années sont une nouvelle fois prises en compte. Les valeurs peuvent alors évoluer, ce qui sera le cas quand on comparera, d'un point de vue historique et statistique, l'année en cours avec toutes les années précédentes composant la série chronologique des observations.

Il importe de comparer l'indice SPI sur 3 mois à des laps de temps plus longs. Il est possible que des conditions relativement normales voire humides se produisent durant trois mois au milieu d'une sécheresse s'étalant sur une durée plus longue, ce qu'on ne pourrait mettre en évidence qu'en examinant une période relativement longue. En analysant des laps de temps relativement longs, on évite de confondre la présence temporaire d'une période humide avec la fin d'une sécheresse. Il est donc essentiel d'assurer un suivi constant pour déterminer à quels moments un épisode de sécheresse débute et prend fin et pour se garder ainsi d'annoncer à tort le début et la fin d'une sécheresse.

- **Indice SPI sur 6 mois**

L'indice SPI sur 6 mois établit la comparaison entre les précipitations sur la période de six mois examinée et les totaux des précipitations pour cette même période de six mois de toutes les années pour lesquelles on dispose de relevés. À titre d'exemple, un indice SPI sur 6

mois se terminant fin septembre permet de comparer le cumul des précipitations d'avril à septembre de l'année examinée aux cumuls de précipitations de cette même période pour toutes les années écoulées.

L'indice SPI sur 6 mois fournit une indication sur les tendances des précipitations sur une saison et jusqu'à moyenne échéance; on considère que pour cette échelle de temps, il présente encore davantage de sensibilité aux conditions que l'indice Palmer. Un indice SPI sur 6 mois peut se révéler très performant pour mettre en évidence les précipitations sur des saisons bien précises. À titre d'exemple, un indice SPI sur 6 mois se terminant fin mars fournirait une très bonne indication des quantités de précipitations observées au cours de la saison humide allant d'octobre à mars.

- **Indice SPI sur 12 mois**

À ces échelles de temps, l'indice SPI fournit une représentation des régimes de précipitations à longue échéance. L'indice SPI sur 12 mois établit la comparaison entre les précipitations sur une période de 12 mois consécutifs et celles enregistrées sur la même série de 12 mois consécutifs de toutes les années pour lesquelles on dispose de relevés. Étant donné que ces échelles de temps constituent le cumul de périodes plus courtes pouvant se situer au-dessus ou au-dessous de la normale, les valeurs des indices SPI établis pour une période relativement longue tendent à graviter autour de zéro, à moins qu'une tendance humide ou sèche bien distincte ne se soit installée. Les indices SPI pour ces échelles de temps sont en général associés au débit des cours d'eau, au niveau des réservoirs et au niveau des eaux souterraines à relativement long terme. Pour certaines stations, l'indice SPI sur 12 mois présente une bonne corrélation avec l'indice Palmer et les deux indices peuvent mettre en évidence des conditions analogues (WMO, 2012).

Dans la présente étude, les SPI ont aussi été calculés à des échelles de temps de 1 mois, 3 mois, 6 mois, et 12 mois et les résultats indiqués sur les (Fig.50, Fig.51, Fig.52, Fig.53). L'influence de l'échelle de temps sur le nombre et la durée des sécheresses détectées est clairement apparente. Il a été observé que sur des échelles plus petites telles que les séries SPI 1 et SPI 3, les intensités de sécheresse sont très variables et deviennent inférieures à -1 plusieurs reprises. Cependant, sur des délais plus longs tels que les séries SPI 6 et SPI 12,

l'intensité de la sécheresse diminue. Cette variation est due à la grande variabilité de la pluviométrie dans le bassin, puisque le SPI est relatif aux caractéristiques pluviométriques de la zone (L. Ahmed et al., 2017, p. 37).

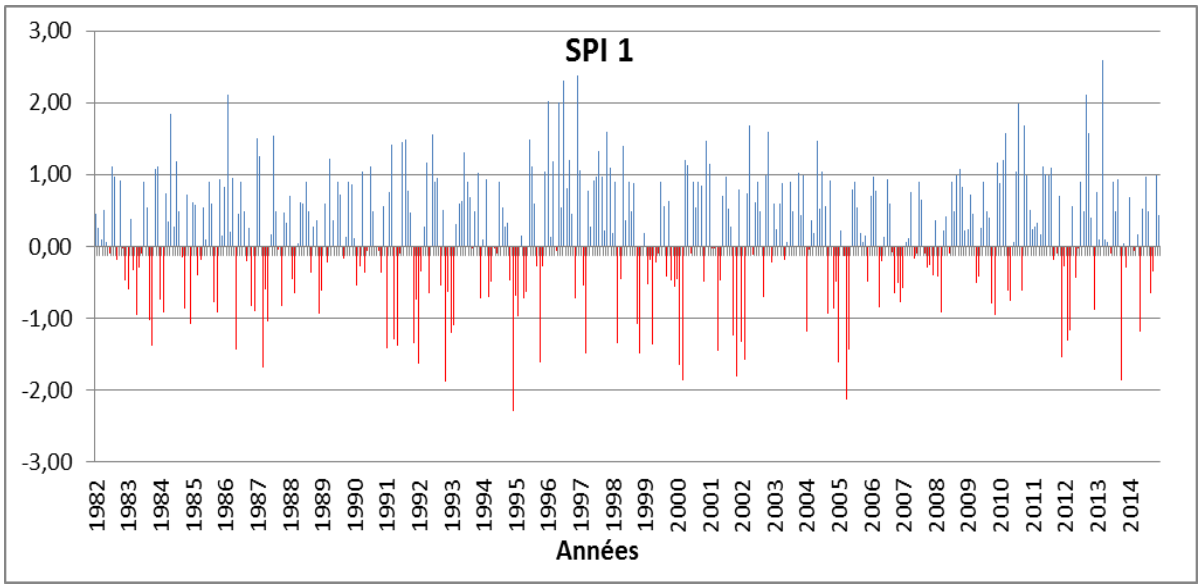

Figure 50: Evolution d'indice SPI a une échelle de temps de 1mois dans le bassin versant de l'oued Ouergha

Des événements de sécheresse ont été détectés pour chaque pas de temps. Le SPI à 1 mois indique des conditions à court terme et peut être étroitement associé à la sécheresse météorologique. Il est également utile pour évaluer l'humidité du sol et le stress des cultures, en particulier pendant la saison de croissance des cultures. Le SPI le plus bas (extrêmement sèche) à une échelle de temps de 1 mois dans le bassin versant de l'oued Ouergha est de -2,29 survenu au cours de l'année 1995 et de -2,13 en 2005.

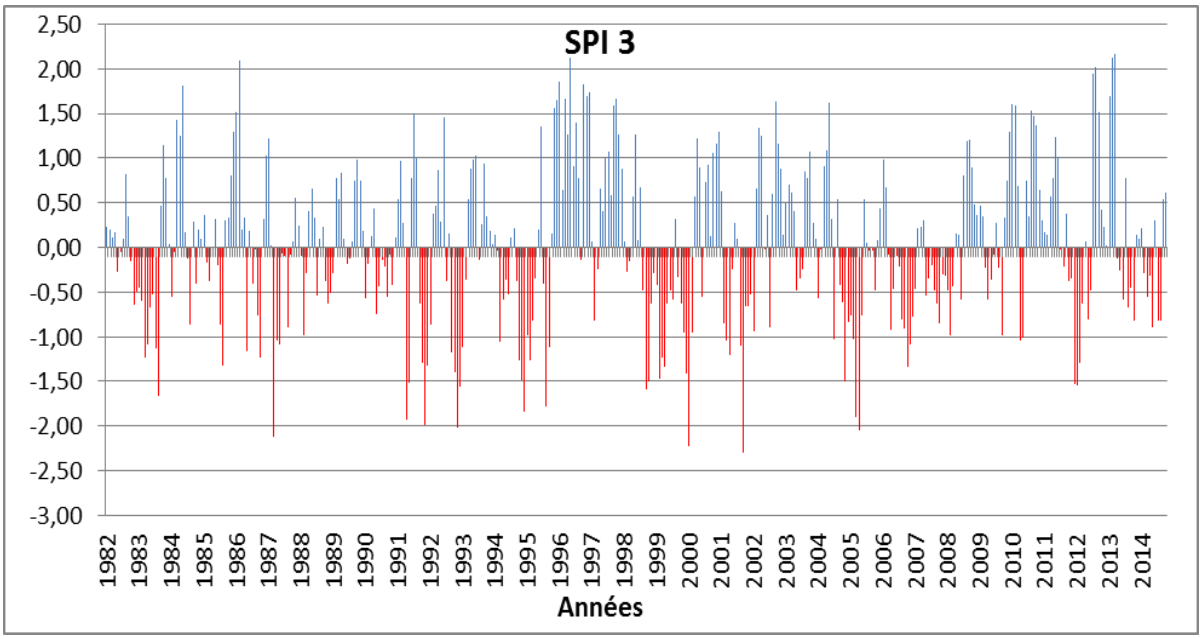

Figure 51: Evolution d'indice SPI a une échelle de temps de 3mois dans le bassin versant de l'oued Ouergha

Un SPI à 3 mois spécifie l'humidité à moyen terme et offre une estimation des précipitations saisonnières. Un SPI sur 3 mois est plus utile pour souligner les conditions d'humidité existantes des principales régions agricoles que de nombreux autres indices hydrologiques. Le SPI le plus bas (extrêmement sèche) dans une échelle de temps de 3 mois dans le bassin versant de l'oued ouergha est de -2,3 survenu au cours de l'année 2001, -2,12 en 1987, -2,23 en 2000, -2,3 en 2001 et -2,05 en 2005.

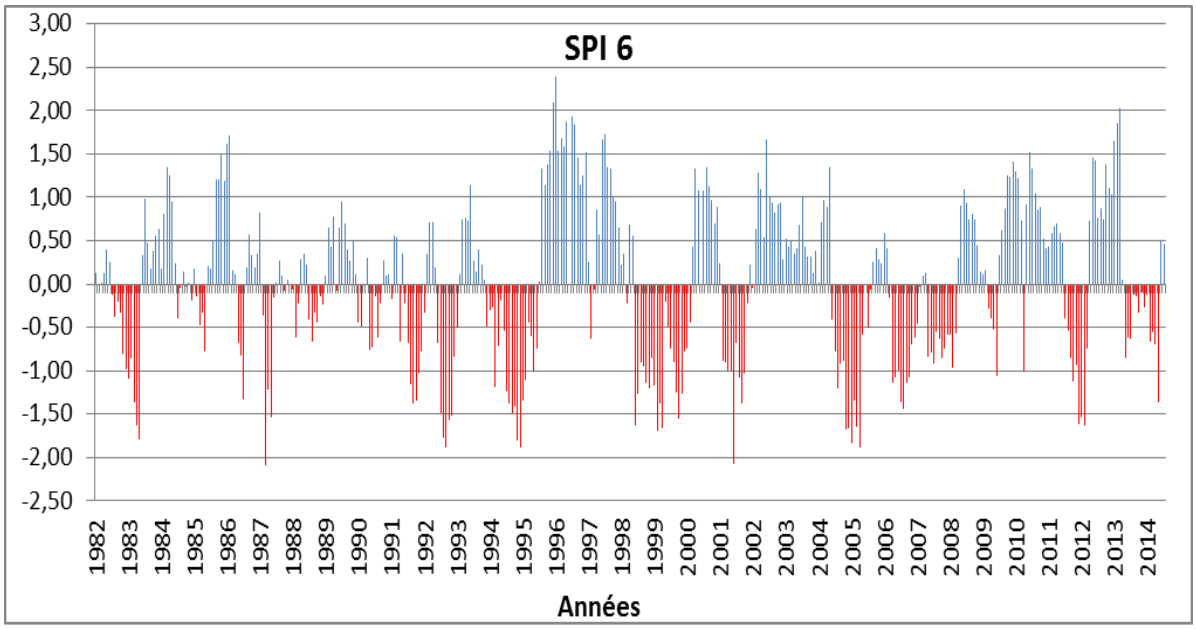

Figure 52: Evolution d'indice SPI a une échelle de temps de 6mois dans le bassin versant de l'oued Ouergha

Le SPI de 6 mois spécifie les tendances saisonnières à moyen terme des précipitations et est très efficace pour afficher les précipitations sur différentes saisons. Le SPI le plus bas (extrêmement sèche) sur une période de 6 mois est de -2.09 survenu au cours de l'année 1987 et 2001 avec une longue durée de sécheresse forte à extrême depuis 1990 a 1995 et une autre depuis 2004 à 2008.

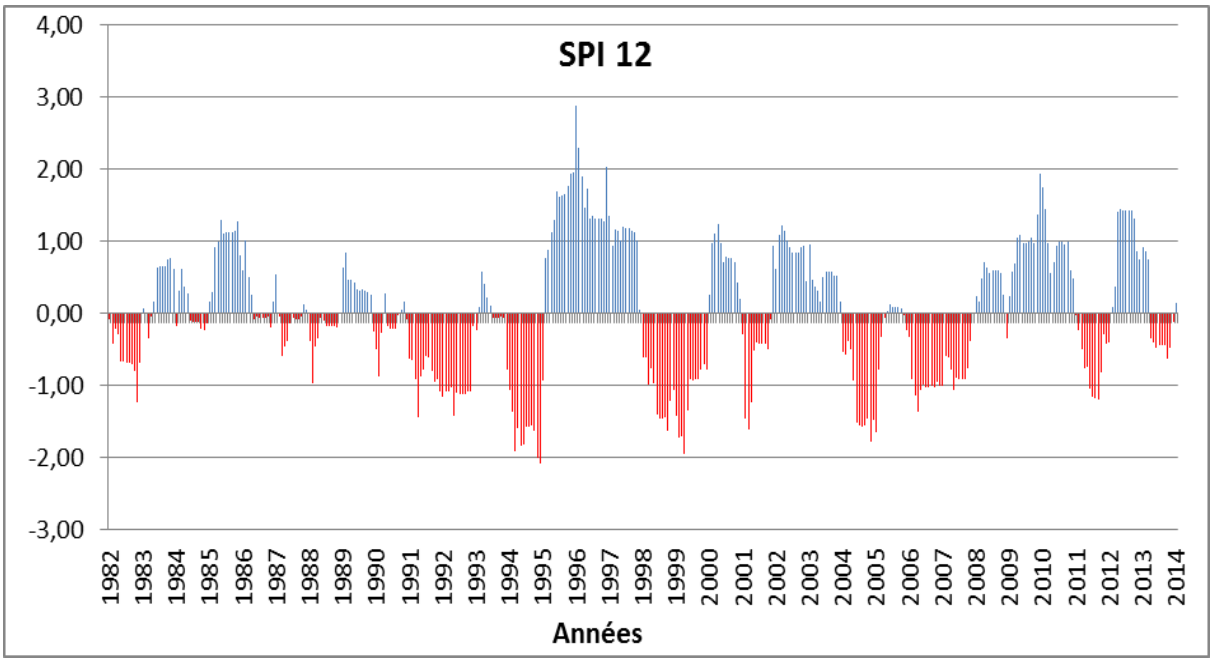

Figure 53: Evolution d'indice SPI a une échelle de temps de 12mois dans le bassin versant de l'oued Ouergha

Les valeurs du SPI sur 12 mois sont généralement liées aux débits des cours d'eau, au niveau des réservoirs et même aux niveaux des eaux souterraines à des échelles de temps étirées. Le SPI le plus bas dans une échelle de temps de 12 mois était de -2,07 (extrêmement sèche), survenu au cours de l'année 1995 avec une longue durée de sécheresse forte à extrême depuis 1990 à 1995 et une autre depuis 2004 à 2008.

L'indice de sécheresse SPI 12 a permis de voir les principales années de sécheresse sur le bassin entre 1982 et 2014. Pour la période d'étude, les sous-périodes 1990-1995 et 2004-2008 reste les plus déficitaires. En revanche, sur les sous-périodes 1995-1998 et 2008-2011 sont les plus humides, Cet excédent pluviométrique s'explique par l'augmentation importante des précipitations en 1995 et elles se reproduisent en 2008. La période 1995-1998 est la plus humide, par rapport à la normale. De plus, les lignes de tendance des SPI suggèrent une augmentation de la nature des SPI à toutes les échelles. Cela implique que la fréquence des sécheresses dans le bassin a diminué au cours de cette période. La tendance à la hausse des précipitations diminue donc la vulnérabilité du bassin à la sécheresse.

La pire période de sécheresse a eu lieu depuis 1990 à 1995 durant laquelle une durée de cinq années consécutives de sècheresse a été observée dans le bassin versant, les valeurs minimales de SPI étaient inférieures à -2 sur toutes les échelles de temps.

Les résultats ont montré que les indices SPI sont capables de reproduire les épisodes de sécheresse survenus dans le bassin versant de l'oued Ouergha au cours de la période 1982-2014. Les événements de sécheresse détectés correspondent aux cas où la valeur de SPI dépasse un seuil donné, ce qui indique qu'une certaine zone est affectée par un événement. Les valeurs des SPI à différentes échelles de temps montrent que les sécheresses dans le bassin versant de l'oued Ouergha étaient généralement d'intensité modérée à légère. Les sécheresses de 1987, 1995, 2001 et 2005 étaient des sécheresses sévères à extrêmes, pour une échelle de temps de 1 mois et 12 mois l'intensité des sécheresses étaient extrêmes, En revanche les échelles de temps de 3 mois et 6 mois étaient des sécheresses sévères en 1995 et extrêmes en 2001 et 2005.

L'analyse des résultats de l'indice SPI conforte d'autres études au bassin versant de l'oued l'Ouergha comme (Boukrim, 2011) qui avaient conclu à un déficit pluviométrique depuis 1982 et la persistance de sécheresse précisément 1987,1995, 2001 et 2005. Les résultats de l'indice SPI conforte aussi les résultats obtenus de l'analyse de débit journalier d'une année sèche.

B. Déciles des précipitations (DP)

DP a été développée par Gibbs et Maher (1967) pour pallier aux faiblesses du pourcentage à la normale. Cette approche permet de connaître la fréquence d'un événement. Elle divise la distribution des fréquences des événements en 10 parties représentant chacune 10 % de la distribution. Le cinquième décile représente donc la médiane et le dixième décile le volume maximal de précipitation reçu pour une région et pour une période de temps (Beaudin, 2006).

C'est une méthode uniforme de classification des sécheresses qui peut être appliquée tant à l'échelle locale que continentale, sur des périodes variant du mois à une année. C'est une formule simple qui ne nécessite qu'une seule donnée, la précipitation, et qui comporte moins d'hypothèses que les méthodes plus complexes. Il est par contre nécessaire de posséder

des données climatiques portant sur une longue période (minimum de 30 ans) afin de calculer les déciles de façon précise et significative. Comme pour le PN, la précision et la représentativité spatiale des déciles sont étroitement reliées à la densité du réseau de stations météorologiques utilisées.

$$\mathbf{DP} = \%\ \text{des fréquences cumulatives}\ /10$$

Le tableau suivant représente la classification des déciles de précipitation (Tab.19):

Tableau 19: Classification des déciles de précipitation

Classifications de DP	Valeur
Sécheresseextrême	1
Sécheressesévère	2
Sécheressemodérée	3
Sécheressefaible	4
Normal ouhumid	≥ 5

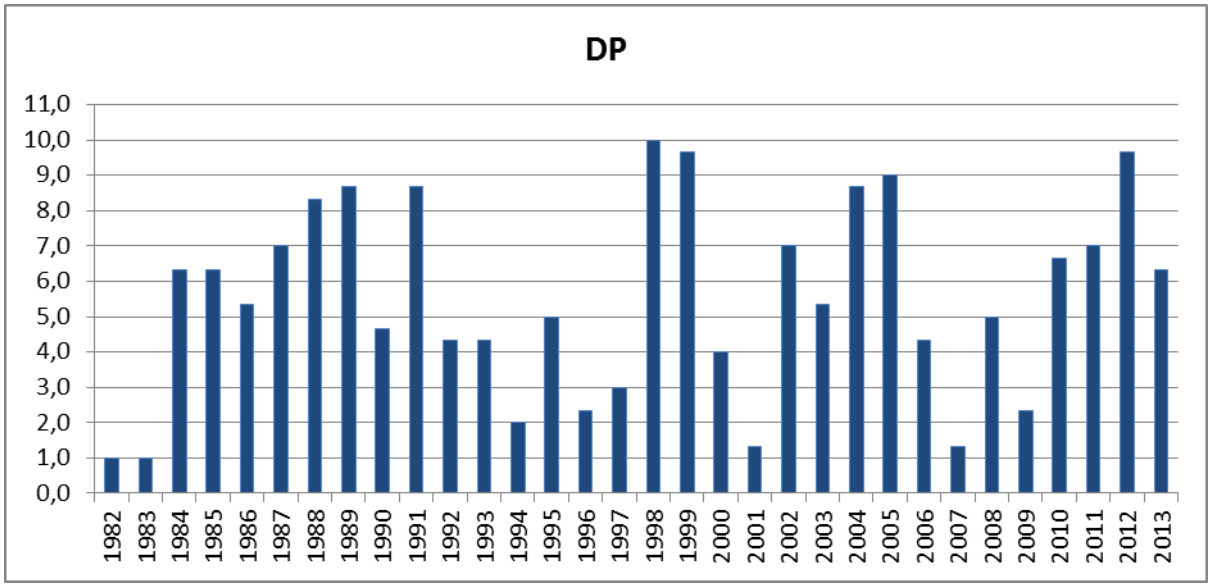

Figure 54: Evolution du (DP) pour des durées annuelles

Le calcul de Déciles de précipitation (DP) à l'échelle annuelle 12 mois (Fig.54) nous montre que les années extrêmement sèches sont 1982-1983, sévèrement sèches 1994-2001-

2007, modères a faibles 1996-1997-2000-2006-2008-2009, les autres années sont normales ou humides.

C. Le pourcentage à la normale (PN)

Il représente le pourcentage de l'écart des précipitations d'une période par rapport à la normale historique de cette période. La normale étant habituellement la moyenne des précipitations totales de la période, calculée à partir d'environ 30 ans de données. Cet indicateur est appliqué à l'échelle locale ou régionale pour des périodes de temps variant de 1 mois à quelques mois, voire même une année temps (Beaudin, 2006).

$$\boldsymbol{PN} = (\boldsymbol{P} \,/\, \boldsymbol{Pm}) * \mathbf{100[\%]}$$

P : Précipitation totale d'une période (mm).

Pm : Précipitation moyenne historique d'une période (mm).

Une condition nécessaire à l'application de cette méthode est la normalité de la distribution des données de précipitation.

Le tableau suivant représente la classification de pourcentage à la normale (Tab.20):

Tableau 20: Classification de PN

Classification de PN	Valeur
Extrêmement sec	< 40
Sécheressesévère	40 à 55
Sécheressemodérée	55 à 70
Sécheressefaible	70 à 80
Normal	80 à100
Humide	100<

- Les avantages de la méthode PN

L'indice PN est facile à utiliser par rapport des autres indices, Le PN est un indicateur très efficace lorsqu'il est utilisé pour comparer une seule région ou une seule saison.

- Les inconvénients de la méthode PN

En région hétérogène ou pour différentes saisons, il existe une grande variabilité spatiale et temporelle des précipitations, son interprétation devient plus difficile (Programme de gestion intégrée des sécheresses 2016).

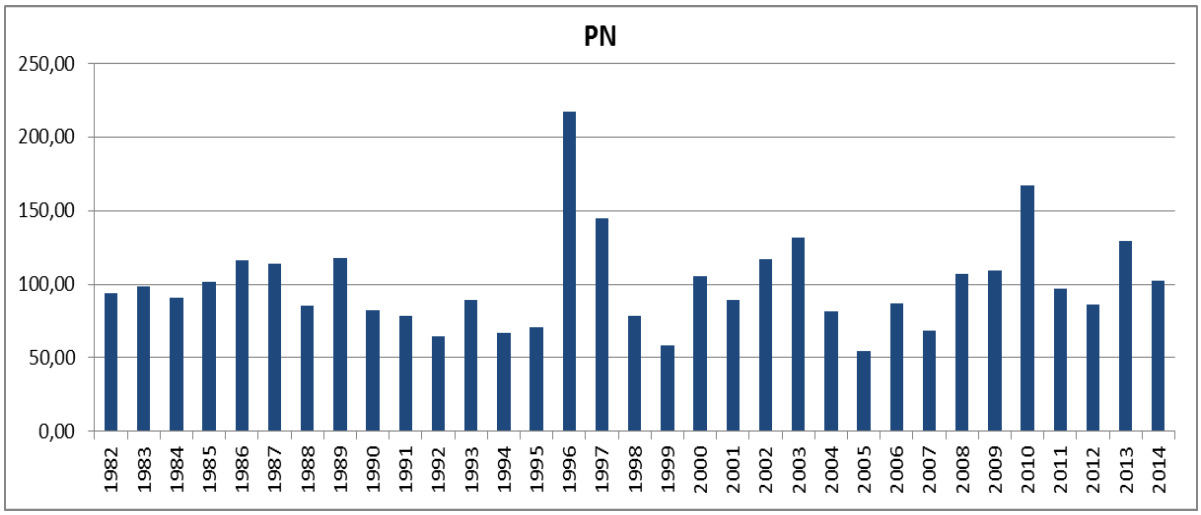

Figure 55: Evolution du (PN) pour des durées annuelles

Le calcul du pourcentage à la normale (PN) à l'échelle annuelle (Fig.55) nous montre que l'année 2005 est sévèrement sèche, les autres années sont modérées a humides.

D. Statistique Z-Score

Cet indice est calculé en soustrayant la moyenne à long terme d'une valeur de précipitation individuelle, puis en divisant la différence par l'écart-type. Le Z-Score ne nécessite pas d'ajuster les données en les ajustant aux distributions Gamma ou Pearson Type III. Pour cette raison, il est supposé que le Z-Score pourrait ne pas représenter les échelles de temps les plus courtes. En raison de son calcul simple et de son efficacité, le Z-Score a été utilisé dans de nombreuses études sur la sécheresse. Divers chercheurs ont également salué le fait qu'il soit aussi bon que le SPI et qu'il peut être calculé sur plusieurs pas de temps. Il peut également prendre en charge les valeurs manquantes dans les séries de données telles que CZI. Le Z-Score est donné par l'équation (Vinit.K, Jain a.n, Rajendra.P, Pandey.b, Manoj K. Jain.c,H.R.Byun d,2015).

$$\varphi_{ij}=\frac{x_{ij}-\overline{x_i}}{\sigma_i}$$

Où :

φ_{ij} : Variante standardisé, également appelé Z-Score,

x_{ij} : La précipitation dans un mois spécifique (mm),

$\overline{xl}$: La précipitation mensuelle moyenne (mm),

σ_i : L'écart type de toute échelle de temps (mm).

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\left(x_{ij} - \bar{x}_i\right)^2} \text{ Et} \bar{x}_i = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} x_{ij}$$

Le tableau suivant représente la classification de Z-Score (Tab.21):

Tableau 21: classification de Z-scores

Classifications de z-score	Valeur
Pas de sécheresse	>0,25
Sécheresse faible	0,25 à -0,25
Sécheresse légère	-0,25 à -0,52
Sécheresse modérée	-0,52 à -0,84
Sécheresse sévère	-0,84 à -1,25
Extrêmement sec	<-1,25

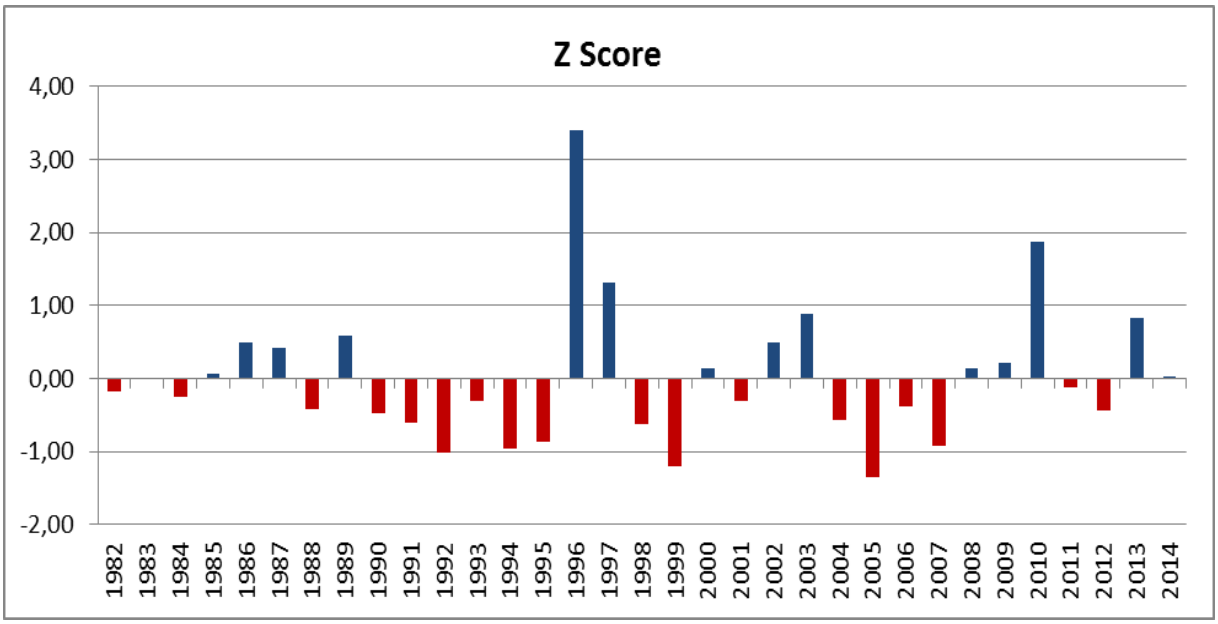

Figure 56: Evolution du z-score pour des durées annuelles

Le calcul du Statistique Z-Score à l'échelle annuelle (Fig.56) nous montre que l'année 2005 est extrêmement sèche, les années 1992-1994-1995-1999-2007 est sévèrement sèches, les autres sont de sécheresse modérée a humide.

E. Comparaison entre PN et DP et Z-score

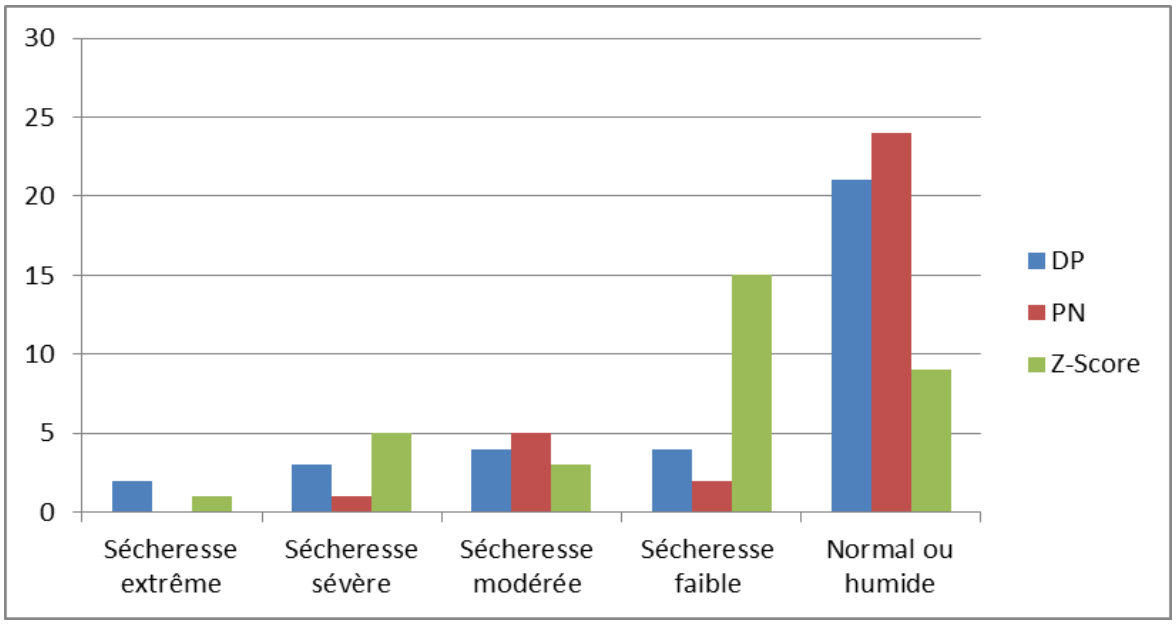

Figure 57: comparaison entre DP12, PN12 et Z-score12

La comparaison entre les indices (PN, DP et Z-score) pour 12 mois (Fig.57) nous montre que la classe de sécheresse « normal où humide» avait le nombre maximal des années par rapport aux autres. Les résultats étaient très proches pour la classe « modérément sèche »et un peu éloigné pour les autres classes.

F. Indice d'anomalie de pluviosité (RAI)

L'indice utilise les valeurs normalisées des précipitations établies à partir de l'historique des relevés à une station particulière. La comparaison avec la période courante donne une perspective historique aux valeurs de sortie. Cet indice a été calculé par le logiciel "MDM" (Meteorological Drought Monitoring).

L'indice permet d'analyser les sécheresses qui ont une incidence sur l'agriculture, les ressources en eau et d'autres secteurs, car, du fait de sa souplesse, il peut être établi à différentes échelles temporelles (Kraus, E.B., 1977).

- Points forts: Il est facile à calculer, ne comporte qu'un paramètre d'entrée (les précipitations) et peut être analysé aux échelles mensuelles, saisonnières ou annuelles.

- Points faibles: Il faut disposer d'une série complète de données et estimer les valeurs manquantes. Les fluctuations au cours de l'année doivent être faibles par rapport aux variations temporelles.

Tableau 22: classification de RAI

Classification de RAI	Valeur
Extreme humide	>0,3
humide	0,3 a -0,3
normal	0,3 a -1,2
secheresse modere	-1,2 a -2,1
secgeresse severe	_2,1 a -3
sechresse extreme	<-3

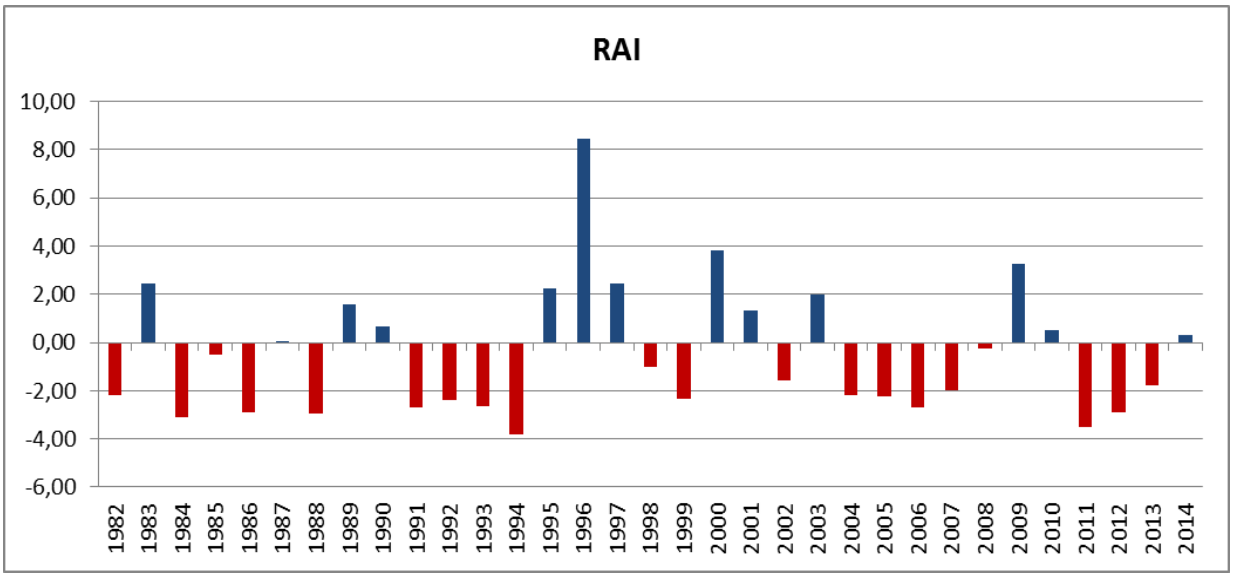

Figure 58: Evolution du RAI pour des durées annuelles

Le calcul du Statistique Z-Score à l'échelle annuelle (Fig.58) nous montre que l'année 1994 est extrêmement sèche et deux longues périodes sèches 1990 à 1995 et 2004 à 2008.

G. Intensité de la sécheresse (DI)

Cet indice a été calculé par le logiciel "MDM" (Meteorological Drought Monitoring).

Tableau 23: classification de DI

Classification de DI	Valeur
Extrêmement sec	1
Sécheressesévère	2
Sécheressemodérée	3
Sécheressefaible	4
Normal ou humide	5=<

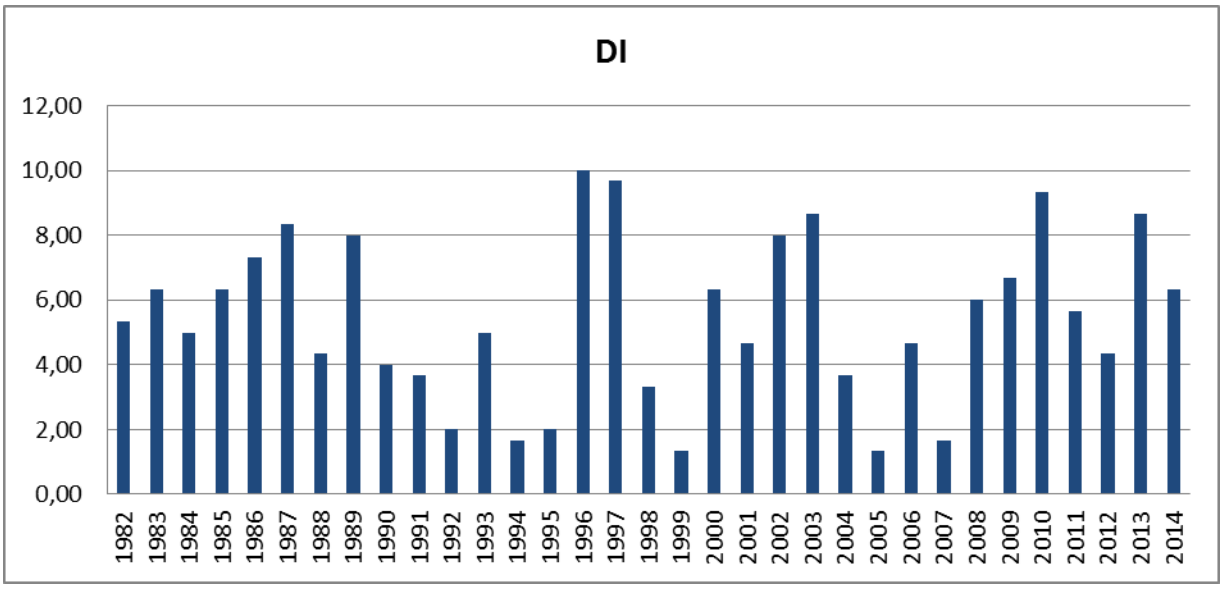

Figure 59: Evolution du DI pour des durées annuelles

Le calcul d'Intensité de la sécheresse (DI) à l'échelle annuelle (Fig.59) nous montre que les années 1992-1994-1995-1999-2005-2006 est sévèrement sèches. Les autres années sont modérées a humides.

4. Conclusion

L'indice de sécheresse SPI 12 a permis de voir les principales années de sécheresse sur le bassin entre 1982 et 2014. Les sous-périodes 1990-1995 et 2004-2008 reste les plus déficitaires, La pire période de sécheresse a eu lieu depuis 1990 à 1995 durant laquelle une durée de cinq années consécutives de sècheresse a été observée dans le bassin versant, les valeurs minimales de SPI étaient inférieures à -2 sur toutes les échelles de temps.

Les résultats ont montré que les indices SPI sont capables de reproduire les épisodes de sécheresse survenus dans le bassin versant de l'oued Ouergha au cours de la période 1982-2014. Les événements de sécheresse détectés correspondent aux cas où la valeur de SPI dépasse un seuil donné, ce qui indique qu'une certaine zone est affectée par un événement. Les valeurs des SPI à différentes échelles de temps montrent que les sécheresses dans le bassin versant de l'oued Ouergha étaient généralement d'intensité modérée à légère. Les sécheresses de 1987, 1995, 2001 et 2005 étaient des sécheresses sévères à extrêmes, pour une

échelle de temps de 1 mois et 12 mois l'intensité des sécheresses étaient extrêmes, En revanche les échelles de temps de 3 mois et 6 mois étaient des sécheresses sévères en 1995 et extrêmes en 2001 et 2005.Les sécheresses de 1987, 1995, 2001 et 2005 étaient des sécheresses sévères à extrêmes, pour une échelle de temps de 1 mois et 12 mois l'intensité des sécheresses étaient extrêmes, En revanche les échelles de temps de 3 mois et 6 mois étaient des sécheresses sévères en 1995 et extrêmes en 2001 et 2005.L'analyse des résultats de l'indice SPI conforte d'autres études au bassin versant de l'oued l'Ouergha comme (Boukrim, 2011) qui avaient conclu à un déficit pluviométrique depuis 1982 et la persistance de sécheresse précisément en 1987,1995, 2001 et 2005.

Les résultats de l'indice SPI conforte les résultats obtenus les autres indices de sécheresses DP, PN, Z-score-RAI et DI, une sécheresse sévère a extrême précisément en 1995 et 2005, des périodes déficitaires avec une sécheresse sévère a extrême depuis 2004 à 2008 et aussi depuis 1990 a 1995 qu'elle était la pire période déficitaire durant toute la période étudier.

Conclusion générale

Les précipitations recueillies dans les stations du bassin versant de l'Ouergha se caractérisent par des fluctuations entre les différentes stations ainsi qu'entre les cycles hydrologiques. On remarque une diminution des précipitations le long des stations du cours d'eau de l'oued de l'Ouergha en allant de l'amont vers l'aval du bassin versant. Dans chacune des stations, on observe que les mois de Juin, Juillet et Août reçoivent des précipitations faibles et montrent que le régime pluviométrique du bassin est de type méditerranéen.

L'analyse des températures a montré que le mois de Janvier est le plus froid et le mois d'Août est le plus chaud avec une moyenne respective de 11,5°C et 30.3 °C. La température moyenne annuelle est de 18,9 °C. Par ailleurs, la combinaison entre la température et la précipitation par des différentes méthodes a montré que la station de Hajria est globalement sous un climat semi humide. On note que le calcul de l'évapotranspiration réelle par des différentes méthodes a donné une valeur moyenne de 569,6 mm. Cette valeur reste toutefois inférieure à la précipitation moyenne annuelle qui est de 808 mm et ainsi en résulte un surplus qui va contribuer à l'alimentation des nappes souterraines ou l'alimentions du ruissellement superficiel. D'après le bilan hydrique du bassin versant, on peut distinguer quatre périodes : une période déficitaire qui s'étend du mois Juin jusqu'au mois de Septembre. La deuxième période pendant le mois d'Octobre correspond à la période de restitution des réserves en eau du sol. Un surplus est observé à la troisième période qui commence à partir du mois Novembre jusqu'au mois d'Avril. La dernière la période débute du mois Avril jusqu'au mois de Juin et est considérée comme une phase d'épuisement des réserves facilement utilisables.

L'étude du régime hydrologique du bassin versant lui a attribué un régime typique méditerranéen, caractérisé par l'abondance pluviale à très fort débits hivernaux, donc des fortes crues. Ce phénomène se reproduit à l'échelle de l'année et marque des saisons d'abondance hydrologique.

Le module annuel des débits au niveau de la station d'Ain Aicha est plus important que celui des stations des Galaz et Tabouda, ceci reflète la situation amont-aval des deux

stations et la succession de périodes humides et de périodes sèches qui est confirmée par le test de simple cumul.

