



Année Universitaire : 2014-2015



Master Sciences et Techniques : Hydrologie de Surface et Qualité des Eaux

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
Pour l'Obtention du Diplôme de Master Sciences et
Techniques

**Etude hydrologique du bassin versant de l'Oued
Ouergha, Nord du Maroc**

Présenté par:

MSATEF KARIM

Encadré par:

- Mr. Lahcen Benaabidate, FST-Fès
- Mr. Aziz Bouignane, ABHS-Fès

Soutenu le 22 Juin 2015 devant le jury composé de:

- Mr. Abderrahim Lahrach
- Mr. Abdel-Ali Chaoui
- Mr. Aziz Bouignane
- Mr. Lahcen Benaabidate

Stage effectué à : ABHS-Fès



Résumé

Le présent travail porte sur le régime hydrologique du bassin versant de l'oued Ouergha. Ce bassin occupe l'essentiel du versant Sud atlantique de l'arc rifain et s'étend sur la majeure partie de la montagne rifaine. L'étude a été entamée par une caractérisation morphologique de la zone étudiée, suivie par une synthèse géologique et climatologique et enfin, une analyse du comportement hydrologique.

Ce bassin a un périmètre de 462 Km et cumulant une superficie de 6190 Km² soit 21.2% de la surface du bassin versant de Sebou. Le bassin reçoit une pluie moyenne annuelle de 741mm, un volume d'eau de 4956.4×10^6 m³/an et une température moyenne annuelle de 18.7°C. L'évapotranspiration réelle dans le bassin versant est de 523.6mm/an ce qui représente 70.6% des précipitations moyennes annuelles.

Le régime hydrologique peut être considéré comme un régime pluvial, caractérisé par l'abondance pluviale à très forts débits hivernaux, donc des fortes crues. Le module annuel ainsi que les différents coefficients, mettent en évidence des fluctuations hydroclimatiques, la combinaison entre la température et la précipitation par les différentes méthodes a montré que le bassin versant de l'oued Ouergha est globalement sous un climat semi humide.

L'analyse du régime hydrologique avec les différentes méthodes ainsi que celle de la relation «précipitation-débit» a permis de définir un régime du type pluvial avec un débit moyen annuel de 14.3m³/s. La répartition fréquentielle des crues est régie par des lois dissymétriques basées sur les méthodes des moments et de maximum de vraisemblance, les lois Gama et Log Pearson III.

Dédicace

Je dédie ce travail

A ma très chère Mère, choukri halima

A mon père, Msatef houssine

Qui ont toujours été là pour moi, qui m'ont donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance. J'espère qu'ils trouveront dans ce travail toute ma reconnaissance et tout mon respect. Que le bon Dieu vous donne une longue vie et de santé.

A mes oncles et mes tantes

A mes cousins et cousines

A tous mes amis (es) et mes collègues

A tous ceux qui me sont chers.

Remerciements

Arrivé au terme de ce travail, je tiens à exprimer ma reconnaissance envers tous ceux qui ont contribué à sa réalisation.

J'exprime toute ma gratitude à mon encadrant Monsieur Lahcen BENABIDATE , professeur de la faculté des sciences et Techniques de Fès et responsable du Master, pour sa patience , sa disponibilité et ses judicieux conseils .Je tiens vivement à le remercier pour ces encouragements et la confiance qu'il m'a accordé tout au long de cette recherche.

Il m'est agréable de remercier Monsieur Abderrahim Lahrach, Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de Fés et Monsieur Abdel Ali Chaouni, Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de Fés qui m'ont honoré en acceptant de juger ce Travail. Je suis largement redevable, car leurs qualités d'enseignement, ont permis mon apprentissage de la recherche. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma reconnaissance.

Je remercie aussi tous les professeurs de la faculté des sciences et Techniques de Fès qui ont contribué pour cette formation durant les 2 ans de Masters.

Je remercie vivement ma famille pour leur patience et leur soutien moral et matériel tout au long de mon parcours estudiantine.

Enfin, j'exprime ma reconnaissance envers les amis et collègues qui m'ont apporté leur support moral et intellectuel tout au long de ma démarche.

Table des matières

Résumé	I
Dédicace	II
Remerciements.....	III
Table des matières.....	IV
Liste des figures	VIII
Liste des tableaux	X
INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre I : PRESENTATION DU BASSIN VERSANT	
I. Introduction.....	3
II. Situation géographique	3
III. Les caractéristiques physiques du bassin versant.....	4
1. La forme.....	4
2. Le relief	6
a) Carte hypsométrique.....	6
b) Courbe hypsométrique	7
3. Le rectangle équivalent	9
4. Les caractéristiques d'altitudes	10
a) Altitudes minimale et maximale.....	10
b) L'altitude moyenne	10
c) Altitude médiane	11
5. Etude de la pente.....	11
a) La réalisation de la carte des pentes	11
b) Pente moyenne du bassin versant	13
c) Indice de pente global	14
IV. Le réseau hydrographique.....	14
1. La densité du drainage	15
V. Conclusion	16
Chapitre II: CADRE GEOLOGIQUE	
I. Introduction.....	18
II. Géologie de la chaîne du Rif	18
III. Aperçu sur la géologie du bassin versant versant de l'Oued l'Ouergha.....	20
1. Les dépôts post-nappe	20
2. Zone Intra-Rifaine.....	20

3.	Unité de Ketama.....	20
4.	Unité de Tanger.....	20
5.	Zone Mésio-Rifaine.....	20
IV.	Tectonique.....	21
V.	Facies Litho stratigraphie.....	21
1.	Les formations secondaires.....	21
2.	Le Crétacé.....	21
3.	Les formations tertiaires et quaternaires.....	21
VI.	Conclusion.....	24

Chapitre III : CLIMATOLOGIE DU BASSIN VERSANT

I.	Introduction.....	26
II.	Précipitation.....	27
1.	Variation temporelle des précipitations.....	27
a)	Précipitations annuelles.....	27
b)	Précipitations saisonnières.....	28
c)	Précipitations moyennes mensuelles.....	29
2.	Evaluation de la lame d'eau moyenne tombée sur le bassin.....	30
a)	Méthode arithmétique.....	30
b)	Méthodes des polygones de Thiessen.....	31
c)	Méthode des isohyètes.....	33
3.	Estimation de la moyenne de la lame d'eau calculée par les trois méthodes.....	34
III.	Etudes des températures.....	35
1.	Température moyenne mensuelle.....	35
2.	Relation température et précipitation.....	36
a)	L'indice Xérothermique de Gaussen.....	36
b)	L'indice d'aridité annuelle de De Martonne et les indices mensuelles d'aridité..	37
c)	Quotient pluviométrique d'Emberger.....	38
IV.	Evapotranspiration.....	40
1.	L'évapotranspiration potentielle.....	40
2.	Evapotranspiration réelle.....	42
a)	Méthode de Turc.....	42
b)	Méthode de coutagne.....	42
c)	Méthode du bilan de Thornthwaite.....	43
3.	Bilan hydrique.....	44