La méthode des écarts (Ec) des débits moyens annuels aux débits moyens interannuels a révélé une alternance de périodes excédentaires et de périodes déficitaires, non conforme dans les trois stations, avec l'importance des périodes déficitaires par rapport à celles excédentaires.

Les autres irrégularités interannuelles de l'écoulement sont mesurées par les variations du coefficient d'hydraulicité (CH) et complétées par le coefficient de variation (CV), ainsi que le coefficient d'immodération (R). Ces coefficients permettent de conclure respectivement des fluctuations hydroclimatiques, une variabilité à l'échelle spatiale et une variabilité des débits extrêmes.

L'étude de la relation entre les précipitations et les lames d'eau écoulée permet de conclure globalement un synchronisme avec un maximum de précipitation en Novembre et Décembre suivi d'un maximum de débits avec un retard d'un mois à deux mois en Février.

Le bilan hydrologique par sa formulation traduit mieux la relation qui existent entre les volumes d'eau précipités sur un bassin et ceux écoulés à son exutoire. Son estimation permet de conclure que les pourcentages des différentes phases d'écoulement (écoulement totale, ruissèlement et infiltration prennent respectivement 29.3%, 18.69% et 10.63%.

L'indice de sécheresse SPI 12 a permis de voir les principales années de sécheresse sur le bassin versant entre 1982 et 2014. Les sous-périodes 1990-1995 et 2004-2008 reste les plus déficitaires, alors que la pire période de sécheresse a eu lieu depuis 1990 à 1995 durant laquelle une durée de cinq années consécutives de sècheresse a été observée dans le bassin versant. En effet, les valeurs minimales de SPI étaient inférieures à -2 sur toutes les échelles de temps.

Les résultats ont montré que les indices SPI sont capables de reproduire les épisodes de sécheresse survenus dans le bassin versant de l'oued Ouergha au cours de la période 1982-2014. Les événements de sécheresse détectés correspondent aux cas où la valeur de SPI dépasse un seuil donné, ce qui indique qu'une certaine zone est affectée par un événement. Les valeurs des SPI à différentes échelles de temps montrent que les sécheresses dans le bassin versant de l'oued Ouergha étaient généralement d'intensité modérée à légère. Les sécheresses de 1987, 1995, 2001 et 2005 étaient des sécheresses sévères à extrêmes. Pour une

échelle de temps de 1 mois et 12 mois, l'intensité des sécheresses étaient extrêmes. En revanche, les échelles de temps de 3 mois et 6 mois étaient des sécheresses sévères en 1995 et extrêmes en 2001 et 2005.

L’analyse des résultats de l’indice SPI conforte d’autres études au bassin versant de l’oued l’Ouergha notamment ceux de Boukrim (2011) qui avaient conclu un déficit pluviométrique depuis 1982 et la persistance de la sécheresse précisément en 1987,1995, 2001 et 2005.

Les résultats de l’indice SPI conforte les résultats obtenus les autres indices de sécheresses DP, PN, Z-score-RAI et DI ; une sécheresse sévère à extrême précisément en 1995 et 2005, des périodes déficitaires avec une sécheresse sévère à extrême depuis 2004 à 2008 et aussi la période 1990 à 1995 qui constitue la pire période déficitaire durant toute la période étudiée.

Références

Abdellah R., 1997: Les bassins néogènes du sillon sud rifain et du Rif nord oriental (Maroc): sédimentologie, paléogéographie et évolution dynamique. Thèse. Doct. Es. Sciences. Fac. Sidi Mohamed Ben Abdallah, Fès.

ABHS-Fès : données précipitations mensuelles, annuels, débits, températures (1982 à 2015).

Afkir E., 1985: Le bassin versant d'Inaouène: caractéristiques climatiques et comportement hydrologique. Thèse 3ème cycle, Univ, Toulouse-le Mirail, 249p.

Ahmed L., Parvase S., Madjid M. & Kanth R. H. (2016) : Analysis of Historical Rainfall Data for Drought Investigation Using Standard precipitation Index (SPI) Under Temperate Conditions of Srinagar Kashmir, 13(25), 29-38.

Andrieux J. 1971 : La structure du Rif central. Etude des relations entre la tectonique de compression et les nappes de glissement dans un tronçon de la chaîne alpine. Notes et mem. Du serv. Géol. Maroc, 235, 155p.

Aserby L., De luca P., Bourgois J., & Chotin P., 1987 : Resédimentations d'âge Sénonien dans le rif central (Maroc) : Conséquence sur les divisions paléogéographiques et structurale de la chaîne, J. Africain Earth. Sci., 6, 9-17.

Aserby L., De luca P., Bourgois J., & Chotin P., 1992 : Imoprtance d'une tectonique de distension pliocène dans le rif central (Maroc : la nappe de Ketama existe-t-elle ?, J. Africain Earth. Sci., 15, 49-57.

Boukrim S., 2011: Etude d'impact des changements cimatiques sur les ressources en eau au bassin de l'Oueghra (Rif – Maroc), Mémoire Master Hydrologie de Surface et Qualité des Eaux, FST Fès, 48 p.

Coutagne A., 1954: Quelques considérations sur le pouvoir évaporant de l'atmosphère, le déficit d'écoulement effectif et le déficit d'écoulement maximum. La houille blanche, pp:360-369.

Didon J., durand Dulga M.,& Kornprobst J., 1973: Homologie géologique entre les deux rives du détroit de gibralter. Bull. Soc. Géol. France, 8, t.17, 77-105.

Favre Ph. 1995: Analyse quantitative du rifting et de la relaxation thermique de la partie occidentale de la marge transformante nord-africaine : le Rif externe (Maroc). Comparaison avec la structure actuelle de la chaîne. Geodinamica Acta (Paris), 8, 2, 59-81.

Frizon D. ; Andrieux J. & Guezou J-C. 1991 : Cinématique des chevauchements néogénes dans l'arc bético-rifain : discussion sur le modèle géodynamique. Bull. Soc. Géol. France, t. 162, 4, 611-626.

GIEC, 2007 : Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A. (publié sous la direction de~)]. GIEC, Genève, Suisse… 103 pages.)

Guttman N.B., 1994 : On the sensitivity of sample L moments to sample size. Journal of Climate, 7(6):1026–1029.

Haida, S., 2000: Transport de matière et bilan de l'érosion mécanique et de l'altérationchimique sur le bassin versant de zone semi-aride: le Sebou. Thèse de Doctorat es sciences, Fac. Sc. Kénitra, Univ. Ibn Tofaïl, Maroc.

Beaudin I., 2006 : Potentiel de la télédétection pour le suivi et la caractérisation de la condition de sécheresse en milieu méditerranéen, programme en sciences géomatiques faculté de foresterie et géomatique université Laval.

Kraus, E.B., 1977: «Subtropical droughts and cross-equatorial energy transports», Monthly Weather Review, 105(8):1009–1018.

Msatef K., 2015 : Etude hydrologique du bassin versant de l'Oued Ouergha, Nord du Maroc.

Karim Msatef, Lahcen Benaabidate, Aziz Bouignane, 2018 : Hydrological and hydroclimatic regimes in the Ouergha watershed. E3S Web of Conferences 37, 04001 (2018) https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183704001 EDE6-2017

Mckee T.B., Doesken N.J., Kleist J., 1993 : The relationship of drought frequency and duration times scales. American Meteorological Society. 8th conference on Aplied Climatology, 17-22 Janvier,Anaheim, CA. p.179- 184.

Mckee T.B., Doesken N.J., Kleist J.,. 1995 : Drought monitoring with multiple times scales. American Meteorological Society.9th conference on Applied Climatology, 15-22 Janvier, Dalas. TX.p. 233-236.

Musy, A. 2001. e-drologie. Ecole Polytechnique Fédérale, Lausanne, Suisse.

Musy A. et Higy, C., 1998 : Hydrologie Appliquée, Edition HGA, Bucarest, 368p.

OMM .2013. 2001-2010 : une décenie d'extrême climatique. Organisation Météorologique Mondiale, communiqué de prese No 976, URL : http:/www.wmo.int/pages/mediacentre/pres_releases/pr_976_fr.html

OMM. .2007 : Guide to climatological practices, Third editon, WMO N° 100, Geneva, 113 p.

Programme de gestion intégrée des sécheresses. (2016), Manuel des indicateurs et des indices de sécheresse, Organisation météorologique mondiale (OMM), pp16-40.

Roche M., 1963: Hydrologie de surface, Gauthier-Villars Editeur, Paris, 429 p.

Sauvage C., 1960 : Le quotient pluviométrique d'Emberger, son utilisation et la présentation géographique de ses variations au Maroc. Ann .Serv . phys. globe météo r. I.S.C.

Sebbar A, Badri W, Fougrach H, Hsaine M et Slaoui A, (2011). : Etude de la variabilité du régime pluviométrique au Maroc septentrional (1935-2004), Sécheresse vol. 22, n° 3, pp48-139.

Suter G. 1980 : Carte géologique de la chaîne rifaine. Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc. N°245.

Suter G., 1967 : Note explicative de la carte géologique du rif, région de moyen Ouarrha (feuille de taounate, Aïn Aïcha, tissa) au /50000éme. Note et Mém. Serv. Géol. Maroc, n° 166 bis.

Thornthwaite 1955: "The water balance", Climatology, 8:1-104, 1955.

Turc L., 1961: Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle, formule simplifiée et mise à jour. Ann. Agron. Tome XII, pp. 13-49.

Vinit.K, Jain a.n, Rajendra.P, Pandey.b, Manoj K. Jain.c,H.R.Byun d,(2015),

Comparison of drought indices for appraisal of drought characteristics in the Ken River Basin,Pukyong National University, Korea.

WMO, (2012), Guide d'utilisation de l'indice normalise de précipitations, Organisation météorologique mondiale (OMM), pp15-25.

Centre d'Etudes Doctorales : Sciences et Techniques de l'Ingénieur

Titre de la thèse : Variabilité climatique et sécheresse hydrologique dans le bassin versant de l'oued Ouergha.

Nom et Prénom : MSATEF KARIM

Résumé de la thèse

Les sécheresses font partie des phénomènes météorologiques extrêmes résultant de la variabilité et l'irrégularité des précipitations et de l'effet des changements climatiques durant ces dernières décennies. Ces sécheresses engendrent de graves conséquences économiques, environnementales et sociales.

L'objectif de cette étude est de caractériser la sécheresse climatique au niveau du bassin versant de l'oued l'Ouergha, situé dans le Maroc septentrional, à travers le calcul de l'indice standardisé de précipitations (SPI) à multi échelle et basé sur les précipitations pour reproduire les sécheresses observées dans le bassin versant de l'oued l'Ouergha pour la période 1982-2014. Par ailleurs, d'autres indices de sécheresses ont été calculés, notamment DP, PN, Z-score-RAI et DI.

Les résultats obtenus après le calcul de l'indice SPI à différents échelles de temps de 1, 3, 6 et 12 mois montrent que les sécheresses dans le bassin versant de l'oued Ouergha étaient généralement d'intensité modérée à légère. Cependant, les sécheresses de 1987, 1995, 2001 et 2005 étaient des sécheresses sévères à extrêmes avec des périodes déficitaires d'une sécheresse sévère à extrême 1990-1995 et 2004-2008.

Les résultats de l'indice SPI conforte les résultats obtenus par les autres indices de sécheresses DP, PN, Z-score-RAI et DI. Ils affichent une sécheresse sévère à extrême précisément en 1995 et 2005, des périodes déficitaires avec une sécheresse sévère à extrême depuis 2004 à 2008 et aussi depuis 1990 à 1995 qui était la pire période déficitaire durant toute la période d'observation.

Mots clés : Sécheresse, Intensité, Changement climatique, l'indice standardisé précipitations (SPI), bassin versant de l'oued l'Ouergha.

جامعة سيدي محمد بن عبد الله بفاس
UNIVERSITÉ SIDI MOHAMED BEN ABDELLAH DE FES
كلية العلوم والتقنيات فاس
FACULTÉ DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE FÈS

Centre d'Etudes Doctorales : Sciences et Techniques de l'Ingénieur

N° d'ordre 54/2021

THESE DE DOCTORAT

Présentée par

Mr : KARIM MSATEF

Discipline : Géo-ressources et Environnement

Spécialité : Eau et Environnement

Sujet de la thèse : Variabilité climatique et sécheresse hydrologique dans le bassin versant de l'oued Ouergha.

Formation Doctorale : Sciences et Génie de la matière, de la Terre et de la Vie

Thèse présentée et soutenue le 10/07/2021 Devant le jury composé de :

Nom Prénom	Titre	Etablissement	
Abdelkader EL GAROUANI	PES	Faculté des Sciences et Techniques de Fès	Président
Jamal Eddine STITOU EL MESSARI	PES	Faculté des Sciences de Tétouan	Rapporteur
Abdelhadi EL OUALI	PES	Faculté des Sciences de Meknès	Rapporteur
Abderrahim LAHRACH	PES	Ecole Nationale des Sciences Appliquées de Fès	Rapporteur
Ourania TZORAKI	PH	Université Lesvos Grèce	Examinateur
Lahcen BENAABIDATE	PES	Faculté des Sciences et Techniques de Fès	Directeur de thèse

Youssef BROUZIYNE	UM6	Invité

Laboratoire d'accueil : Ecologie Fonctionnelle et Génie de l'Environnement.

Etablissement : Faculté des Sciences et Techniques de Fès.

Dédicace

C’est avec un grand plaisir que je dédie ce travail

Aux êtres les plus chers de ma vie

Ma Mère, Choukri Halima

A mon père, Msatef houssine

Qui n’ont jamais cessé de m’encourager de m’avoir aidé avec leur soutien moral leurs conseils et surtout l’éducation qui m’ont apporte

Que dieu leurs préserve une très bonne santé et une longue vie plein de joie et de bonheur.

Aussi à mes frères et à tous les membres de ma famille.

A tous mes collègue et amis sans exception.

Msatef karim

Remerciements

Je tiens à remercier Monsieur Lahcen Benaabidate, Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de Fès, qui m'a fait partager ses brillantes intuitions et qui m'a encadré tout au long de cette thèse. Qu'il soit aussi remercié pour sa disponibilité permanente, sa gentillesse et pour les nombreux encouragements qu'il m'a prodiguée.

J'adresse tous mes remerciements à Monsieur Jamal Eddine STITOU EL MESSARI Professeur à la Faculté des Sciences de Tétouan, Monsieur Abdelhadi EL OUALI Professeur à la Faculté des Sciences Meknès, Monsieur Abdelkader EL GAROUANI Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de Fès et Monsieur Abderrahim LAHRACH Directeur de l'Ecole Nationale des Sciences Appliquées de Fés qui m'ont fait l'honneur d'être rapporteurs de ma thèse, ils ont pris le temps de m'écouter et de discuter avec moi. Leurs remarques m'ont permis d'envisager mon travail sous un autre angle. Pour tout cela je les remercie.

J'exprime ma gratitude à Madame Ourania TZORAKI, Professeur à l'Université de Lesvos Grèce, qu'elle a bien voulu être examinateur.

Je remercie toutes les personnes avec qui j'ai partagé mes études et notamment ces années de thèse.

.

Résumé

Les sécheresses font partie des phénomènes météorologiques extrêmes résultant de la variabilité et l'irrégularité des précipitations et de l'effet des changements climatiques durant ces dernières décennies. Ces sécheresses engendrent de graves conséquences économiques, environnementales et sociales.

L'objectif de cette étude est de caractériser la sécheresse climatique au niveau du bassin versant de l'oued l'Ouergha, situé dans le Maroc septentrional, à travers le calcul de l'indice standardisé de précipitations (SPI) à multi échelle et basé sur les précipitations pour reproduire les sécheresses observées dans le bassin versant de l'oued l'Ouergha pour la période 1982-2014. Par ailleurs, d'autres indices de sécheresses ont été calculés, notamment DP, PN, Z-score-RAI et DI.

Les résultats obtenus après le calcul de l'indice SPI à différents échelles de temps de 1, 3, 6 et 12 mois montrent que les sécheresses dans le bassin versant de l'oued Ouergha étaient généralement d'intensité modérée à légère. Cependant, les sécheresses de 1987, 1995, 2001 et 2005 étaient des sécheresses sévères à extrêmes avec des périodes déficitaires d'une sécheresse sévère à extrême 1990-1995 et 2004-2008.

Les résultats de l'indice SPI conforte les résultats obtenus par les autres indices de sécheresses DP, PN, Z-score-RAI et DI. Ils affichent une sécheresse sévère à extrême précisément en 1995 et 2005, des périodes déficitaires avec une sécheresse sévère à extrême depuis 2004 à 2008 et aussi depuis 1990 à 1995 qui était la pire période déficitaire durant toute la période d'observation.

Mots clés : Sécheresse, Intensité, Changement climatique, l'indice standardisé précipitations (SPI), bassin versant de l'oued l'Ouergha.

Abstract

Droughts are among the extreme weather phenomena resulting from the variability and the irregularity of precipitation and the effect of climate changes in recent decades. These droughts have serious economic, environmental and social consequences.

The objective of this study is to characterize the climatic drought in the Ouergha, located in the Northern part of Morocco, through the calculation of the standardized precipitation index (SPI) for multi-scale based on rainfall to reproduce the observed droughts in the Ouergha watershed for the period 1982-2015 with the use of other drought indices (DP, PN, Z-score-RAI and DI). The obtained results after calculating the SPI index at different time scales of 1, 3, 6 and 12 months show that droughts in the Ouergha watershed were generally moderate to mild in intensity, Indeed, the droughts of 1987, 1995, 2001 and 2005 were severe to extreme with shortage periods of severe to extreme drought 1990-1995 and 2004-2008.

The results of the SPI index confirm the obtained results for the other drought indices DP, PN, Z-score-RAI and DI), severe drought to extreme precisely in 1995 and 2005, deficit periods with severe to extreme drought since 2004 to 2008 and also 1990 to 1995 was the worst deficit period during the entire studied period.

Key words : Drought, Intensity, Climate change, the standardized precipitation index (SPI), Ouergha watershed.

Table des matières

Dédicace I
Remerciements II
Résumé III
Abstract……..……..IV
Table des matières V
Liste des abréviations utilisées……VI
Liste des figures VII
Liste des tableaux VIII

Introduction Générale 1

Chapitre I : Caractéristiques générales du bassin de l'Ouergha

1. Introduction 3
2. Situation géographique 3
3. Les caractéristiques physiques du bassin versant 5
A. La forme 5
B. Le relief 7
1) Carte hypsométrique 7
2) Courbe hypsométrique 8
C. Le rectangle équivalent 11
D. Les caractéristiques d'altitudes 12
1) Altitudes minimale et maximale 12
2) L'altitude moyenne 13
3) Altitude médiane 13
E. La pente 13
1) La réalisation de la carte des pentes 13
2) Pente moyenne du bassin versant 16
3) Indice de pente global 17
4. Le réseau hydrographique 18
5. Contexte géologique de la zone d'étude 19
A. Géologie de la chaîne du Rif 19
B. Aperçu sur la géologie du bassin versant versant de l'Ouergha 22
1) Les dépôts post-nappe 22
2) Zone Intra-Rifaine 22

3) Unité de Ketama 22
4) Unité de Tanger 22
5) Zone Méso-Rifaine 23
C. Tectonique 23
D. Facies Litho stratigraphie 23
1) Les formations secondaires 23
2) Le Crétacé 24
3) Les formations tertiaires et quaternaires 24
6. Conclusion 26

Chapitre II : Etude Climatique du bassin de l'Ouergha

1. Introduction 27
2. Précipitation 28
A. Variation temporelle des précipitations 28
1) Précipitations annuelles 29
2) Précipitations saisonnières 29
3) Précipitations moyennes mensuelles 30
B. Evaluation de la lame d'eau moyenne tombée sur le bassin 31
1) Méthode arithmétique 31
2) Méthodes des polygones de Thiessen 32
3) Méthode des isohyètes 34
C. Estimation de la moyenne de la lame d'eau calculée par les trois méthodes 36
3. Etudes des températures 37
A. Température moyenne mensuelle 37
B. Relation température et précipitation 38
1) L'indice Xérothermique de Gaussen 38
2) L'indice d'aridité annuelle de De Martonne et les indices mensuelles d'aridité 39
3) Quotient pluviométrique d'Emberger 41
4. Evapotranspiration 42
A. L'évapotranspiration potentielle 43
B. Evapotranspiration réelle 45
1) Méthode de Turc 46
2) Méthode de Coutagne 46
3) Méthode du bilan de Thornthwaite 46
C. Bilan hydrique 48
5. Conclusion 49

Chapitre III : Etude de la relation pluie débit dans le bassin de l'Ouergha

1. Introduction 51
2. Etude du régime du débit 52
A. Débits annuels 52
1) Variation des débits annuels par la méthode des écarts à la moyenne 54
2) L'irrégularité interannuelle des débits par la méthode du simple cumul 57
3) Coefficient et indice de la variabilité des débits 60
3.1.1. Coefficient d'hydraulicité (CH) 60
3.1.2. Coefficient d'immodération (CI) 61
3.1.3. Coefficient de variation (CV) 62
B. Débits moyens mensuels 62
1) Module mensuel 62
2) Coefficient mensuel des débits 65
C. Débits journalières 67
1) Débit journaliers d'une année humide 67
2) Débits journaliers d'une année moyenne 67
3) Débits journaliers d'une année sèche 68
3. Relation entre les débits et les précipitations 68
A. Relation entre les débits et les précipitations mensuelles 68
B. Coefficient de ruissellement (Cr) 71
C. Bilan Hydrologique 71
1) Ecoulement total 72
2) Le ruissellement 72
3) Infiltration 73
4. Conclusion 73

Chapitre IV: Etude de la sécheresse climatique de l'Ouergha

1. Introduction 75
2. Etude d'homogénéité des séries 77
A. Tests graphiques : 77
1) Le simple cumul 77
2) Le double cumul 78
3) La méthode du cumul des résidus 78
B. Tests numériques : 78
1) Méthodes statistiques 78
2) Test de Pettitt 79

3) Test de Buishand pour l'homogénéité 79
C. Traitement des données pluviométriques : 80
3. Calcul des indices de sécheresses 83
A. L'indice de précipitations normalisé (SPI) 83
B. Déciles des précipitations (DP) 92
C. Le pourcentage à la normale (PN) 94
D. Statistique Z-Score 95
E. Comparaison entre PN et DP et Z-score 97
F. Indice d'anomalie de pluviosité (RAI) 98
G. Intensité de la sécheresse (DI) 99
4. Conclusion 100
Conclusion générale 102
Références bibliographiques……...……108

Liste des abréviations utilisées

ABHS : Agence du Bassin Hydraulique de Sebou

CH : Coefficient d'hydraulicité

CI : Coefficient d'immodération

CV : Coefficient de variation

DA : Déficit agricole

DI : Intensité de la sécheresse

DP : Déciles des précipitations

ETP : Evapotranspiration potentiel

ETR : Evapotranspiration réel

I : L'indice d'aridité annuelle de De Martonne

OMM: Organisation mondiale de la météorologie

PN : Le pourcentage à la normale

RAI : Indice d'anomalie de pluviosité

RFU : Reserve facilement utilisable

SPI : L'indice de précipitations normalisé

Listes des tableaux

Tableau 1 : Répartition de la surface totale par tranche d'altitude au bassin versant de l'Oued l'Ouergha 9
Tableau 2 : Tableau de fréquences et des pourcentages cumulés au-dessus de la limite inférieure au bassin versant de l'Oued l'Ouergha 9
Tableau 3: les Classes des pentes 14
Tableau 4: Superficies, fréquences et fréquences cumulées en fonction des classes des pentes au bassin versant de l'Oued l'Ouergha 14
Tableau 5: la Classification du relief selon Ig donné par l'ORSTOM 17
Tableau 6 : Caractéristiques morphologiques du bassin versant de l'Ouergha 26
Tableau 7: Coordonnées des stations pluviométriques du bassin versant de l'Ouergha 27
Tableau 8: Calcul de la lame d'eau tombée par la méthode de Thiessen au bassin versant de l'Oued l'Ouergha 34
Tableau 9: Calcul de la lame d'eau tombée par la méthode des Isohyètes au bassin versant de l'Ouergha 36
Tableau 10: Estimation de la lame d'eau moyenne au bassin versant de l'Ouergha 36
Tableau 11: ETP mensuel selon la méthode de Thornthwaite au bassin versant de l'Ouergha au cours de la période (1981 à 2014) 44
Tableau 12: calcul de l'ETR mensuelle par la méthode de Thornthwaite au bassin versant de l'Ouergha au cours de la période 1981 à 2014 48
Tableau 13: Simple cumul des lames d'eau écoulées pour la station de Galaz (1983 à 2020) 57
Tableau 14: Simple cumul des lames d'eau écoulées pour la station de Tabouda (1981 à 2020) 58
Tableau 15 : Simple cumul des lames d'eau écoulées pour la station d' Ain Aicha (1981 à 2020) 59
Tableau 16: Stations pluviométriques retenues pour l'étude 76
Tableau 17: Les résultats du test de point de changement de Pettitt effectué sur la pluviométrie annuelle moyenne des stations 83
Tableau 18: Classification de la sècheresse en rapport avec la valeur de l'indice de précipitations normalisé (McKee et al. 1993) 84
Tableau 19: Classification des déciles de précipitation 93
Tableau 20: Classification de PN 94
Tableau 21: classification de Z-scores 96
Tableau 22: classification de RAI 98
Tableau 23: classification de DI 99

Listes des figures

Figure 1 : Situation géographique du bassin versant de l'Oued l'Ouergha 4
Figure 2 : Indice de compacité (Musy, 2001) 6
Figure 3 : Carte morphologique du bassin versant de l'oued Ouergha 7
Figure 4 : Carte hypsométrique du bassin versant de l'Ouergha 8
Figure 5 : Courbe hypsométrique du bassin versant de l'Ouergha 10
Figure 6 : Interprétation de la courbe hypsométrique (Larue, 2005) 11
Figure 7: Rectangle équivalent du bassin versant de l'Ouergha 12
Figure 8 : Histogramme des fréquences cumulées des pentes en (Km²) 15
Figure 9: Carte des pentes du bassin versant de l'Ouergha 16
Figure 10: Carte du réseau hydrographique du bassin versant de l'Ouergha 18
Figure 11: la carte géologique du Maroc (1951) 21
Figure 12: Carte géologique et lithologique du bassin versant de l'Ouergha 25
Figure 13: carte de situation géographique des stations pluviométriques étudiées dans ce chapitre au bassin versant de l'oued l'Ouergha 28
Figure 14: les précipitations moyennes annuelles dans le bassin versant de l'oued l'Ouergha au cours de la période 1981 à 2014 29
Figure 15: les précipitations moyennes saisonnières dans le bassin versant de l'oued l'Ouergha au cours de la période 1981 à 2014 30
Figure 16: les précipitations moyennes mensuelles dans le bassin versant de l'oued l'Ouergha au cours de la période 1981 à 2014 31
Figure 17: Carte des polygones de Thiessen au bassin versant de l'Ouergha 33
Figure 18: Carte des isohyètesau bassin versant de l'oued l'Ouergha 35
Figure 19: les températures moyennes mensuelles au niveau de la station de Hajria au cours de la période 1981 à 2014 38
Figure 20: Diagramme ombrothermique de Gaussen au niveau de la station Hajria au cours de la période 1981 à 2014 39
Figure 21: L'indice d'aridité mensuelle au niveau de la station de Hajria au cours de la période 1981 à 2014 40
Figure 22: Climagramme d'Emberger dans le bassin versant de l'oued l'Ouergha au niveau de la station Hajria 42
Figure 23: Evolution de l'ETP en fonction de Précipitation et Température au niveau de la station Hajria au cours de la période 1981 à 2014 45
Figure 24: Bilan hydrique du bassin versant de l'oued l'Ouergha au niveau de Hajria, estimé à partir de précipitations, L'ETP et l'ETR par la méthode de Thornthwaite au cours de la période 1981 à 2014 49
Figure 25: carte de situation géographique des stations pluviométriques étudiées dans ce chapitre au bassin versant de l'oued l'Ouergha 51
Figure 26: les débits moyens annuels au niveau de la station de Tabouda 53
Figure 27: les débits moyens annuels au niveau de la station de Galaz 53
Figure 28: les débits moyens annuels au niveau de la station d'Ain Aicha 54
Figure 29: les écarts des débits moyens annuels et interannuels au niveau de la satation de Tabouda 55

Figure 30: les écarts des débits moyens annuels et interannuels au niveau de la station de Galaz..... 56
Figure 31: les écarts des débits moyens annuels et interannuels au niveau de la station d'Ain Aicha..... 56
Figure 32: Simple cumul des lames d'eau écoulées pour la station de Galaz (1983 à 2020).. 58
Figure 33: Simple cumul des lames d'eau écoulées pour la station de Tabouda (1981 à 2020) 59
Figure 34: Simple cumul des lames d'eau écoulées pour la station d'Ain Aicha (1981 à 2020) 60
Figure 35: Variation du coefficient d'hydraulicité dans le bassin versant de l'Ouergha..... 61
Figure 36: les débits mensuels au niveau de la station de Tabouda 63
Figure 37: les débits mensuels au niveau de la station de Galaz..... 63
Figure 38: les débits mensuels au niveau de la station d'Ain Aicha 64
Figure 39: les débits moyens saisonniers dans le bassin versant de l'Ouergha 65
Figure 40: Variation du coefficient mensuel des débits au bassin versant de l'Oued l'Ouergha 66
Figure 41: Débits journaliers au niveau de la station d'Ain Aicha pour l'année humide, moyenne et sèche 68
Figure 42 : Evolution des précipitations et des débits pour la station de Tabouda..... 69
Figure 43 : Evolution des précipitations et des débits pour la station de Galaz..... 69
Figure 44: Evolution des précipitations et des débits pour la station d'Ain Aicha..... 70
Figure 45: carte de situation géographique des stations pluviométriques étudiées dans ce chapitre au bassin versant de l'oued l'Ouergha..... 76
Figure 46: Le contrôle des totaux annuels des précipitations en (mm) par la méthode des doubles cumuls 81
Figure 47: Test de Pettitt d'homogénéisation à 99% de confiance appliqué à la station Galez 81
Figure 48: Test de Pettitt d'homogénéisation à 99% de confiance appliqué à la station Ain Aicha..... 82
Figure 49: Test de Pettitt d'homogénéisation à 99% de confiance appliqué à la station Jbel Oudka 82
Figure 50: Evolution d'indice SPI a une échelle de temps de 1mois dans le bassin versant de l'oued Ouergha..... 88
Figure 51: Evolution d'indice SPI a une échelle de temps de 3mois dans le bassin versant de l'oued Ouergha..... 89
Figure 52: Evolution d'indice SPI a une échelle de temps de 6mois dans le bassin versant de l'oued Ouergha..... 90
Figure 53: Evolution d'indice SPI a une échelle de temps de 12mois dans le bassin versant de l'oued Ouergha..... 91
Figure 54: Evolution du (DP) pour des durées annuelles..... 93
Figure 55: Evolution du (PN) pour des durées annuelles..... 95
Figure 56: Evolution du z-score pour des durées annuelles 97
Figure 57: comparaison entre DP12, PN12 et Z-score12 97
Figure 58: Evolution du RAI pour des durées annuelles..... 99

Figure 59: Evolution du DI pour des durées annuelles 100

Introduction Générale

Le réchauffement global de la terre ou le changement climatique fait l'objet d'une grande attention aujourd'hui de la part de divers chercheurs du monde entier. Décideurs, gouvernements et Scientifiques du monde entier cherchent à comprendre la nature des changements et des défis auxquels ils doivent faire face. Les événements météorologiques extrêmes sont devenus de plus en plus répandus et de plus en plus fréquents. Cela a rappelé à la communauté scientifique internationale une évidence première, le climat de notre planète est très variable dans le temps et dans l'espace.

Dans cette optique, l'organisation météorologique mondiale (OMM) et le Groupe Intergouvernemental des experts du climat (GIEC, 2007) estiment qu'il est nécessaire actuellement, d'entreprendre des études de diagnostic pour déterminer empiriquement et statistiquement les caractéristiques du système climatique et sa variabilité pour différentes régions du globe. Par ailleurs, durant ces dernières décennies, le prolongement des épisodes secs est devenu une réalité dans cette partie du globe, notamment le Maroc (Sebbar et al. 2011). En effet, au Maroc ces dernières années, la sécheresse s'est manifestée d'une manière sévère, persistante, préoccupante et avec une intensité remarquable.

Ce travail a comme objectif de faire l'étude de la sécheresse dans le bassin versant de l'oued l'Ouergha, d'autres études au bassin versant de l'oued l'Ouergha comme (Boukrim, 2011) et (Msatef et al, 2018) avaient conclu à un déficit pluviométrique depuis 1982, donc la période d'étude de sécheresse dans ce bassin a été choisi depuis 1982 à 2014, à travers l'indice standardisé de précipitations (SPI) à différents échelles de temps de 1, 3, 6 et 12 mois et aussi d'autres indices de sécheresses DP, PN, Z-score-RAI et DI.

Cette étude est structurée comme suit :

- Une introduction générale explique de contenu du travail.

- Une introduction générale explicative du contenu du travail.

-Le premier chapitre concerne la situation géographique, les caractéristiques physiques, et la géologie du bassin versant.

-Le deuxième chapitre porte sur le contexte climatique du bassin (précipitation, température, évapotranspiration et le bilan hydrique.

- Le troisième chapitre est consacré au cotexte hydrologique (relation entre débit et précipitation)

- Le dernier chapitre est destiné pour le calcul des indices de sécheresse et la discussion des résultats.

-Une conclusion générale qui synthétise les résultats obtenus.

Chapitre I : Caractéristique du bassin versant

Introduction

Le fonctionnement du bassin versant est comme un percepteur chargé de recevoir les pluies et de les métamorphoser en écoulement à l'exutoire. Cette métamorphose va exister avec des pertes en eau et ces pertes dépendent des caractéristiques physiques et des conditions climatiques du bassin versant (Haida,2000).

On peut constater que le bassin versant est caractérisé par la couverture végétale et la nature du sol, la morphologie (réseau de drainage, forme, relief).

On va étudier dans ce chapitre, la situation géographique du bassin versant de l'Oued l'Ouergha, qui nous permettra d'avoir une vision des facteurs qui influencent les eaux de pluies et les transforment en écoulement jusqu'à la fin du parcours et aussi déterminer quelque indices qui permettent de savoir les caractéristiques du bassin versant.

On va étudier dans ce chapitre aussi la géologie qui est un facteur primordial des écoulements superficiels, elle nous permettra de savoir la perméabilité des formations, la couverture végétale, la densité du drainage et l'infiltration des eaux superficiels.

1. Situation géographique

Le bassin versant d'Oued Sebou a une forme de cuvette, il se situe entre l'océan Atlantique à l'Ouest, la zone de Fès Taza à l'Est, le moyen Atlas et la Meseta au Sud et le Rif au Nord. Le bassin versant de l'Ouergha représente 16.5% du bassin versant de l'oued Sebou, il couvre une grande partie de la montagne rifaine.

Le bassin versant de l'oued ouergha couvre une superficie de 6190 Km² et se situe au Nord du Maroc entre les longitudes -5°24' et -3°45' et les latitudes 34°25' et 35°25' (Fig.1).

Il est limité à l'Est par les affluents de la Moulouya et du Sebou du Périf oriental, au Nord par la crête rifaine passant par Ketama, Bab Bourred et Bab Taza, distant de la méditerranée d'environ 30 Km et au Sud par les bassins versants des affluents prérifains du Sebou.

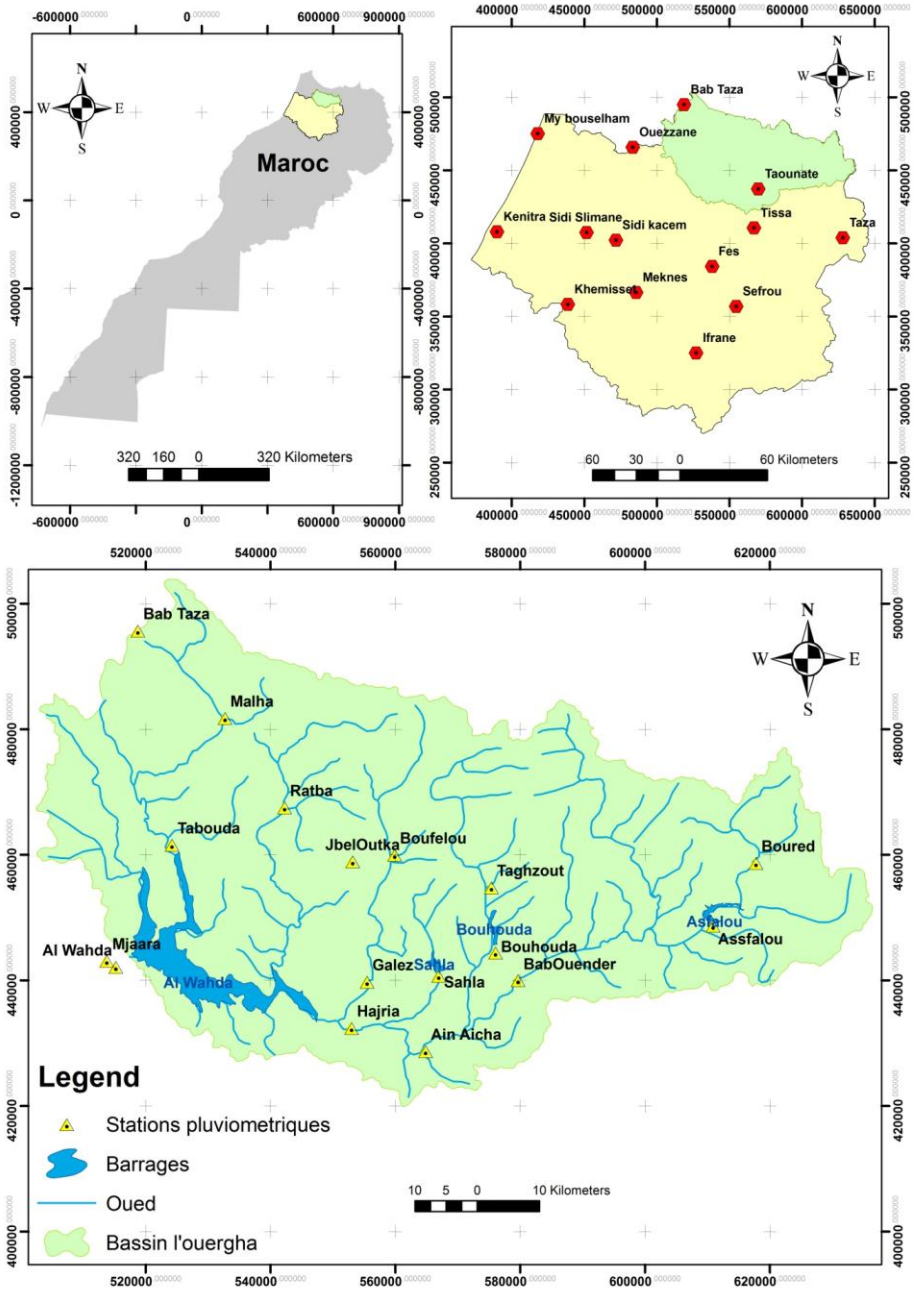

Figure 1 : Situation géographique du bassin versant de l'Oued l'Ouergha

L'exutoire du bassin versant se situe au niveau du barrage ALWAHDA, la capacité de stockage du barrage AL WAHDA (3,7 milliards de m^3) avec un apport moyen annuel de 3 300 Mm^3 et un module annuel d'environ 105m^3/s.

2. Les caractéristiques physiques du bassin versant

Les caractéristiques physiographiques d'un bassin versant dépendent du dynamisme des cours d'eau et leur hydrologie correspondant. Les paramètres primordiaux d'une étude physique d'un bassin versant pour désigner son attitude par rapport aux différentes unités géologiques qu'il a parcouru est le réseau hydrographique, le relief, la forme (Musy et Higy, 1998).

A. La forme

Le bassin versant de l'oued l'ouergha a une forme allongée avec une orientation Est-Ouest. L'écoulement de l'Oued a une orientation Est-Ouest au Sud du bassin versant et recueille des affluents importants de sa cote droite en origine du nord suivant une orientation Nord-Sud (Fig.3).

L'indice de compacité de Gravelius (KG) nous permet de déterminer la forme du bassin versant qui influence l'allure du l'hydrogramme à l'exutoire du bassin versant et aussi l'écoulement du cours d'eau. L'indice de compacité de Gravelius est défini par le rapport du périmètre du bassin au périmètre du cercle ayant la même surface :

$$\mathbf{KG} = 0{,}28\frac{P}{\sqrt{A}}$$

Avec :

- P : le périmètre du bassin versant (Km) ;
- A : surface du bassin versant (Km^2).

La figure nous montre les différentes formes en fonction des indices de compacité (Fig.2), si l'indice de compacité rapproche de 1, donc on peut considérer que le bassin versant est bien drainé.

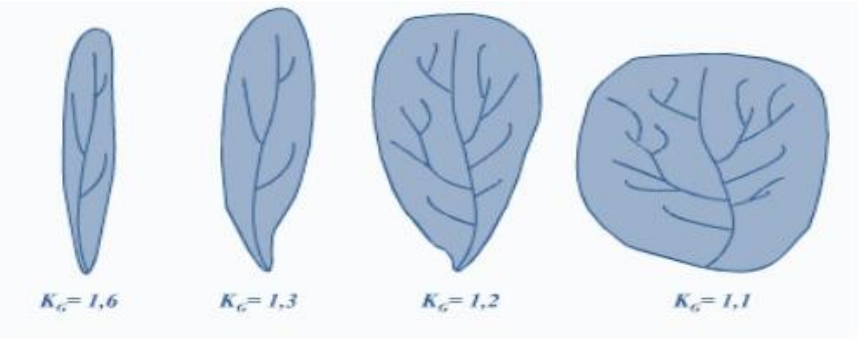

Figure 2 : Indice de compacité (Musy, 2001)

Pour le bassin versant de l'oued Ouergha: A = 6190 km ² et P= 462 km, Donc l'indice de compacité est égal à **1,64**.

On peut considérer que le bassin versant de l'Ouergha a une forme allongée. Le bassin versant de l'oued ouergha est comme une gouttière dissymétrique, la majeur partie de la superficie est au nord, 70% de la superficie du bassin versant de l'oued l'Ouergha est situé au Nord.

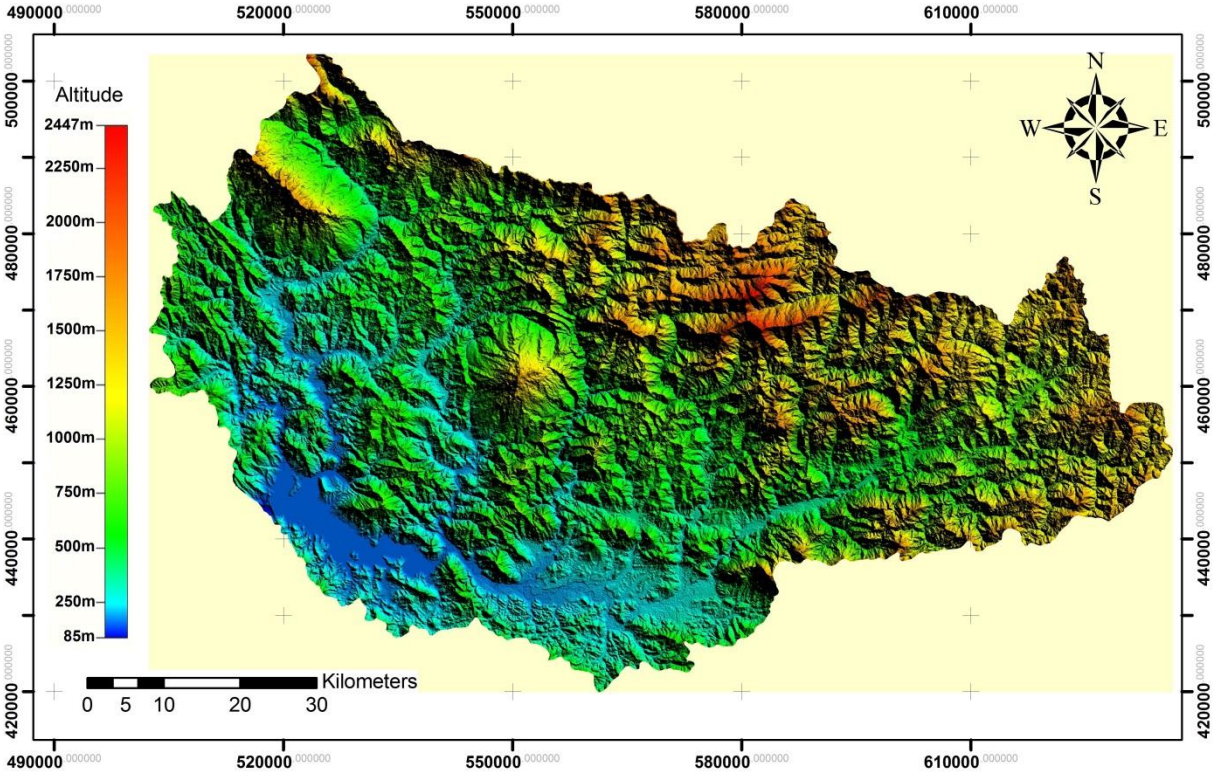

Figure 3 : Carte morphologique du bassin versant de l'oued Ouergha

B. Le relief

La morphologie et l'altitude du bassin versant influencent beaucoup de paramètres hydrométéologiques. Les courbes de niveau a la carte nous montre le relief, on peut définir les multiples paramètres du relief en déterminant les tranches d'altitudes qui permettent d'avoir la répartition du bassin versant.

Une carte topographique au 500000ème nous a permis de déterminer les tranches d'altitudes et le logiciel Arc Gis nous a aidés à trouver la surface entre deux courbes de niveau.

1) Carte hypsométrique

La carte hypsométrique nous montre des surfaces situées entre des courbes de niveau avec des couleurs dissemblables (Fig.4), des zones de basses altitudes d'environ 80m et celles de hautes altitudes environ 2400m.

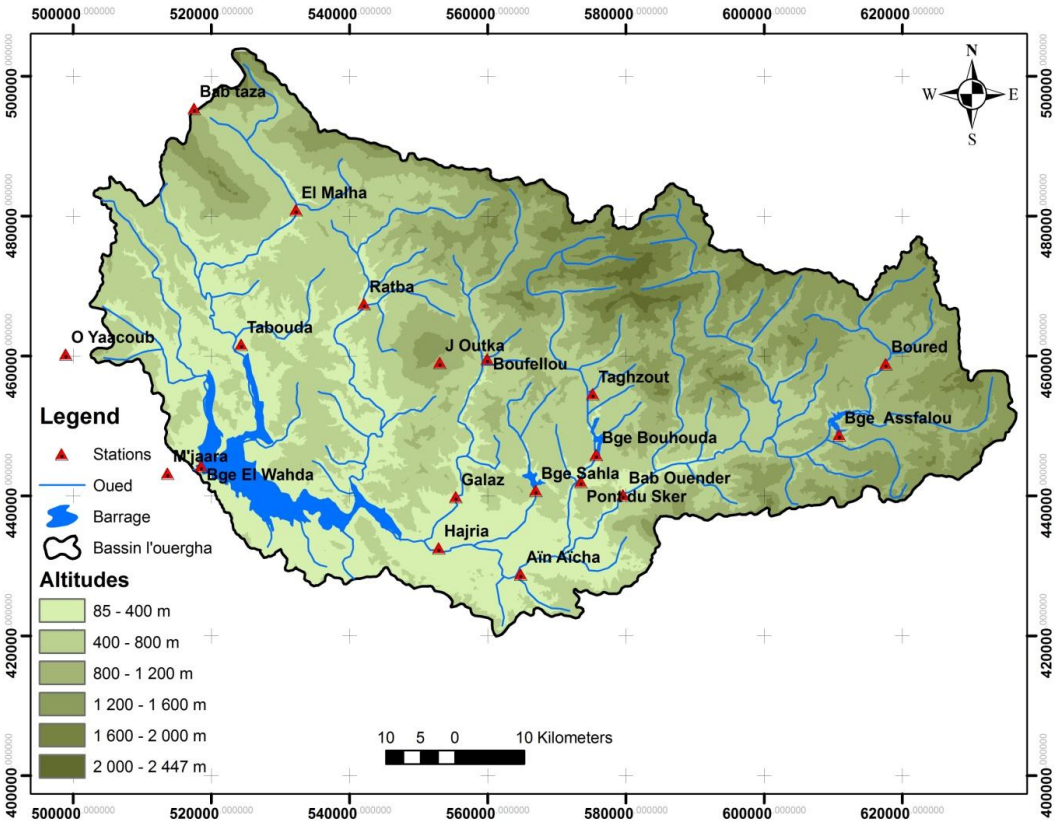

Figure 4 : Carte hypsométrique du bassin versant de l'Ouergha

La carte hypsométrique nous montre des classes d'altitudes équidistantes de 400m. Les calasses de hautes altitudes se situent au nord du bassin versant de l'Ouergha et les classes de basses altitudes se situent au Sud-ouest du bassin versant près de l'exutoire au barrage EL WAHDA.

2) Courbe hypsométrique

La courbe hypsométrique nous permet de caractériser le relief d'un bassin versant, cette courbe nous montre la répartition de la surface dans un bassin versant en fonction de l'altitude (Fig.5).

Le tableau nous résume la répartition des surfaces dans le bassin versant de l'oued Ouergha en pourcentage et en kilomètre carré en fonction de son altitude (Tab.1).

Tableau 1 : Répartition de la surface totale par tranche d'altitude au bassin versant de l'Oued l'Ouergha

Classe d'altitude (m)	Surface (Km²)	Pourcentage de la surface (%)
85 - 478	2027,26	32,75
478 - 872	1825,73	29,49
872 - 1266	1258,24	20,32
1266 - 1659	890,97	14,39
1659 - 2053	171,15	2,76
2053 - 2447	16,62	0,26
Total	6190	100

Ce tableau nous aide à avoir la courbe hypsométrique en calculant les superficies cumulées et leurs pourcentages aux différentes altitudes (Tab.2).

Tableau 2 : Tableau de fréquences et des pourcentages cumulés au-dessus de la limite inférieure au bassin versant de l'Oued l'Ouergha

Classe d'altitude (m)	Surface (Km²)	surface (%)	Surface cumuléé	Altitude (m)	surface cumulée(%)
85 - 478	2027,26	32,75	6190,00	85,00	100,00
478 - 872	1825,73	29,49	4162,71	478,00	67,25
872 - 1266	1258,24	20,32	2336,98	872,00	37,75
1266 - 1659	890,97	14,39	1078,74	1266,00	17,43
1659 - 2053	171,15	2,76	187,77	1659,00	3,03
2053 - 2447	16,62	0,26	16,62	2053,00	0,27
Total	6190,00	100,00	0,00	2447,00	0,00

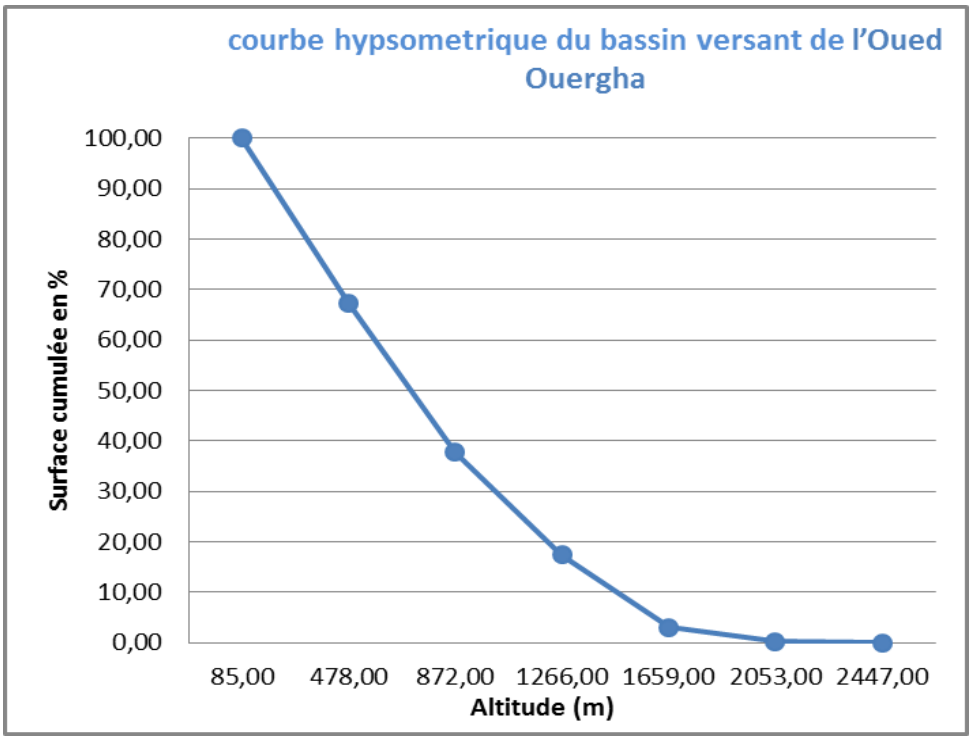

Figure 5 : Courbe hypsométrique du bassin versant de l'Ouergha

On a trois cas pour l'interprétation de la courbe hypsométrique :

- Le premier cas, le bassin jeune (courbe 3), ce bassin est caractérisé par sa superficie qui est faible par rapport au changement de son altitude.
- Le deuxième cas, le vieux bassin (courbe 1), ce bassin est caractérisé par une grande superficie avec une très faible altitude.
- Le troisième cas, le bassin mature (courbe 2), c'est un bassin ou l'échelle d'érosion est parallèle à son âge.

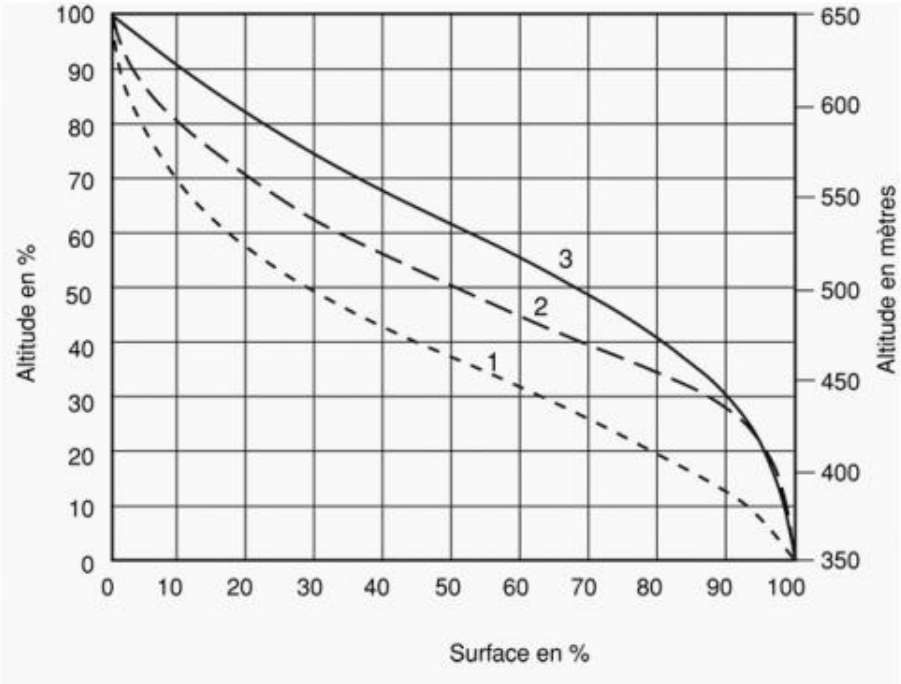

Figure 6 : Interprétation de la courbe hypsométrique (Larue, 2005)

L'analyse de ces courbes pour les deux figures (Fig.5) et (Fig.6) nous confirme que le bassin versant de l'oued l'Ouergha est un vieux bassin qui est caractérisé par une faible superficie par rapport à son altitude.

L'analyse de la courbe et la carte hypsométrique nous indique que le bassin versant de l'oued Ouergha est un bassin ou les eaux circulent d'une grande facilité à cause des altitudes qui sont très importantes ce qui amène par la suite a une forte érosion.

C. Le rectangle équivalent

Le bassin versant est transformé en rectangle équivalent par une représentation géométrique du contour du bassin, le rectangle équivalent est tracé à travers la largeur et la longueur du bassin versant. Les répartitions hypsométriques sont respectées en traçant les courbes de niveau qui sont parallèles. Le rectangle équivalent est créé pour faire une comparaison morphologique des bassins versants (Afkir, 1985).

Cette figure nous montre que le rectangle équivalent du bassin versant Ouergha (Fig. 7), le rectangle équivalent sera bien drainé si le rectangle est moins allongé.

Cette formule nous permet de calculer les dimensions du rectangle équivalent :

$$L = \frac{K_G\sqrt{A}}{1.12} \times \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_G}\right)^2}\right] \; et \; l = \frac{K_G\sqrt{A}}{1.12} \times \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_G}\right)^2}\right]$$

KG : indice de compacité Gravelius

A : superficie du bassin en (Km²)

L : longueur du rectangle équivalent en (Km)

l : largeur du rectangle équivalent en (Km)

l = 31 Km et L =199 Km

La largeur est plus petite six fois que la longueur.

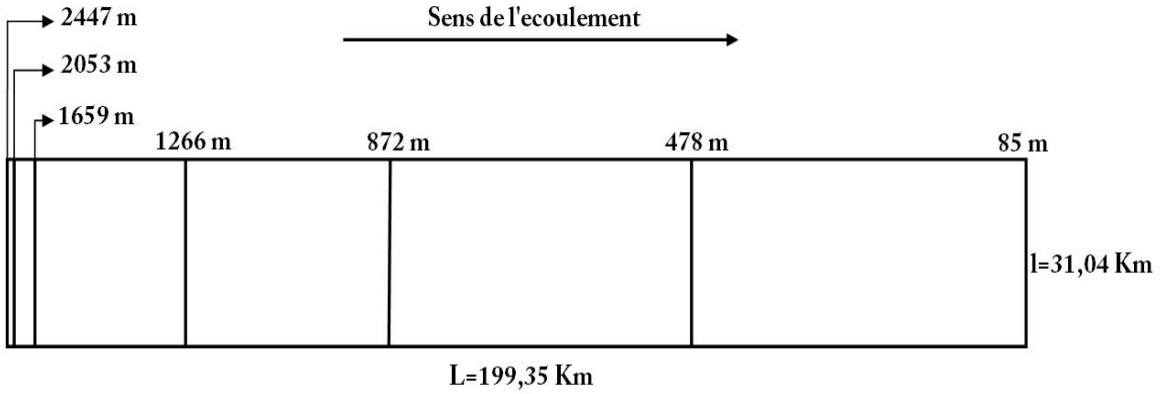

Figure 7: Rectangle équivalent du bassin versant de l'Ouergha

D. Les caractéristiques d'altitudes

1) Altitudes minimale et maximale

La carte topographique nous permet d'obtenir les altitudes maximales et minimales, les altitudes minimales représentent le point le plus bas du bassin versant et les altitudes

maximales reflètent le point le plus élevé du bassin versant. Pour le bassin versant de l'oued l'Ouergha, l'altitude maximale est de 2447m et l'altitude minimale est de 85m.

2) L'altitude moyenne

L'altitude moyenne est calculée par cette formule :

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

A_i : Aire comprise entre deux courbes de niveau (Km²)

h : Altitude moyenne entre deux courbes de niveau (m)

A : Surface totale du bassin versant (Km²)

H_{moy}=776 m

On peut servir l'altitude moyenne dans un model hydrologique ou bien aussi dans le calcul de quelque paramètre hydrométéorologique.

3) Altitude médiane

L'altitude médiane présente l'altitude a un point de la moitié de la surface totale du bassin versant. L'altitude médiane du bassin versant de l'oued l'Ouergha est de **710m.**

E. La pente

La pente influence beaucoup le cycle hydrologique du bassin versant. Elle a un effet sur le ruissellement, l'infiltration et aussi la perméabilité. Le partage entre l'infiltration et l'écoulement superficiel sur le bassin versant est en fonction de la pente (Abdellah, 1997).

1) La réalisation de la carte des pentes

La carte des pentes est réalisée par le logiciel SIG (Système d'Information Géographique), ce logiciel nous a permis de découpé la carte du Model Numérique de Terrain (MNT) afin d'avoir des classes des pentes.

Tableau 3: les Classes des pentes

Classe	Type de pente
1	Nulle à faible (0-3%)
2	Modérée (3%-12%)
3	Abrupte (12%-20%)
4	Très abrupte (20%-35%)
5	Extrême (>35%)

Pour les types de pente abrupte a très abrupte, on a comme résultat 21% et de 31%. Et pour les classes 1 et 2, le résultat est de 3% et 12% (Tab.3).

Tableau 4: Superficies, fréquences et fréquences cumulées en fonction des classes des pentes au bassin versant de l'Oued l'Ouergha

Classe	Surface (Km^2)	Fréquence cumulée	%de la surface	% cumulé
0 - 3	215,41	215,41	3,48	3,48
3 - 12	763,23	978,64	12,33	15,81
12 - 20	1933,14	2911,78	31,23	47,04
20 - 35	1335,80	4247,58	21,58	68,62
>35	1941,18	6190	31,36	100
Totale	6190			

On a comme résultat, un pourcentage de 3% de la surface du bassin versant de l'Ouergha qui représente une pente moins de 3% et un pourcentage de 84% de surface qui dépasse une pente de 12%. Donc notre bassin versant en générale a une pente extrêmement élevé (Tab.4).

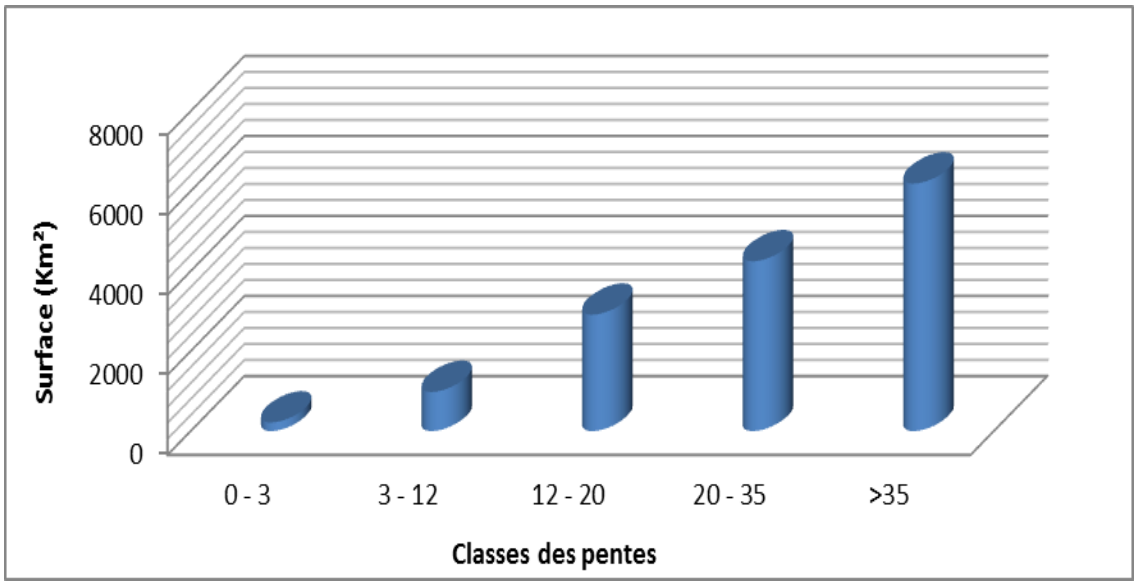

Figure 8 : Histogramme des fréquences cumulées des pentes en (Km²)

Cette figure nous indique une augmentation des surfaces de classes de pentes de notre bassin, cette augmentation est parallèle avec l'élévation de degré de pente (Fig.8). Par contre par rapport à la carte des pentes (Fig.9), elle ne confirme pas cet ordre d'augmentation des surfaces de pentes parallèlement avec le de degré de pente, ce qui peut être expliquer par la géologie de notre bassin versant et aussi la force qui est appliquée par les eaux qui influence gravement le terrain surtout avec ce degré de pente qui est très accidenté sur la majorité de la surface du bassin versant à part une minorité de surface située auprès de barrage EL WAHDA qu'elle a une pente faible.

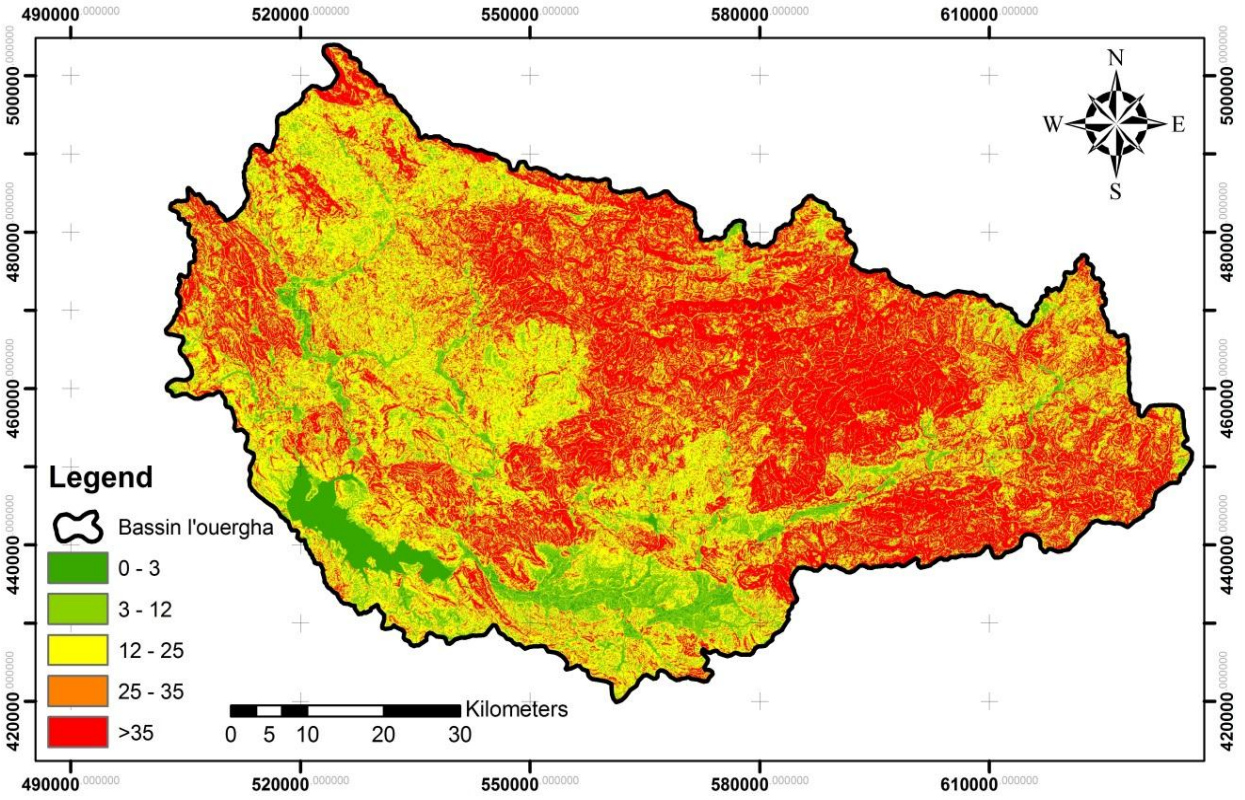

Figure 9: Carte des pentes du bassin versant de l'Ouergha

2) Pente moyenne du bassin versant

On peut avoir une idée sur la topographique de notre bassin versant à partir de la pente moyenne, elle nous donne une idée de la durée du ruissellement et aussi elle influence le débit de pointe.

La formule de la pente moyenne :

$$P_{moy} = \frac{\Delta H}{L} = \frac{H_{max} - H_{min}}{L}$$

P_{moy} : La pente moyenne

ΔH : L'altitude moyenne en (m)

L : La longueur du rectangle équivalent en (Km)

P_{moy} = 5.9

Puisque la pente moyenne a un pourcentage de 0,06%, Donc le bassin versant de l'oued l'Ouergha a un fort relief.

3) Indice de pente global

L'indice de pente global (I_g) nous donne les caractéristiques de relief du bassin versant. L'indice de pente global c'est le rapport entre le dénivellement utile et la longueur du rectangle équivalent du bassin versant.

La formule de l'indice de pente global :

$$I_g = \frac{DU}{L_{eq}} = \frac{H_{5\%} - H_{95\%}}{L}$$

I_g : Indice de pente global

DU : La dénivelée $H_{5\%}$ - $H_{95\%}$

L_{eq}: Longueur du rectangle équivalent

$H_{5\%}$: Altitude correspond à 5% de la surface totale du BV

$H_{95\%}$: Altitude correspond à 95% de la surface totale du BV

L'indice de pente global est égal à **7** ou bien **0,07%.** Suivant la classification du relief l'ORSTOM (Tab.5), Donc notre bassin versant a **un relief fort**.

Tableau 5: la Classification du relief selon Ig donné par l'ORSTOM

Relief	Valeur d'Ig
Relief très faible	Ig<0,002
Relief faible	0,002 ≤ Ig < 0,005
Relief assez faible	0,005 ≤ Ig < 0,01
Relief modéré	0,01 ≤ Ig < 0,02
Relief assez fort	0,02 ≤ Ig < 0,05
Relief fort	0,05 ≤ Ig < 0,5
Relief très fort	Ig > 0,5

3. Le réseau hydrographique

La carte topographique nous a permis de déterminer les limites du bassin versant et aussi de savoir les caractéristiques physiques du bassin, afin de déterminer ensuite une carte du réseau hydrographique (Fig.10).

La carte de réseau hydrographique nous indique l'assemblage des cours d'eau qui participent à l'écoulement, ces eaux peuvent être artificiels ou naturels, temporaires ou permanents (Roche, 1936).

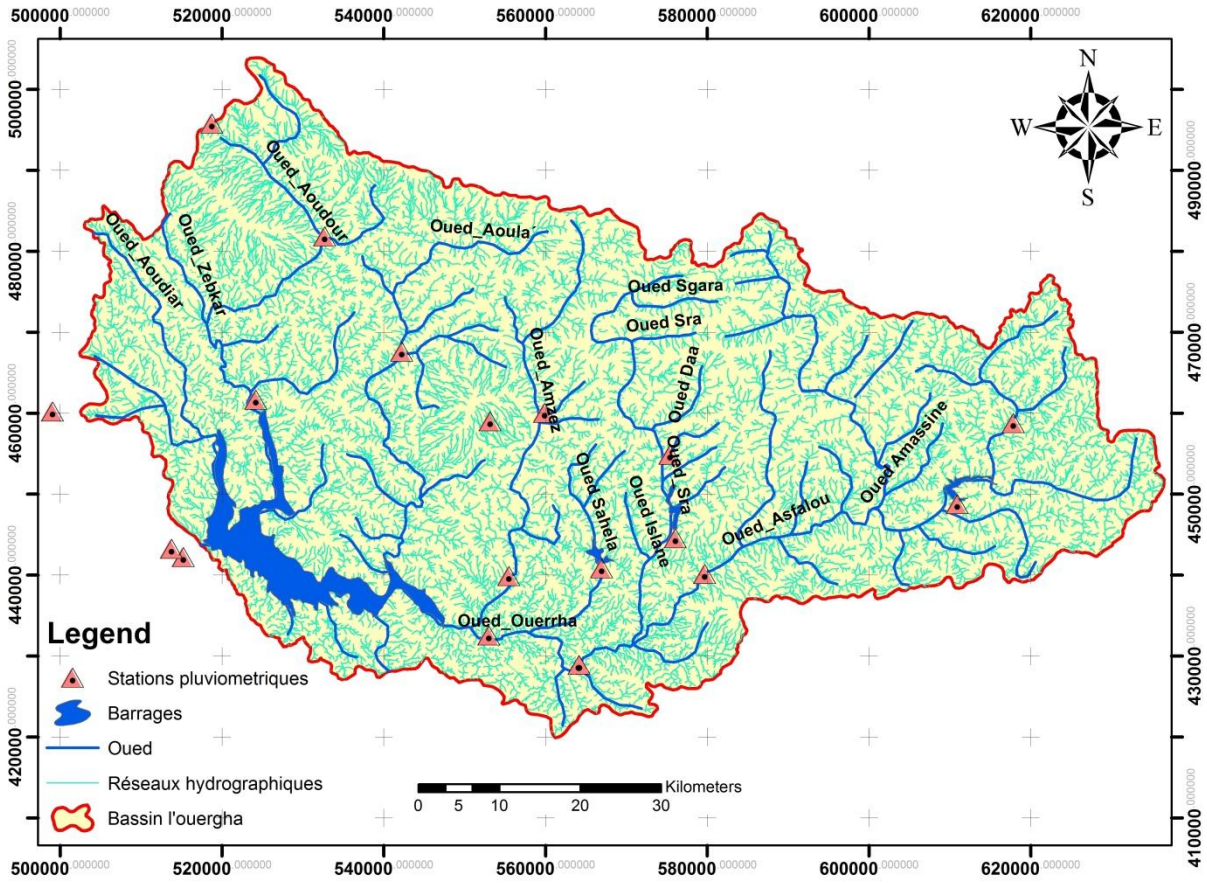

Figure 10: Carte du réseau hydrographique du bassin versant de l'Ouergha

L'écoulement du réseau hydrographique du bassin versant de l'oued l'Ouergha est Nord-Est vers le Sur-Ouest.

Parmi les affluents les plus importants d'oued Sebou c'est l'oued l'ouergha qui est considéré comme le 2éme affluent de l'oued Sebou.

L’assemblage des deux oueds Sra et Asfalou nous forme l’Oued ourgha du cote gauche, du cote droite l’oued Ouergha recueilli de importants affluents en passant par la station Bab Ouender.

Les affluents d’Oued l’Ouergha :

- Oued Sra qui est mesuré par la station pont du Sker.
- Oued Aoulai qui est mesuré par la station de Rhafsai.
- Oued Aoudour qui est mesuré par la station Tafrant.
- Oued Aoudyar qui est pres du barrage AL WAHDA, mesuré par la station de M’Jara

4. Contexte géologique de la zone d’étude

A. Géologie de la chaîne du Rif

Les chaines alpines de la Méditerranée occidentale contiennent la chaîne rifaine qui s’étale à l’Est vers l’algerie en formant forme les maghrébides(Fig.11) (Auboiun et Debelmas, 1980 ; Durant et Delga, 1980 ; In Frizon et al. 1991).

Depuis le nord vers le Sud, on remarque 3 domaines :

Les rides sud rifaines, les zones externes, les zones internes. La zone interne (Sebtides métamorphiques, Dorsale calcaire, Ghomarides paléozoïques) appartient au terrain d'Alboran qui s’étale jusqu’il dépasse le détroit de Gibraltar au Cordillères bétiques. Le socle de la mer d'Alboran est formé par les zones internes, qui appartiennent aux deux chaines (Frizon et al, 1991). Un empiliement de nappes a causé la constitution de ces zone, une distinction de deux ensembles litholo-structuraux, le complexe Ghomaride et le complexe Sebtide qui font partie au dorsale calcaire (Didon et al. 1973).

L’attachement des deux domaines interne et externe indique que la dorsale calcaire et les Ghomarides se reposent sur les unités externes et sont verticalisées (Favre, 1995).

La marge téthysiènne du continent africain représente le domaine. Les séries sédimentaires qui sont d'âge cénozoïque, sont devisées en 3 unités : pré-rifaines, intra-rifaines et méso-rifaines. Entre les unités intra-rifaines de Kétama-Tanger au Sud et les zones internes se trouvent les nappes des flyschs, la nappe d'Ouazzane, la nappe de Senhadja, la nappe d'Aknoul et la nappe de Temsamane (Hottinger et Suter, 1961) (Suter, 1967,1980).

Le Crétacé a subit un renversement tectonique au Jurassique, un chevauchement de faille normales qui a eu lieu au Jurassique, après ces failles ont subi été suivie par un décrochement NordEst-SudOuest et NordOuest-SudEst. Dans le domaine subrifain (Asebry et al. 1987) (Asebry et al. 1992).

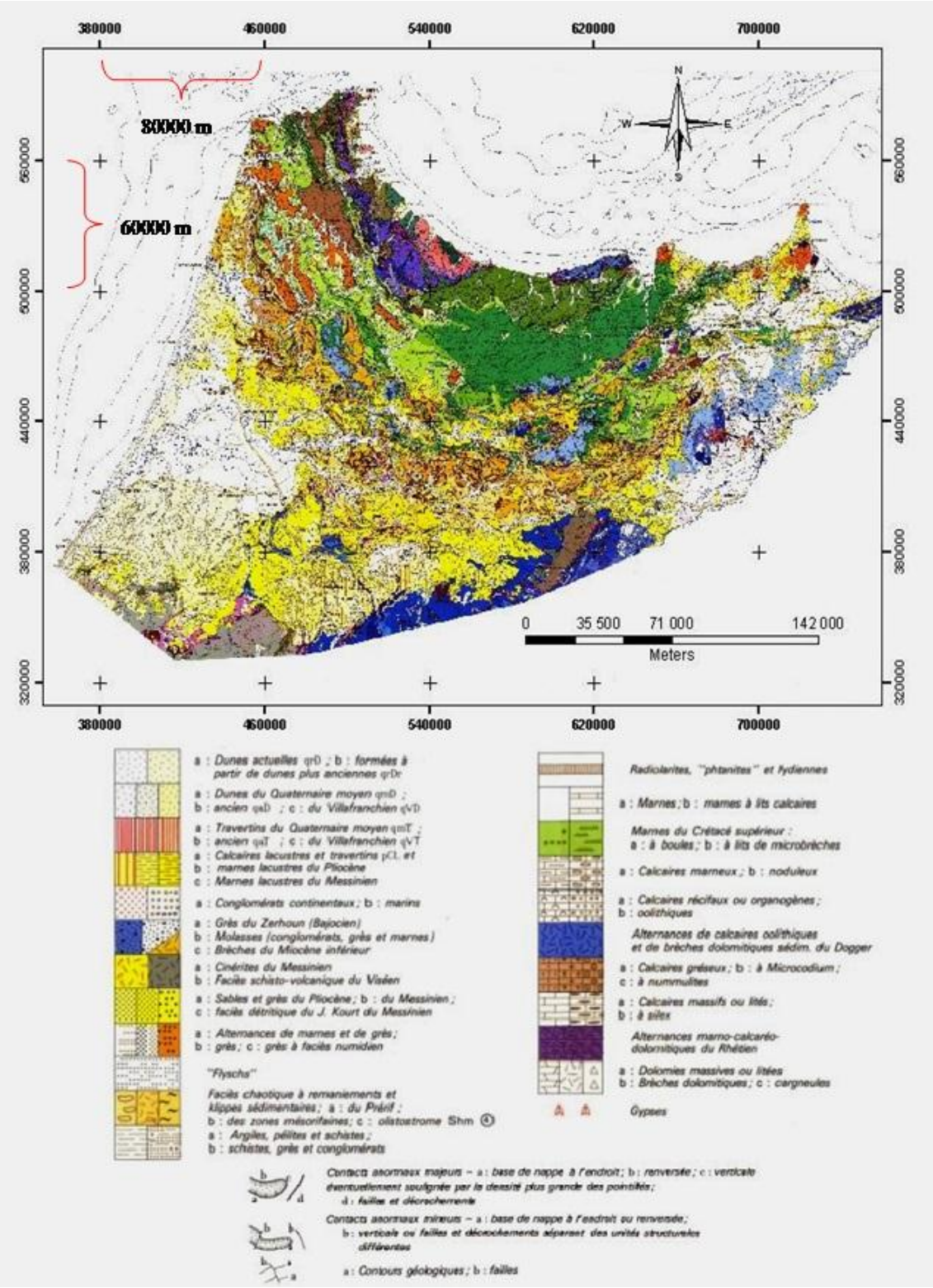

Figure 11: la carte géologique du Maroc (1951)

B. Aperçu sur la géologie du bassin versant de l'Ouergha

Dans le bassin versant de l'Oued l'Ouergha il excite 3 unités morpho-structurales depuis l'amont jusqu'à l'aval, on a les unités intra-rifaines, les unités méso-rifaines et les formations post-orogéniques (Fig.12).

1) Les dépôts post-nappe

Le Miocène est une formation autochtone durant la transgression tortonienne qui contient des dépôts post-nappe qui sont constitués a la base par des sédiments grossiers du conglomérat. Cette formation molassique indique un très fort pendage orienté vers le Sud-Est-ce qui explique la déformation tectonique. Une épaisse série d'argile des marnes bleues qui sont formé à partir de ces formations qui sont transformé en grés, par la suite des roches sédimentaires continentales qui se placent au-dessus de ces formations marneuses. Suite à un effondrement de la partie nord de la chaîne moyen atlasique un ensemble de bassins de subsidence qui sont formés au Tortonien.

Pour notre zone d'étude, la ride mésorifaine de Taounate sépare deux bassins, le bassin de Tahar Souk au Nord et le bassin de Taounate entre la partie sud de la ville et Aïn Aïcha.

2) Zone Intra-Rifaine

Deux nappes de charriage forment la zone Intra-Rifaine, L'unité de Tanger et celle de Ketama. Elles sont des formations para-autochtones mobiles, formées par des particules du Trias jusqu'au Tortonien inférieur.

3) Unité de Ketama

L'Unité de Ketama se situe dans le Rif oriental, elle affleure une patrie du bassint versant de l'Oued Amzazelle, elle contient un épais flysch schisto-gréseux du Crétacé inférieur.

4) Unité de Tanger

L'Unité de Tanger se situe a cote de la partie occidentale du Rif. Elle couvre l'Unité de Ketama, elle est construite par un Crétacé supérieur de calcaires et de schistes et aussi par un Crétacé moyen.

5) Zone Méso-Rifaine

La zone Mézo-Rifaine est constituée par des marnes. Une formation molassique constituée de grés et de conglomérat qui surmontent ces marnes.

C. Tectonique

Des failles actives séparent et découpent le Rif. Des nappes de flyschs chevauchent vers le Nord à l'unité intra-rifaine de Tanger-Ketama. L'unité méso-rifaine est chevauchée vers le sud par des nappes de flyschs (Andrieux, 1971).

Des séries jurassico-crétacées constituent le méso-rif. Ces zones sont généralement en position d'autochtone relatif sous les nappes Intra-Rifaine et aussi rifaines (Suter et Marçais, 1966).Dans le Prérif externe la nappe rifaine d'Ouezzane est considérée comme une nappe de glissement.

D'une manière générale l'orientation du réseau hydrographique est influencé par ce canevas structural de notre région d'étude.

D. Facies Litho stratigraphie

1) Les formations secondaires

- Le Trias :

Au sud du bassin versant de l'oued de l'Ouergha se trouve le Trias qui est gypsifère, imperméable et salé. Les nappes qui sont en contact avec des argiles du Trias deviennent inexploitables, ces argiles de trias influencent aussi les nappes alluviales et les eaux superficielles.

- Le Lias :

Le lias se situe entre le sud et le nord de l'oued l'Ouergha. Les dolomites et les calcaires du Lias jouent un rôle très important à la constitution d'aquifère pour l'alimentation.

2) Le Crétacé

Dans le bassin versant de l'oued l'Ouergha les formations crétacées se situent un peu près sur l'ensemble du bassin.

3) Les formations tertiaires et quaternaires

Depuis le Jurassique le Miocène transgressif est déposé sur la causse. Le Miocène transgressif est formé sur les anciennes structures, ces structures sont fossilisées à cause du Miocène transgressif qui sera lui aussi plissé après

Le Miocène Supérieur est concordant sur le Miocène inférieur. Il est construit par des séries épaisses transgressives qui comblent les bassins du haut et moyen de l'Oued l'Oeurgha.

Le Miocène inférieur est formé par une série marno-gréseuse détritique. Il se situe à la zone de Tafrant, Rhafsa et mois Taounate.

Le Pliocène commence par une série détritique qui repose sur le Tortonien, il est surmonté d'un calcaire tufeux et caractérisé par gonflement. Le Pliocène se situe au bas du bassin versant Ouergha.

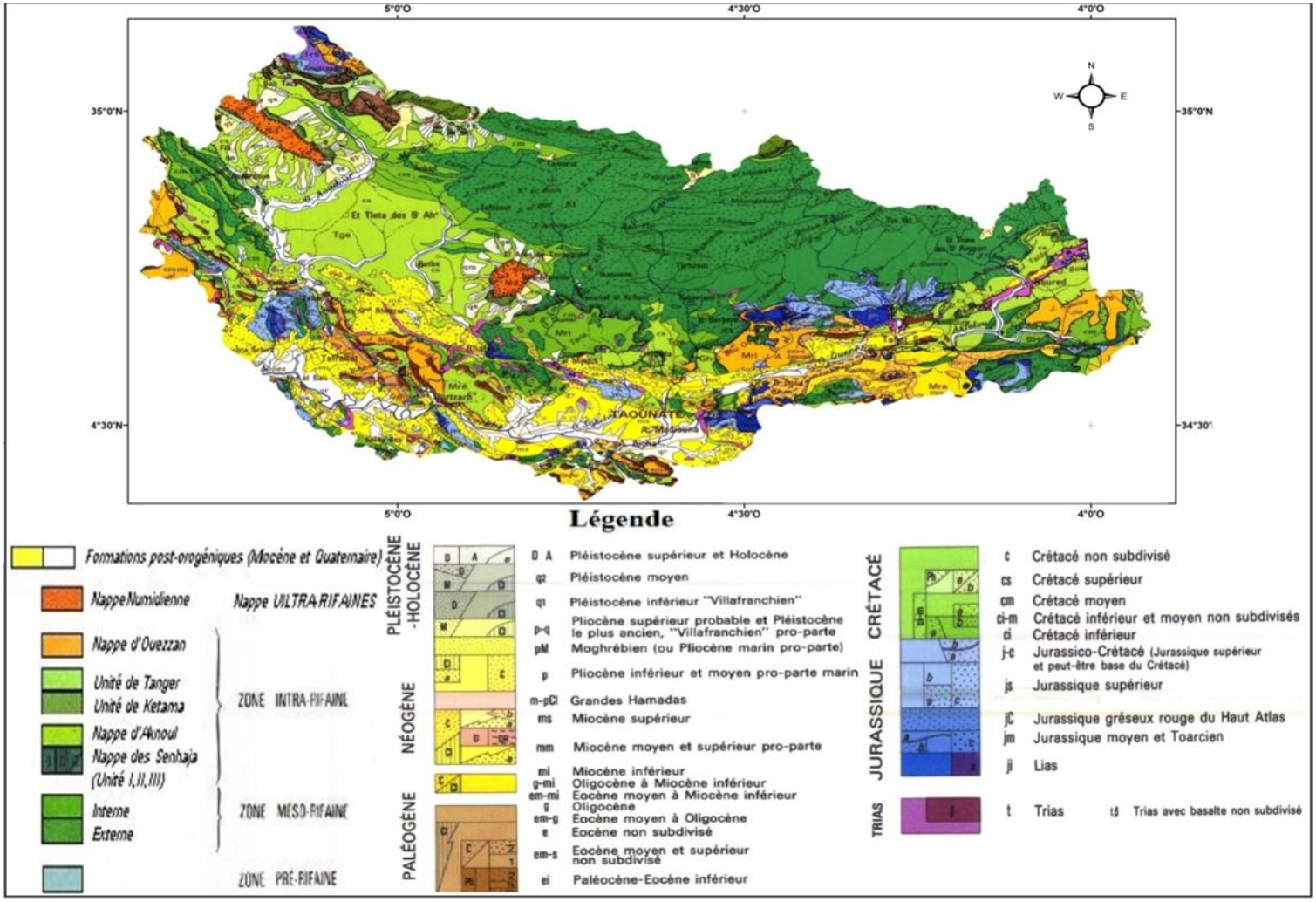

Figure 12: Carte géologique et lithologique du bassin versant de l'Ouergha

5. Conclusion

Les caractéristiques topographiques du bassin versant de l'oued l'ouergha sont déterminées par différents paramètres physiques de notre bassin (Tab.6):

Tableau 6 : Caractéristiques morphologiques du bassin versant de l'Ouergha

Paramètres	Valeurs
Surface	6190 Km²
Périmètre	462 Km
Indice de compacité de Gravelus	1.64
Longueur du cours d'eau principale	255 Km
Longueur du rectangle équivalent	199.35 Km
Largeur du rectangle équivalent	31,04 Km
Altitude maximale	2447 m
Altitude minimale	85 m
Altitude moyenne	1266 m
Pente moyenne	0.06%

Le bassin versant de l'oued Ouergha a un fort relief ce qui favorise la circulation des eaux dans le bassin versant.