V.	Conclusion	45
Chapitre IV : ETUDE HYDROLOGIQUE		
I.	Introduction.....	47
II.	Etude du régime du débit.....	47
1.	Débits annuels	47
a)	Variation des débits annuels par la méthode des écarts à la moyenne	49
b)	L'irrégularité interannuelle des débits par la méthode du simple cumul.....	51
c)	Coefficient et indice de la variabilité des débits.....	55
2.	Débits moyens mensuels.....	56
a)	Module mensuel.....	56
b)	Coefficient mensuel des débits	59
3.	Débits journalières	60
a)	Débit journaliers d'une année humide.....	60
b)	Débit journaliers d'une année moyenne.....	61
c)	Débit journaliers d'une année sèche.....	61
III.	Relation entre les débits et les précipitations.....	61
1.	Relation entre les débits et les précipitations mensuels.....	61
2.	Coefficient de ruissellement.....	63
3.	Bilan Hydrologique	64
a)	Ecoulement total	64
b)	Le ruissellement	65
c)	Infiltration.....	65
IV.	Etudes des crues.....	66
1.	Etude des débits maxima instantanés annuels	66
2.	Puissance des crues.....	67
3.	Analyse fréquentielle des crues maximales annuelles.....	69
4.	Donnés et méthode d'analyse.....	69
a)	Test d'homogénéité de Mann whitney	70
b)	Test d'indépendance de Wald Wolfowitz	70
c)	Test de stationnarité (Kendal)	71
5.	Statistique de base	72
a)	Résultats de statistique de base.....	72
b)	Histogramme de fréquence	72
c)	Ajustement aux lois statistiques.....	73

6. Comparaison aux ajustements aux lois statistiques.....	82
a) Quantiles estimés pour différentes périodes de retour.....	84
V. Conclusion	86
CONCLUSION GENERALE	88
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	89

Liste des figures

Figure 1: Carte de la situation géographique du bassin versant de l'Oued Ouergha	4
Figure 2: Exemple d'indice de compacité (Musy, 2001)	5
Figure 3: Carte morphologique de l'oued Ouergha	6
Figure 4: Carte hypsométrique du bassin versant de l'Oued Ouergha	7
Figure 5: Courbe hypsométrique du bassin versant de l'oued Ouergha.....	8
Figure 6: Interprétation de la courbe hypsométrique (Jean-Pierre Larue, 2005)	9
Figure 7: Rectangle équivalent du bassin versant de l'Oued Ouergha	10
Figure 8: Histogramme des fréquences cumulées des pentes en (Km ²) du Ouergha.....	12
Figure 9: Carte des pentes du bassin versant de l'oued Ouergha.....	13
Figure 10: Carte du réseau hydrographique du bassin versant de l'oued Ouergha	15
Figure 11: Extrait de la carte géologique du Maroc (1951).....	19
Figure 12: Carte géologique et lithologique du bassin versant de l'oued l'Ouergha	23
Figure 13: Fiche synoptique du bassin versant de l'oued Ouergha	27
Figure 14: Variation des précipitations moyennes annuelles dans le bassin versant du Ouergha.....	28
Figure 15: Variation des précipitations moyennes saisonnières dans le bassin versant de l'oued Ouergha	29
Figure 16: Variation des précipitations moyennes mensuelles dans le bassin du Ouergha	30
Figure 17: Carte des polygones de Thiessen relative au bassin versant de l'oued Ouergha	32
Figure 18: Carte des isohyètes relatives au bassin versant de l'oued Ouergha	33
Figure 19: Variation de températures moyennes mensuelles au niveau de la station Hajria au cours de la période 1981 à 2007 (ABHS-Fès)	36
Figure 20: Diagramme ombrothermique de Gaussen au niveau de la station Hajria	37
Figure 21: Evolution mensuelle de l'indice d'aridité au niveau de la station de Hajria	38
Figure 22: Climagramme d'Emberger dans le bassin versant de l'oued Ouergha (Hajria).....	39
Figure 23: Evolution de l'ETP en fonction de Précipitation et Température au niveau de la station Hajria	41
Figure 24: Bilan hydrique du bassin versant de l'oued Ouergha au niveau de Hajria, estimé à partir de précipitations, L'ETP et l'ETR de la méthode de Thornthwaite.....	44
Figure 25: Variation interannuel des débits moyens annuels pour la station Tabouda	48
Figure 26: Variation interannuel des débits moyens annuels pour la station Galaz.....	48
Figure 27: Variation interannuel des débits moyens annuels pour la station Ain Aicha	49
Figure 28: Variation des écarts des débits moyens annuels et interannuels de Tabouda.....	50
Figure 29: Variation des écarts des débits moyens annuels et interannuels de Galaz	50
Figure 30: Variation des écarts des débits moyens annuels et interannuels d'Ain Aicha.....	51
Figure 31: Simple cumul des lames d'eau écoulées au niveau de la station Galaz (1983 à 2011).....	52
Figure 32: Simple cumul des lames d'eau écoulées au niveau de la station Tabouda (1980 à 2012) ..	53
Figure 33: Simple cumul des lames d'eau écoulées au niveau de la station Ain Aicha (1981 à 2011) .	54
Figure 34: Variation du coefficient d'hydraulicité dans le bassin versant de l'oued l'Ouergha.....	55
Figure 35: Variation des débits mensuels à la station de Tabouda.....	57
Figure 36: Variation des débits mensuels à la station de Galaz	57
Figure 37: Variation des débits mensuels à la station d'Ain Aicha.....	58
Figure 38: Variation des débits moyens saisonniers dans le bassin versant de l'oued Ouergha.....	58
Figure 39: Variation du coefficient mensuel des débits.....	60

Figure 40: Débits journaliers à la station d'Ain Aicha pour l'année humide, moyenne et sèche	61
Figure 41: Evolution des précipitations et des débits au niveau de la station de Tabouda.....	62
Figure 42: Evolution des précipitations et des débits au niveau de la station de Galaz	62
Figure 43: Evolution des précipitations et des débits au niveau de la station d'Ain Aicha.....	63
Figure 44: Les débits maxima instantanés pour la station d'Ain Aicha.....	67
Figure 45: Les débits maxima instantanés pour la station Galaz	67
Figure 46: Evolution des indices de sévérité dans la station d'Ain Aicha.....	68
Figure 47: Evolution des indices de sévérité dans la station de Galaz	68
Figure 48: Histogramme de fréquence des débits maximum annuel pour la station d'Ain Aicha	73
Figure 49: Histogramme de fréquence des débits maximum annuel pour la station de Galaz.....	73
Figure 50: Ajustement graphique de la série maxima instantanée à la loi Gumbel pour la station d'Ain Aicha	76
Figure 51: Ajustement graphique de la série maxima instantanée à la loi Gumbel pour la station de Galaz	76
Figure 52: Ajustement graphique de la série des débits maxima instantanée à la loi de GEV pour la station Ain Aicha.....	78
Figure 53: Ajustement graphique de la série des débits maxima instantanée à la loi de GEV pour la station Galaz	78
Figure 54: Ajustement graphique de la série des débits maxima instantanés à la loi de Gamma pour la station d'Ain Aicha.....	80
Figure 55: Ajustement graphique de la série des débits maxima instantanés à la loi de Gamma pour la station de Galaz	80
Figure 56: Ajustement graphique de la série des débits maxima instantanée à la loi de Log Perason III pour la station Ain Aicha	81
Figure 57: Ajustement graphique de la série des débits maxima instantanée à la loi de Log Perason III pour la station Galaz.....	82
Figure 58: Résultats de comparaison des ajustements graphique au niveau de la station d'Ain Aicha	83
Figure 59: Résultats de comparaison des ajustements graphique au niveau de la station de Galaz ...	83
Figure 60: Temps de retours correspondant aux débits maxima annuels enregistrés au niveau de la station d'Ain Aicha.....	85
Figure 61: Temps de retours correspondant aux débits maxima annuels enregistrés au niveau de la station de Galaz.....	86