Le bassin versant de l'oued Ouergha a un écoulement orienté du Nord-Est vers le Sur-Ouest. On remarque des failles qui sont produites par des mouvements et des déformations épirogéniques au tertiaire et secondaire.

Une déformation dans le domaine rifaine qui caractérise l'évolution structurale, cette déformation antérieure produit des nappes pré-rifaines qui sont dominée par des failles de socle.

Chapitre II : Caractéristique Climatique

1. Introduction

Dans notre zone d'étude, le climat est lié directement avec l'éloignement les côtes atlantiques et méditerranéennes, il est lié aussi avec le climat aride saharien et l'anticyclone des Açores qui influencent le climat général du pays (Benaabidate et al, 2006).

Le climat a un rôle très important et typique dans le cycle hydrologique. La détermination des paramètres climatiques (température, précipitation et évaporation) est nécessaire pour définir le climat, l'étage et les conditions climatiques de notre zone d'étude.

Dans ce chapitre, on va étudier les températures et les précipitations qui nous permettent d'avoir le contraste spatio-temporel.

Ce tableau nous indique les stations qu'on a utilisées dans cette étude, pour une période de 33ans, depuis 1981 à 2014 (Tab.7) :

Tableau 7: Coordonnées des stations pluviométriques du bassin versant de l'Ouergha

Station	N° Station	X(Km)	Y(Km)	Z(m)
Mjaara	5128	513,6	443,2	92
Ain aicha	236	564,7	428,8	230
Bab ouander	1568	579,5	440,1	312
Bab taza	1586	518,5	495	902
Boured	2338	617	458	815
Jbel oudka	4626	553	459	1115
Tabouda	7283	524,25	461,6	180

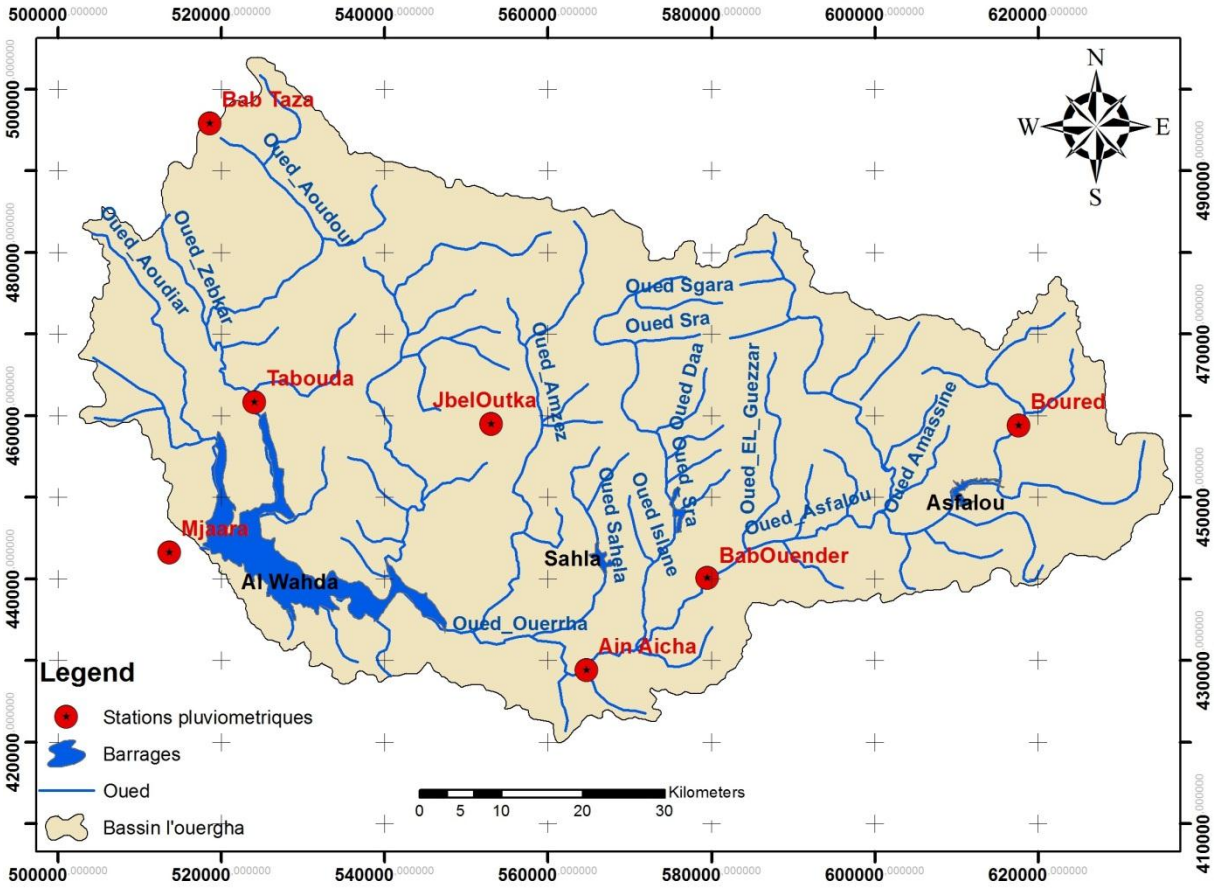

Figure 13: carte de situation géographique des stations pluviométriques étudiées dans ce chapitre au bassin versant de l'oued l'Ouergha

2. Précipitation

Les précipitations sont définit par les eaux météoriques, solide ou bien liquide qui chute sur la surface de la terre. Ces eaux météoriques sont produites par le changement de pression ou de température.

A. Variation temporelle des précipitations

Pour avoir des résultats fiable pour le calculer de la lame d'eau tombée sur la totalité d'un bassin versant, il faut avoir des données de précipitations bien répartis sur la totalité du bassin versant. On va utiliser pour le calculer de la lame d'eau tombée sept stations répartis sur tout le bassin versant avec plusieurs méthodes, la méthode des polygones de Thiessen, des isohyètes et la méthode arithmétique.

1) Précipitations annuelles

L'analyse des précipitations moyennes annuelles dans le bassin versant de l'oued l'Oeurgha nous indique un maximum de précipitation pour la station pluviométrique Jbel oudka (1435,7 mm) et un minimum pour la station pluviométrique d'Ain aicha (522,1 mm). On remarque une diminution des précipitations moyennes annuelles en allant de l'amont vers l'aval (Fig.14).

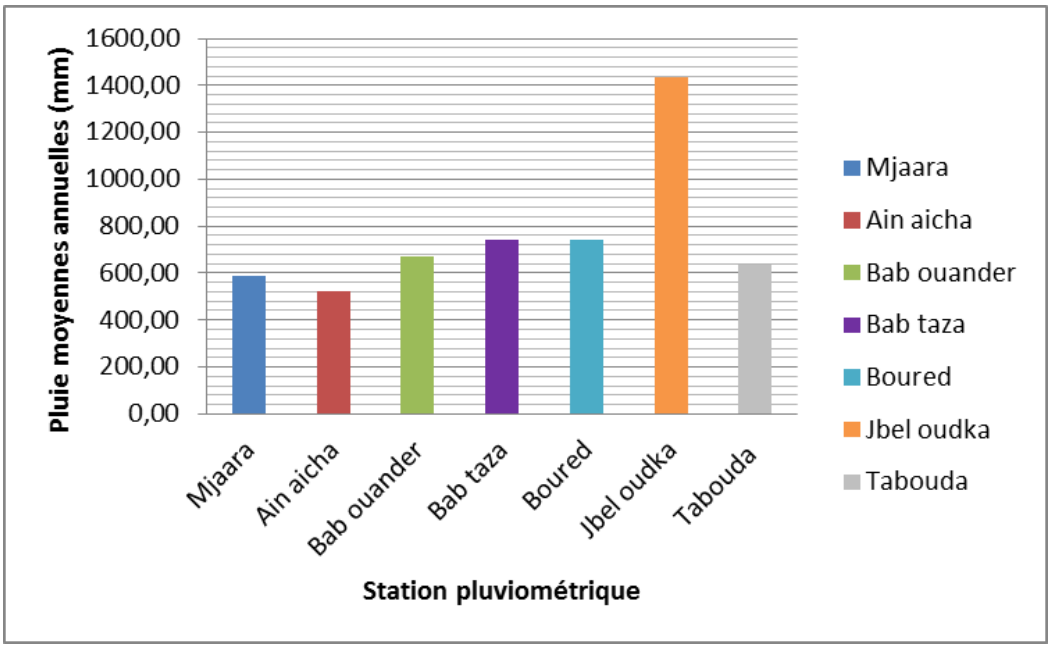

Figure 14: les précipitations moyennes annuelles dans le bassin versant de l'oued l'Ouergha au cours de la période 1981 à 2014

2) Précipitations saisonnières

Les précipitations moyennes saisonnières dans le bassin versant de l'Ouergha nous indiquent que les mois de décembre, janvier et février sont les plus pluvieuses et la saison la plus sèche est la saison d'été (Fig.15). On peut donc constater que le bassin versant de l'oued l'Ouergha a un régime pluviométrique de type méditerranéen.

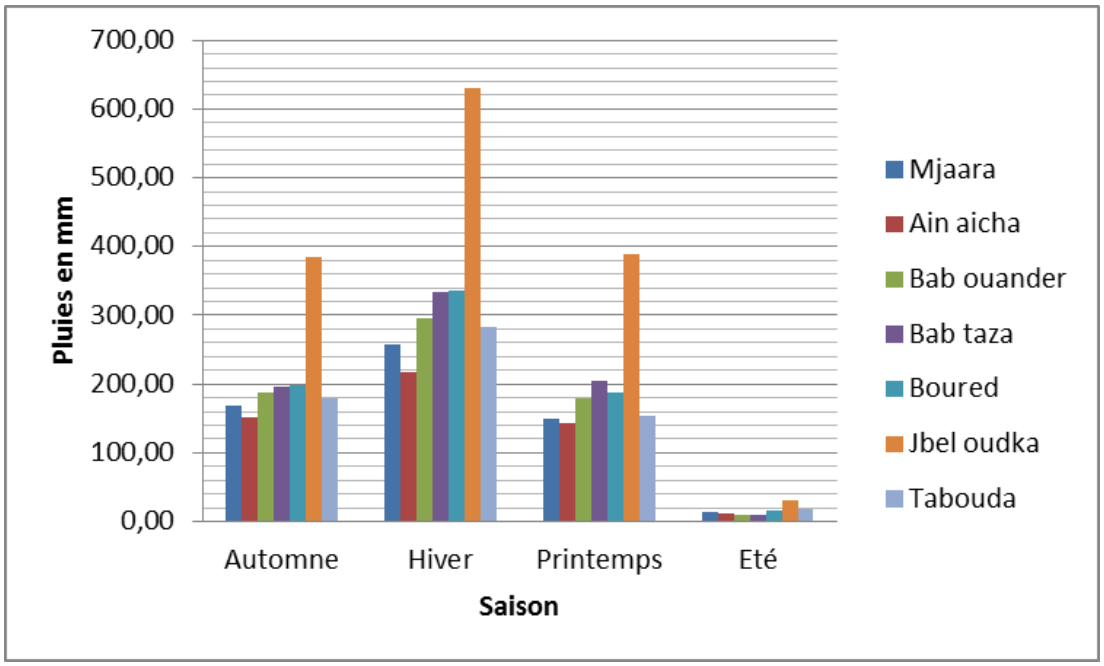

Figure 15: les précipitations moyennes saisonnières dans le bassin versant de l'oued l'Ouergha au cours de la période 1981 à 2014

3) Précipitations moyennes mensuelles

Les précipitations moyennes mensuelles dans le bassin versant de l'oued l'Ouergha nous montre que la majorité de la précipitation mensuelle qui représente un pourcentage supérieure à 90 est enregistré dans la période pluvieuse qui prend l'effet à partir du mois d'Octobre jusqu'au Mai (Fig.16). Cette figure nous indique aussi que le mois de décembre est celui qui reçoit le maximum de précipitations pour toutes les stations du bassin versant de l'oued l'Ouergha et le mois de Juillet est le mois le plus sec.

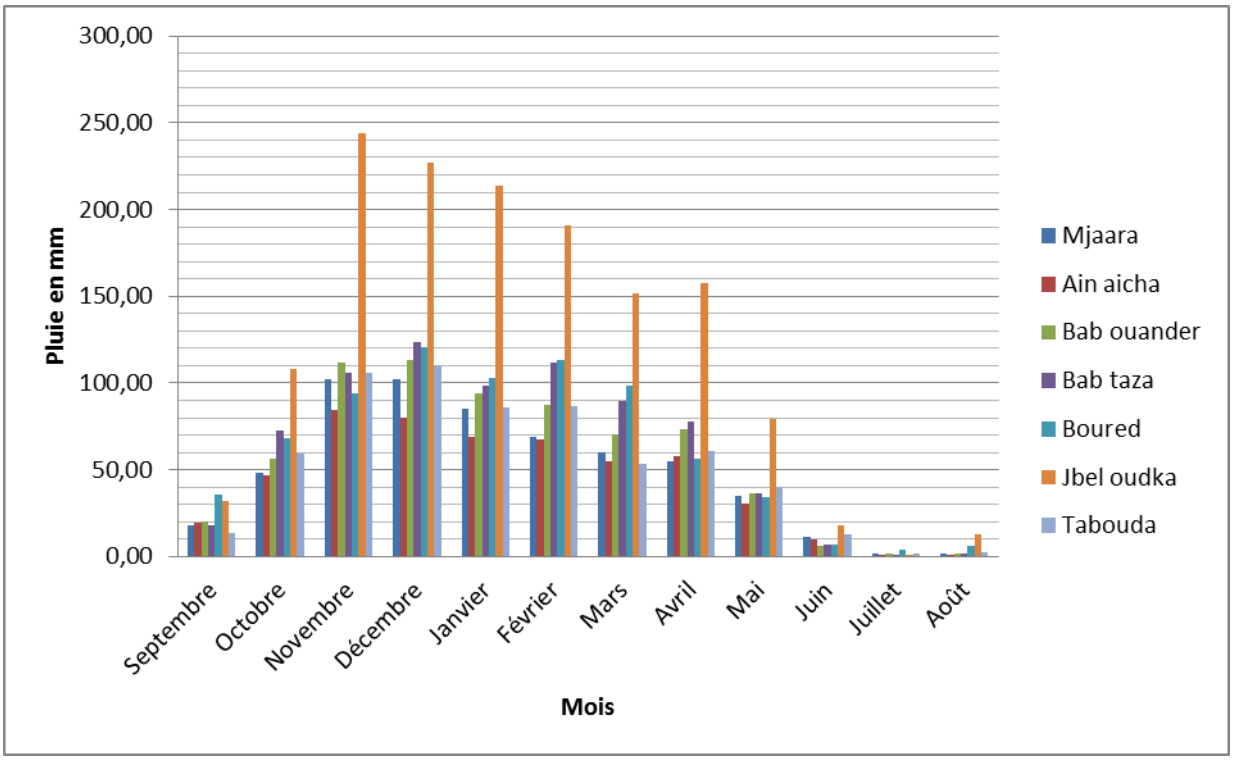

Figure 16: les précipitations moyennes mensuelles dans le bassin versant de l'oued l'Ouergha au cours de la période 1981 à 2014

B. Evaluation de la lame d'eau moyenne tombée sur le bassin

Pour le calcul de la lame d'eau moyenne tombée dans le bassin versant de l'oued l'Ouergha, On a choisi 3 méthodes les plus pratiquées :

- ❖ Arithmétique
- ❖ Les polygones de Thiessen
- ❖ Les isohyètes

1) Méthode arithmétique

La méthode arithmétique est la plus facile pour le calcul de la lame d'eau moyenne tombée dans le bassin versant de l'oued l'Ouergha.

La formule de la méthode arithmétique :

$$P_{moy} = \frac{\sum_{i=1}^{n} P_i}{n}$$

Avec :

P_{moy} : Précipitation moyenne dans le BV en (mm)

P_i : Hauteur des précipitations à la station en (mm)

n : Nombre des stations dans le BV

Donc **P_{moy}=763 mm**

La méthode arithmétique ne donne pas la hauteur exacte des précipitations tombées dans tous le bassin versant, étant donné que dans le bassin versant le relief n'est pas homogène et aussi pour la diversion de répartition des stations dans le bassin versant. Donc, on estime l'erreur avec une méthode :

$$E = \frac{c_v}{\sqrt{n}} \text{ Avec } c_v = \frac{\partial}{P_{moy}}$$

E : Erreur

Cv : Coefficient de variation

P_{moy} : Précipitation moyenne dans le BV (P_{moy}=763 mm)

∂ : Ecart type (∂ = 307 mm)

n : Nombre des stations dans le BV

Donc **E= 15 %**

C'est pour cette raison qu'on a utilisé la méthode de Thiessen et celle des isohyètes pour avoir plus de fiabilité au résultat.

2) Méthodes des polygones de Thiessen

La méthode des polygones de Thiessen permet d'estimer des valeurs pondérées des précipitations pour chaque station pluviométrique dans le bassin versant. Sur une carte

topographique, les differentes zones d'influence sont déterminées par un découpage géométrique du bassin versant.

Les polygones sont tracés en se basant au positionnement des 7 stations pluviométriques du bassin versant de l'oued Ouergha (Fig.17).

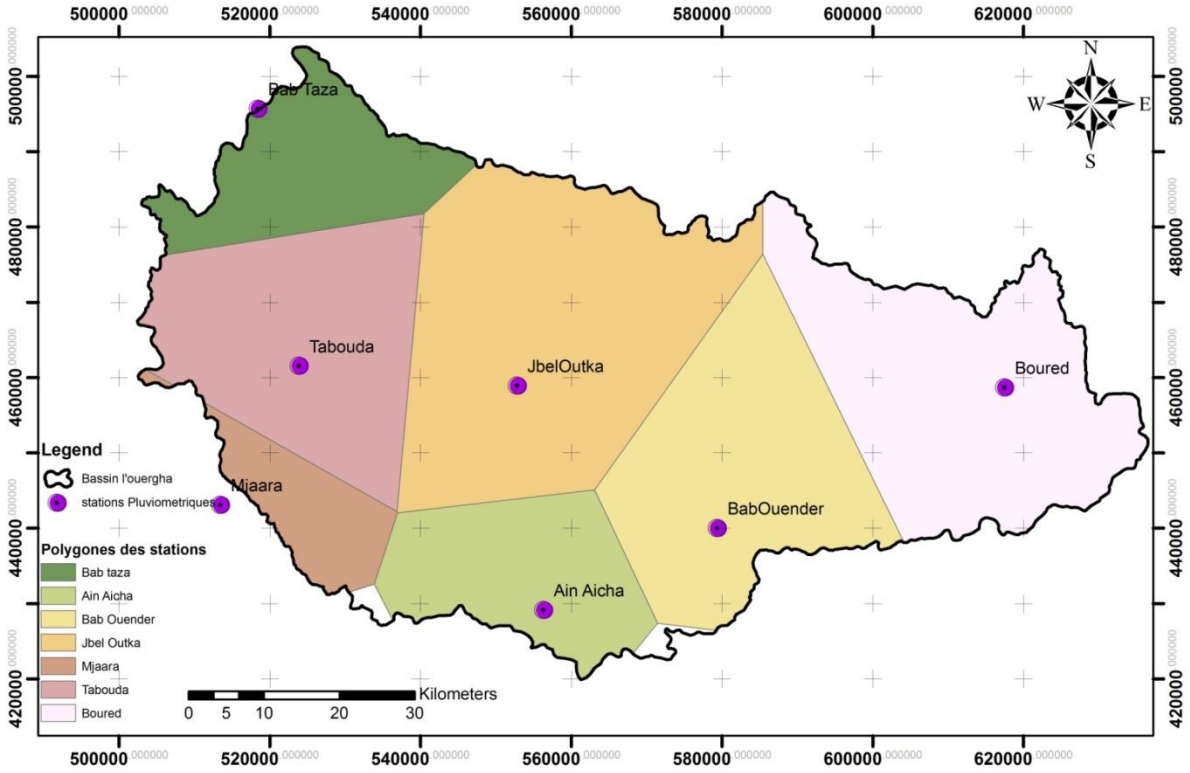

Figure 17: Carte des polygones de Thiessen au bassin versant de l'Ouergha

Le logiciel ArcGis nous permet de déterminer la superficie des polygones dans le bassin versant de l'oued Ouergha. La formule de la méthode des polygones des Thiessen :

$$P_{moy} = \frac{\sum_{i=1}^{n} A_i P_i}{A}$$

P_{moy} : Précipitation moyenne dans le BV en (mm)

P_i: Précipitation à la station i en (mm)

A_i: Superficie du polygone qui appartient à la station i en (Km^2)

A : aire totale du BV (Km^2)

Donc :

P_{moy}=843,5mm

Tableau 8: Calcul de la lame d'eau tombée par la méthode de Thiessen au bassin versant de l'Oued l'Ouergha

Station	Pi (mm)	Ai (Km^2)	Pi*Ai
Mjaara	589,33	281,23	165736,51
Ain aicha	522,11	582,72	304246,27
Bab ouander	672,78	1032,41	694587,97
Bab taza	744,02	543,11	404082,43
Boured	740,48	1208,89	895153,25
Jbel oudka	1435,71	1501,99	2156416,15
Tabouda	633,25	949,18	601071,43
Total	5337,67	6190	5221294,00
Pmoy	**843,50**		

3) Méthode des isohyètes

La méthode des isohyètes est basée sur l'intercalation des précipitations moyennes enregistrées aux stations pluviométriques dans le bassin versant et aussi celles qui sont à cote de ses limites pour une durée précise.

Les isohyètes représente des lignes de valeurs des précipitations annuelles qui sont égaux (Fig.18).

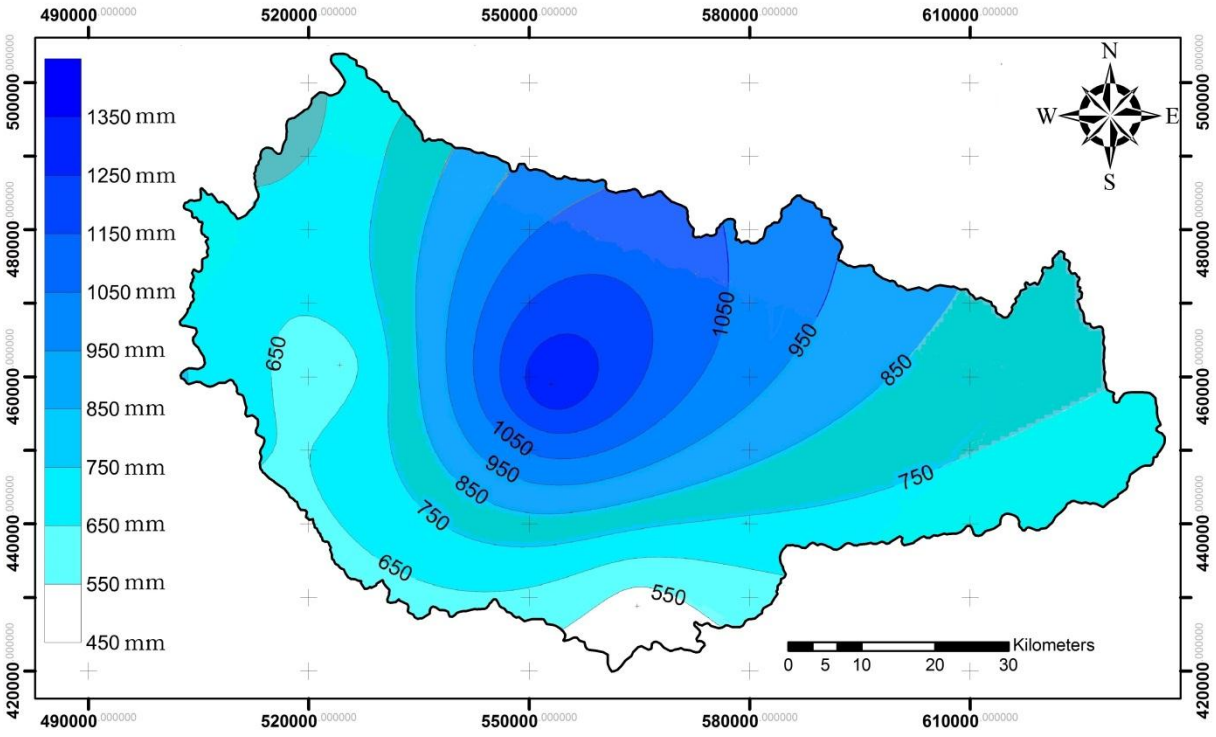

Figure 18: Carte des isohyètesau bassin versant de l'oued l'Ouergha

Le logiciel ArcGis nous permet de calculer la superficie entre deux isohyètes (Tab.9), pour la précipitation moyenne de notre bassin versant, elle est calculée par cette formule :

$$P_{moy} = \frac{\sum_{i=1}^{n} A_i P_i}{S_T} \text{ Avec } P_i = \frac{h_i + h_{i+1}}{2}$$

P_{moy} : Précipitation moyenne du BV en (mm)

S_T : Surface totale du BV en (Km²)

A_i : Surface entre les deux isohyètes h_i et h_{i+1} en (Km²)

n : nombre total des isohyètes au BV

P_i : Hauteur moyenne entre les deux isohyètes en (mm)

Tableau 9: Calcul de la lame d'eau tombée par la méthode des Isohyètes au bassin versant de l'Ouergha

Isohyètes	Pi (mm)	Ai (Km²)	Ai*Pi
<550	522	129,65	67692,98
550-650	600	568,83	341298,20
650-750	700	1793,65	1255554,36
750-850	800	1267,21	1013768,76
850-950	900	781,71	703542,95
950-1050	1000	702,95	702945,46
1050-1150	1100	614,26	675681,17
1150-1250	1200	60,68	72818,40
>1250	1436	271,06	389163,14
Total	8257,82005	6190,00	5222465,41
Pmoy	**843,7**		

Pour la méthode des isohyètes, la précipitation moyenne du bassin versant de l'oued Ouergha : $\mathbf{P_{moy}}$ **= 843,7 mm**

C. Estimation de la moyenne de la lame d'eau calculée par les trois méthodes

L'estimation de la moyenne de la lame d'eau calculée par la méthode arithmétique, la méthode des polygones de Thiessen et la méthode des isohyètes est calculée dans ce tableau (Tab.10):

Tableau 10: Estimation de la lame d'eau moyenne au bassin versant de l'Ouergha

	Méthode arithmétique	Méthode Polygones de Thiessen	Méthode des isohyètes
Precipitation moyenne (mm)	763	843,5	843,7
L'ame d'eau moyenne	816,7		

Le volume d'eau tombé dans le bassin versant de l'oued Ouergha est déterminé par cette formule :

$$\mathbf{V = P_{moy} \times S_T}$$

$V = 816{,}7 \times 10^{-3} \times 6190 \times 10^{6}$

$\mathbf{V = 5055{,}3 \times 10^{6}\ m^{3}}$

Donc :

Le volume d'eau qui reçoit le bassin versant est de 5 milliards de mètre cube par an.

3. Etudes des températures

L'étude des températures est très importante pour déterminer le climat du bassin versant. La relation entre la température et la précipitation nous permet de déterminer les caractéristiques du cycle hydrologique, l'evatranspiration et les indices climatiques. Pour le bassin versant de l'oued Ouergha les données de la température sont disponibles juste au niveau de la station Hajria.

A. Température moyenne mensuelle

La température moyenne mensuelle dans cette figure nous montre la saison chaude et froide durant les mois de l'année au cours d'une période de longue durée (1981 à 2014). Pour les mois de Juin, Juillet, Août et Septembre sont les mois les plus chauds avec un maximum au moi Août de 30,3°C. Au contraire les mois de Juin, Juillet, Août et Septembre représentes la saison froide avec un minimum au mois de Février de 11,57 °C (Fig.19).

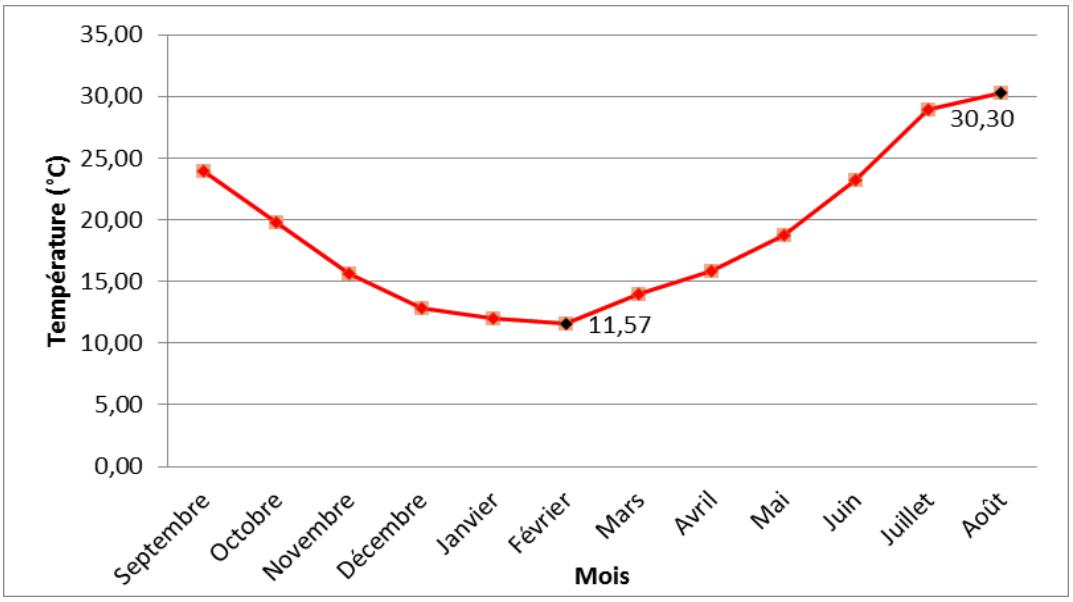

Figure 19: les températures moyennes mensuelles au niveau de la station de Hajria au cours de la période 1981 à 2014

B. Relation température et précipitation

La relation précipitation et température nous permet de calculer des indices qui nous permettra après de déterminer les caractéristiques climatiques de notre bassin versant de l'oued Ouergha, ces indices sont :

- L'indice Xérothermique de Gaussen ou bien Diagramme ombrothermique
- Les indices mensuels d'aridité et L'indice d'aridité de De Martonne
- Le quotient pluviométrique d'Emberger

1) L'indice Xérothermique de Gaussen

L'indice Xérothermique de Gaussen nous permet de déterminer la période pluvieuse et la période sèche. Pour la période humide, les précipitations sont supérieures au double des températures (P>2T). Par contre la période sèche c'est le cas inverse (2T>P). Les besoins d'eau sont satisfaisants, dans le cas où elles sont égales (2T=P) (Fig.20).

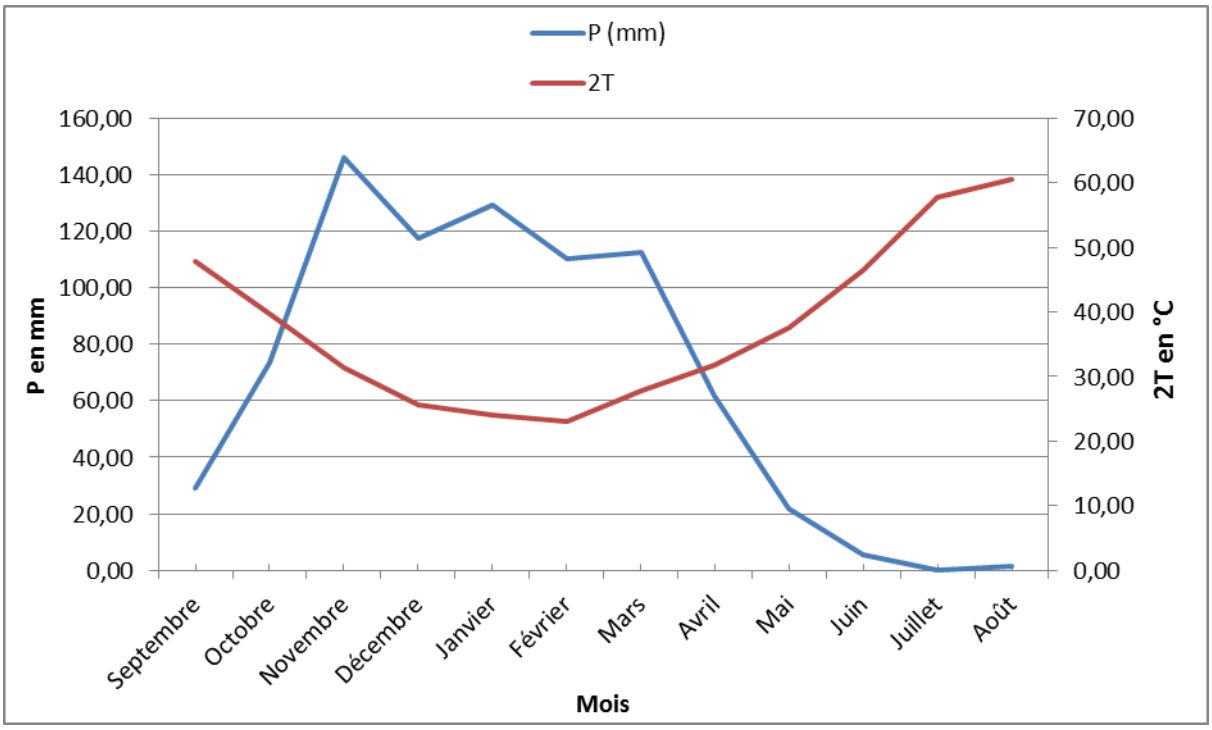

Figure 20: Diagramme ombrothermique de Gaussen au niveau de la station Hajria au cours de la période 1981 à 2014

Ce diagramme nous montre que la période sèche prend l'effet à partir du mois Avril jusqu'au mois d'Octobre. Pour la période humide, elle prend l'effet à partir du mois Octobre jusqu'au mois d'Avril.

2) L'indice d'aridité annuelle de De Martonne et les indices mensuels d'aridité

L'indice d'aridité annuelle de De Martonne et l'indice mensuel d'aridité sont parmi les indices qui nous permettent aussi de déterminer le climat de notre zone. Pour l'indice d'aridité annuelle de De Martonne, il est calculé par la formule suivante :

$$I = \frac{P}{T + 10}$$

P : Précipitation moyenne annuelle dans le bassin versant en (mm)

T : Température moyenne annuelle dans le bassin versant en (°C)

I= 27,98

Donc le bassin versant de l'oued Ouergha est caractérisé par un climat **semi humide** (20<i<30).

Pour l'indice mensuel d'aridité, il est calculé par la formule suivante :

$$i = \frac{12 \times P}{t + 10}$$

P : précipitation moyenne mensuelle dans le bassin versant (mm)

t : température moyenne mensuelle dans le bassin versant (°C)

Cette figure nous indique que l'indice d'aridité est inferieure à cinq pour les mois de Juin, Juillet et Août, donc ces mois ont un régime hyperaride. Un climat aride pour les mois de Mai et Septembre. Pour les mois qui reste, le régime climatique est humide a semi humide (Fig.21).

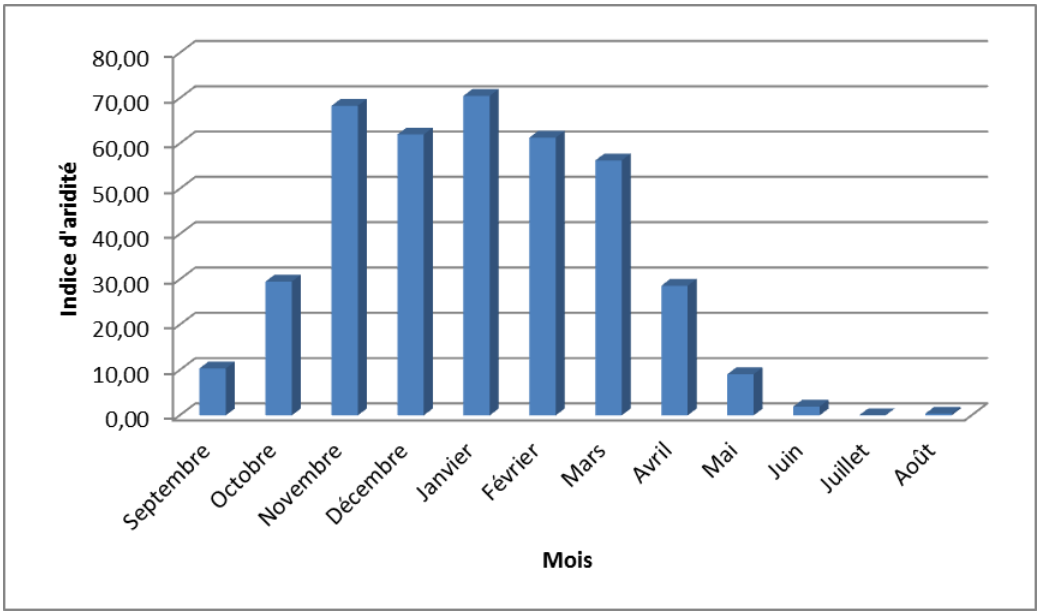

Figure 21: L'indice d'aridité mensuelle au niveau de la station de Hajria au cours de la période 1981 à 2014

3) Quotient pluviométrique d'Emberger

Le quotient pluviométrique d'Emberger ressemble à une formule synthétique du climat méditerranéen en prenant en considération la moyenne annuelle de la température et la précipitation (Sauvage, 1960). Le quotient pluviométrique d'Emberger est calculé par la formule suivante :

$$Q_2 = \frac{P}{\frac{(M+m)(M-m)}{2}} \times 1000$$

Q_2 : Le quotient pluviométrique d'Emberger

P : Précipitation moyenne annuelle dans le bassin versant (P= 808,56mm)

M : Moyenne des maxima du moi le plus chaud au bassin versant (M=303,15°Kelvin)

m: Moyenne des minima du mois le plus froid au bassin versant (m= 284,15°Kelvin)

Q_2 =144

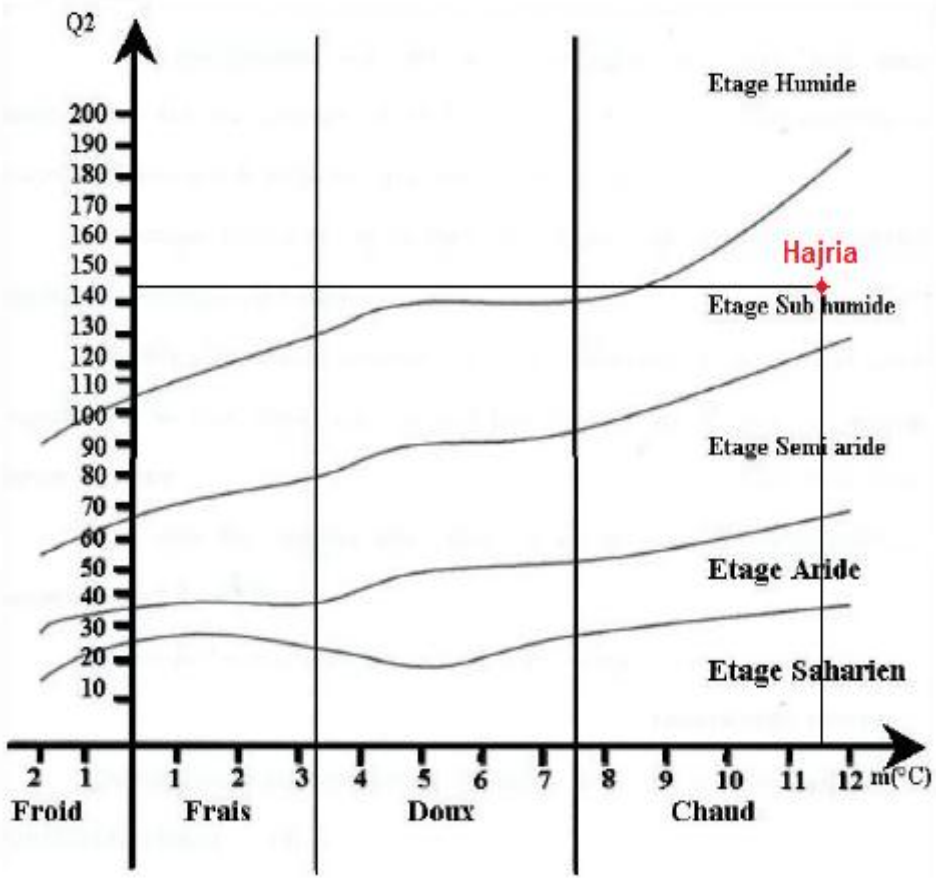

Figure 22: Climagramme d'Emberger dans le bassin versant de l'oued l'Ouergha au niveau de la station Hajria

Le Climagramme d'Emberger nous indique que le bassin versant de l'Ouergha appartient à un étage climatique **semi humide**.

4. Evapotranspiration

L'évapotranspiration est parmi les éléments initiaux de l'hydrologie, pour déterminer le potentiel hydrologique d'une zone, il est nécessaire de savoir et faire une étude sur L'évapotranspiration.

L'évapotranspiration est une association de deux éléments la transpiration et l'évaporation.

L’évaporation est une transformation progressive d’eau de l’état liquide à l’état gazeux. Ce phénomène absorbe l’énergie thermique ce qui amène à réduire le degré de température de l’environnement.

La transpiration est processus continu provoqué par l’évaporation des eaux à travers les plantes vers l’atmosphère.

L’évapotranspiration est la somme de l’évaporation (des surfaces d’eau libre et des sols) et de la transpiration du couvert végétale.

L’estimation des pertes des eaux par l’évapotranspiration est représentée par deux notions :

- L’évapotranspiration potentielle
- L’évapotranspiration réelle

A. L’évapotranspiration potentielle

L’évapotranspiration potentielle (ETP) est une mesure de la capacité de l’atmosphère à éliminer l’eau de la surface d’un sol avec couvert végétal disposant de l’eau en abondance.

L’évapotranspiration potentielle est estimée par Thornthwaite (1948) avec l’équation suivante :

$$ETP = 16 \times \left(\frac{10 \times T_k}{I}\right)^{\alpha} \times K$$

ETP : L’évapotranspiration potentielle dans le BV en (mm)

K: coefficient d’ajustement mensuel donné par la table de Gerber et Brocher

T_K: Température moyenne du mois considéré en °C

$i_K=(\frac{TK}{5})^{1.514}$: Indice thermique mensuel

$I=\sum iK$: Indice thermique annuel (I= 93,47)

$\alpha=\left(\frac{1.6\times I}{100}\right)+0.5$: Coefficient exprimé en fonction de i_K (α=1.99)

Selon la méthode de Thornthwaite, le résultat du calcul de l'évapotranspiration potentiel mensuelle au bassin versant de l'Ouergha est indiqué dans le tableau suivant (Tab.11):

Tableau 11: ETP mensuel selon la méthode de Thornthwaite au bassin versant de l'Ouergha au cours de la période (1981 à 2014)

	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août
K	1,05	0,91	0,75	0,75	0,73	0,79	1,02	1,15	1,32	1,33	1,33	1,24
T_K	23,94	19,83	15,69	12,79	11,99	11,57	13,95	15,84	18,72	23,21	28,89	30,30
iK	10,71	8,05	5,65	4,15	3,76	3,56	4,73	5,73	7,38	10,22	14,23	15,30
ETP	108,14	64,58	33,48	22,34	19,13	19,29	36,07	52,31	83,51	128,87	198,77	203,57
P	29,32	73,40	146,26	117,73	129,24	110,20	112,32	61,63	21,72	5,35	0,13	1,25

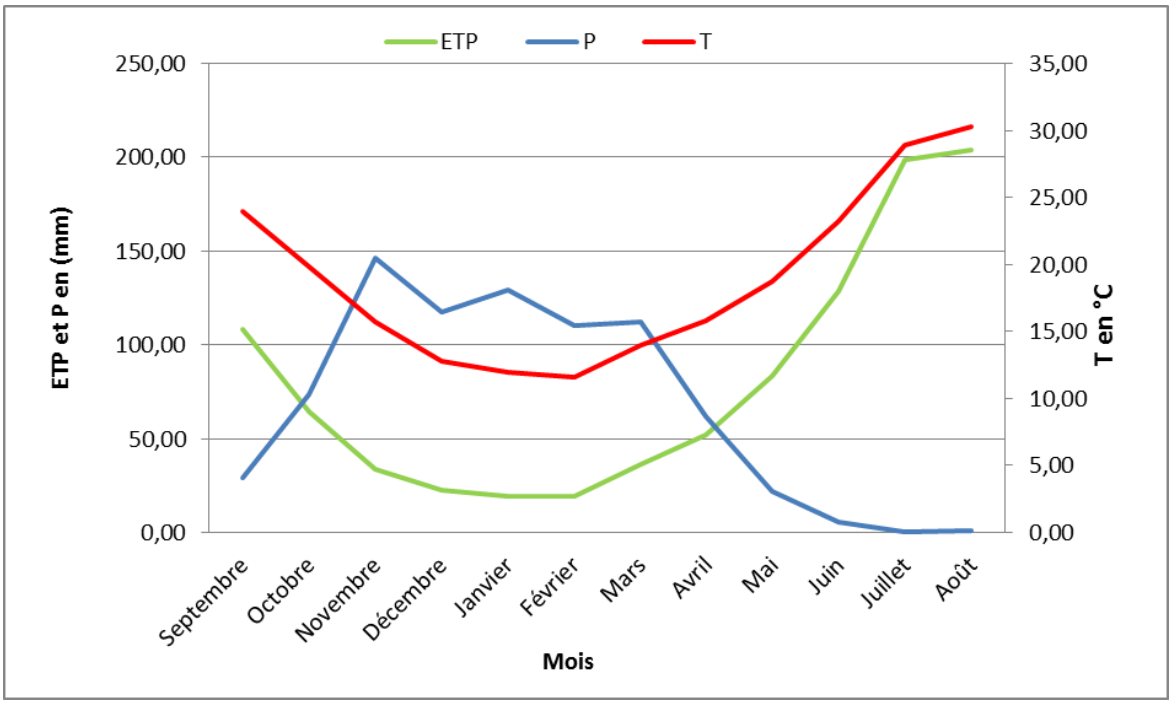

Figure 23: Evolution de l'ETP en fonction de Précipitation et Température au niveau de la station Hajria au cours de la période 1981 à 2014

Les résultats obtenus pour l'évapotranspiration potentielle mensuelle au bassin versant nous indiquent plusieurs changements pendant toute la période de l'année, une valeur maximale est enregistrée au mois d'aout de 203,57 mm et une valeur minimale au mois de Janvier de 19,13mm (Fig.23).

B. Evapotranspiration réelle

L'évapotranspiration réelle nous permet de déterminer la quantité d'eau retirée à l'état réel d'une surface en considération du processus de transpiration et d'évaporation lorsqu'il y a un manque d'eau.

Plusieurs méthodes sont pratiquées pour le calcul L'évapotranspiration réelle, la méthode de Coutagne (1954), Thornthwaite (1955) et de Turc (1961).

1) Méthode de Turc

La formule pour calculer l'évapotranspiration réelle par la méthode de Turc :

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

Avec :

ETR : évapotranspiration réelle dans le bassin versant en (mm)

P : précipitation moyenne annuelle dans le bassin versant en (mm)

$L = 300 + 25T + 0,05T^3 = 1149,27$

T : température moyenne annuelle au bassin versant en (°C)

ETR = **686 mm/an.**

2) Méthode de Coutagne

La formule pour calculer l'évapotranspiration réelle par la méthode de Coutagne :

$$ETR = P - \gamma P^2 \quad \textbf{Avec} \quad \gamma = \frac{1}{0,8+0,14\times T}$$

Avec :

ETR : évapotranspiration réelle dans le bassin versant en (mm)

P : précipitation moyenne annuelle dans le bassin versant en (mm)

T : température moyenne annuelle au bassin versant en (°C)

ETR = **618 mm/an.**

3) Méthode du bilan de Thornthwaite

Le calcul de l'ETR dans le tableau (Tab.12) est effectué par une méthode qui se base sur le bilan hydrique du sol, c'est en effet la méthode du bilan de Thornthwaite. Pour cette

méthode le sol est saturé à 100 mm de précipitation absorbée, ce qu'on appelle la quantité du confort hydrique ou bien de la réserve facilement utilisable (RFU).

La méthode du bilan de Thornthwaite contient 2 périodes differentes :

- La période sèche, c'est le cas où on a l'évapotranspiration potentielle est supérieur à la précipitation, donc l'évapotranspiration réelle dans ce cas égale à la somme de la précipitation et la réserve facilement utilisable.
- La période humide, c'est le cas où on a la précipitation est supérieur à l'évapotranspiration potentielle, donc l'évapotranspiration réelle dans ce cas égale à l'évapotranspiration potentielle, ce surplus de précipitation rempliera la réserve facilement utilisable.

D'autre cas ou on peut trouver que l'évapotranspiration potentielle est égale à l'évapotranspiration réelle lorsque la réserve facilement utilisable est rempli, donc la RFU égale à l'évapotranspiration potentielle moins la précipitation. Le cas contraire, la réserve facilement utilisable est faible ou bien nulle, donc cela provoque la création du déficit agricole (DA) qui égale à l'évapotranspiration potentielle mois l'évapotranspiration réelle.

Dans la période humide, la valeur obtenue de la précipitation moins l'évapotranspiration potentielle va alimenter la réserve facilement utilisable jusqu'à le maximum de 100mm (puisque le bassin versant de l'oued Ouergha selon les résultats qu'on a obtenu a un climat semi humide), après on aura un excès d'eau pour le ruissèlement et l'infiltration. Pour la période sèche, la réserve facilement utilisable va alimenter l'évapotranspiration réelle. Dans la plupart de temps à cette période la réserve facilement utilisable est nulle.

Tableau 12: calcul de l'ETR mensuelle par la méthode de Thornthwaite au bassin versant de l'Ouergha au cours de la période 1981 à 2014

	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août
P	29,32	73,40	146,26	117,73	129,24	110,20	112,32	61,63	21,72	5,35	0,13	1,25
ETP	108,14	64,58	33,48	22,34	19,13	19,29	36,07	52,31	83,51	128,87	198,77	203,57
RFU	0	8,82	100	100	100	100	100	100	38,21	0	0	0
ETR	29,32	64,58	33,48	22,34	19,13	19,29	36,07	52,31	83,51	43,56	0,13	1,25
Excèdent	-	-	21,6	95,39	110,11	90,91	76,25	9,32	-	-	-	-
Déficit	78,82	-	-	-	-	-	-	-	-	85,31	198,64	202,32

L'évapotranspiration réelle mensuelle est très élevée en saison de printemps et d'automne. Après, L'évapotranspiration potentielle augmente jusqu'au maximum durant la saison sèche. L'évapotranspiration réelle annuelle au bassin versant de l'oued Ouergha par la méthode du bilan de Thornthwaite égale a **404,9 mm/an**.

Donc l'évapotranspiration réelle annuelle dans le bassin versant par les 3 méthodes égale à **569,6 mm/an,** ce qui représente **70.4%** des précipitations moyennes annuelles du bassin versant de l'oued Ouergha.

C. Bilan hydrique

Le bilan hydrique est la relation entre les flux d'eau entrants (Précipitation) et sortants (évaporation, transpiration) d'un système sur une période donnée. Pour le bassin versant de l'oued Ouergha le bilan hydrique permet de désigner plusieurs phases au cours de l'année (Fig.24) :

- D : c'est la phase déficitaire, elle prend l'effet à partir du mois Juin jusqu'au Septembre.
- R : cette phase apparait au mois d'Octobre, elle est considérée comme une période de reconstitution des réserves d'eau.
- S : cette phase prend l'effet à partir du mois Novembre jusqu'au mois d'Avril. Dans cette période les précipitations sont supérieures à l'évapotranspiration, cet excès d'eau alimentera après les nappes.

- E : cette phase prend l'effet à partir du mois Avril jusqu'au mois de Juin. Dans cette période, les réserves d'eau se réduisent doucement sous l'effet de l'evatranspiration jusqu'au l'épuisement total au mois de Juillet.

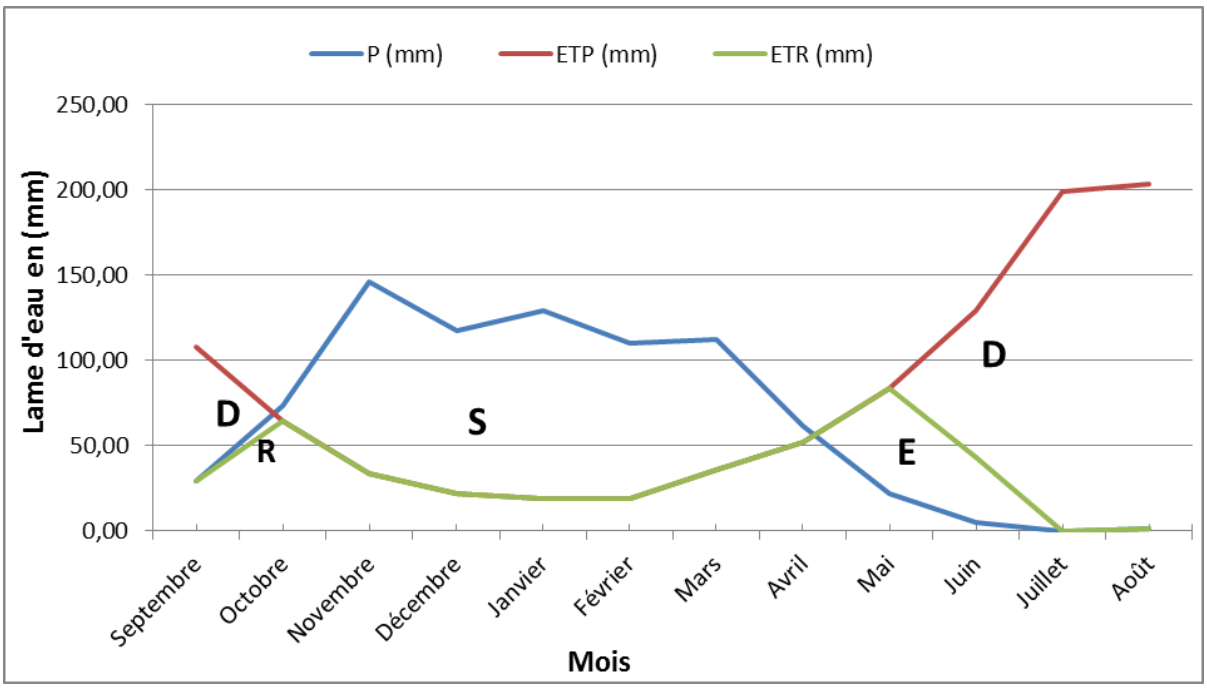

Figure 24: Bilan hydrique du bassin versant de l'oued l'Ouergha au niveau de Hajria, estimé à partir de précipitations, L'ETP et l'ETR par la méthode de Thornthwaite au cours de la période 1981 à 2014

5. Conclusion

L'analyse des précipitations dans le bassin versant de l'oued Ouergha nous indique qu'il y a un abaissement progressif des précipitations au niveau des stations sur toute la trajectoire de l'oued Ouergha à partir de l'amont vers l'aval. Pour toutes les stations du bassin versant, les mois les plus secs sont les mois de la saison d'été, ce qui nous permet de conclure que notre bassin versant a un régime pluviométrique de type méditerranéen.

Pour les températures dans le bassin versant de l'oued Ouergha, le mois le plus chaud est le mois d'Août avec une température moyenne de 30.3 °C et le mois le plus froid est le mois d'Avril avec une température moyenne de 11,5°C. La relation précipitation et température nous a permis de conclure que le climat au niveau du bassin versant de l'oued Ouergha est semi humide.

La valeur annuelle moyenne de l'ETR au bassin versant de l'oued Ouergha est de 569,6 mm, ce qui représente **70.4%** des précipitations moyennes annuelles qui de 808 mm.

Le bilan hydrique a déterminé 4 phases au niveau du bassin versant d'Ouergha, une première phase déficitaire qui prend l'effet à partir du mois Juin jusqu'au Septembre. Une 2ème phase qui apparait au mois d'Octobre, elle est considérée comme une période de reconstitution des réserves d'eau. La 3ème phase qui prend l'effet à partir du mois Novembre jusqu'au mois d'Avril. Dans cette période les précipitations sont supérieures à l'évapotranspiration, cet excès d'eau alimentera après les nappes et la 4ème phase qui prend l'effet à partir du mois Avril jusqu'au mois de Juin. Dans cette période, les réserves d'eau se réduisent doucement sous l'effet de l'evatranspiration jusqu'au l'épuisement total au mois de Juillet.

Chapitre III : Caractéristique Hydrologique

1. Introduction

Le bassin versant de l'oued l'Ouergha a une direction d'écoulement ENE-OSO. Le débit varie d'une année à une autre et d'un mois à un autre dans tous les oueds du bassin. On a réalisé l'étude hydrologique du bassin versant à la base des données hydrométriques des stations (Fig.25) :

- Oued Aoudour 1981 à 2020 a la station Station Tabouda
- Oued Amzez 1981 à 2020 a la Station Galaz
- Oued Ouergha 1981 à 2020 a la Station Ain Aicha

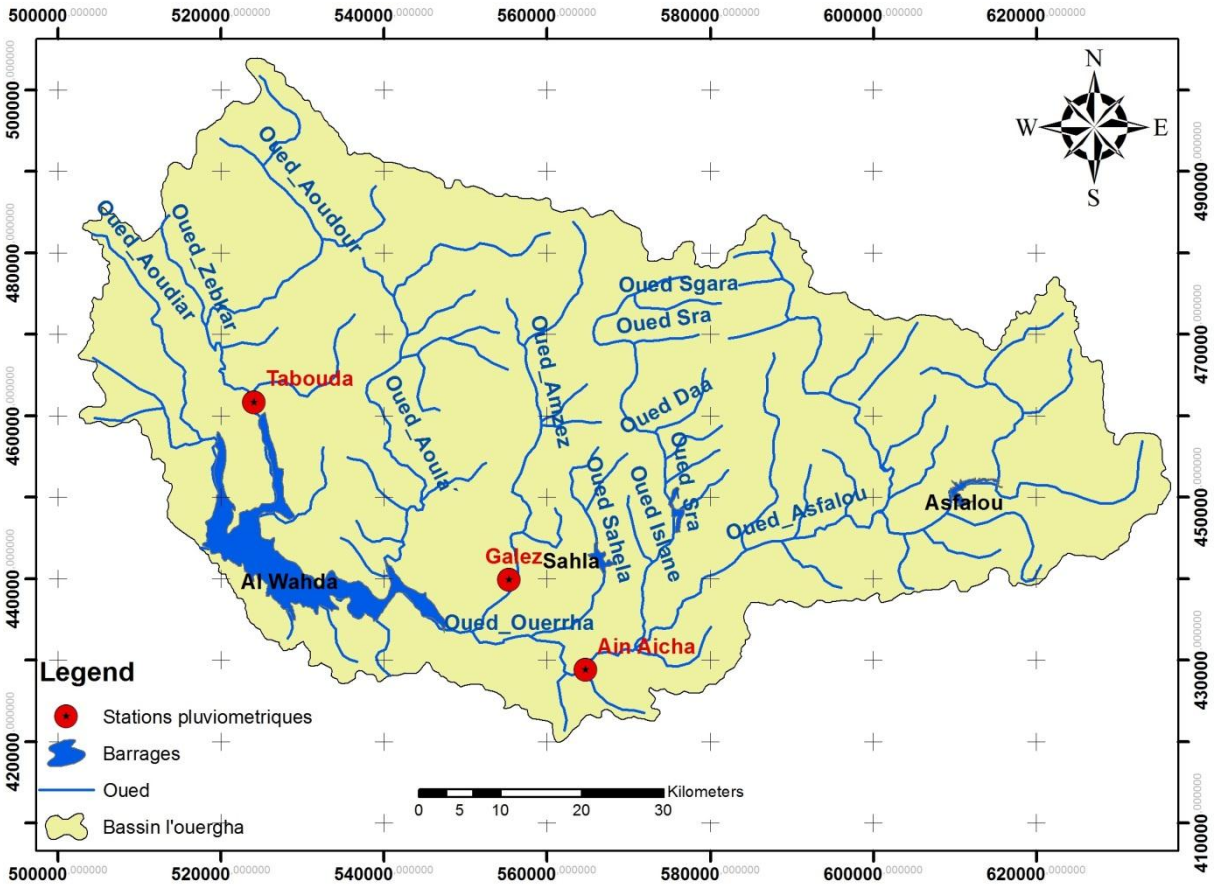

Figure 25: carte de situation géographique des stations pluviométriques étudiées dans ce chapitre au bassin versant de l'oued l'Ouergha

Pour l'étude du bilan hydrologique du bassin versant de l'oued l'Ouergha, ainsi que son fonctionnement, On a analysé la relation entre les débits et les précipitations pour ces stations et aussi l'étude du régime des débits et leurs fluctuations. Apres, nous étudions la genèse des étiages, les crues et les caractéristiques du bilan hydrologique.

2. Etude du régime du débit

A. Débits annuels

En tenant compte des variations interannuelles dans les stations, l'évolution des débits moyens annuels reflètent les irrégularités spatiotemporelles. La situation amont-aval et en relation direct avec les irrégularités spatiales. Autrement, en relief une succession de période sèche et période humide est mise par les irrégularités temporelles (Fig.26), (Fig.27) et (Fig.28).

Pour la station d'Ain Aicha le débit moyen annuel est de (20.44 m^3/s) et pour les stations Tabouda (11.87 m^3/s) et Galaz (8.53 m^3/s) qu'ils ont un débit moyen annuel moins important par rapport à la station Ain aicha. Ce qui explique la succession de période humide et de période sèche et la reflète la situation amont–aval.

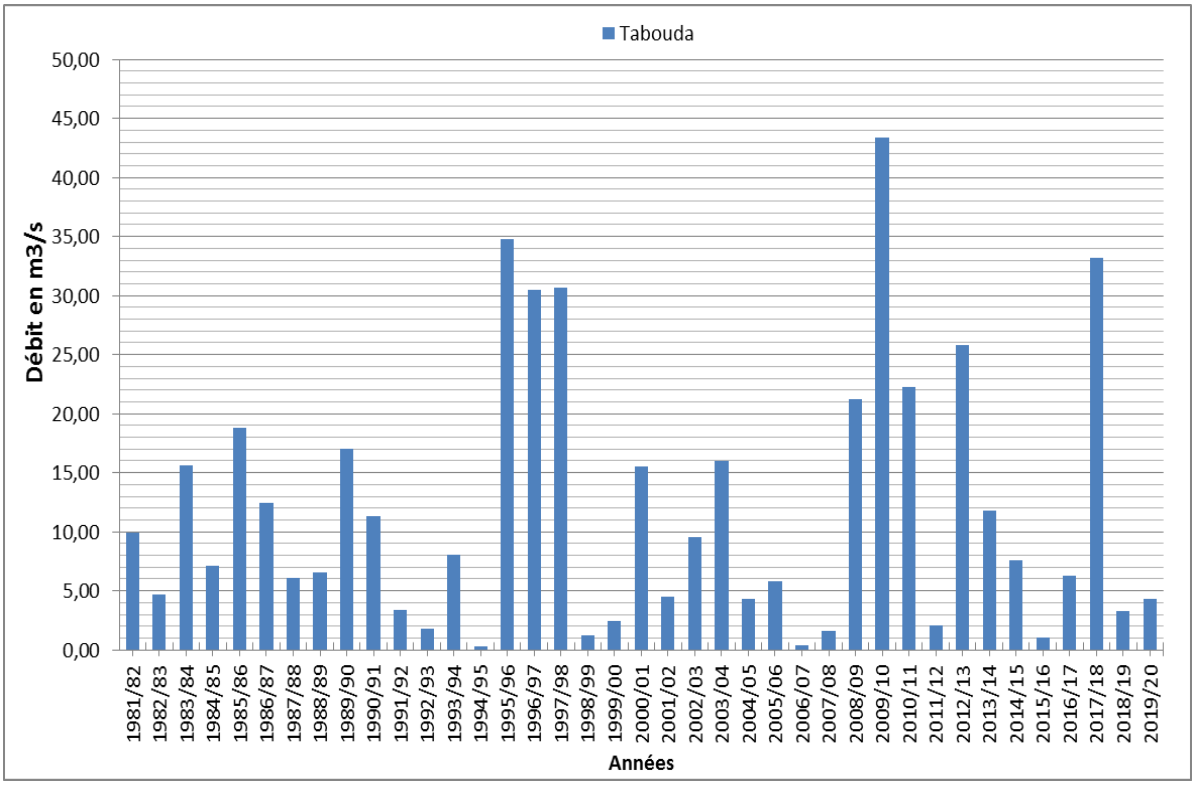

Figure 26: les débits moyens annuels au niveau de la station de Tabouda

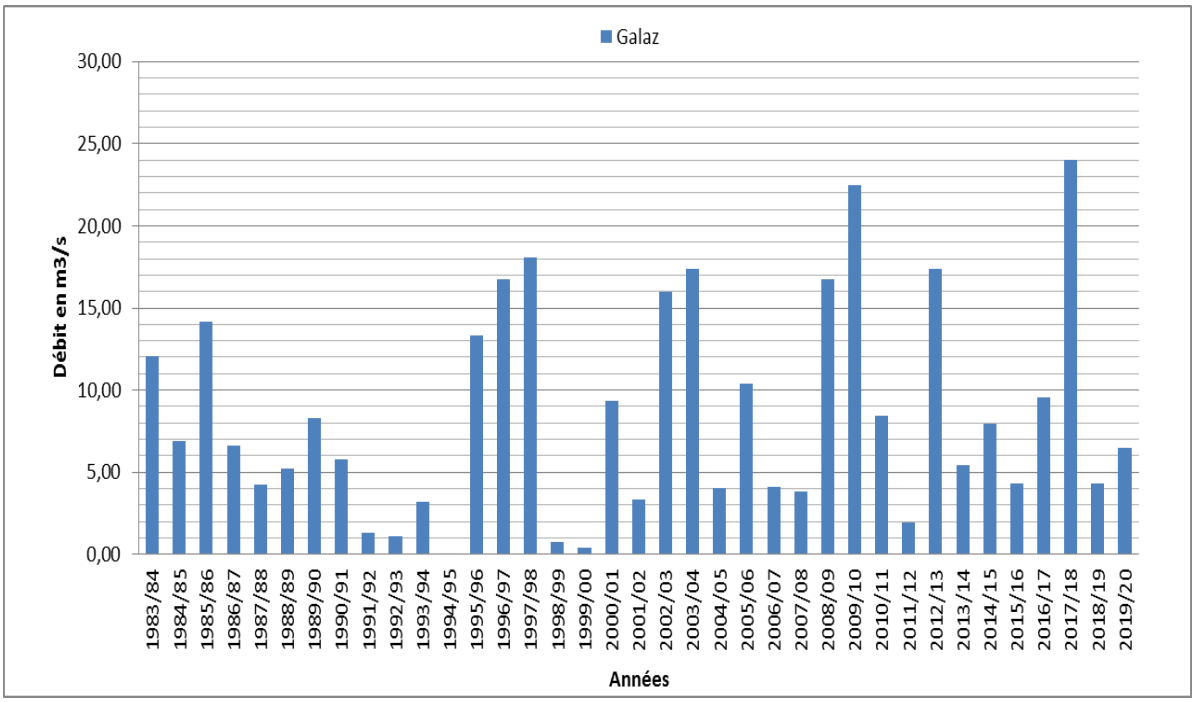

Figure 27: les débits moyens annuels au niveau de la station de Galaz

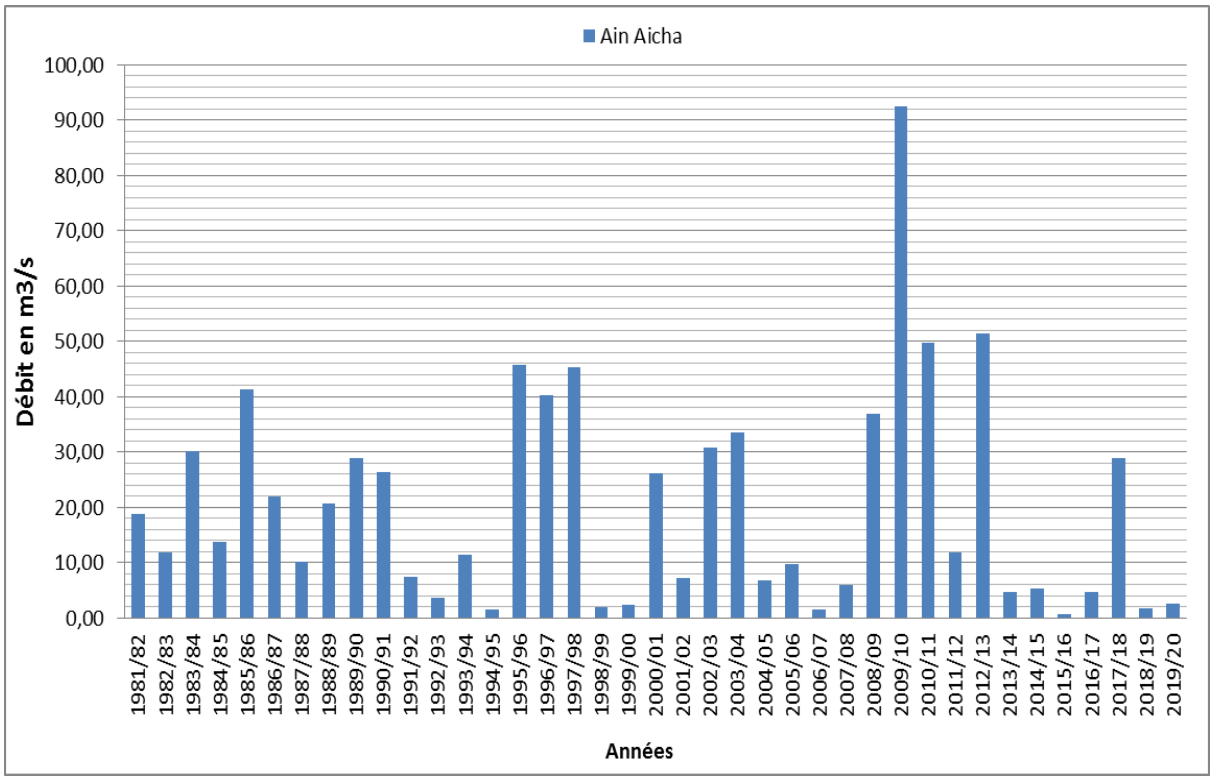

Figure 28: les débits moyens annuels au niveau de la station d'Ain Aicha

1) Variation des débits annuels par la méthode des écarts à la moyenne

Le bassin versant est affecté par des fluctuations hydroclimatiques et pour le mettre en évidence la méthodologie la plus efficace c'est les écarts des débits moyens annuels aux débits moyens interannuels qui permet de distinguer les périodes déficitaires ou sèches (Ec <0) et les périodes excédentaires ou humides (Ec > 0).

La formule utilisée :

$$E_c = \frac{Q_{ma} - Q_{mi}}{Q_{mi}} \times 100$$

Q_{mi} : Débit moyen interannuel

Q_{ma}: Débit moyen annuel

Les (Fig.29, Fig.30 et Fig.31) montrent une alternance des séries des périodes sèches ou déficitaires et des périodes humides ou excédentaires au niveau de chaque station.

Ces stations n'ont pas eu une conformité d'alternance des séries de périodes sèches et des séries de périodes humides.

Les réservoirs hydrologiques sont vidées en périodes sèches et recharger en périodes humides par les fluctuations climatiques ce qui explique l'alternance de ces périodes.

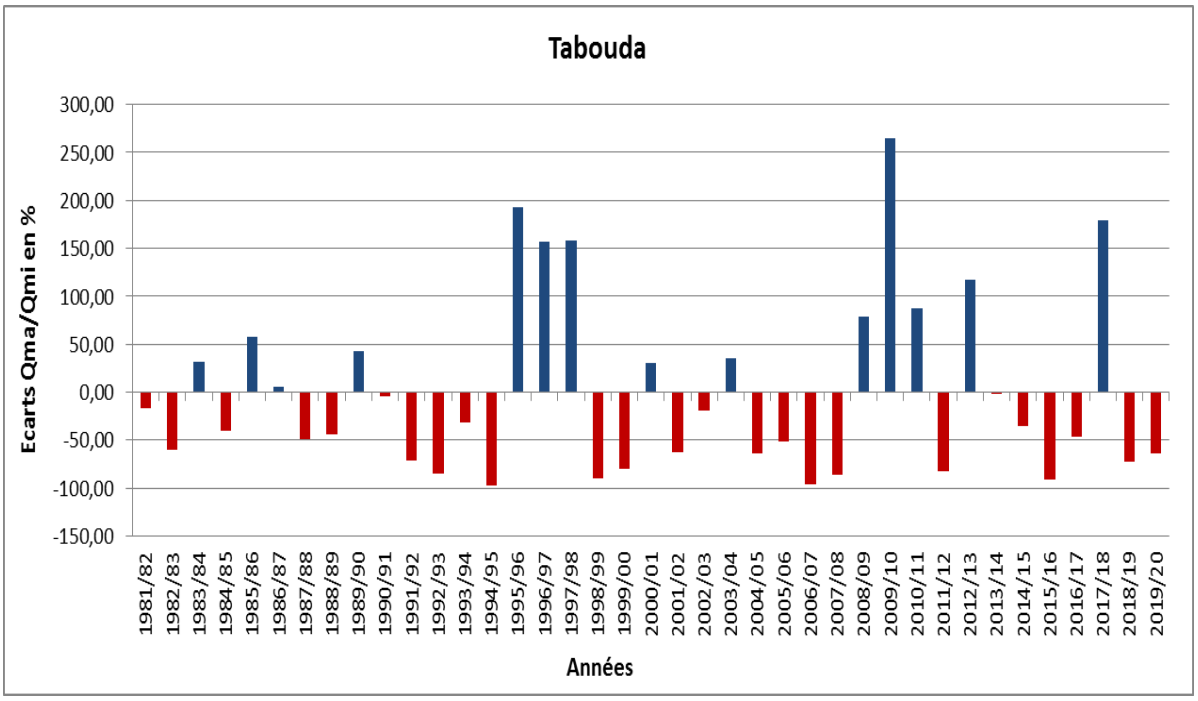

Figure 29: les écarts des débits moyens annuels et interannuels au niveau de la satation de Tabouda

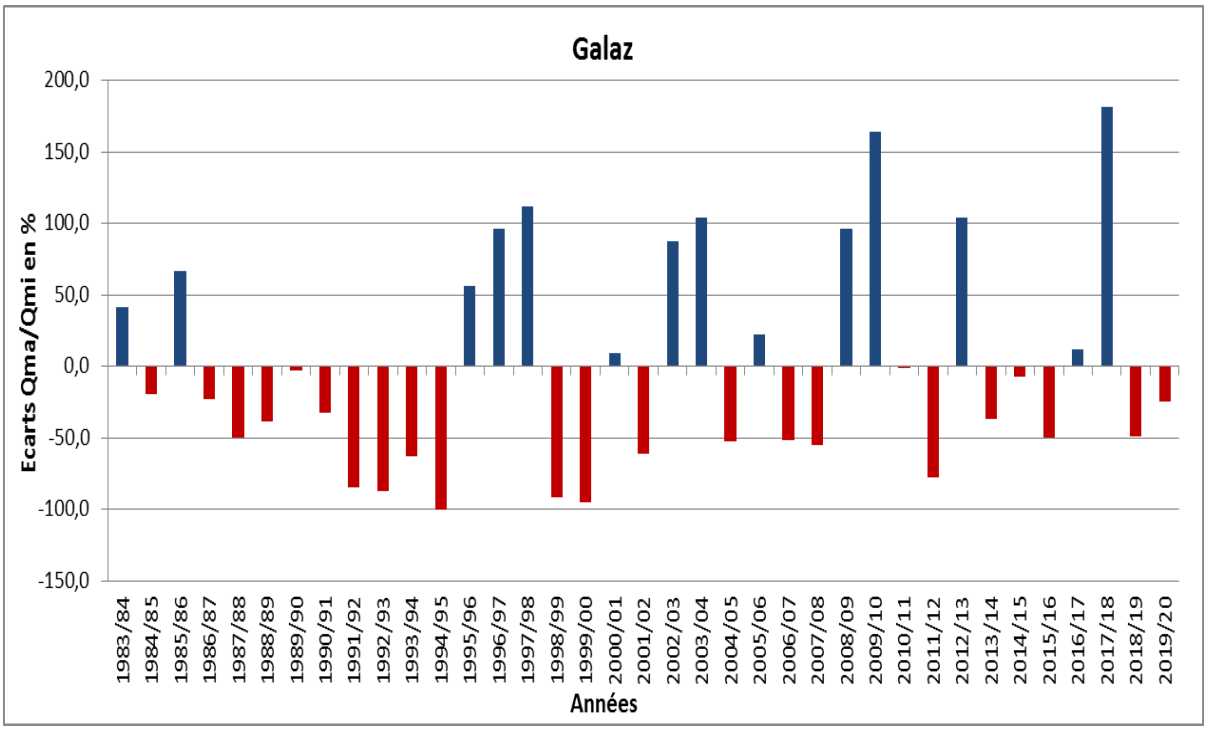

Figure 30: les écarts des débits moyens annuels et interannuels au niveau de la station de Galaz

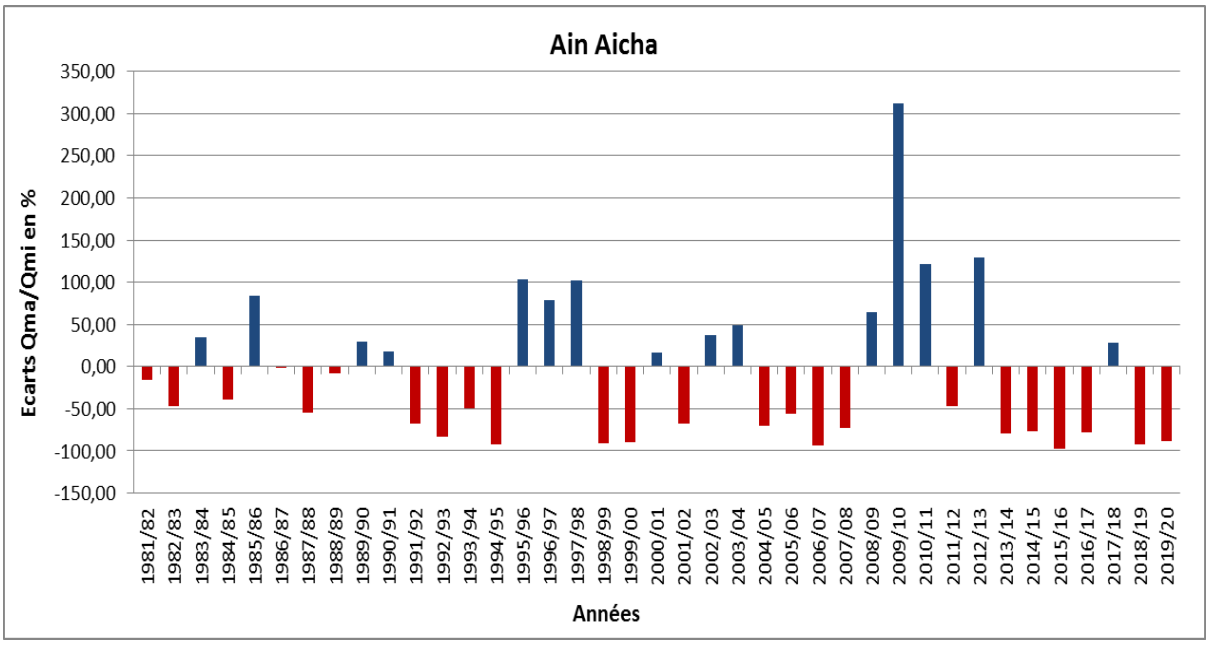

Figure 31: les écarts des débits moyens annuels et interannuels au niveau de la station d'Ain Aicha

2) L'irrégularité interannuelle des débits par la méthode du simple cumul

L'analyse des lames d'eaux écoulées dans le bassin versant nous permet d'avoir une idée sur l'irrégularité interannuelle des débits par la méthode du simple cumul au niveau des trois stations étudier. Cette méthode montre les ruptures des pentes qui correspondent au contraste d'homogénéité au cours de la période d'observation entre les séries de ces lames et qui caractérisent le profil de la lame d'eau écoulée.

Les points de rupture de pente qui sont détectés aux figures (Fig.32), (Fig.33) et (Fig.34) montrent la manière d'alternance des phases humides et sèches. Ce qui explique un faible module annuel de débit et un module annuel de débit élevé sont caractérisés par l'alternance des années.