Liste des tableaux

Tableau 1: Répartition de la surface totale par tranche d'altitude.....	7
Tableau 2: Tableau de fréquences et des pourcentages cumulés au dessus de la limite inférieure.....	8
Tableau 3: Classes des pentes	11
Tableau 4: Superficies, fréquences et fréquences cumulées en fonction des classes des pentes	12
Tableau 5: Classification du relief selon Ig donné par l'ORSTOM	14
Tableau 6: Caractéristiques morphologiques du bassin versant de l'oued Ouergha.....	16
Tableau 7: Coordonnées des stations pluviométriques du bassin versant de l'oued Ouergha au cours de la période (1981 à 2007)	26
Tableau 8: Calcul de la lame d'eau tombée par la méthode de Thiessen.....	33
Tableau 9: Calcul de la lame d'eau tombée par la méthode des Isohyètes.....	34
Tableau 10: Estimation de la lame d'eau moyenne	34
Tableau 11: ETP mensuel selon la méthode de Thornthwaite.....	41
Tableau 12: calcul de l'ETR mensuelle par la méthode de Thornthwaite	43
Tableau 13: Simple cumul des lames d'eau écoulées au niveau de la station Galaz (1983 à 2011).....	52
Tableau 14: Simple cumul des lames d'eau écoulées au niveau de la station Tabouda (1980 à 2012)	53
Tableau 15: Simple cumul des lames d'eau écoulées au niveau de la station Ain Aicha (1981 à 2011)	54
Tableau 16: Résultats du test de Kendal sur les données issues des deux stations	71
Tableau 17: Résultats des statistiques de base de l'oued de l'Ouergha dans les deux stations.....	72
Tableau 18: Résultats de l'ajustement à la loi de Gumbel (Maximum de vraisemblance) pour les deux stations	75
Tableau 19: Résultats et les paramètres du test de l'ajustement à la GEV pour les deux stations	78
Tableau 20: Résultats et paramètres du test de l'ajustement à la loi de Gamma pour les deux stations	79
Tableau 21: Résultats et les paramètres du test de l'ajustement à la loi de Log Pearson III pour les deux stations	81
Tableau 22: Résultat d'ajustement graphique de la série des débits maxima instantanés de la station d'Ain Aicha.....	85
Tableau 23: Résultat d'ajustement graphique de la série des débits maxima instantanés de la station de Galaz	86

INTRODUCTION GENERALE

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

Le bassin versant de Sebou qui se situe au Nord-Ouest Marocain possède 30% de la réserve nationale en eau superficielle dont 50% sont fournies par le sous bassin versant de l'Ouergha. L'oued Ouergha est l'un des principaux fleuves du Maroc. Il s'étend sur la majeure partie de la montagne rifaine et forme un passage entre le Rif et le Moyen atlas sur une superficie de 6190 Km², en occupant l'essentiel de l'arc rifain. Cette situation géographique favorise la pénétration de la fraîcheur et de l'humidité des masses d'air de lui permettre d'être la région la plus pluvieuse au Maroc surtout au niveau de son point culminant Jbel Outka.

C'est dans ce cadre que s'inscrit ce travail dont l'objectif est de dégager, sur la base des données climatologiques et hydrologiques disponibles, les aspects quantitatifs et statistiques des précipitations, de l'évapotranspiration et des écoulements sur le bassin versant de l'oued Ouergha. La démarche suivie est la suivante :

- Le premier chapitre présente des données générales sur le bassin et détermine les caractéristiques physiques du bassin versant : il s'agit de déterminer ces caractéristiques géométriques (surface, morphologie, forme, topographie, relief) et son réseau hydrographique. Le but est de déterminer le rôle de ces caractéristiques dans la réponse hydrologique du bassin (régime des écoulements).
- Le deuxième chapitre présente le contexte géologique et qui est un élément déterminant dans la compréhension des mécanismes d'écoulement superficiels et souterrains dans ce bassin. La géologie du substratum influe non seulement sur l'écoulement de l'eau souterraine mais également sur le ruissellement de surface. L'étude géologique d'un bassin versant dans le cadre d'un projet hydrologique a surtout pour objet de déterminer la perméabilité du substratum et l'influence de la géologie sur la différenciation du contexte hydrogéologique.
- Le troisième chapitre s'intéresse à l'étude des caractéristiques climatiques dont l'étude est nécessaire à la compréhension des mécanismes d'alimentation et de circulation des eaux superficielles. Elle intervient dans l'établissement de l'équation du bilan hydrologique essentiellement par les précipitations, secondairement par les températures et troisièmement par l'évapotranspiration.
- Le quatrième chapitre se consacrera à la caractérisation hydrologique, afin de déterminer le régime d'écoulement dans le bassin versant, ainsi qu'une analyse fréquentielle pour déterminer la période de retour des crues et l'ajustement des débits par les lois statistiques.

**Chapitre I : PRESENTATION DU
BASSIN VERSANT**

Introduction

Le bassin versant fonctionne comme un collecteur chargé de recueillir les pluies et de les transformer en écoulement à l'exutoire. Cette transformation ne va pas sans pertes en eau, lesquelles dépendent des conditions climatologiques régnant sur le bassin, mais aussi des caractéristiques physiques de ce dernier (Haida, 2000).

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

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

I. Situation géographique

Le bassin de Sebou forme une cuvette entre le Rif au Nord, le moyen Atlas et la Meseta au Sud, la zone de Fès -Taza à l'Est et l'océan Atlantique à l'Ouest.

Le Bassin Versant de l'Ouergha couvre une superficie de l'ordre de 6190 Km², ce qui représente 16.5% du BV de l'oued Sebou dont il fait partie.

Il se situe dans le Nord du Maroc entre les latitudes 34°25' et 35°25' et les longitudes -5°24' et -3°45'. Il s'étend sur la majeure partie de la montagne rifaine (Fig.1).

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

L'exutoire du bassin versant considéré dans cette étude a été placé au niveau du barrage ALWAHDA ; la retenue la plus importante du royaume de point de vue capacité de stockage (3,7 milliards de m³) avec un apport moyen annuel est de 3 300 Mm³ et un module annuel de 105m³/s environ. Les crues du bassin, qui se produisent entre octobre et avril, sont souvent d'une extrême violence. Le caractère irrégulier du régime hydrologique dans l'oued Ouergha met en évidence les difficultés concernant le choix du modèle adéquat qui décrit la transformation pluies- débits.