Tableau 13: Simple cumul des lames d'eau écoulées pour la station de Galaz (1983 à 2020)

Galaz				
Année	Débit moyen (m3/s)	Débit spécifique (l/s/Km2)	la lame d'eau écoulée (mm)	la lame d'eau écoulée cumuléé(mm)
1983/84	**12,05**	1,95	61,40	61,40
1984/85	**6,90**	1,11	35,16	96,56
1985/86	**14,18**	2,29	72,26	168,82
1986/87	**6,61**	1,07	33,67	202,49
1987/88	**4,27**	0,69	21,77	224,26
1988/89	**5,24**	0,85	26,67	250,94
1989/90	**8,27**	1,34	42,13	293,06
1990/91	**5,76**	0,93	29,34	322,40
1991/92	**1,32**	0,21	6,74	329,14
1992/93	**1,09**	0,18	5,54	334,68
1993/94	**3,20**	0,52	16,30	350,99
1994/95	**0,00**	0,00	0,00	350,99
1995/96	**13,34**	2,15	67,95	418,93
1996/97	**16,78**	2,71	85,46	504,40
1997/98	**18,11**	2,93	92,25	596,65
1998/99	**0,75**	0,12	3,84	600,49
1999/00	**0,42**	0,07	2,14	602,62
2000/01	**9,34**	1,51	47,58	650,20
2001/02	**3,33**	0,54	16,99	667,19
2002/03	**16,00**	2,58	81,50	748,69
2003/04	**17,39**	2,81	88,62	837,31
2004/05	**4,03**	0,65	20,55	857,86
2005/06	**10,41**	1,68	53,04	910,90
2006/07	**4,10**	0,66	20,87	931,76
2007/08	**3,82**	0,62	19,46	951,22
2008/09	**16,75**	2,71	85,31	1036,53
2009/10	**22,50**	3,63	114,62	1151,16
2010/11	**8,45**	1,37	43,07	1194,23
2011/12	**1,91**	0,31	9,74	1203,97
2012/13	**17,39**	2,81	88,57	1292,54
2013/14	**5,42**	0,87	27,59	1320,13
2014/15	**7,94**	1,28	40,43	1360,57
2015/16	**4,30**	0,69	21,91	1382,47
2016/17	**9,54**	1,54	48,62	1431,09
2017/18	**24,03**	3,88	122,43	1553,52
2018/19	**4,32**	0,70	22,02	1575,55
2019/20	**6,47**	1,04	32,94	1608,48

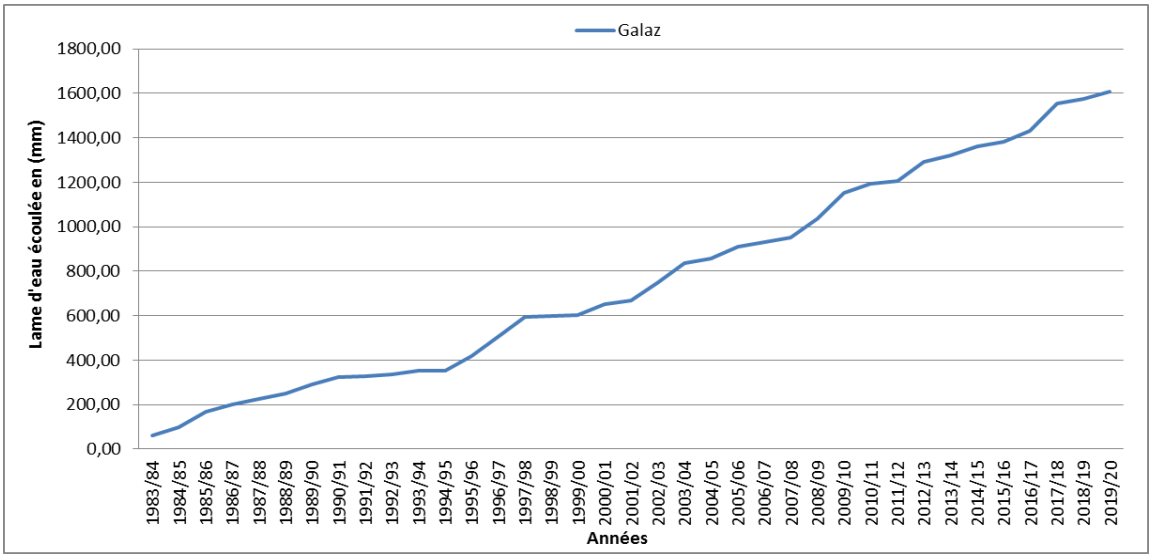

Figure 32: Simple cumul des lames d'eau écoulées pour la station de Galaz (1983 à 2020)

Tableau 14: Simple cumul des lames d'eau écoulées pour la station de Tabouda (1981 à 2020)

Tabouda				
Année	Débit moyen (m3/s)	Débit spécifique (l/s/Km2)	la lame d'eau écoulée (mm)	la lame d'eau écoulée cumuléé(mm)
1981/82	**9,92**	1,60	50,54	24,23
1982/83	**4,69**	0,76	23,88	48,11
1983/84	**15,67**	2,53	79,81	127,92
1984/85	**7,12**	1,15	36,29	164,21
1985/86	**18,78**	3,03	95,68	259,90
1986/87	**12,48**	2,02	63,59	323,49
1987/88	**6,12**	0,99	31,15	354,64
1988/89	**6,59**	1,06	33,57	388,21
1989/90	**16,98**	2,74	86,51	474,72
1990/91	**11,36**	1,84	57,88	532,61
1991/92	**3,39**	0,55	17,28	549,89
1992/93	**1,77**	0,29	9,00	558,89
1993/94	**8,07**	1,30	41,12	600,01
1994/95	**0,33**	0,05	1,70	601,71
1995/96	**34,76**	5,61	177,07	778,79
1996/97	**30,52**	4,93	155,46	934,25
1997/98	**30,67**	4,95	156,26	1090,51
1998/99	**1,25**	0,20	6,35	1096,86
1999/00	**2,42**	0,39	12,31	1109,17
2000/01	**15,51**	2,51	79,00	1188,17
2001/02	**4,51**	0,73	22,97	1211,15
2002/03	**9,54**	1,54	48,59	1259,74
2003/04	**16,04**	2,59	81,71	1341,45
2004/05	**4,32**	0,70	22,01	1363,46
2005/06	**5,81**	0,94	29,58	1393,03
2006/07	**0,40**	0,06	2,04	1395,07
2007/08	**1,59**	0,26	8,11	1403,18
2008/09	**21,20**	3,42	108,01	1511,19
2009/10	**43,37**	7,01	220,96	1732,14
2010/11	**22,24**	3,59	113,32	1845,47
2011/12	**2,07**	0,33	10,55	1856,02
2012/13	**25,80**	4,17	131,46	1987,48
2013/14	**11,79**	1,90	60,07	2047,55
2014/15	**7,61**	1,23	38,77	2086,32
2015/16	**1,01**	0,16	5,16	2091,48
2016/17	**6,30**	1,02	32,10	2123,58
2017/18	**33,15**	5,36	168,91	2292,49
2018/19	**3,27**	0,53	16,67	2309,16
2019/20	**4,36**	0,70	22,19	2331,35

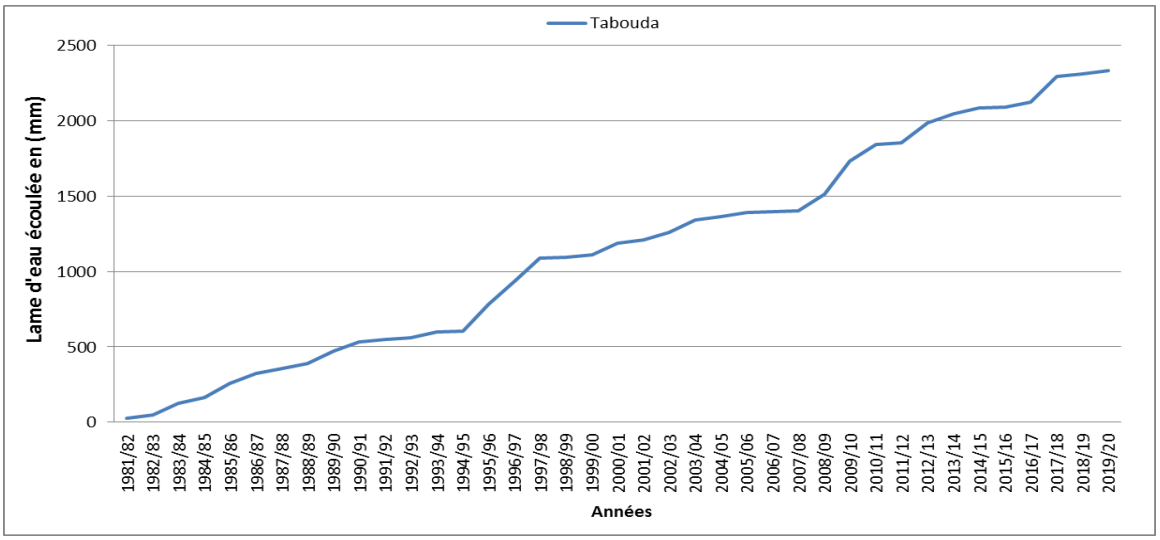

Figure 33: Simple cumul des lames d'eau écoulées pour la station de Tabouda (1981 à 2020)

Tableau 15 : Simple cumul des lames d'eau écoulées pour la station d' Ain Aicha (1981 à 2020)

Ain Aicha				
Année	Débit moyen (m3/s)	Débit spécifique (l/s/Km2)	la lame d'eau écoulée (mm)	la lame d'eau écoulée cumuléé(mm)
1981/82	**18,92**	3,06	96,37	96,37
1982/83	**11,93**	1,93	60,76	157,13
1983/84	**30,26**	4,89	154,17	311,30
1984/85	**13,72**	2,22	69,92	381,21
1985/86	**41,28**	6,67	210,31	591,52
1986/87	**22,04**	3,56	112,31	703,82
1987/88	**10,18**	1,64	51,84	755,66
1988/89	**20,73**	3,35	105,59	861,25
1989/90	**28,96**	4,68	147,52	1008,78
1990/91	**26,34**	4,25	134,18	1142,95
1991/92	**7,35**	1,19	37,46	1180,42
1992/93	**3,62**	0,58	18,42	1198,84
1993/94	**11,37**	1,84	57,94	1256,78
1994/95	**1,67**	0,27	8,49	1265,27
1995/96	**45,68**	7,38	232,75	1498,02
1996/97	**40,20**	6,49	204,81	1702,82
1997/98	**45,30**	7,32	230,80	1933,62
1998/99	**1,91**	0,31	9,73	1943,35
1999/00	**2,42**	0,39	12,35	1955,70
2000/01	**26,17**	4,23	133,34	2089,04
2001/02	**7,35**	1,19	37,42	2126,46
2002/03	**30,91**	4,99	157,46	2283,92
2003/04	**33,45**	5,40	170,43	2454,35
2004/05	**6,80**	1,10	34,64	2488,99
2005/06	**9,82**	1,59	50,03	2539,02
2006/07	**1,57**	0,25	8,01	2547,03
2007/08	**6,07**	0,98	30,94	2577,98
2008/09	**37,00**	5,98	188,49	2766,46
2009/10	**92,52**	14,95	471,35	3237,81
2010/11	**49,70**	8,03	253,23	3491,04
2011/12	**11,84**	1,91	60,30	3551,34
2012/13	**51,47**	8,32	262,24	3813,58
2013/14	**4,66**	0,75	23,75	3837,33
2014/15	**5,27**	0,85	26,85	3864,18
2015/16	**0,70**	0,11	3,54	3867,72
2016/17	**4,82**	0,78	24,53	3892,25
2017/18	**28,91**	4,67	147,26	4039,51
2018/19	**1,78**	0,29	9,06	4048,57
2019/20	**2,56**	0,41	13,03	4061,59

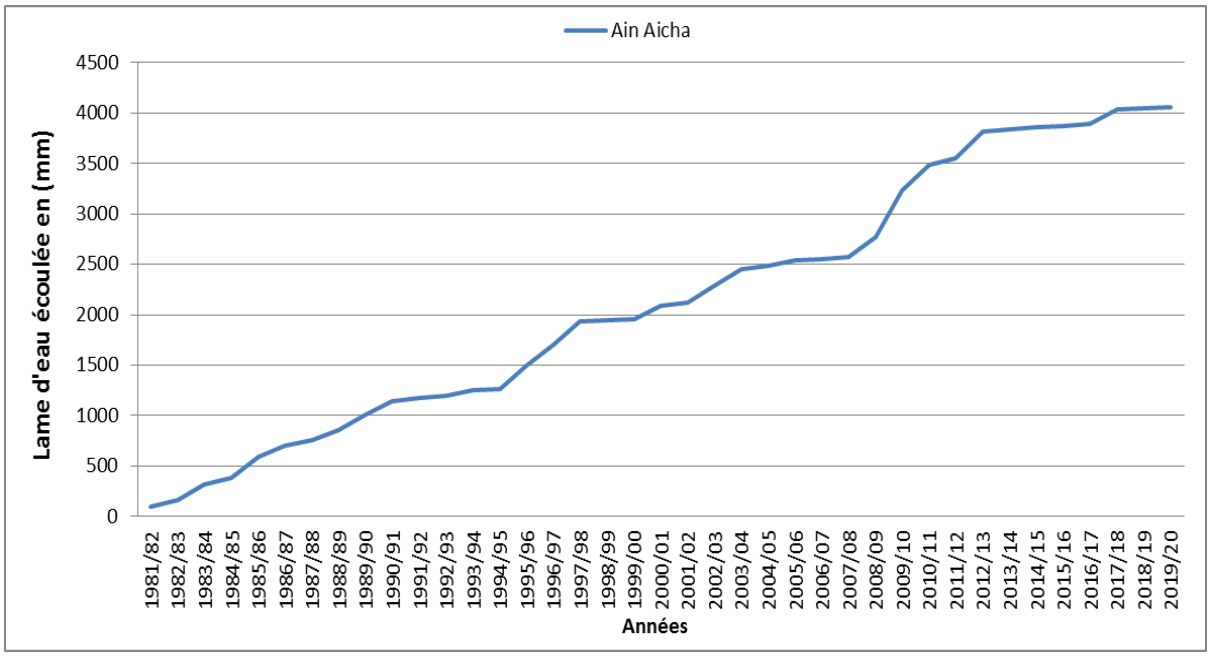

Figure 34: Simple cumul des lames d'eau écoulées pour la station d'Ain Aicha (1981 à 2020)

3) Coefficient et indice de la variabilité des débits

Le coefficient d'hydraulicité (CH) nous permet de mesurer l'irrégularité interannuelle de l'écoulement, c'est le rapport du débit d'une année donnée (Qi) sur le débit moyen d'une longue série d'observation (Qmoy). Il y a d'autre critères statistiques très simples pour la complétée comme le coefficient de variation (CV), le coefficient d'immodération (R) donné par rapport des modules extrêmes (R = QM/Qm), ainsi que l'écart type.

3.1.1. Coefficient d'hydraulicité (CH)

On peut définir le coefficient d'hydraulicité pour un cours d'eau par le débit d'une année donnée sur le débit moyen interannuel donné (Fig.35).

Lorsqu'on a un écoulement important avec une année humide, on parle d'un coefficient (CH> 1). Dans l'autre cas, lorsqu'on a une année sèche, Donc un faible cours d'eau ou bien un faible débit au bassin versant.

Les résultats obtenu par le coefficient d'hydraulicité nous confirment les fluctuations hydroclimatiques, ce qui été précédemment montré par l'autre méthode des écarts des débits moyens interannuels aux débits moyens interannuels.

On remarque que le nombre des années hydrologiques qui sont déficitaires dépasse les 50% pour les trois stations avec un déphasage d'hydraulicité pour la série commune entre les stations dans l'évolution du coefficient.

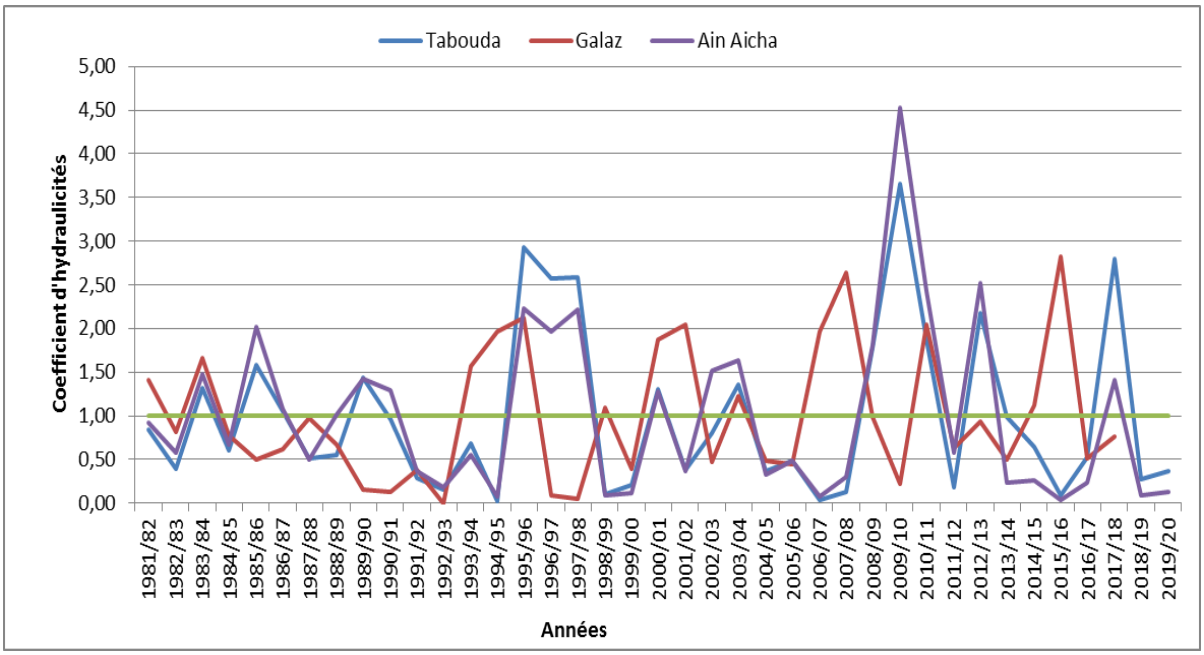

Figure 35: Variation du coefficient d'hydraulicité dans le bassin versant de l'Ouergha

3.1.2. Coefficient d'immodération (CI)

La définition du coefficient d'immodération est comme étant le rapport des modules extrêmes (CI=Qmax/Qmin). Pour la station de Tabouda la valeur du coefficient d'immodération est de 130, Pour la station d'Ain Aicha 59 et pour la station de Galaz 225.

La valeur du coefficient d'immodération pour la station de Galaz et Tabouda est supérieure au module le plus élevé de la série, avec une forte irrégularité des débits annuels. Par contre, la valeur du coefficient d'immodération pour la station d'Ain Aicha montre une variabilité à l'échelle spatiale des débits annuels et des irrégularités moins importantes.

3.1.3. Coefficient de variation (CV)

Le coefficient de variation est le rapport de l'écart type à la moyenne. Plus la dispersion autour de la moyenne est grande, plus la valeur du coefficient de variation est élevée. Il permet aussi de mettre en évidence les variations des débits.

Pour la station Ain Aicha la valeur du coefficient de variation est de 0.88, la station Galaz 0.75 et pour la station Tabouda 0.94, on remarque qu'elles sont légèrement élevées, contribuent à une variabilité des débits extrêmes.

B. Débits moyens mensuels

On peut caractériser le régime d'écoulement d'un cours d'eau par les débits moyens mensuels qui sont considérer comme des paramètres classiques et qui sont influencés par le régime pluviométrique.

1) Module mensuel

Les figures (Fig.36, Fig.37 et Fig.38) nous indiquent une irrégularité des fluctuations au cours de l'année. Pour la station Ain Aicha les débits augmentent progressivement à partir du mois de Septembre pour atteindre le maximum en Février, après on a une progressive diminution jusqu'au mois d'Août.

Pour les stations Galaz et Tabouda on assiste à une progressive augmentation des débits depuis le mois de Septembre jusqu'au maximum au niveau du Décembre après on assiste à une progressive diminution jusqu'au minimum au niveau du mois de Juillet.

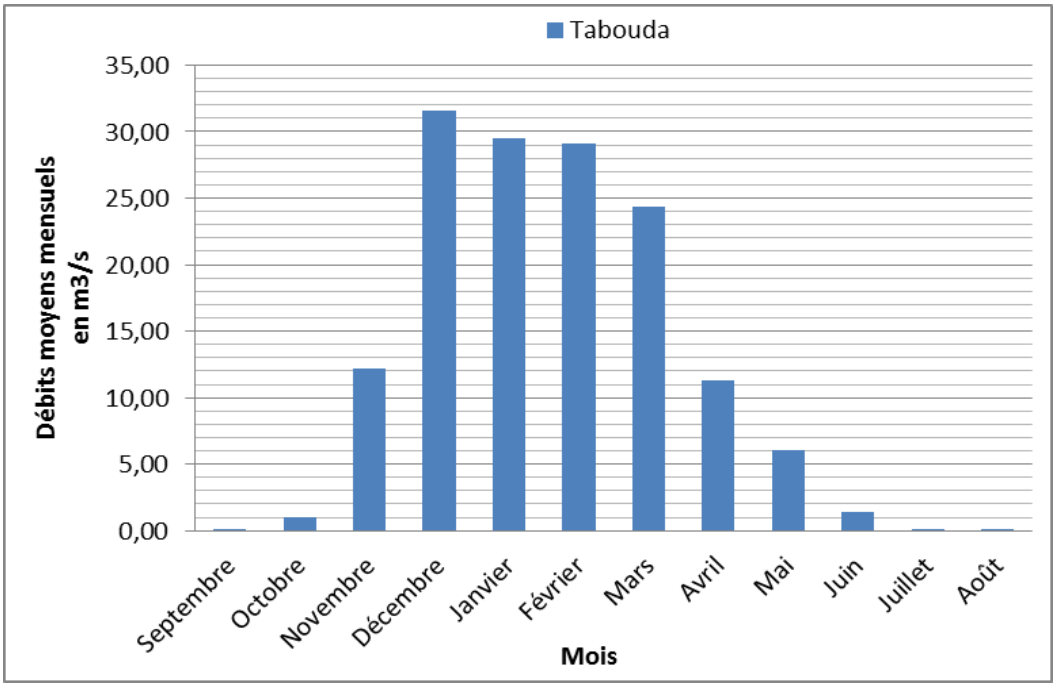

Figure 36: les débits mensuels au niveau de la station de Tabouda

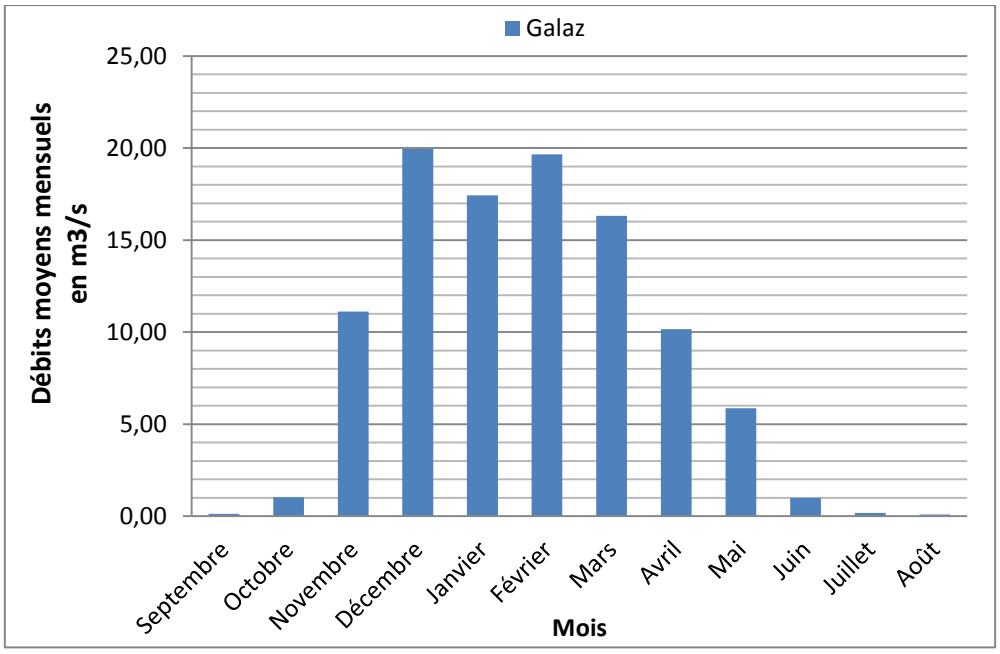

Figure 37: les débits mensuels au niveau de la station de Galaz

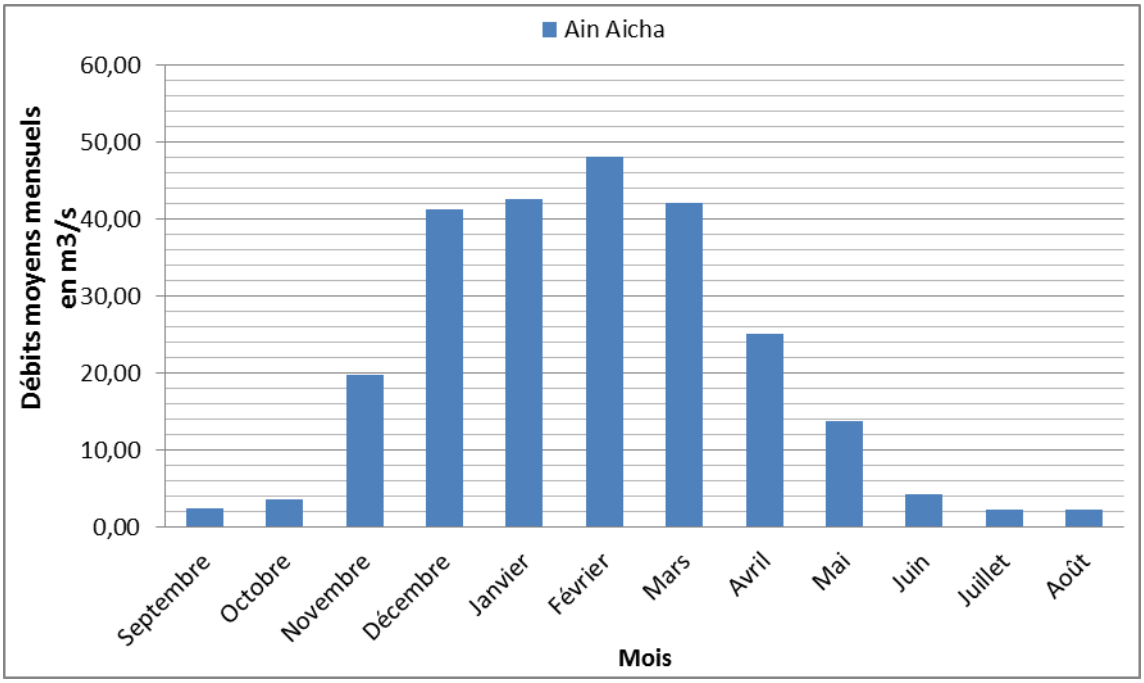

Figure 38: les débits mensuels au niveau de la station d'Ain Aicha

Il y a une grande liaison entre les débits moyens mensuels et les précipitations moyennes mensuelles. Dans ces stations, on remarque qu'il existe des différences des variations mensuelles des débits qui peuvent êtres dues à leurs situations géographiques, le réseau hydrographique et la surface des zones drainées, ou bien à la lithologie du terrain.

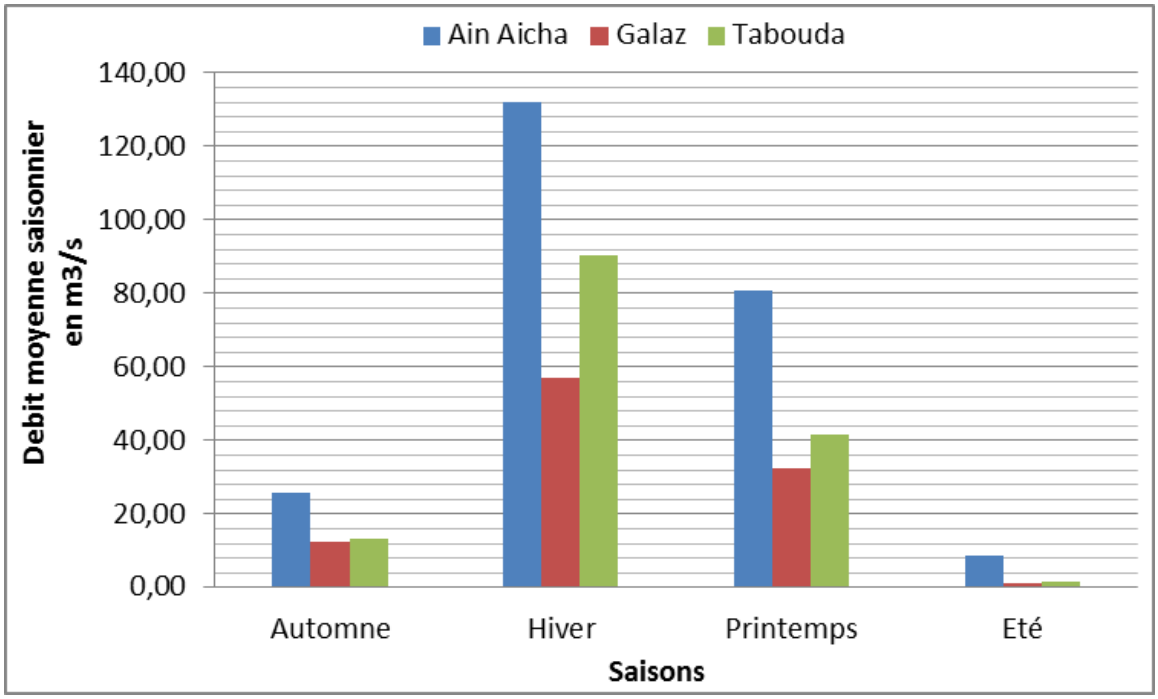

Figure 39: les débits moyens saisonniers dans le bassin versant de l'Ouergha

Dès l'automne, les pluies occasionnelles et les débits liquides de ces stations augmentent jusqu'au atteindre le maximum en hiver (Fig.39), donc à partir du mois de Décembre jusqu'au mois d'Avril le ruissellement extrême qui est favorisé par la saturation des sols va augmenter le débit de l'oued, cependant sous l'influence de l'écoulement souterrain et hypodermique, les débits diminues en suivant une loi exponentielle.

2) Coefficient mensuel des débits

La relation entre le module brut annuel et le débit moyen mensuel est le coefficient mensuel. Il montre l'influence d'un mois sur l'année et il met en clair la variabilité des écoulements qui se révèlent par des périodes de basses et hautes eaux. Le coefficient mensuel est définit par le rapport des débits moyens mensuels sur le débit moyen interannuel.

$$C = \frac{Q_m}{Q_{mi}}$$

Avec :

C : Coefficient mensuel des débits

Qm : Débit moyen mensuel

Qmi : Débit moyen interannuel

Les variations du coefficient mensuel des débits pour les trois stations indiquent que le régime hydrologique se détermine par une période des basses eaux (C <1) et des hautes eaux (C >1).

Pour la station d'Ain Aicha la période des eaux élevés prend l'effet à partir de Novembre jusqu'en Avril, Cette période cause des crues intenses désignant le mois Février et le mois Décembre pour la station de Galaz et Tabouda (Fig.40). En revanche, la période des eaux basses pour les trois stations prend l'effet à partir de Mai jusqu'en Novembre. Elle cause des étiages plus violents durant le mois de Juillet, Août et Septembre.

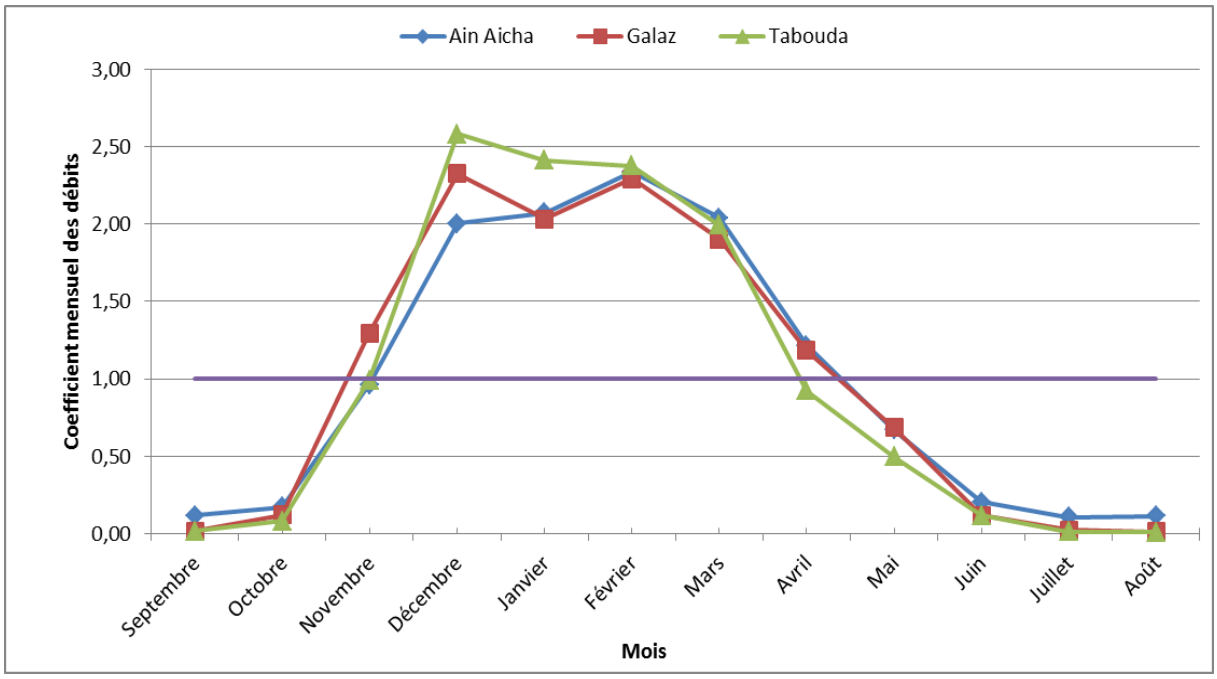

Figure 40: Variation du coefficient mensuel des débits au bassin versant de l'Oued l'Ouergha

Le coefficient moyen mensuel des débits détermine ces variations spatio-temporelles qui peuvent être expliquées par la propagation des eaux, les particularités hydrodynamiques du milieu, l'intensité pluviale et les caractéristiques physiques du bassin versant.

Pendant la période humide le coefficient mensuel des débits et très élevés, alors on peut considérer que l'oued de l'Ouergha a un régime hydrologique pluvial.

C. Débits journalières

La relation entre débits-précipitations et leurs variations, spatiales et journalières nous permet d'avoir une analyse des débits journaliers. On prend la station d'Ain Aicha pour une analyse des débits journaliers à partir de 1981/1982 jusqu'au 2019/2020. Cette analyse nous permet de savoir le type du régime d'écoulement (Fig.41).

1) Débit journaliers d'une année humide

L'évolution de la courbe des débits par rapport à l'année humide 2009/2010 (Fig.40) montre un régime saisonnier. On a des débits forts qui atteignent 1298 m3/s en hiver et en printemps. Pour l'été, les précipitations est très faibles avec une élévation intense de l'évapotranspiration et une augmentation de nombre de prélèvements anthropiques sur toute la longueur de l'oued ce qui ressemble à une saison de tarissement. Pour l'automne, une majeure partie de la lame d'eau précipitée ruisselle, sachant que le sol est entièrement sec et imperméable à cause d'une très longue période sèche et estivale.

2) Débits journaliers d'une année moyenne

Pour la saison d'automne l'évolution des débits journaliers d'une année moyenne est faible 1986/1987 (Fig.41). Les crues sont reproduites et intenses pour la saison du printemps et la saison d'hiver, elles atteignent un maximum de débit 812 m3/s. Pour la saison d'été reste continuellement sèche. La progression rapide des eaux et leur diminution progressive peut être expliqué par la nature lithologique, l'intensité des précipitations et de plusieurs sources qui soutient les cours d'eaux.

3) Débits journaliers d'une année sèche

La progression des débits journaliers d'une année sèche est dissemblable à celle d'une année humide. L'année la plus sèche au bassin versant est 2006/2007 (Fig.41), Les débits journaliers de cette année étaient à peu près inexistant.

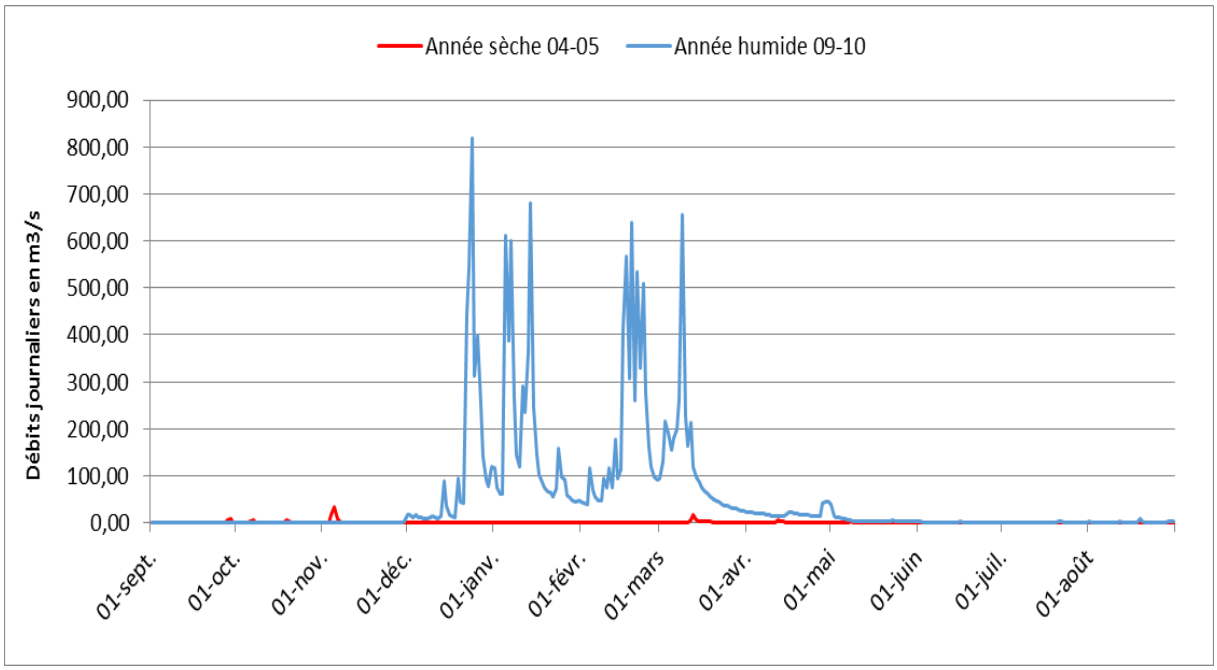

Figure 41: Débits journaliers au niveau de la station d'Ain Aicha pour l'année humide, moyenne et sèche

3. Relation entre les débits et les précipitations

A. Relation entre les débits et les précipitations mensuelles

La liaison entre la lame d'eau écoulée et la tranche d'eau précipitée, permet de mesurer celle entre les hauteurs mensuelles pluviométrique et l'évolution des débits.

Quand on fait une comparaison entre l'évolution des précipitations mensuelles et les variations mensuelles des débits au niveau des trois stations du bassin versant (Fig.42, Fig.43 et Fig.44), on remarque qu'il y a un synchronisme entre les précipitations et les débits mensuels.

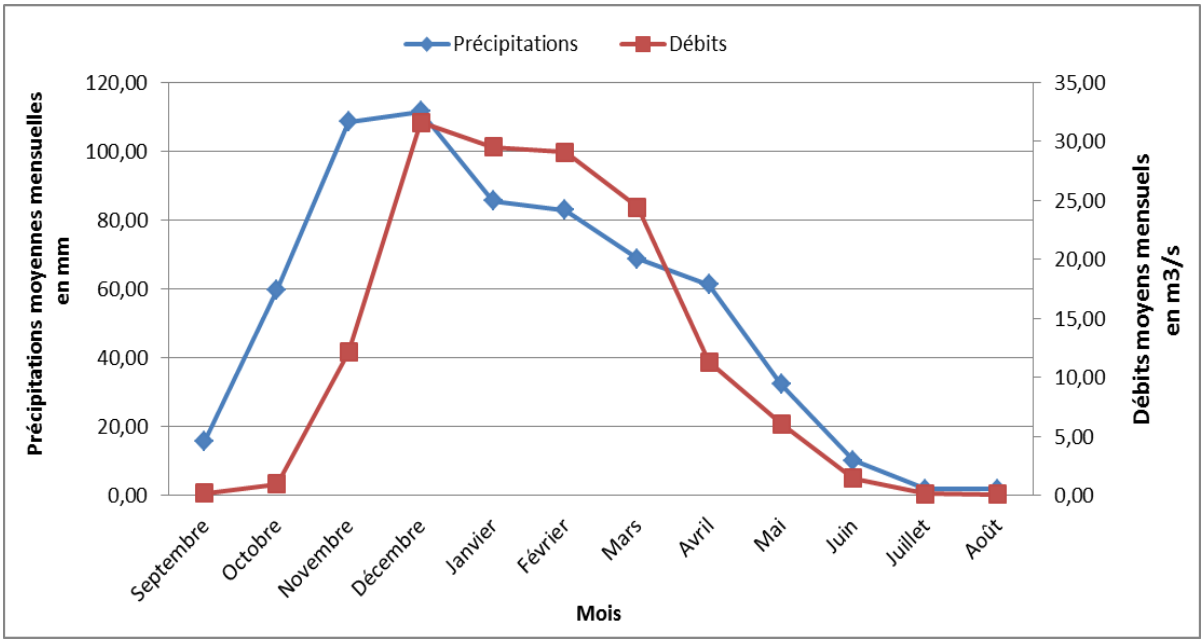

Figure 42 : Evolution des précipitations et des débits pour la station de Tabouda

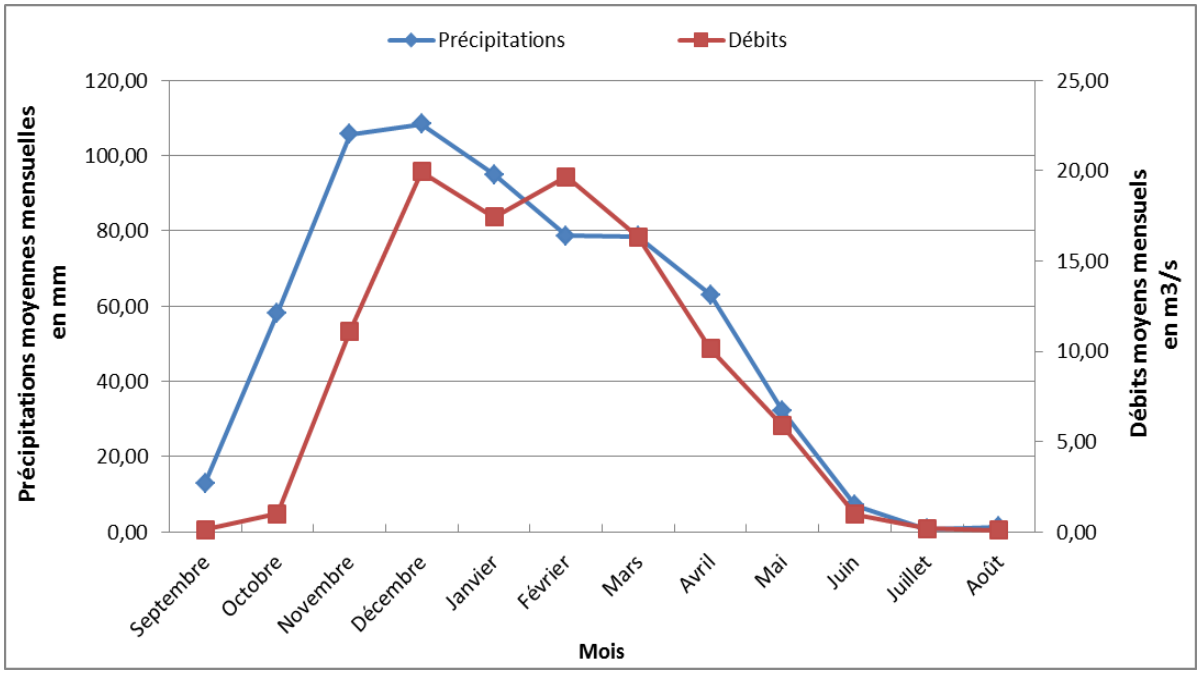

Figure 43 : Evolution des précipitations et des débits pour la station de Galaz

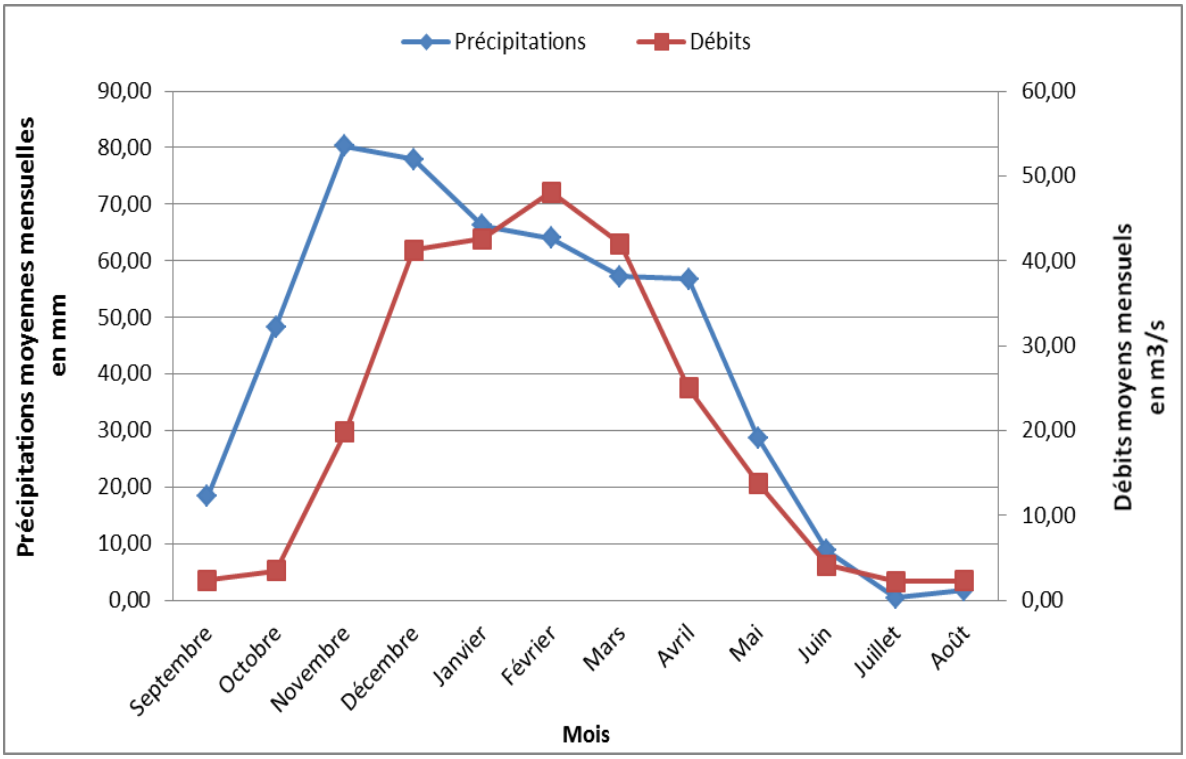

Figure 44: Evolution des précipitations et des débits pour la station d'Ain Aicha

Pour les stations Galaz et tabouda ces figures nous indiquent qu'il ya un enchainement des averses et des crues, on remarque au mois de décembre un maximum de débit et de précipitation, En revanche, on a un maximum en Novembre de précipitation suivi d'un maximum de débit avec deux mois de décalage en Février pour la station d'Ain Aicha. Ce retard on peut l'expliquer par les eaux qui se précipitent et ruissellent directement après leur tombée au sol, la nature lithologique du bassin versant de l'Oued Ouergha (semi-perméable à perméable). Le décalage qui sépare le commencement de l'averse et sa circulation après une tes faible infiltration ce qui cause l'imperméabilité du milieu.

Pour les trois stations la courbe des débits moyens mensuels indique que le ruissellement réagi seulement aux puissantes averses. Pour les faibles peuvent être interprété par l'irrigation ou bien l'évapotranspiration excessive.

B. Coefficient de ruissellement (Cr)

La définition du coefficient de ruissellement, c'est le rapport entre la hauteur d'eau ruisselée à la sortie d'une surface « pluie nette » et la hauteur d'eau précipitée « pluie brute ». L'intensité, le volume et la nature de la pluie est loin d'être constants, ainsi qu'avec les divers types de surface (Pratt et al, 1984; Schaake et al, 1967 in Zian 2011).

La valeur de Cr et de ces variations est difficile de déterminer précisément, donc on passe par des mesures sur site.

Pour déterminer le Cr, on adopte la méthode la plus simple, qui consiste à utiliser le rapport de la lame d'eau écoulée (H en mm) sur la lame précipité (P en mm).

$$Cr = \frac{H}{P}$$

Pour la station d'Ain Aicha la valeur du coefficient de ruissellement est de 23%, la station de Galaz 7% et la station de Tabouda 10%.

C. Bilan Hydrologique

Le bilan hydrologique permet de déterminer le dénombrement des apports et les sorties ou les pertes, en ramenant une période de référence nettement déterminée pour une unité de volume bien délimitée. En général, la formule du bilan s'écrit :

$$P = Q + ETR \pm \Delta R \text{ Avec } \Delta R = RFU + RH \text{ et } Q = R + I$$

Avec :

P : Précipitation moyenne annuelle (mm)

Q : Débit d'écoulement total (mm/an)

ETR : Evapotranspiration réelle en (mm)

R : Ruissellement du bassin versant (mm)

I : Infiltration du bassin versant (mm/an)

ΔR: Variation des reserves

1) Ecoulement total

$$P = ETR + Q \quad \Longrightarrow \quad Q = P - ETR$$

Avec :

P : Précipitation moyenne annuelle (mm)

ETR : Evapotranspiration réelle en (mm)

Q : Débit d'écoulement total du bassin versant (mm/an)

D'où Q est de 32% de P.

Donc, on peut déduire le volume écoulé (Ve) en se basant sur l'estimation de la moyenne de la lame d'eau tombée au chapitre de la climatologie et à partir du volume annuel précipité (Vp) déjà calculé.

$$Ve = 32 \times 10^{-2} \times Vp \quad \text{Avec } Vp = 5055{,}3 \times 10^{6}\ m^3/an$$

Donc : Ve=**$1617 \times 10^{6}\ m^3/an$.**

2) Le ruissellement

Le ruissellement est l'écoulement temporaire et instantané des eaux sur un bassin versant à la suite d'une averse, le ruissellement peut être estimé d'après la formule de Tixeront–Berkaloff :

$$R = \frac{P^3}{3(ETP)^2}$$

Avec

R : ruissellement (mm)

P : précipitation annuelle moyenne (mm)

ETP : évapotranspiration potentielle en (mm)

D'où R est de 23% de P

V_R=23x10^{-2} xVp Avec Vp=5055,3 × 10^6 m^3/an

Donc : **V_R=1162 × 10^6 m^3/an.**

3) Infiltration

L'infiltration est la quantité d'eau qui pénètre dans le sol et le sous-sol pour alimenter les aquifères. Ce paramètre est difficile à évaluer parce qu'il s'évade aux mesures directes. On peut déduire les infiltrations, grâce à l'équation du bilan hydrique :

$$P = ETR + R + I \iff I = P - (ETR + R)$$

Avec :

I : infiltration du bassin versant (mm)

R : ruissellement du bassin versant (mm/an)

ETR : Evapotranspiration réelle en (mm/an)

P : précipitation annuelle moyenne en (mm/an)

D'où I est de 15% de P

On a V_I=15 x10^{-2} xVp Avec Vp=5055,3 × 10^6 m^3/an

Donc **V_I=758 × 10^6 m^3/an.**

4. Conclusion

Le régime hydrologique d'après l'étude hydrologique est considéré comme un régime méditerranéen qui est caractérisé par la profusion pluviale avec des débits intenses hivernaux ce qui cause des crues intenses. On remarque une reproductivité du phénomène à l'échelle de l'année avec des saisons de profusion hydrologique.

Le débit au module annuel par rapport à la station de Tabouda et Galaz est moins important que celui d'Ain Aicha, ce qui traduit la situation amont-aval des stations et la succession des périodes sèches et de périodes humides qui sont confirmées aussi par le test de simple cumul.

Au niveau des trois stations, une non-conformité et alternance de périodes déficitaires et de périodes excédentaires est détectée par la méthodologie des écarts des débits annuels

moyens (Ec) aux débits moyens interannuels, avec une domination des périodes déficitaires par rapport aux périodes excédentaires.

Les variations du coefficient d'hydraulicité (CH), le coefficient d'immodération (R) et le coefficient de variation (CV) permettent de mesurées les irrégularités interannuelles de l'écoulement et aussi de conclure la variabilité des débits extrêmes, la variabilité à l'échelle spatiale et les fluctuations hydroclimatiques.

L'étude de la relation entre les lames d'eau écoulée et les précipitations montre une grande compatibilité avec des précipitations très importantes en Novembre et Décembre suivi de très importants débits avec un décalage entre un mois à deux mois en Février.

La formule du bilan hydrologique montre bien la relation entre le volume d'eau précipité au bassin versant et l'eau écoulé à l'exutoire du bassin versant. L'estimation du bilan hydrologique nous montre le pourcentage des différentes étapes d'écoulement. Pour l'infiltration 15%, l'écoulement total 32% et le ruissèlement 23%.

Chapitre IV: Caractérisation de la sécheresse

1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est de caractériser la sécheresse climatique au niveau du bassin versant de l'oued l'ouegha à travers le calcul des indices de sécheresses (l'indice standardisé de précipitations SPI a multi échelle, Déciles des précipitations DP, Le pourcentage à la normale PN, Statistique Z-Score, Indice d'anomalie de pluviosité RAI, Intensité de la sécheresse DI).

Les L'observation des évènements de la nature est un outil essentiel à la connaissance et à la compréhension des phénomènes naturels. Les mesures de ces évènements en général et en particulier en hydrologie constituent des éléments de référence indispensables pour toute l'étude. La quantification des paramètres hydro climatiques constitue un préalable à l'estimation des ressources en eau. Il Ya un problème des lacunes d'observation et de leur fiabilité dans l'étude des précipitations au Maroc. Ceci a été mis en évidence dans d'autres études hydrologiques et climatologiques. La faible densité du réseau pluviométrique dans les zones montagneuses constitue un handicap supplémentaire aux études.

Afin d'avoir un moyen fiable de comparaison et dans le but d'intégrer un ensemble de stations qui offrent des données de bonne qualité, il est nécessaire de se baser sur quelques critères pour éliminer les stations défectueuses. Les critères qui ont été adoptés son :

•Continuité des séries des stations retenues sur une période suffisamment longue

• Homogénéité des séries à étudier

• Synchronisation des séries

• Stations issues de réseaux professionnels

• Représentativité des stations pour toutes les grandes régions géographiques.

Après vérification des stations, nous avons constaté les difficultés Suivantes :

• Le problème des ruptures d'observations qui affectent un certain nombre de stations

• Les données manquantes

Les données pluviométriques proviennent de l'Agence de Bassin hydraulique de Sebou (ABHS). L'étude a été réalisée sur la base des données pluviométriques (Précipitations mensuelles) de trois stations météorologiques (Ain aicha, Galez et Jbel Oudka) (Fig.45).

La Série d'observations prise en considération s'étale sur 32 années (1982-2015), La localisation des stations est présentée dans le (Tab.16).

Tableau 16: Stations pluviométriques retenues pour l'étude

Station	N° Station	X (m)	Y (m)	Z (m)
Ain aicha	236	56470	42880	230
Jbel oudka	4626	55300	45900	1115
Galez	3924	55532	43985	214

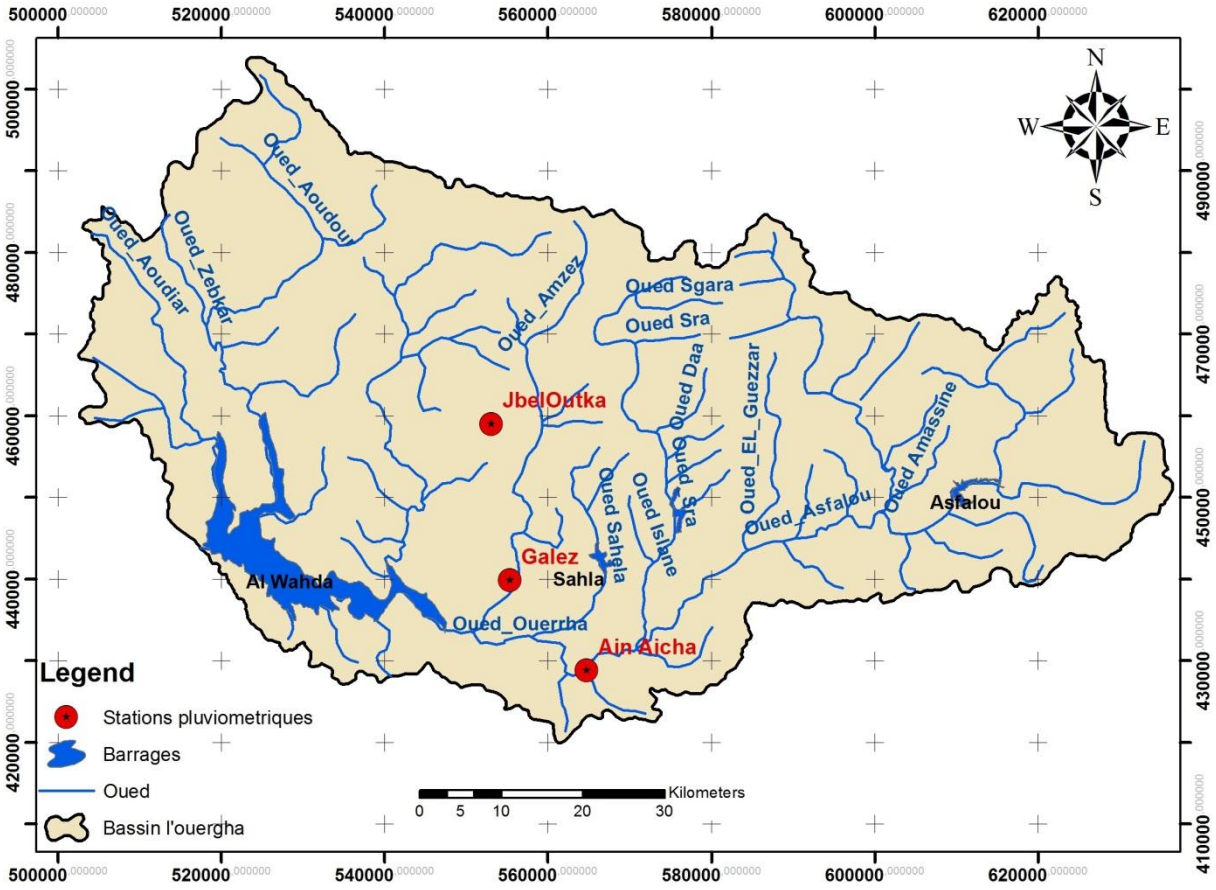

Figure 45: carte de situation géographique des stations pluviométriques étudiées dans ce chapitre au bassin versant de l'oued l'Ouergha

2. Etude d'homogénéité des séries

Diverses techniques d'homogénéisation ont été développées pour accommoder différents types de facteurs tels que la variable à homogénéiser, la variabilité spatiale, et temporelle des données selon l'endroit où les stations sont situées, la longueur des séries et le nombre de données manquantes, les métadonnées disponibles et la densité du réseau d'observation.

Les techniques d'homogénéisation varient également selon l'objectif pour lequel on les applique. Malgré la grande diversité des méthodes d'homogénéisation, elles peuvent néanmoins être classifiées en deux catégories principales qui les rejoignent toutes : Méthodes subjectives ou objectives. Lorsque l'emplacement d'une discontinuité est détecté à l'œil nu sur un graphique, la méthode appartient à la classe subjective même si des tests statistiques sont appliqués par la suite. Par contre, les méthodes objectives ne dépendent pas du jugement de l'utilisateur pour localiser les inhomogénéités.

Les méthodes bayésiennes, qui seront présentées plus loin, pourraient être considérées comme subjectives ou objectives selon qu'elles incorporent ou non l'opinion du modalisateur par le biais d'une distribution apriori informative. L'utilisateur des données doit connaître l'historique des stations d'observations ce qui permettra d'expliquer les causes de l'hétérogénéité lorsqu'elle existe. Cet historique comprend le nom de la station, les coordonnées, les périodes et le personnel d'exploitation et les détails sur son équipement. Avant d'aborder l'étude de l'homogénéité de nos séries et donner les résultats, nous allons présenter la méthode traitant cette question. Il existe des tests graphiques et numériques par exemple :

A. Tests graphiques :

1) Le simple cumul

Le principe consiste à cumuler les valeurs annuelles observées de chaque paramètre à traiter, une fois que les valeurs sont cumulées, il faut les mettre en ordonnées et le temps en abscisse.

À partir de cumuls en fonction du temps on dispose d'un nuage de points, ces derniers fluctuent autour d'une droite. Si on constate une cassure de la droite, on conclut que la série correspondante présente une tendance, des observations erronées ou des valeurs exceptionnelles. Lorsque la cassure est nette, on peut par simple lecture sur le graphique déterminer l'époque où s'est manifestée la tendance et contrôler dans les documents les causes de cette tendance.

La méthode du simple cumul ne permet pas de différentier dans le cas où l'on observerait une tendance, celle qui est propre à la station (hétérogénéité) d'une tendance climatique.

2) Le double cumul

Le principe de la méthode des doubles cumuls consiste à tracer progressivement le cumul d'un paramètre du poste à tester en fonction de celui du même paramètre de la série de référence.

Lorsque les séries sont homogènes, les points sont sensiblement alignés sur une droite. Les cassures dans la pente de la droite donnent les dates probables de rupture d'homogénéité.

3) La méthode du cumul des résidus

Dans la méthode du cumul des résidus, on calcule d'abord la régression entre la série étudiée et la série de référence. On peut alors former la série des résidus (le résidu étant l'écart entre la valeur vraie et la valeur estimée par régression). On effectue ensuite la somme de ces résidus que l'on pointe sur un graphe en fonction du temps. Si la série testée est homogène, la distribution de ces résidus est complètement aléatoire. Par contre, si la série est hétérogène, la courbe présente des portions anormalement croissantes ou décroissantes. Si elle sort d'une ellipse de significativité définie pour un intervalle de confiance donné, on peut conclure qu'une hétérogénéité est détectée à la cassure de la courbe.

B. Tests numériques :

1) Méthodes statistiques

Pour détecter l'existence d'une éventuelle tendance dans les séries de données pluviométriques, les tests non paramétriques de Spearman et Man-Kendal, qui permettent de franchir des contraintes imposées par d'autres méthodes paramétriques et qui ont montré leur efficacité dans ce genre d'application. Afin de consolider les résultats de ces deux tests, nous

avons utilisé le test de Pettitt, qui présente la particularité de localiser le moment de la rupture de la moyenne au sein de la série avec un niveau de signification qui traduit l'importance réelle du changement détecté. Ces calculs ont été appliqués aux données annuelles.

2) Test de Pettitt

Pour confirmer les résultats obtenus par la méthode classique, nous avons appliqué l'approche de Pettitt qui est non paramétrique et dérive du test de Man-Whitney. Ainsi, l'absence de rupture dans la série (xi) de taille N constitue l'hypothèse nulle (pas de cassure au sein de la série).

La mise en œuvre du test suppose que pour tout instant t compris entre 1 et N, les séries chronologiques (xi) i = 1 à t et t + 1 à N appartiennent à la même population. La variable à tester est le maximum en valeur absolue de la variable Ut, N définie par:

$$U_{t,N} = \sum_{i=1}^{t} \sum_{j=t+1}^{N} Dij$$

Où Dij = sgn (xi- xj) avec sgn(d)= 1 si x > 0; 0 si d = 0

Et -1 si d < 0, avec (d = xi- xj).

Si l'hypothèse nulle n'est rejetée, une estimation de la date de la cassure est donnée par l'instant « t » définissant le maximum en valeur absolue de la variable Ut,N.

3) Test de Buishand pour l'homogénéité

Le test de (Buishand, 1982) peut être utilisé sur des variables suivant des distributions quelconques. Néanmoins ses propriétés ont été particulièrement étudiées pour le cas normal.

L'article Buishand se concentre sur le cas du test bilatéral, mais pour la statistique Q présentée ci-dessous le cas unilatéral est aussi possible. Buishand a développé une seconde statistique R, pour laquelle seule une hypothèse bilatérale est possible. Dans le cas de la statistique Q, les hypothèses nulles et alternatives sont définies par :

- H0 : les T variables suivent une ou plusieurs distributions ayant une même moyenne.
- Test bilatéral : Ha : Il existe un temps t à partir duquel les variables changent de moyenne.
- Test unilatéral à gauche : Ha : Il existe un temps t à partir duquel la moyenne des variables diminue de D.

- Test unilatéral à droite : Ha : Il existe un temps t à partir duquel la moyenne des variables augmente de D.

C. Traitement des données pluviométriques :

L'un des défis de la communauté scientifique est la résolution du problème d'homogénéité des séries chronologiques observées dans certaines stations météorologiques. Pour cela nous avons utilisé deux méthodes, la méthode classique des doubles cumuls et l'application du test d'homogénéité de Pettitt à un intervalle de confiance 95 % (Wang et al. 2007). L'ajustement des séries a été effectué par le logiciel XLSTAT.

Généralement on utilise la méthode des doubles cumuls (Musy et Higy, 2003), dans le but de confirmer ou d'infirmer l'existence d'une hétérogénéité au sein d'une série pluviométrique d'une station donnée.

L'utilisation de cette méthode requiert la disponibilité d'une station de référence dite station témoin (X) dont les valeurs sont supposées complètes et homogènes, avec lesquelles on va comparer les valeurs de la station qu'on veut contrôler (Y), il est à noter que la comparaison ne se fait pas entre les valeurs observées, mais entre leur cumul, un effet de lisage est obtenu au cours de la comparaison, en fonction de la variable temps choisie (année, saison, mois, décade). Pour mieux illustrer cette méthode, nous donnons en exemple, les deux stations de «GALEZ » et «Ain Aicha».

Sur le graphique cartésien (Fig.46), nous portons en abscisse les totaux annuels des précipitations de la station de référence «Galez» et en ordonnée avec ceux de la station «Ain Aicha».

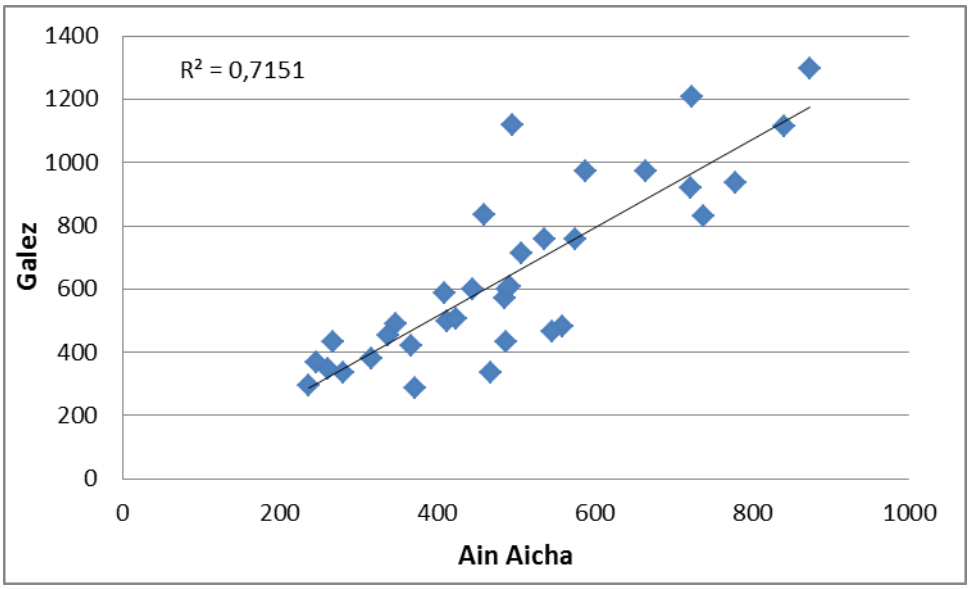

Figure 46: Le contrôle des totaux annuels des précipitations en (mm) par la méthode des doubles cumuls

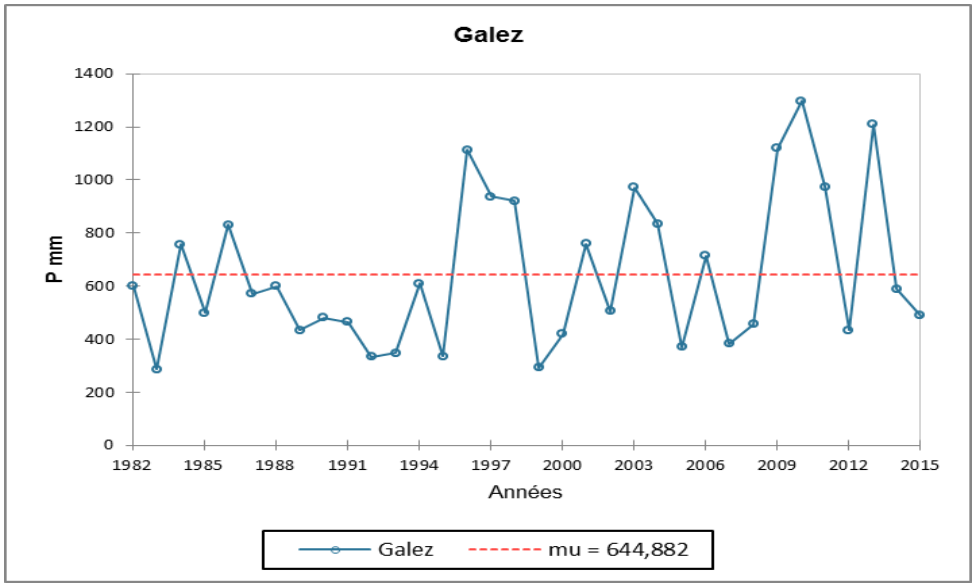

Figure 47: Test de Pettitt d'homogénéisation à 99% de confiance appliqué à la station Galez

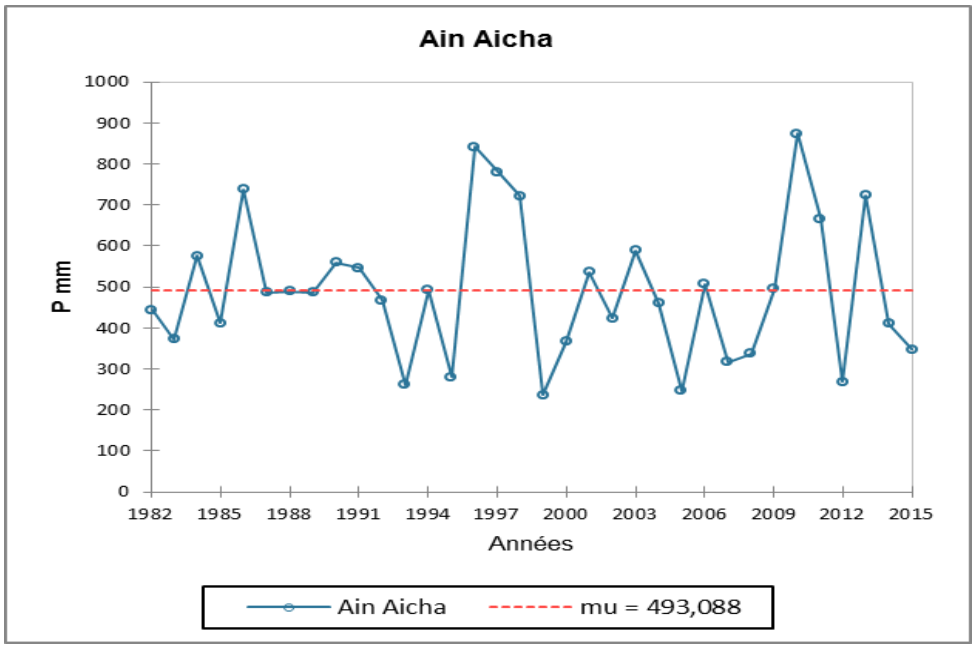

Figure 48: Test de Pettitt d'homogénéisation à 99% de confiance appliqué à la station Ain Aicha

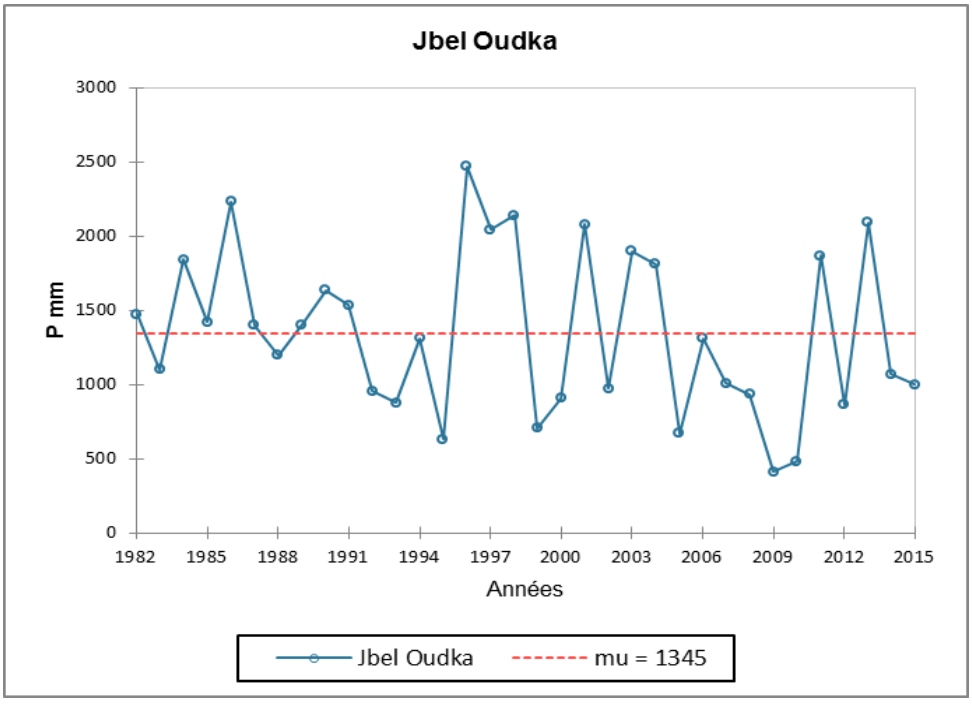

Figure 49: Test de Pettitt d'homogénéisation à 99% de confiance appliqué à la station Jbel Oudka

Les résultats montrent que les séries pluviométriques moyennes annuelles des trois stations sont homogènes, ils n'ont pas des points de changement et une seule moyenne (Fig.47, Fig.48, Fig.49).

Tableau 17: Les résultats du test de point de changement de Pettitt effectué sur la pluviométrie annuelle moyenne des stations

Station	p-value (Pettitt)	Observation
Galez	0,347	Homogène
Ain Aicha	0,645	Homogène
Jbel Oudka	0,429	Homogène

Le test de pettitt a indiqué que l'hypothèse d'homogénéité est valable dans les trois stations puisque des points de changement non significatifs ont été détectés dans leur série de précipitations (valeur $p \geq 0,05$) (Tab.17).

3. Calcul des indices de sécheresses

A. L'indice de précipitations normalisé (SPI)

L'indice de précipitations normalisé, ou en anglais Standardized Précipitation Index (SPI) (McKee et al. 1993, 1995) est un indice à la fois puissant, souple d'utilisation et simple à calculer. Il est basé sur des données pluviométriques adopté par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) en 2009, comme instrument mondial pour la mesure des sécheresses météorologiques. En outre, l'indice SPI se révèle tout aussi efficace pour analyser les périodes ou cycles humides que les périodes ou cycles secs.

Pour calculer l'indice SPI, il faut disposer idéalement de relevés mensuels s'étalant sur au moins 20 à 30 ans, mais de préférence sur 50 à 60 ans, voire plus, ce qui constitue la période optimale (Guttman, 1994).

McKee et al. (1993) ont utilisé le système de classification des valeurs de l'indice SPI pour définir l'intensité des épisodes de sécheresse en fonction de la valeur des indices. L'intensité de la sécheresse est définie par la valeur de SPI. En général, les valeurs de SPI supérieures à zéro représentent des supérieures à la normale, tandis que les valeurs de SPI inférieures à zéro représentent des valeurs négatives et indiquent des précipitations inférieures

à la normale. Le SPI peut être calculé pour différentes échelles de temps et peut fournir une alerte précoce en cas de sécheresse. La formule mathématique de SPI est la suivante :

$$SPI= (Pi - Pm) / \sigma$$

Pi : Précipitation de l'année i

Pm : Précipitation moyenne

σ : Écart-type

Ils ont aussi défini les critères d'un épisode de sécheresse pour une échelle de temps (Tab.18):

Tableau 18: Classification de la sècheresse en rapport avec la valeur de l'indice de précipitations normalisé (McKee et al. 1993)

Classes du SPI	Degré de la sècheresse
SPI>2	Humidité extrême
1<SPI<2	Humidité forte
0<SPI<1	Humidité modérée
-1<SPI<0	Sècheresse modérée
-2<SPI<-1	Sècheresse forte
SPI<-2	Sècheresse extrême

Sur les bases de données chronologiques historiques à long terme, l'analyste peut dire l'impact de ces anomalies sur les domaines susmentionnés. La durée peut être obtenue en comptant les mois du début à la fin des valeurs SPI négatives et leur magnitude en faisant la somme positive des valeurs SPI de tous les mois de la période de la sécheresse.

Les SPI pour la zone d'étude ont été calcules a des échelles de temps de 1 mois, 3 mois, 6 mois et 12mois. Les SPI à 1 mois reflètent relativement peu de temps l'humidité du sol pendant les saisons de croissance. Les SPI à 3 mois fournissent une comparaison des précipitations sur une période spécifique de 3 mois avec les totaux des précipitations de la même période de 3 mois pour toute la série. Les SPI à 6 mois peuvent êtres très efficaces pour montrer la pluie sur les stations distinctes. Les SPI à 12 mois reflètent les modèles de précipitations à long terme.

- Les avantages de la méthode SPI

L’indice SPI offre une bonne souplesse d’utilisation : il est possible de le calculer pour de multiples échelles de temps. Quand il porte sur un laps de temps relativement court (entre 1 et 3 mois), l’indice SPI permet de détecter rapidement les situations de sécheresse et évaluer leur gravité.

L’indice SPI présente une bonne cohérence spatiale, ce qui permet d’établir des comparaisons entre des zones différentes soumises à des climats différents. Sa nature probabiliste le place dans un contexte historique, ce qui convient bien à la prise de décision.

- Les inconvénients de la méthode SPI

Le bilan hydrique du sol n’étant pas pris en compte. L’indice ne permet pas le calcul du rapport : évapotranspiration/évapotranspiration potentielle (ET/ETP).L’indice SPI ne repose que sur les relevés des précipitations.

- **Indice SPI sur 1 mois**

Une carte de l’indice SPI calculé sur 1 mois ressemble beaucoup à une carte représentant le pourcentage de la normale des précipitations pour une période de 30 jours. L’indice dérivé offre en fait une représentation plus exacte des précipitations mensuelles, car la distribution est normalisée. À titre d’exemple, l’indice SPI sur 1 mois se terminant fin novembre établit la comparaison entre le total mensuel des précipitations pour novembre de l’année examinée et les totaux mensuels des précipitations en novembre de toutes les années pour lesquelles on dispose de relevés. Comme l’indice SPI sur 1 mois représente des conditions à courte échéance, ses applications sont en rapport étroit avec les sécheresses de type météorologique ainsi qu’avec l’humidité du sol à court terme et le stress hydrique subi par les cultures, en particulier au cours de la période végétative. L’indice SPI sur 1 mois peut fournir une approximation des conditions représentées par l’indice d’humidité des cultures, qui fait partie de la série d’indices que regroupe l’indice de sécheresse de Palmer.

Il est possible de mal interpréter l’indice SPI sur 1 mois si l’on ne tient pas compte des caractéristiques climatiques du lieu. Dans les régions où il est normal que les pluies soient faibles au cours d’un mois donné, il est possible d’obtenir des valeurs négatives ou positives importantes alors que l’écart par rapport à la moyenne est relativement faible. L’indice SPI sur 1 mois peut aussi induire en erreur lorsque les valeurs des précipitations sont inférieures à

la normale dans des régions où, pour le mois considéré, le total normal des précipitations est faible. Tout comme les cartes du pourcentage de la normale des précipitations, celles de l'indice SPI sur 1 mois fournissent des informations utiles, mais il faut faire preuve de prudence quand on les analyse.

- **Indice SPI sur 3 mois**

L'indice SPI sur 3 mois établit la comparaison entre le total des précipitations sur la période de trois mois examinée et les totaux des précipitations pour cette même période de trois mois de toutes les années pour lesquelles on dispose de relevés. En d'autres termes, l'indice SPI sur 3 mois se terminant fin février permet de comparer le cumul des précipitations des mois de décembre, janvier et février de l'année examinée aux cumuls de précipitations de décembre à février de toutes les années figurant dans l'historique des observations exécutées à la station étudiée.

Chaque nouvelle année, les données d'observation viennent s'ajouter à la série des relevés dont la durée gagne ainsi une année et les valeurs de toutes les années sont une nouvelle fois prises en compte. Les valeurs peuvent alors évoluer, ce qui sera le cas quand on comparera, d'un point de vue historique et statistique, l'année en cours avec toutes les années précédentes composant la série chronologique des observations.

Il importe de comparer l'indice SPI sur 3 mois à des laps de temps plus longs. Il est possible que des conditions relativement normales voire humides se produisent durant trois mois au milieu d'une sécheresse s'étalant sur une durée plus longue, ce qu'on ne pourrait mettre en évidence qu'en examinant une période relativement longue. En analysant des laps de temps relativement longs, on évite de confondre la présence temporaire d'une période humide avec la fin d'une sécheresse. Il est donc essentiel d'assurer un suivi constant pour déterminer à quels moments un épisode de sécheresse débute et prend fin et pour se garder ainsi d'annoncer à tort le début et la fin d'une sécheresse.

- **Indice SPI sur 6 mois**

L'indice SPI sur 6 mois établit la comparaison entre les précipitations sur la période de six mois examinée et les totaux des précipitations pour cette même période de six mois de toutes les années pour lesquelles on dispose de relevés. À titre d'exemple, un indice SPI sur 6

mois se terminant fin septembre permet de comparer le cumul des précipitations d'avril à septembre de l'année examinée aux cumuls de précipitations de cette même période pour toutes les années écoulées.

L'indice SPI sur 6 mois fournit une indication sur les tendances des précipitations sur une saison et jusqu'à moyenne échéance; on considère que pour cette échelle de temps, il présente encore davantage de sensibilité aux conditions que l'indice Palmer. Un indice SPI sur 6 mois peut se révéler très performant pour mettre en évidence les précipitations sur des saisons bien précises. À titre d'exemple, un indice SPI sur 6 mois se terminant fin mars fournirait une très bonne indication des quantités de précipitations observées au cours de la saison humide allant d'octobre à mars.

- **Indice SPI sur 12 mois**

À ces échelles de temps, l'indice SPI fournit une représentation des régimes de précipitations à longue échéance. L'indice SPI sur 12 mois établit la comparaison entre les précipitations sur une période de 12 mois consécutifs et celles enregistrées sur la même série de 12 mois consécutifs de toutes les années pour lesquelles on dispose de relevés. Étant donné que ces échelles de temps constituent le cumul de périodes plus courtes pouvant se situer au-dessus ou au-dessous de la normale, les valeurs des indices SPI établis pour une période relativement longue tendent à graviter autour de zéro, à moins qu'une tendance humide ou sèche bien distincte ne se soit installée. Les indices SPI pour ces échelles de temps sont en général associés au débit des cours d'eau, au niveau des réservoirs et au niveau des eaux souterraines à relativement long terme. Pour certaines stations, l'indice SPI sur 12 mois présente une bonne corrélation avec l'indice Palmer et les deux indices peuvent mettre en évidence des conditions analogues (WMO, 2012).

Dans la présente étude, les SPI ont aussi été calculés à des échelles de temps de 1 mois, 3 mois, 6 mois, et 12 mois et les résultats indiqués sur les (Fig.50, Fig.51, Fig.52, Fig.53). L'influence de l'échelle de temps sur le nombre et la durée des sécheresses détectées est clairement apparente. Il a été observé que sur des échelles plus petites telles que les séries SPI 1 et SPI 3, les intensités de sécheresse sont très variables et deviennent inférieures à -1 plusieurs reprises. Cependant, sur des délais plus longs tels que les séries SPI 6 et SPI 12,

l'intensité de la sécheresse diminue. Cette variation est due à la grande variabilité de la pluviométrie dans le bassin, puisque le SPI est relatif aux caractéristiques pluviométriques de la zone (L. Ahmed et al., 2017, p. 37).

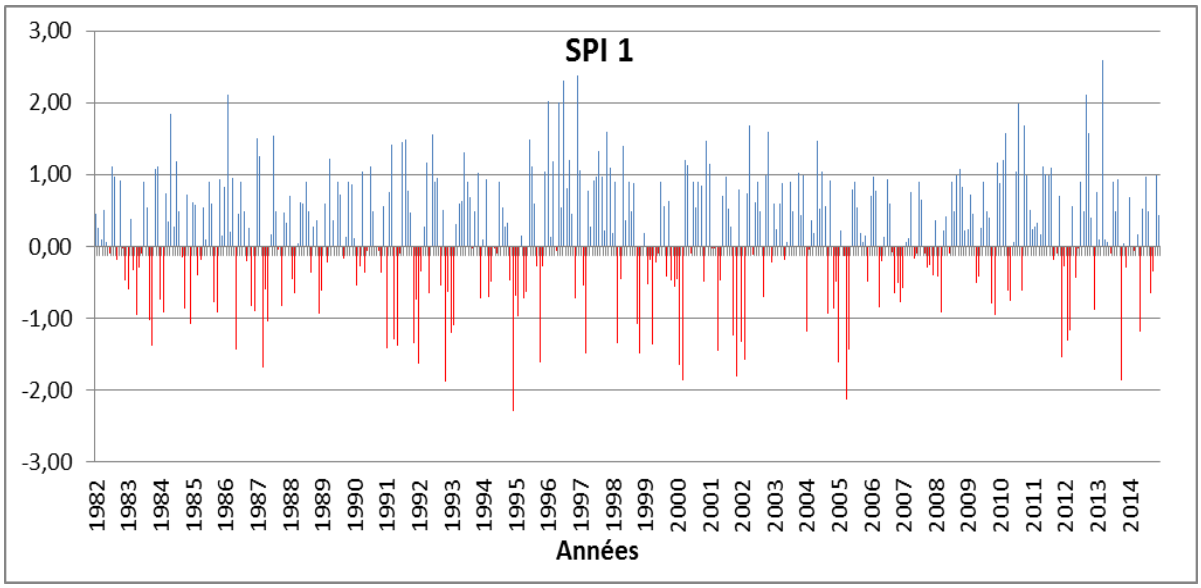

Figure 50: Evolution d'indice SPI a une échelle de temps de 1mois dans le bassin versant de l'oued Ouergha

Des événements de sécheresse ont été détectés pour chaque pas de temps. Le SPI à 1 mois indique des conditions à court terme et peut être étroitement associé à la sécheresse météorologique. Il est également utile pour évaluer l'humidité du sol et le stress des cultures, en particulier pendant la saison de croissance des cultures. Le SPI le plus bas (extrêmement sèche) à une échelle de temps de 1 mois dans le bassin versant de l'oued Ouergha est de -2,29 survenu au cours de l'année 1995 et de -2,13 en 2005.

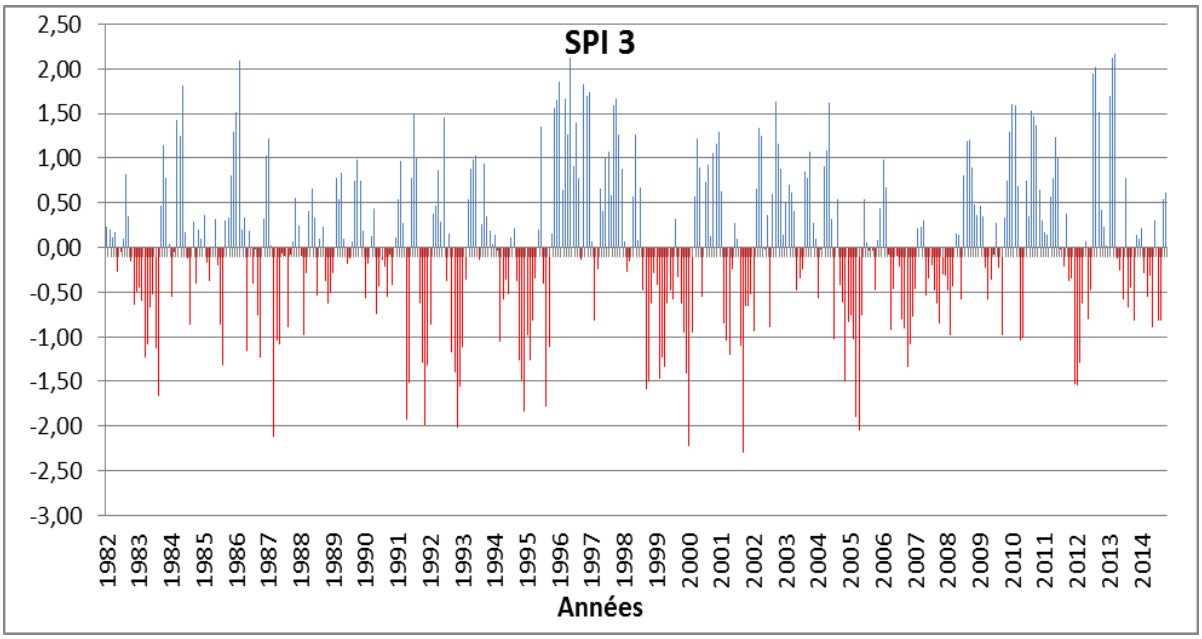

Figure 51: Evolution d'indice SPI a une échelle de temps de 3mois dans le bassin versant de l'oued Ouergha

Un SPI à 3 mois spécifie l'humidité à moyen terme et offre une estimation des précipitations saisonnières. Un SPI sur 3 mois est plus utile pour souligner les conditions d'humidité existantes des principales régions agricoles que de nombreux autres indices hydrologiques. Le SPI le plus bas (extrêmement sèche) dans une échelle de temps de 3 mois dans le bassin versant de l'oued ouergha est de -2,3 survenu au cours de l'année 2001, -2,12 en 1987, -2,23 en 2000, -2,3 en 2001 et -2,05 en 2005.

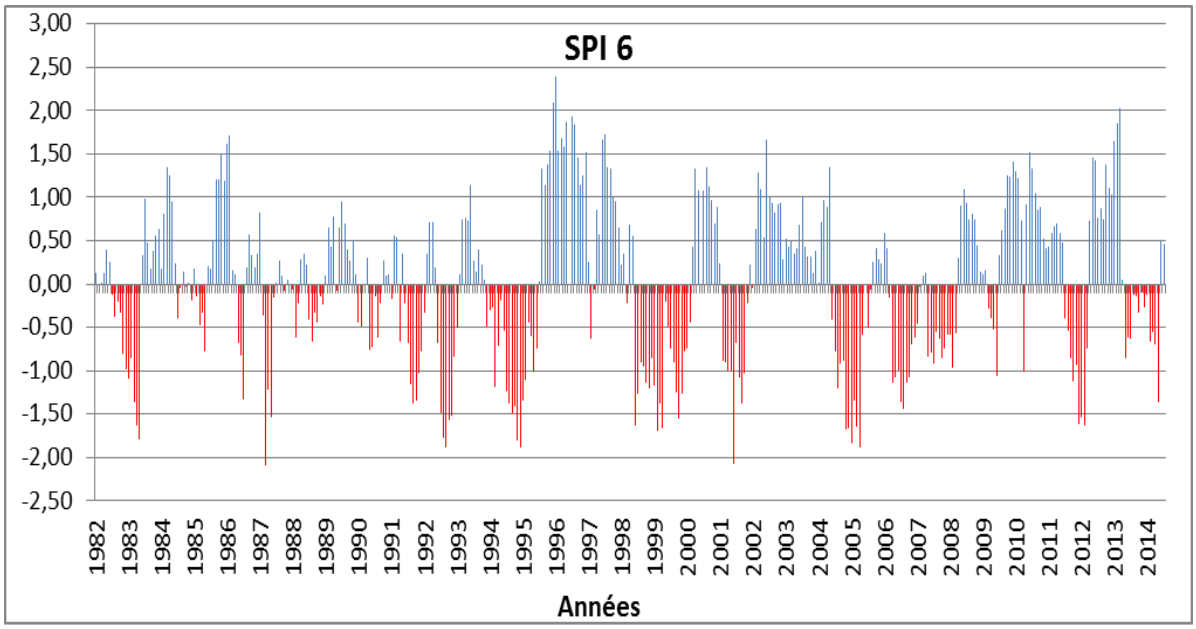

Figure 52: Evolution d'indice SPI a une échelle de temps de 6mois dans le bassin versant de l'oued Ouergha

Le SPI de 6 mois spécifie les tendances saisonnières à moyen terme des précipitations et est très efficace pour afficher les précipitations sur différentes saisons. Le SPI le plus bas (extrêmement sèche) sur une période de 6 mois est de -2.09 survenu au cours de l'année 1987 et 2001 avec une longue durée de sécheresse forte à extrême depuis 1990 a 1995 et une autre depuis 2004 à 2008.