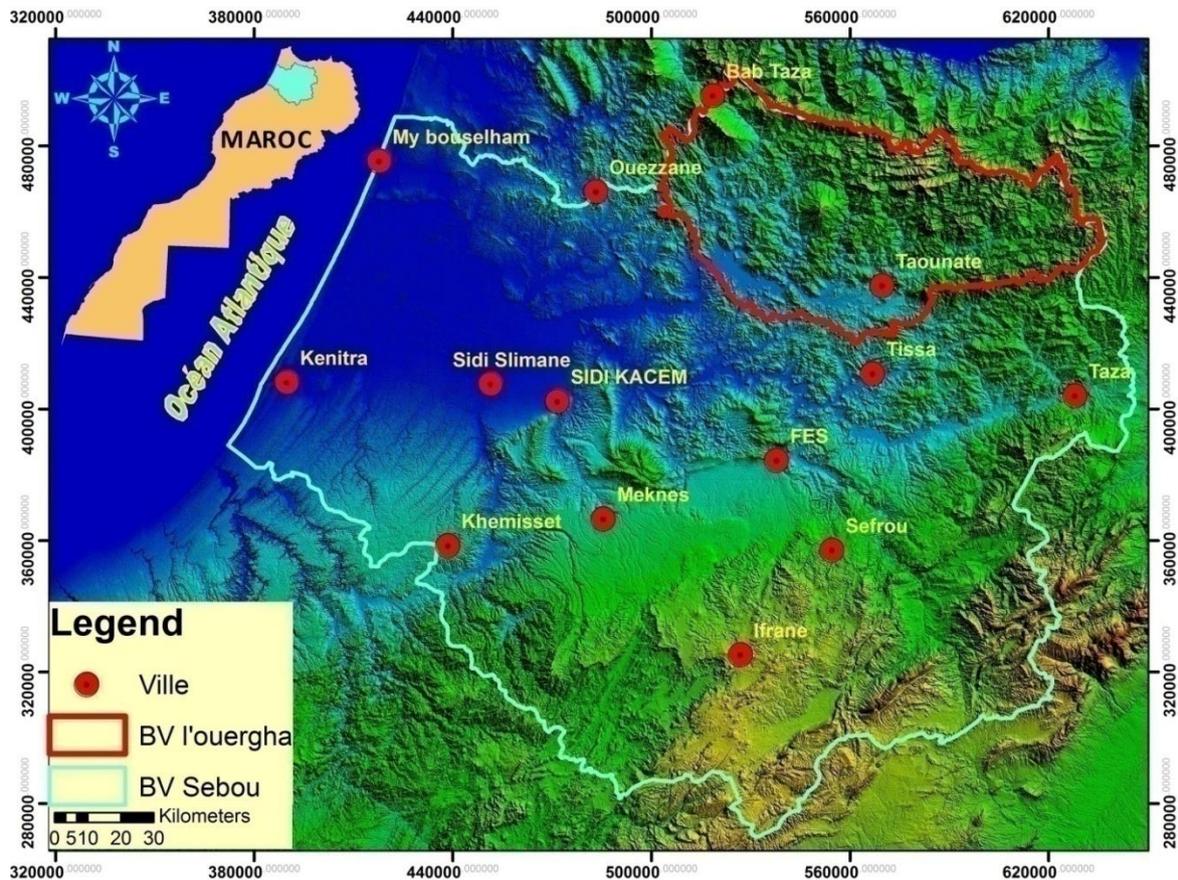


Figure 1: Carte de la situation géographique du bassin versant de l'Oued Ouergha

II. Les caractéristiques physiques du bassin versant

L'hydrologie des cours d'eau ainsi que de leur dynamisme dépendent vivement des caractéristiques physiographiques du bassin versant correspondant. Le relief, la forme et le réseau hydrographique constituent les principaux paramètres de l'étude physique du bassin versant en vue de caractériser son comportement vis-à-vis des différentes unités géologiques qu'il traverse (Musy et Higy, 1998).

1. La forme

La forme du bassin de l'Ouergha est allongée suivant une direction Est-Ouest. Cet oued coule en effet suivant une direction Est-Ouest au Sud du bassin et récolte la plupart des affluents importants de sa rive droite en provenance du Nord suivant une direction sensiblement Nord-Sud (Fig.3).

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

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

Avec :

- P : le périmètre du bassin (Km) ;
- A : surface du BV (Km²).

Le bassin est considéré comme bien drainé si son indice de compacité tend vers 1. la (Fig.2) illustre des exemples de forme en fonction des indices de compacité.

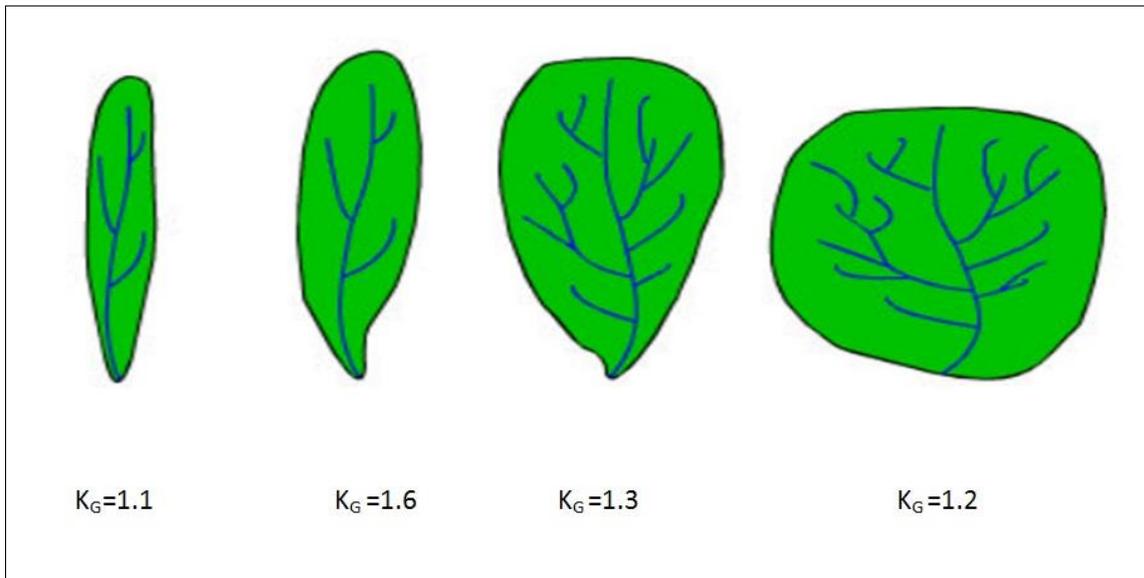


Figure 2: Exemple d'indice de compacité (Musy, 2001)

Pour le cas du bassin Ouergha: P= 462 km et A = 6190 km², ce qui conduit à un indice de compacité est égal à **1,64**.

Donc le bassin versant de l'oued de l'Ouergha a une forme allongée. Ce bassin versant ressemble à une gouttière dissymétrique dont le flanc Nord est beaucoup plus développé que le flanc Sud puisque 70% de la superficie du bassin est situé au Nord de l'Ouergha.

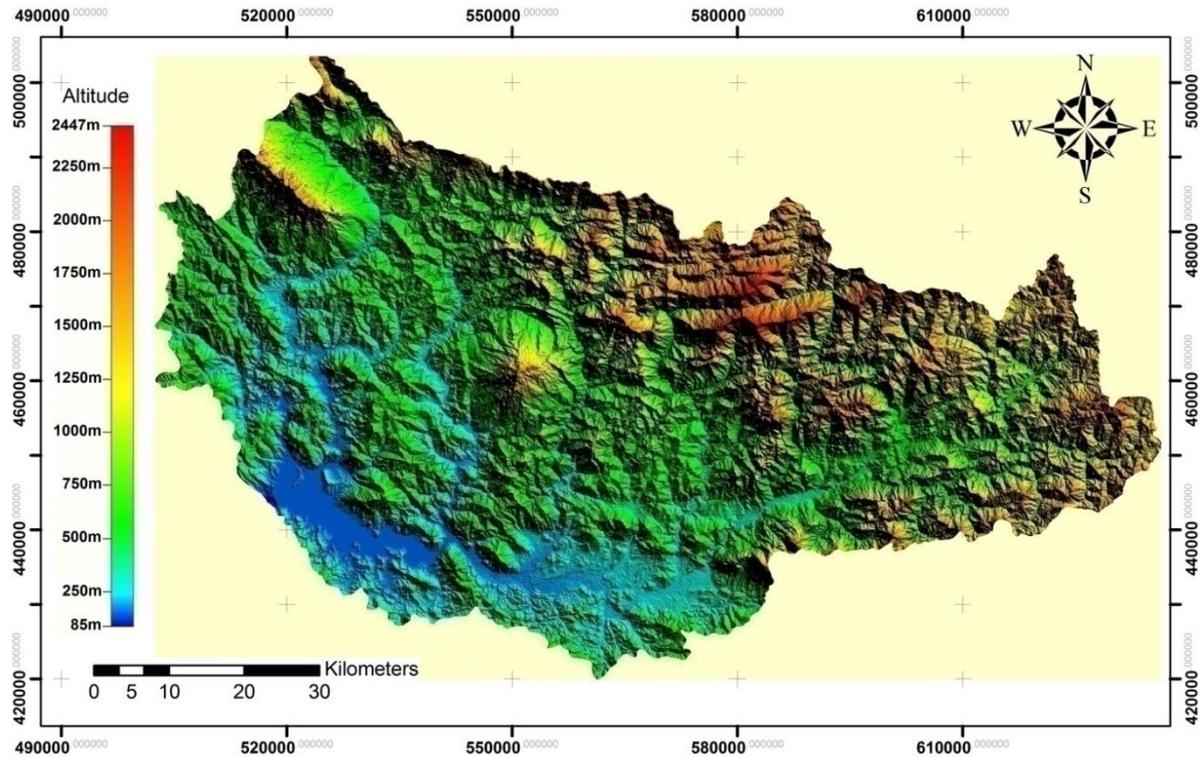


Figure 3: Carte morphologique de l'oued Ouergha

2. Le relief

L'influence du relief sur l'hydrogramme est encore plus évidente, car de nombreux paramètres hydrométéorologiques varient avec l'altitude et la morphologie du bassin versant.

Sur la carte, le relief est indiqué par les courbes de niveau en joignant les points d'égale altitude. Il est nécessaire de déterminer la répartition du bassin versant par les tranches d'altitude en fin de pouvoir dégager les différents paramètres du relief.

La répartition des altitudes a été déterminée à partir d'une carte topographique au 500000^{ème}. La surface entre deux courbes de niveau a été déterminée par un logiciel Arc Gis. Les résultats obtenus ont permis d'établir la courbe hypsométrique.

a) Carte hypsométrique

Nous avons représenté les surfaces comprises entre les courbes de niveau de la carte hypsométrique par des couleurs différentes (Fig.4), dans laquelle se succèdent des zones de hautes altitudes supérieures à 2447m et des basses altitudes inférieures à 85m.

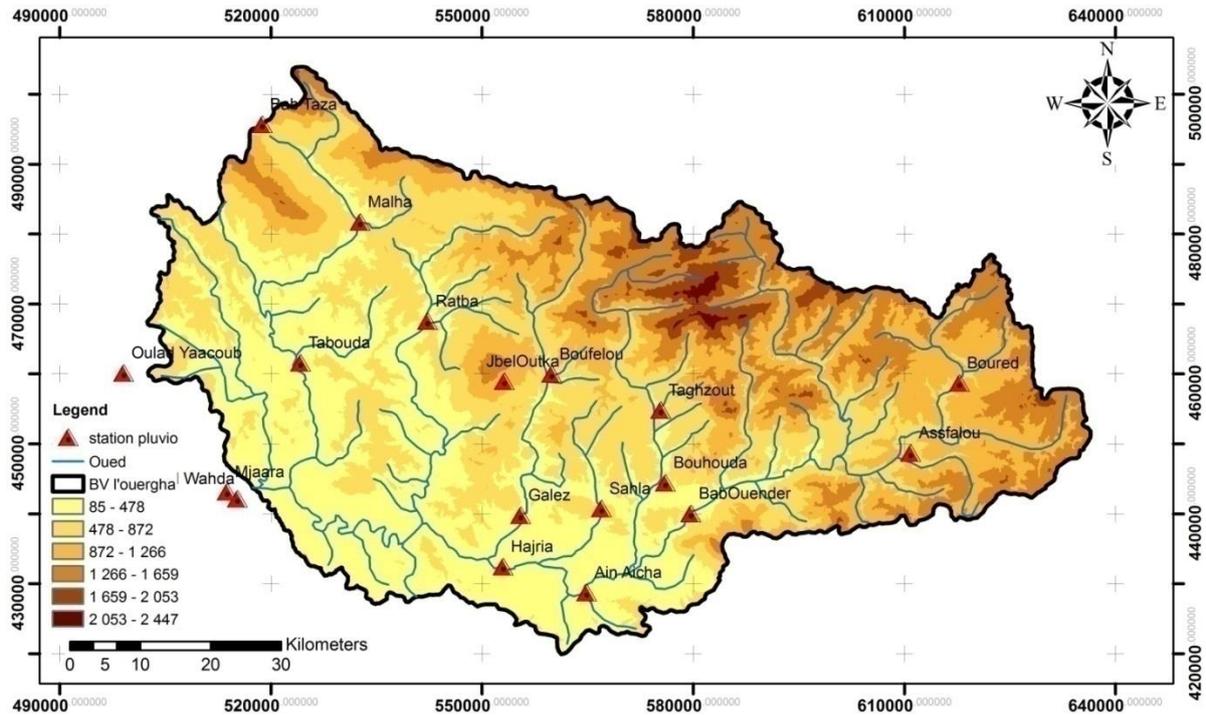


Figure 4: Carte hypsométrique du bassin versant de l'Oued Ouergha

Dans cette carte hypsométrique, les tranches d'altitudes sont équidistantes de 400m. Les zones de hautes altitudes figurent dans le Nord du bassin et les zones de basses altitudes se trouvent au Sud ouest à côté du barrage El WAHDA.

b) Courbe hypsométrique

Le relief d'un bassin est souvent caractérisé par la courbe de sa répartition hypsométrique. Cette dernière représente la répartition de la surface du bassin versant en fonction de son altitude. Elle porte en ordonnée le pourcentage de surface bassin qui se trouve au dessus de l'altitude représentée en abscisse (Fig.5).

Le Tableau (1) récapitule la répartition des surfaces du bassin versant de Ouergha (en km² et en % de la superficie totale) par tranche d'altitude.

Tableau 1: Répartition de la surface totale par tranche d'altitude

Classe d'altitude (m)	Surface (Km ²)	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

A partir de ces données, on a calculé les superficies cumulées et leurs pourcentages à une altitude donnée (Tab.2) et ce pour représenter la courbe hypsométrique.

Tableau 2: Tableau de fréquences et des pourcentages cumulés au dessus de la limite inférieure

Classe d'altitude (m)	Surface (Km ²)	Pourcentage de la surface (%)	Surface cumulé	Altitude (m)	Pourcentage de la 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