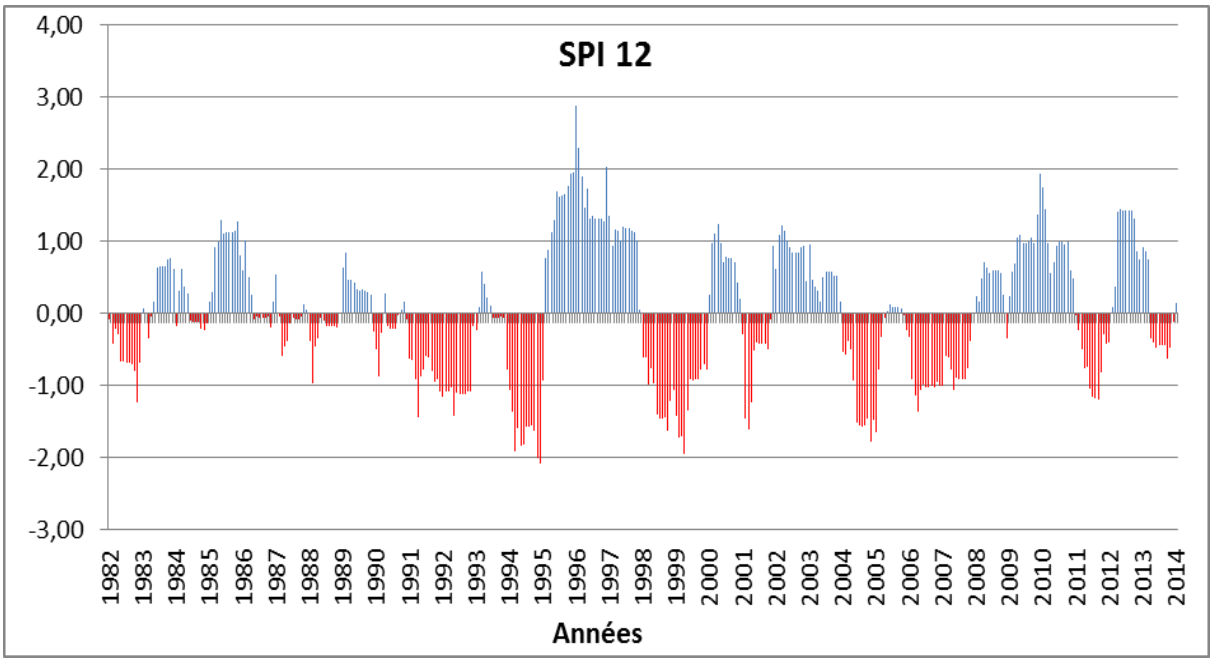

Figure 53: Evolution d'indice SPI a une échelle de temps de 12mois dans le bassin versant de l'oued Ouergha

Les valeurs du SPI sur 12 mois sont généralement liées aux débits des cours d'eau, au niveau des réservoirs et même aux niveaux des eaux souterraines à des échelles de temps étirées. Le SPI le plus bas dans une échelle de temps de 12 mois était de -2,07 (extrêmement sèche), survenu au cours de l'année 1995 avec une longue durée de sécheresse forte à extrême depuis 1990 à 1995 et une autre depuis 2004 à 2008.

L'indice de sécheresse SPI 12 a permis de voir les principales années de sécheresse sur le bassin entre 1982 et 2014. Pour la période d'étude, les sous-périodes 1990-1995 et 2004-2008 reste les plus déficitaires. En revanche, sur les sous-périodes 1995-1998 et 2008-2011 sont les plus humides, Cet excédent pluviométrique s'explique par l'augmentation importante des précipitations en 1995 et elles se reproduisent en 2008. La période 1995-1998 est la plus humide, par rapport à la normale. De plus, les lignes de tendance des SPI suggèrent une augmentation de la nature des SPI à toutes les échelles. Cela implique que la fréquence des sécheresses dans le bassin a diminué au cours de cette période. La tendance à la hausse des précipitations diminue donc la vulnérabilité du bassin à la sécheresse.

La pire période de sécheresse a eu lieu depuis 1990 à 1995 durant laquelle une durée de cinq années consécutives de sècheresse a été observée dans le bassin versant, les valeurs minimales de SPI étaient inférieures à -2 sur toutes les échelles de temps.

Les résultats ont montré que les indices SPI sont capables de reproduire les épisodes de sécheresse survenus dans le bassin versant de l'oued Ouergha au cours de la période 1982-2014. Les événements de sécheresse détectés correspondent aux cas où la valeur de SPI dépasse un seuil donné, ce qui indique qu'une certaine zone est affectée par un événement. Les valeurs des SPI à différentes échelles de temps montrent que les sécheresses dans le bassin versant de l'oued Ouergha étaient généralement d'intensité modérée à légère. Les sécheresses de 1987, 1995, 2001 et 2005 étaient des sécheresses sévères à extrêmes, pour une échelle de temps de 1 mois et 12 mois l'intensité des sécheresses étaient extrêmes, En revanche les échelles de temps de 3 mois et 6 mois étaient des sécheresses sévères en 1995 et extrêmes en 2001 et 2005.

L'analyse des résultats de l'indice SPI conforte d'autres études au bassin versant de l'oued l'Ouergha comme (Boukrim, 2011) qui avaient conclu à un déficit pluviométrique depuis 1982 et la persistance de sécheresse précisément 1987,1995, 2001 et 2005. Les résultats de l'indice SPI conforte aussi les résultats obtenus de l'analyse de débit journalier d'une année sèche.

B. Déciles des précipitations (DP)

DP a été développée par Gibbs et Maher (1967) pour pallier aux faiblesses du pourcentage à la normale. Cette approche permet de connaître la fréquence d'un événement. Elle divise la distribution des fréquences des événements en 10 parties représentant chacune 10 % de la distribution. Le cinquième décile représente donc la médiane et le dixième décile le volume maximal de précipitation reçu pour une région et pour une période de temps (Beaudin, 2006).

C'est une méthode uniforme de classification des sécheresses qui peut être appliquée tant à l'échelle locale que continentale, sur des périodes variant du mois à une année. C'est une formule simple qui ne nécessite qu'une seule donnée, la précipitation, et qui comporte moins d'hypothèses que les méthodes plus complexes. Il est par contre nécessaire de posséder

des données climatiques portant sur une longue période (minimum de 30 ans) afin de calculer les déciles de façon précise et significative. Comme pour le PN, la précision et la représentativité spatiale des déciles sont étroitement reliées à la densité du réseau de stations météorologiques utilisées.

$$\mathbf{DP} = \%\ \text{des fréquences cumulatives}\ /10$$

Le tableau suivant représente la classification des déciles de précipitation (Tab.19):

Tableau 19: Classification des déciles de précipitation

Classifications de DP	Valeur
Sécheresseextrême	1
Sécheressesévère	2
Sécheressemodérée	3
Sécheressefaible	4
Normal ouhumid	≥ 5

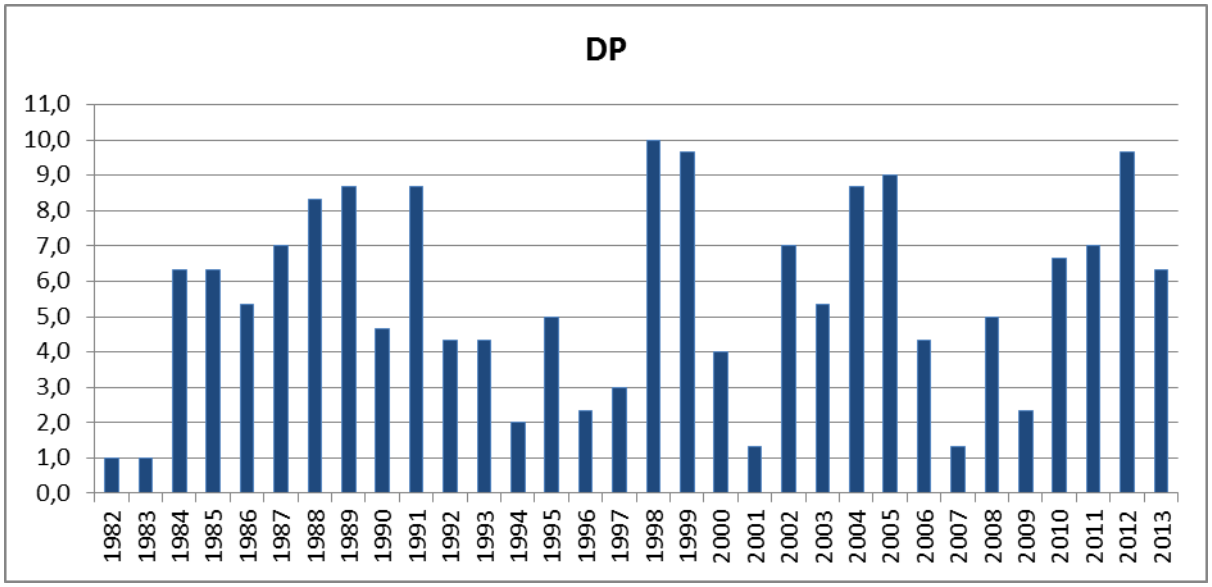

Figure 54: Evolution du (DP) pour des durées annuelles

Le calcul de Déciles de précipitation (DP) à l'échelle annuelle 12 mois (Fig.54) nous montre que les années extrêmement sèches sont 1982-1983, sévèrement sèches 1994-2001-

2007, modères a faibles 1996-1997-2000-2006-2008-2009, les autres années sont normales ou humides.

C. Le pourcentage à la normale (PN)

Il représente le pourcentage de l'écart des précipitations d'une période par rapport à la normale historique de cette période. La normale étant habituellement la moyenne des précipitations totales de la période, calculée à partir d'environ 30 ans de données. Cet indicateur est appliqué à l'échelle locale ou régionale pour des périodes de temps variant de 1 mois à quelques mois, voire même une année temps (Beaudin, 2006).

$$\boldsymbol{PN} = (\boldsymbol{P} \,/\, \boldsymbol{Pm}) * \mathbf{100[\%]}$$

P : Précipitation totale d'une période (mm).

Pm : Précipitation moyenne historique d'une période (mm).

Une condition nécessaire à l'application de cette méthode est la normalité de la distribution des données de précipitation.

Le tableau suivant représente la classification de pourcentage à la normale (Tab.20):

Tableau 20: Classification de PN

Classification de PN	Valeur
Extrêmement sec	< 40
Sécheressesévère	40 à 55
Sécheressemodérée	55 à 70
Sécheressefaible	70 à 80
Normal	80 à100
Humide	100<

- Les avantages de la méthode PN

L'indice PN est facile à utiliser par rapport des autres indices, Le PN est un indicateur très efficace lorsqu'il est utilisé pour comparer une seule région ou une seule saison.

- Les inconvénients de la méthode PN

En région hétérogène ou pour différentes saisons, il existe une grande variabilité spatiale et temporelle des précipitations, son interprétation devient plus difficile (Programme de gestion intégrée des sécheresses 2016).

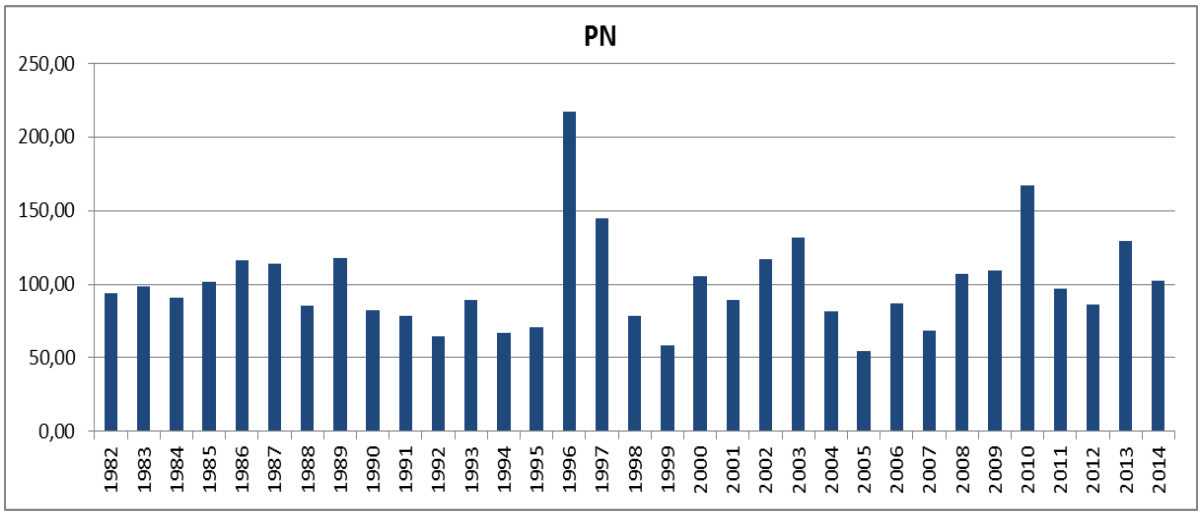

Figure 55: Evolution du (PN) pour des durées annuelles

Le calcul du pourcentage à la normale (PN) à l'échelle annuelle (Fig.55) nous montre que l'année 2005 est sévèrement sèche, les autres années sont modérées a humides.

D. Statistique Z-Score

Cet indice est calculé en soustrayant la moyenne à long terme d'une valeur de précipitation individuelle, puis en divisant la différence par l'écart-type. Le Z-Score ne nécessite pas d'ajuster les données en les ajustant aux distributions Gamma ou Pearson Type III. Pour cette raison, il est supposé que le Z-Score pourrait ne pas représenter les échelles de temps les plus courtes. En raison de son calcul simple et de son efficacité, le Z-Score a été utilisé dans de nombreuses études sur la sécheresse. Divers chercheurs ont également salué le fait qu'il soit aussi bon que le SPI et qu'il peut être calculé sur plusieurs pas de temps. Il peut également prendre en charge les valeurs manquantes dans les séries de données telles que CZI. Le Z-Score est donné par l'équation (Vinit.K, Jain a.n, Rajendra.P, Pandey.b, Manoj K. Jain.c,H.R.Byun d,2015).

$$\varphi_{ij}=\frac{x_{ij}-\overline{x_i}}{\sigma_i}$$

Où :

φ_{ij} : Variante standardisé, également appelé Z-Score,

x_{ij} : La précipitation dans un mois spécifique (mm),

$\overline{xl}$: La précipitation mensuelle moyenne (mm),

σ_i : L'écart type de toute échelle de temps (mm).

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\left(x_{ij} - \bar{x}_i\right)^2} \text{ Et} \bar{x}_i = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} x_{ij}$$

Le tableau suivant représente la classification de Z-Score (Tab.21):

Tableau 21: classification de Z-scores

Classifications de z-score	Valeur
Pas de sécheresse	>0,25
Sécheresse faible	0,25 à -0,25
Sécheresse légère	-0,25 à -0,52
Sécheresse modérée	-0,52 à -0,84
Sécheresse sévère	-0,84 à -1,25
Extrêmement sec	<-1,25

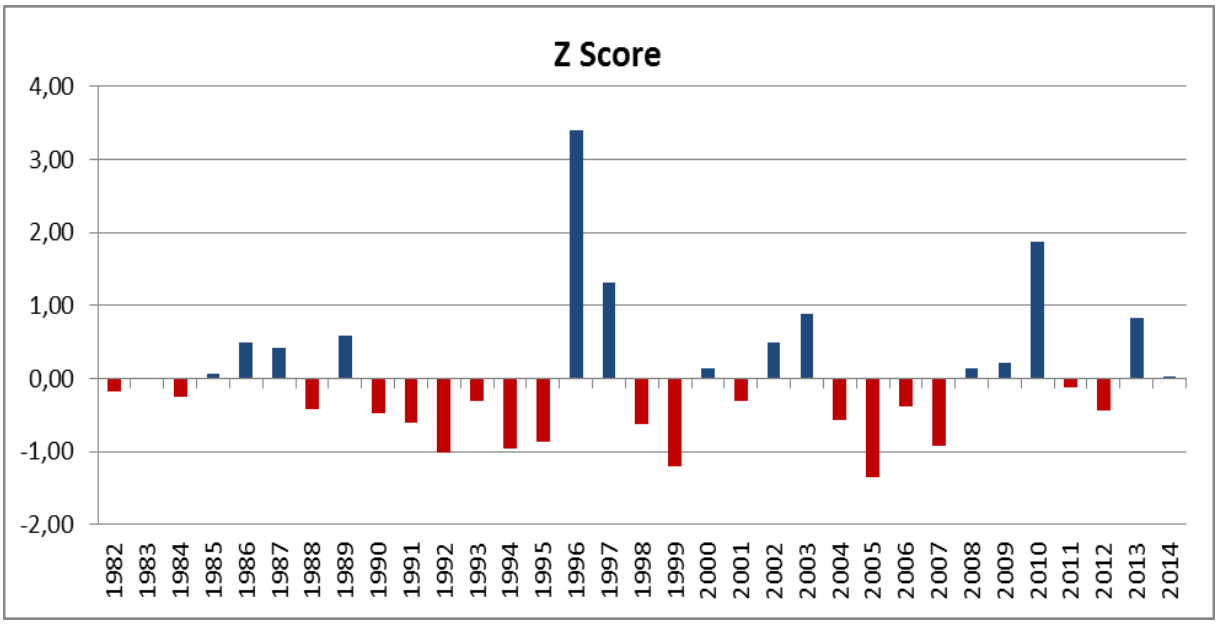

Figure 56: Evolution du z-score pour des durées annuelles

Le calcul du Statistique Z-Score à l'échelle annuelle (Fig.56) nous montre que l'année 2005 est extrêmement sèche, les années 1992-1994-1995-1999-2007 est sévèrement sèches, les autres sont de sécheresse modérée a humide.

E. Comparaison entre PN et DP et Z-score

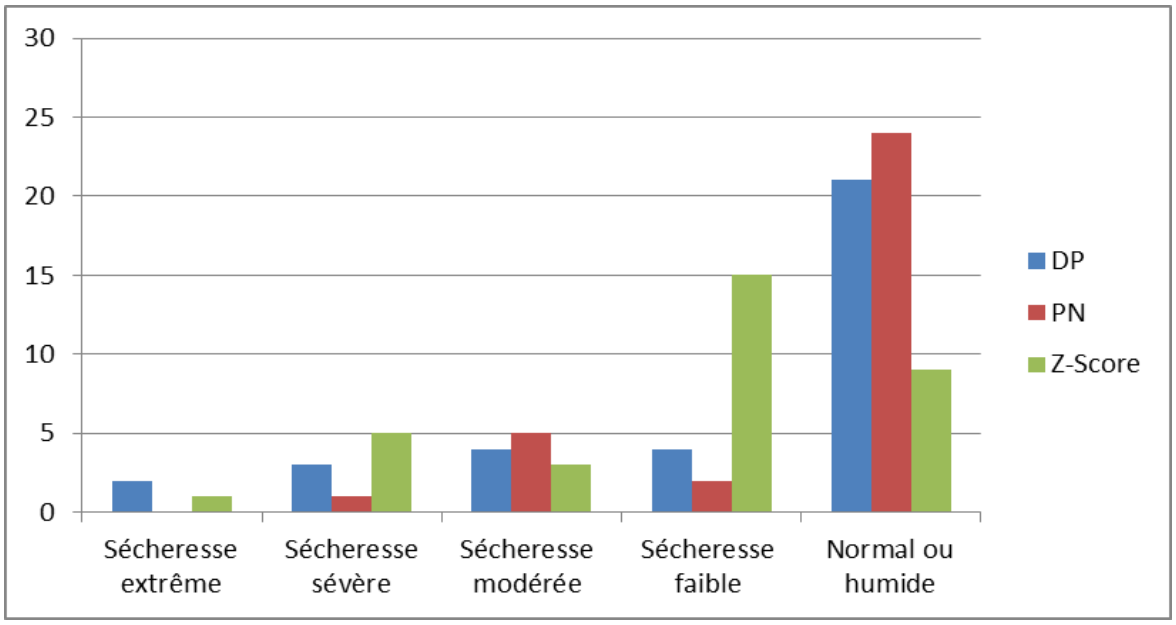

Figure 57: comparaison entre DP12, PN12 et Z-score12

La comparaison entre les indices (PN, DP et Z-score) pour 12 mois (Fig.57) nous montre que la classe de sécheresse « normal où humide» avait le nombre maximal des années par rapport aux autres. Les résultats étaient très proches pour la classe « modérément sèche »et un peu éloigné pour les autres classes.

F. Indice d'anomalie de pluviosité (RAI)

L'indice utilise les valeurs normalisées des précipitations établies à partir de l'historique des relevés à une station particulière. La comparaison avec la période courante donne une perspective historique aux valeurs de sortie. Cet indice a été calculé par le logiciel "MDM" (Meteorological Drought Monitoring).

L'indice permet d'analyser les sécheresses qui ont une incidence sur l'agriculture, les ressources en eau et d'autres secteurs, car, du fait de sa souplesse, il peut être établi à différentes échelles temporelles (Kraus, E.B., 1977).

- Points forts: Il est facile à calculer, ne comporte qu'un paramètre d'entrée (les précipitations) et peut être analysé aux échelles mensuelles, saisonnières ou annuelles.

- Points faibles: Il faut disposer d'une série complète de données et estimer les valeurs manquantes. Les fluctuations au cours de l'année doivent être faibles par rapport aux variations temporelles.

Tableau 22: classification de RAI

Classification de RAI	Valeur
Extreme humide	>0,3
humide	0,3 a -0,3
normal	0,3 a -1,2
secheresse modere	-1,2 a -2,1
secgeresse severe	_2,1 a -3
sechresse extreme	<-3

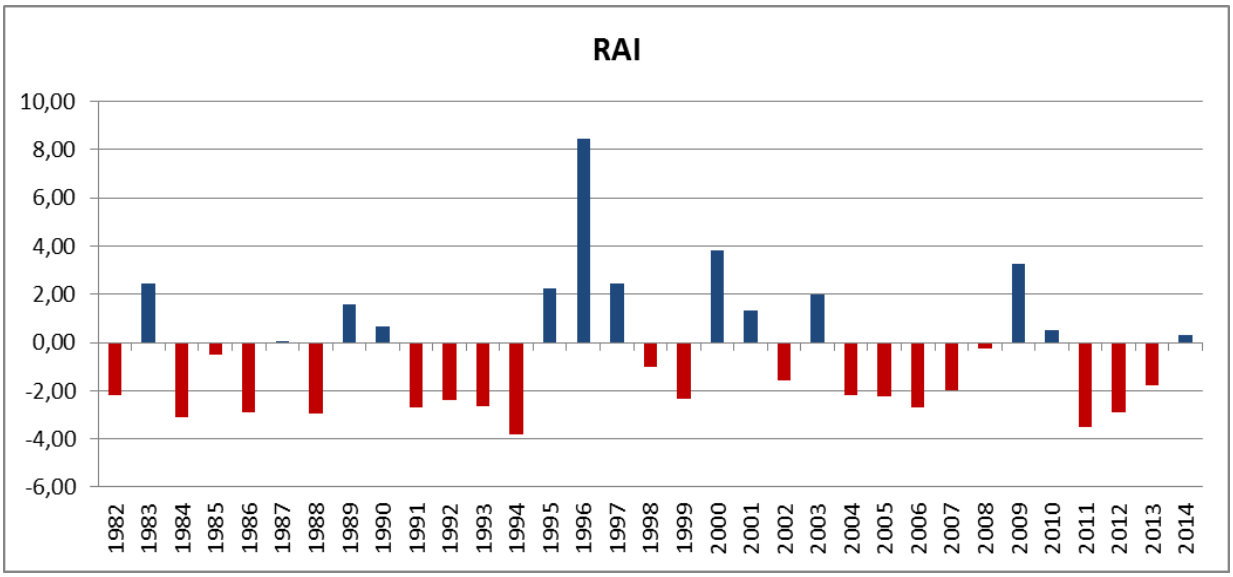

Figure 58: Evolution du RAI pour des durées annuelles

Le calcul du Statistique Z-Score à l'échelle annuelle (Fig.58) nous montre que l'année 1994 est extrêmement sèche et deux longues périodes sèches 1990 à 1995 et 2004 à 2008.

G. Intensité de la sécheresse (DI)

Cet indice a été calculé par le logiciel "MDM" (Meteorological Drought Monitoring).

Tableau 23: classification de DI

Classification de DI	Valeur
Extrêmement sec	1
Sécheressesévère	2
Sécheressemodérée	3
Sécheressefaible	4
Normal ou humide	5=<

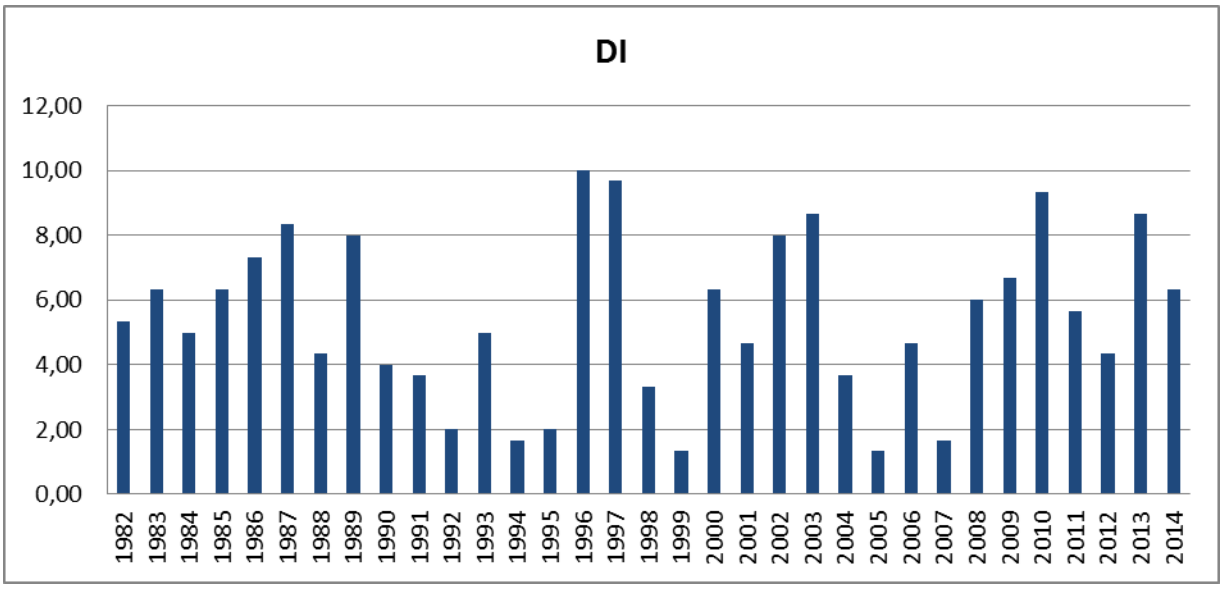

Figure 59: Evolution du DI pour des durées annuelles

Le calcul d'Intensité de la sécheresse (DI) à l'échelle annuelle (Fig.59) nous montre que les années 1992-1994-1995-1999-2005-2006 est sévèrement sèches. Les autres années sont modérées a humides.

4. Conclusion

L'indice de sécheresse SPI 12 a permis de voir les principales années de sécheresse sur le bassin entre 1982 et 2014. Les sous-périodes 1990-1995 et 2004-2008 reste les plus déficitaires, La pire période de sécheresse a eu lieu depuis 1990 à 1995 durant laquelle une durée de cinq années consécutives de sècheresse a été observée dans le bassin versant, les valeurs minimales de SPI étaient inférieures à -2 sur toutes les échelles de temps.

Les résultats ont montré que les indices SPI sont capables de reproduire les épisodes de sécheresse survenus dans le bassin versant de l'oued Ouergha au cours de la période 1982-2014. Les événements de sécheresse détectés correspondent aux cas où la valeur de SPI dépasse un seuil donné, ce qui indique qu'une certaine zone est affectée par un événement. Les valeurs des SPI à différentes échelles de temps montrent que les sécheresses dans le bassin versant de l'oued Ouergha étaient généralement d'intensité modérée à légère. Les sécheresses de 1987, 1995, 2001 et 2005 étaient des sécheresses sévères à extrêmes, pour une

échelle de temps de 1 mois et 12 mois l'intensité des sécheresses étaient extrêmes, En revanche les échelles de temps de 3 mois et 6 mois étaient des sécheresses sévères en 1995 et extrêmes en 2001 et 2005.Les sécheresses de 1987, 1995, 2001 et 2005 étaient des sécheresses sévères à extrêmes, pour une échelle de temps de 1 mois et 12 mois l'intensité des sécheresses étaient extrêmes, En revanche les échelles de temps de 3 mois et 6 mois étaient des sécheresses sévères en 1995 et extrêmes en 2001 et 2005.L'analyse des résultats de l'indice SPI conforte d'autres études au bassin versant de l'oued l'Ouergha comme (Boukrim, 2011) qui avaient conclu à un déficit pluviométrique depuis 1982 et la persistance de sécheresse précisément en 1987,1995, 2001 et 2005.

Les résultats de l'indice SPI conforte les résultats obtenus les autres indices de sécheresses DP, PN, Z-score-RAI et DI, une sécheresse sévère a extrême précisément en 1995 et 2005, des périodes déficitaires avec une sécheresse sévère a extrême depuis 2004 à 2008 et aussi depuis 1990 a 1995 qu'elle était la pire période déficitaire durant toute la période étudier.

Conclusion générale

Les précipitations recueillies dans les stations du bassin versant de l'Ouergha se caractérisent par des fluctuations entre les différentes stations ainsi qu'entre les cycles hydrologiques. On remarque une diminution des précipitations le long des stations du cours d'eau de l'oued de l'Ouergha en allant de l'amont vers l'aval du bassin versant. Dans chacune des stations, on observe que les mois de Juin, Juillet et Août reçoivent des précipitations faibles et montrent que le régime pluviométrique du bassin est de type méditerranéen.

L'analyse des températures a montré que le mois de Janvier est le plus froid et le mois d'Août est le plus chaud avec une moyenne respective de 11,5°C et 30.3 °C. La température moyenne annuelle est de 18,9 °C. Par ailleurs, la combinaison entre la température et la précipitation par des différentes méthodes a montré que la station de Hajria est globalement sous un climat semi humide. On note que le calcul de l'évapotranspiration réelle par des différentes méthodes a donné une valeur moyenne de 569,6 mm. Cette valeur reste toutefois inférieure à la précipitation moyenne annuelle qui est de 808 mm et ainsi en résulte un surplus qui va contribuer à l'alimentation des nappes souterraines ou l'alimentions du ruissellement superficiel. D'après le bilan hydrique du bassin versant, on peut distinguer quatre périodes : une période déficitaire qui s'étend du mois Juin jusqu'au mois de Septembre. La deuxième période pendant le mois d'Octobre correspond à la période de restitution des réserves en eau du sol. Un surplus est observé à la troisième période qui commence à partir du mois Novembre jusqu'au mois d'Avril. La dernière la période débute du mois Avril jusqu'au mois de Juin et est considérée comme une phase d'épuisement des réserves facilement utilisables.

L'étude du régime hydrologique du bassin versant lui a attribué un régime typique méditerranéen, caractérisé par l'abondance pluviale à très fort débits hivernaux, donc des fortes crues. Ce phénomène se reproduit à l'échelle de l'année et marque des saisons d'abondance hydrologique.

Le module annuel des débits au niveau de la station d'Ain Aicha est plus important que celui des stations des Galaz et Tabouda, ceci reflète la situation amont-aval des deux

stations et la succession de périodes humides et de périodes sèches qui est confirmée par le test de simple cumul.

La méthode des écarts (Ec) des débits moyens annuels aux débits moyens interannuels a révélé une alternance de périodes excédentaires et de périodes déficitaires, non conforme dans les trois stations, avec l'importance des périodes déficitaires par rapport à celles excédentaires.

Les autres irrégularités interannuelles de l'écoulement sont mesurées par les variations du coefficient d'hydraulicité (CH) et complétées par le coefficient de variation (CV), ainsi que le coefficient d'immodération (R). Ces coefficients permettent de conclure respectivement des fluctuations hydroclimatiques, une variabilité à l'échelle spatiale et une variabilité des débits extrêmes.

L'étude de la relation entre les précipitations et les lames d'eau écoulée permet de conclure globalement un synchronisme avec un maximum de précipitation en Novembre et Décembre suivi d'un maximum de débits avec un retard d'un mois à deux mois en Février.

Le bilan hydrologique par sa formulation traduit mieux la relation qui existent entre les volumes d'eau précipités sur un bassin et ceux écoulés à son exutoire. Son estimation permet de conclure que les pourcentages des différentes phases d'écoulement (écoulement totale, ruissèlement et infiltration prennent respectivement 29.3%, 18.69% et 10.63%.

L'indice de sécheresse SPI 12 a permis de voir les principales années de sécheresse sur le bassin versant entre 1982 et 2014. Les sous-périodes 1990-1995 et 2004-2008 reste les plus déficitaires, alors que la pire période de sécheresse a eu lieu depuis 1990 à 1995 durant laquelle une durée de cinq années consécutives de sècheresse a été observée dans le bassin versant. En effet, les valeurs minimales de SPI étaient inférieures à -2 sur toutes les échelles de temps.

Les résultats ont montré que les indices SPI sont capables de reproduire les épisodes de sécheresse survenus dans le bassin versant de l'oued Ouergha au cours de la période 1982-2014. Les événements de sécheresse détectés correspondent aux cas où la valeur de SPI dépasse un seuil donné, ce qui indique qu'une certaine zone est affectée par un événement. Les valeurs des SPI à différentes échelles de temps montrent que les sécheresses dans le bassin versant de l'oued Ouergha étaient généralement d'intensité modérée à légère. Les sécheresses de 1987, 1995, 2001 et 2005 étaient des sécheresses sévères à extrêmes. Pour une

échelle de temps de 1 mois et 12 mois, l'intensité des sécheresses étaient extrêmes. En revanche, les échelles de temps de 3 mois et 6 mois étaient des sécheresses sévères en 1995 et extrêmes en 2001 et 2005.

L’analyse des résultats de l’indice SPI conforte d’autres études au bassin versant de l’oued l’Ouergha notamment ceux de Boukrim (2011) qui avaient conclu un déficit pluviométrique depuis 1982 et la persistance de la sécheresse précisément en 1987,1995, 2001 et 2005.

Les résultats de l’indice SPI conforte les résultats obtenus les autres indices de sécheresses DP, PN, Z-score-RAI et DI ; une sécheresse sévère à extrême précisément en 1995 et 2005, des périodes déficitaires avec une sécheresse sévère à extrême depuis 2004 à 2008 et aussi la période 1990 à 1995 qui constitue la pire période déficitaire durant toute la période étudiée.

Références

Abdellah R., 1997: Les bassins néogènes du sillon sud rifain et du Rif nord oriental (Maroc): sédimentologie, paléogéographie et évolution dynamique. Thèse. Doct. Es. Sciences. Fac. Sidi Mohamed Ben Abdallah, Fès.

ABHS-Fès : données précipitations mensuelles, annuels, débits, températures (1982 à 2015).

Afkir E., 1985: Le bassin versant d'Inaouène: caractéristiques climatiques et comportement hydrologique. Thèse 3ème cycle, Univ, Toulouse-le Mirail, 249p.

Ahmed L., Parvase S., Madjid M. & Kanth R. H. (2016) : Analysis of Historical Rainfall Data for Drought Investigation Using Standard precipitation Index (SPI) Under Temperate Conditions of Srinagar Kashmir, 13(25), 29-38.

Andrieux J. 1971 : La structure du Rif central. Etude des relations entre la tectonique de compression et les nappes de glissement dans un tronçon de la chaîne alpine. Notes et mem. Du serv. Géol. Maroc, 235, 155p.

Aserby L., De luca P., Bourgois J., & Chotin P., 1987 : Resédimentations d'âge Sénonien dans le rif central (Maroc) : Conséquence sur les divisions paléogéographiques et structurale de la chaîne, J. Africain Earth. Sci., 6, 9-17.

Aserby L., De luca P., Bourgois J., & Chotin P., 1992 : Imoprtance d'une tectonique de distension pliocène dans le rif central (Maroc : la nappe de Ketama existe-t-elle ?, J. Africain Earth. Sci., 15, 49-57.

Boukrim S., 2011: Etude d'impact des changements cimatiques sur les ressources en eau au bassin de l'Oueghra (Rif – Maroc), Mémoire Master Hydrologie de Surface et Qualité des Eaux, FST Fès, 48 p.

Coutagne A., 1954: Quelques considérations sur le pouvoir évaporant de l'atmosphère, le déficit d'écoulement effectif et le déficit d'écoulement maximum. La houille blanche, pp:360-369.

Didon J., durand Dulga M.,& Kornprobst J., 1973: Homologie géologique entre les deux rives du détroit de gibralter. Bull. Soc. Géol. France, 8, t.17, 77-105.

Favre Ph. 1995: Analyse quantitative du rifting et de la relaxation thermique de la partie occidentale de la marge transformante nord-africaine : le Rif externe (Maroc). Comparaison avec la structure actuelle de la chaîne. Geodinamica Acta (Paris), 8, 2, 59-81.

Frizon D. ; Andrieux J. & Guezou J-C. 1991 : Cinématique des chevauchements néogénes dans l'arc bético-rifain : discussion sur le modèle géodynamique. Bull. Soc. Géol. France, t. 162, 4, 611-626.

GIEC, 2007 : Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A. (publié sous la direction de~)]. GIEC, Genève, Suisse… 103 pages.)

Guttman N.B., 1994 : On the sensitivity of sample L moments to sample size. Journal of Climate, 7(6):1026–1029.

Haida, S., 2000: Transport de matière et bilan de l'érosion mécanique et de l'altérationchimique sur le bassin versant de zone semi-aride: le Sebou. Thèse de Doctorat es sciences, Fac. Sc. Kénitra, Univ. Ibn Tofaïl, Maroc.

Beaudin I., 2006 : Potentiel de la télédétection pour le suivi et la caractérisation de la condition de sécheresse en milieu méditerranéen, programme en sciences géomatiques faculté de foresterie et géomatique université Laval.

Kraus, E.B., 1977: «Subtropical droughts and cross-equatorial energy transports», Monthly Weather Review, 105(8):1009–1018.

Msatef K., 2015 : Etude hydrologique du bassin versant de l'Oued Ouergha, Nord du Maroc.

Karim Msatef, Lahcen Benaabidate, Aziz Bouignane, 2018 : Hydrological and hydroclimatic regimes in the Ouergha watershed. E3S Web of Conferences 37, 04001 (2018) https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183704001 EDE6-2017

Mckee T.B., Doesken N.J., Kleist J., 1993 : The relationship of drought frequency and duration times scales. American Meteorological Society. 8th conference on Aplied Climatology, 17-22 Janvier,Anaheim, CA. p.179- 184.

Mckee T.B., Doesken N.J., Kleist J.,. 1995 : Drought monitoring with multiple times scales. American Meteorological Society.9th conference on Applied Climatology, 15-22 Janvier, Dalas. TX.p. 233-236.

Musy, A. 2001. e-drologie. Ecole Polytechnique Fédérale, Lausanne, Suisse.

Musy A. et Higy, C., 1998 : Hydrologie Appliquée, Edition HGA, Bucarest, 368p.

OMM .2013. 2001-2010 : une décenie d'extrême climatique. Organisation Météorologique Mondiale, communiqué de prese No 976, URL : http:/www.wmo.int/pages/mediacentre/pres_releases/pr_976_fr.html

OMM. .2007 : Guide to climatological practices, Third editon, WMO N° 100, Geneva, 113 p.

Programme de gestion intégrée des sécheresses. (2016), Manuel des indicateurs et des indices de sécheresse, Organisation météorologique mondiale (OMM), pp16-40.

Roche M., 1963: Hydrologie de surface, Gauthier-Villars Editeur, Paris, 429 p.

Sauvage C., 1960 : Le quotient pluviométrique d'Emberger, son utilisation et la présentation géographique de ses variations au Maroc. Ann .Serv . phys. globe météo r. I.S.C.

Sebbar A, Badri W, Fougrach H, Hsaine M et Slaoui A, (2011). : Etude de la variabilité du régime pluviométrique au Maroc septentrional (1935-2004), Sécheresse vol. 22, n° 3, pp48-139.

Suter G. 1980 : Carte géologique de la chaîne rifaine. Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc. N°245.

Suter G., 1967 : Note explicative de la carte géologique du rif, région de moyen Ouarrha (feuille de taounate, Aïn Aïcha, tissa) au /50000éme. Note et Mém. Serv. Géol. Maroc, n° 166 bis.

Thornthwaite 1955: "The water balance", Climatology, 8:1-104, 1955.

Turc L., 1961: Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle, formule simplifiée et mise à jour. Ann. Agron. Tome XII, pp. 13-49.

Vinit.K, Jain a.n, Rajendra.P, Pandey.b, Manoj K. Jain.c,H.R.Byun d,(2015),

Comparison of drought indices for appraisal of drought characteristics in the Ken River Basin,Pukyong National University, Korea.

WMO, (2012), Guide d'utilisation de l'indice normalise de précipitations, Organisation météorologique mondiale (OMM), pp15-25.

Centre d'Etudes Doctorales : Sciences et Techniques de l'Ingénieur

Titre de la thèse : Variabilité climatique et sécheresse hydrologique dans le bassin versant de l'oued Ouergha.

Nom et Prénom : MSATEF KARIM

Résumé de la thèse

Les sécheresses font partie des phénomènes météorologiques extrêmes résultant de la variabilité et l'irrégularité des précipitations et de l'effet des changements climatiques durant ces dernières décennies. Ces sécheresses engendrent de graves conséquences économiques, environnementales et sociales.

L'objectif de cette étude est de caractériser la sécheresse climatique au niveau du bassin versant de l'oued l'Ouergha, situé dans le Maroc septentrional, à travers le calcul de l'indice standardisé de précipitations (SPI) à multi échelle et basé sur les précipitations pour reproduire les sécheresses observées dans le bassin versant de l'oued l'Ouergha pour la période 1982-2014. Par ailleurs, d'autres indices de sécheresses ont été calculés, notamment DP, PN, Z-score-RAI et DI.

Les résultats obtenus après le calcul de l'indice SPI à différents échelles de temps de 1, 3, 6 et 12 mois montrent que les sécheresses dans le bassin versant de l'oued Ouergha étaient généralement d'intensité modérée à légère. Cependant, les sécheresses de 1987, 1995, 2001 et 2005 étaient des sécheresses sévères à extrêmes avec des périodes déficitaires d'une sécheresse sévère à extrême 1990-1995 et 2004-2008.

Les résultats de l'indice SPI conforte les résultats obtenus par les autres indices de sécheresses DP, PN, Z-score-RAI et DI. Ils affichent une sécheresse sévère à extrême précisément en 1995 et 2005, des périodes déficitaires avec une sécheresse sévère à extrême depuis 2004 à 2008 et aussi depuis 1990 à 1995 qui était la pire période déficitaire durant toute la période d'observation.

Mots clés : Sécheresse, Intensité, Changement climatique, l'indice standardisé précipitations (SPI), bassin versant de l'oued l'Ouergha.