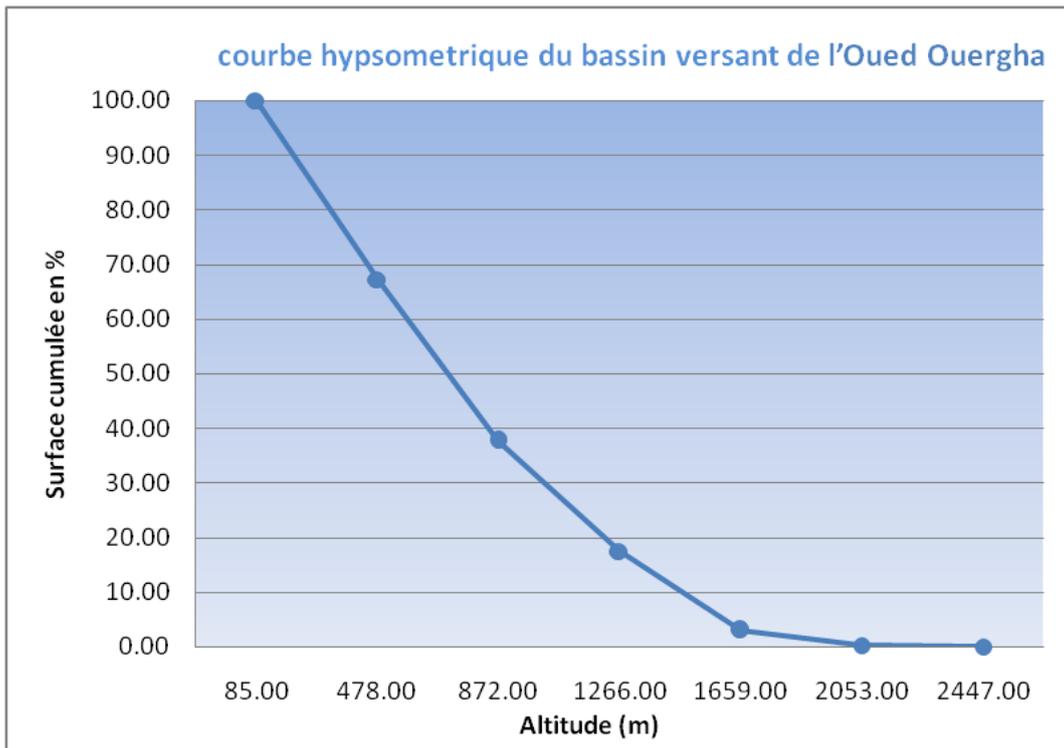


Figure 5: Courbe hypsométrique du bassin versant de l'oued Ouergha

- Interprétation de l'aspect de la courbe hypsométrique :
 - ❖ pour les bassins plus jeunes (3), la superficie est faible par rapport au changement d'altitude initiale, ce qui est caractéristique des bassins abrupts.
 - ❖ les vieux bassins (1) présentent l'inverse, c'est-à-dire, une plaine douce près d'un cours d'eau ou l'altitude varie très peu malgré une superficie importante.
 - ❖ le troisième cas (2), se rapproche donc de l'état dit « mature », du moins selon cette classification du degré d'érosion associé à l'âge du bassin.

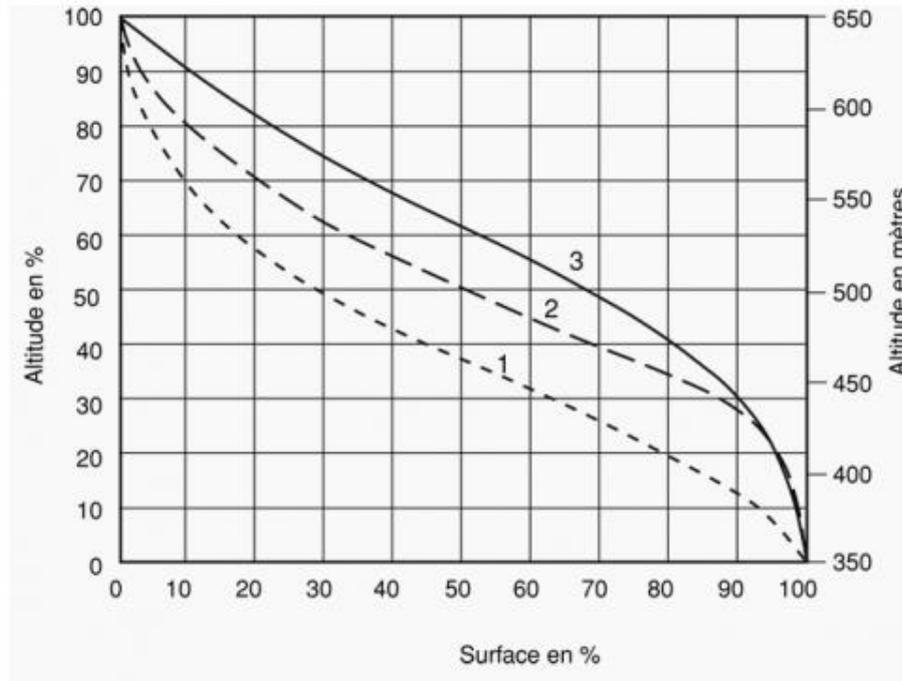


Figure 6: Interprétation de la courbe hypsométrique (Larue, 2005)

L'analyse de l'aspect de la courbe (Fig.5) est en comparaison avec la courbe (Fig.6). On peut dire qu'on est en présence d'un bassin vieux dans lequel la superficie est faible par rapport au changement d'altitude.

En résumé, l'analyse de la carte et la courbe hypsométrique confirme qu'on est en présence d'un bassin où les différences d'altitudes sont très marquées, ce qui va rendre facile les circulations des eaux à l'intérieur du bassin et par conséquent des pertes en terre plus grande.

3. Le rectangle équivalent

Le rectangle équivalent est une représentation géométrique du contour du bassin versant transformé en rectangle. Celui-ci est tracé à partir de la longueur et de la largeur du bassin. Les courbes de niveau y sont parallèles et sont tracées en respectant les répartitions hypsométriques. Ce rectangle est conçu pour pouvoir comparer les bassins versants du point de vue morphologique (Afkir, 1985).

La Figure (7) illustre le rectangle équivalent du bassin versant de l'oued Ouergha. En effet, plus le rectangle équivalent est allongé moins il sera drainé. Les dimensions du rectangle équivalent sont déterminées par la formule suivante:

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

Avec :

KG : indice de compacité de Gravelius

A : superficie de bassin versant (Km²)

L : longueur du rectangle équivalent (Km)

l : largeur du rectangle équivalent (Km)

On obtient : **L =199,35 Km et l = 31,04 Km**

La longueur est presque six fois plus grande que la largeur.

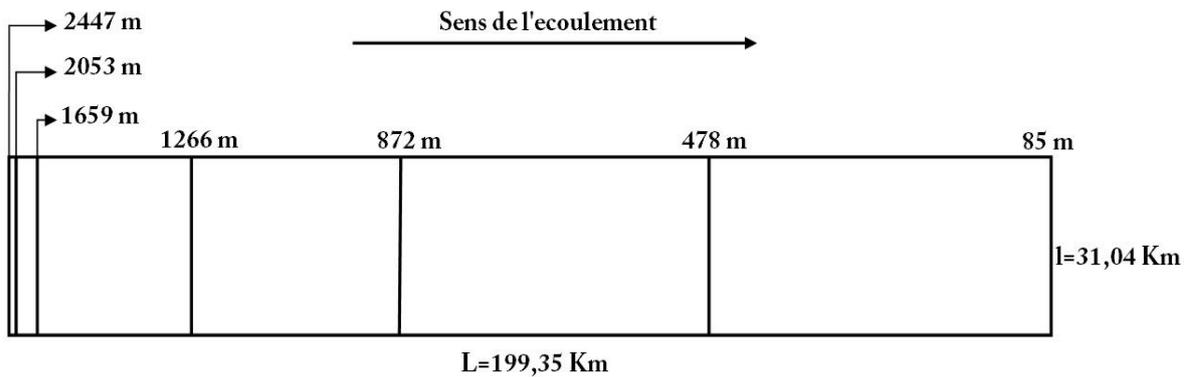


Figure 7: Rectangle équivalent du bassin versant de l'Oued Ouergha

4. Les caractéristiques d'altitudes

a) Altitudes minimale et maximale

Elles sont directement obtenues à partir des cartes topographiques. L'altitude maximale représente le point le plus élevé tandis que l'altitude minimale indique le point le plus bas où se trouve généralement l'exutoire. Dans notre étude, on a obtenu :

- le point le plus bas est de 85m.
- le point le plus haut est de 2447m.

b) L'altitude moyenne

Elle est calculée par la formule suivante :

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

Avec :

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

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

A : Surface totale du bassin versant en (Km²)

D'où $H_{moy}=776$ m

L'altitude moyenne est peu représentative de la réalité. Toutefois, elle est parfois utilisée dans l'évaluation de certains paramètres hydrométéorologiques ou dans la mise en œuvre de modèles hydrologiques.

c) Altitude médiane

L'altitude médiane correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 50% de la surface totale du bassin, sur la courbe hypsométrique. Cette grandeur se rapproche de l'altitude moyenne dans le cas où la courbe hypsométrique du bassin concernée présente une pente régulière. Elle est de l'ordre de **710m**.

5. Etude de la pente

La pente joue rôle incontournable dans le cycle hydrologique. Elle influe directement sur l'infiltration et le ruissellement. Ainsi, pour une même averse et à perméabilité équivalente, la dualité de partage entre écoulement superficiel et infiltration sur le bassin sera essentiellement en fonction de la pente (Abdellah, 1997).

a) La réalisation de la carte des pentes

Pour la réalisation de la carte des pentes on a utilisé le logiciel SIG pour découper le MNT du Maroc de résolution 30m de côté de pixel et pour classer les pentes suivant les classes voulues. La démarche commence par une délimitation de la zone d'étude, après on superpose le polygone résultant sur le MNT et grâce à l'extension \ extraction \ Masque, on obtient un MNT délimité suivant les coordonnées du bassin d'étude, après, et afin de réaliser la carte avec les classes propres (Tab.3), on a utilisé l'extension spatial analyst \ slope\ qui permet de diviser le terrain en polygones de classes différentes. Pour le calcul des surfaces de chaque classe, on a utilisé l'utilitaire de calcul des surfaces qui après une transformation du fichier Raster en un fichier vectoriel permet de rassembler les classes de pentes dans des polygones.

Tableau 3: 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%)

A partir de l'analyse de la base de données de la carte des pentes on a calculé les superficies relatives à chaque portion (Tab.4). Les résultats obtenus montrent un pourcentage de 31% 21% et de 31% pour les classes 3, 4 et 5 respectivement. Les pentes faibles et modérées représentent un pourcentage de 3% et 12%.

Tableau 4: Superficies, fréquences et fréquences cumulées en fonction des classes des pentes

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			

Donc Notre bassin témoigne d'un relief très accidenté, ce qui va rendre l'activité des eaux d'écoulement plus forte. L'ablation va nettement l'emporter sur l'accumulation vue que l'inclinaison de moins de 3% occupe seulement 3% du bassin versant et que sur 84% de la surface du bassin, elle est supérieure à 12%.

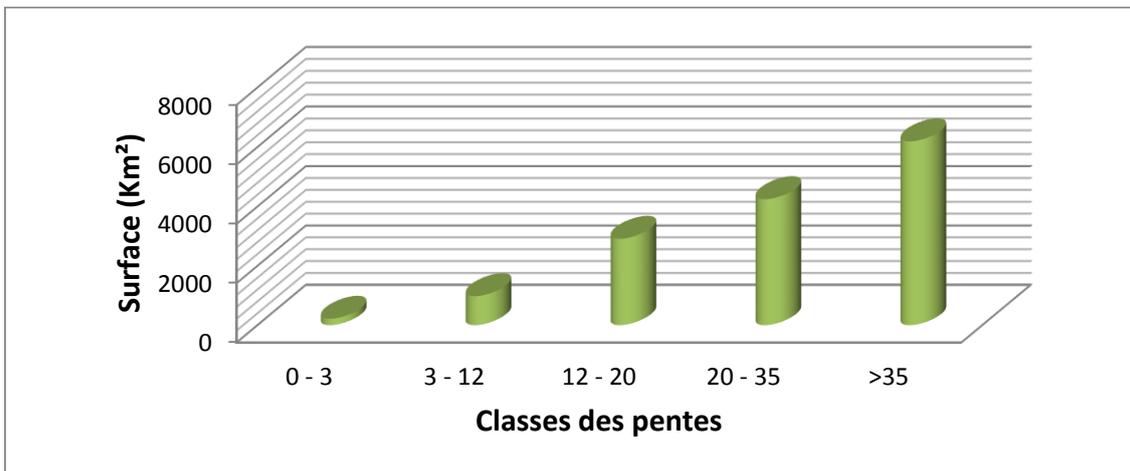


Figure 8: Histogramme des fréquences cumulées des pentes en (Km²) du bassin versant de l'Oued Ouergha

La répartition des surfaces des différentes classes de pentes (Fig.8) montre un ordre au sein du bassin versant de l'Oued Ouergha, car elle augmente avec l'accroissement du degré de pente.

Cet ordre n'est pas respecté d'après ce que montre la carte des pentes (Fig.9). Cette différence peut être liée soit à la géologie du terrain soit à une forte activité des eaux. Les pentes les plus faibles figurent dans la partie la plus aval.

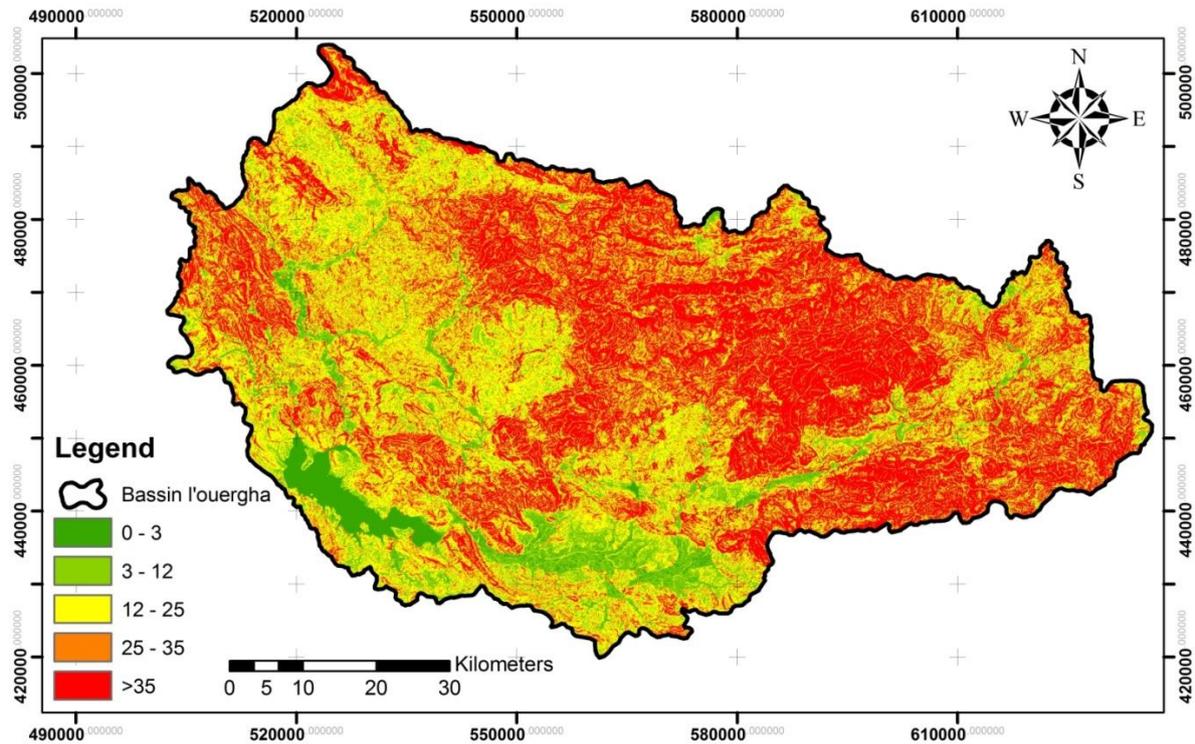


Figure 9: Carte des pentes du bassin versant de l'oued Ouergha

b) Pente moyenne du bassin versant

Le calcul de la pente moyenne nous donne un renseignement sur la topographie du bassin versant. La pente moyenne donne une bonne indication sur le temps de parcourt du ruissellement direct, donc sur le temps de concentration, et influence directement le débit de pointe lors d'une averse lente. Elle est déterminée par la formule suivante :

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

Avec :

P_{moy} : La pente moyenne du bassin versant

ΔH : L'altitude moyenne (m)

L : La longueur du rectangle équivalent (Km)

D'où $P_{\text{moy}} = 5.92$

Donc, la pente moyenne du bassin versant de l'oued Ouergha est égal à 0,06%, une valeur qui montre que le relief est fort.

c) Indice de pente global

Cet indice (I_g) permet de déterminer l'importance du relief sur le bassin. Il est défini comme étant le rapport entre le dénivellement utile (DU) et la longueur (L) du rectangle équivalent. Cet indice caractérise le relief du bassin. Il est donné par la formule suivante :

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

I_g : Indice de pente global en m /km

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

L_{eq} : Longueur du rectangle équivalent (Km)

$H_{5\%}$: Altitude correspondant à 5 % de la surface totale du bassin versant

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

L'indice de pente global qui est donné par la formule suivante est **7.3** soit **0,07%**. Selon la classification du relief donné par l'ORSTOM (Tab.5), la valeur de l'indice de pente global du bassin versant de l'Oued de l'Ouergha montre que le relief est fort.

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

Relief	Valeur d' I_g
Relief très faible	$I_g < 0,002$
Relief faible	$0,002 \leq I_g < 0,005$
Relief assez faible	$0,005 \leq I_g < 0,01$
Relief modéré	$0,01 \leq I_g < 0,02$
Relief assez fort	$0,02 \leq I_g < 0,05$
Relief fort	$0,05 \leq I_g < 0,5$
Relief très fort	$I_g > 0,5$

III. Le réseau hydrographique

Pour définir les limite du bassin de l'oued Ouergha jusqu'au barrage EL WAHDA et sortir ses caractéristiques physiques, on a procédé par une carte topographique au 500000^{ème}, ce qui nous a permis de sortir la carte de réseau hydrographique (Fig.10). Ce dernier se définit comme l'ensemble des cours d'eau naturels ou artificiels, permanents ou temporaires, qui participe à l'écoulement (Roche, 1936).

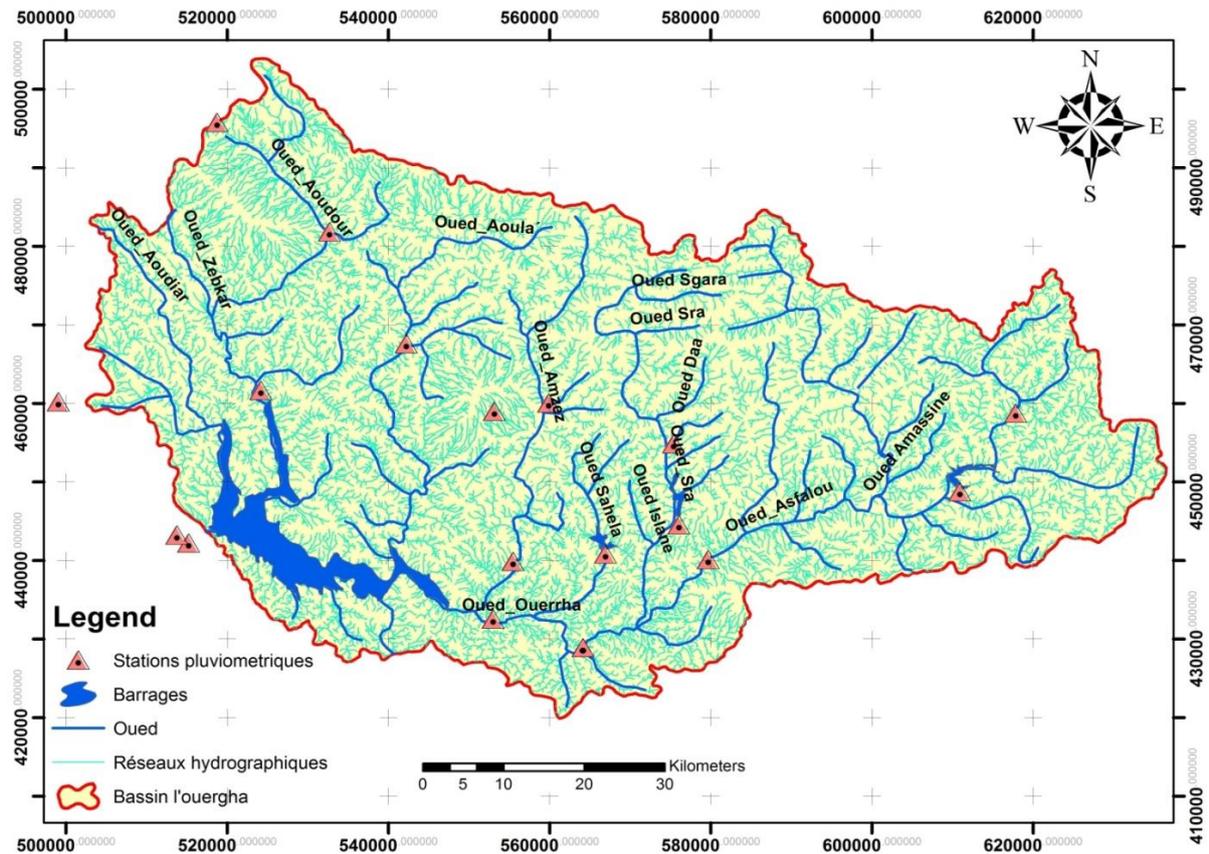


Figure 10: Carte du réseau hydrographique du bassin versant de l'oued Ouergha

Le réseau hydrographique du bassin versant d'Ouergha s'écoule du NE vers le SW. L'oued Ouergha est le deuxième affluent principal de l'oued Sebou après l'oued Baht. L'oued Ouergha est formé sur la rive gauche par la réunion de l'oued Asfalou venant de l'Est, l'oued Sra Ouergha venant du Nord. Il passe à la station hydrométrique de Bab Ouender, en aval de laquelle l'oued Ouergha reçoit de gros affluents sur sa rive droite de l'aval vers l'amont :

- L'oued Sra : contrôlé par la station hydrométrique de pont du Sker.
- L'oued Aoula : contrôlé par la station hydrométrique de Rhafsai.
- L'oued Ouergha passe ensuite à la station hydrométrique d'Ourtzaga, et sa pente moins forte, puis, il reçoit toujours en rive droite.
- L'oued Aoudour : contrôlé par la station hydrométrique de Tafrant ;
- L'oued Aoudyar : un peu avant de passer au site de barrage Al Wahda et à la station hydrométrique de M'Jara, immédiatement à l'aval du site.

1. La densité du drainage

Le réseau du drainage est caractérisé par sa densité de drainage D_d . Elle se définit comme la longueur totale du réseau hydrographique par unité de surface du bassin versant.

Si on désigne la surface du bassin en kilomètre carré et L_i les longueurs des cours d'eau en Kilomètre.

$$D_i = \frac{\sum L_i}{A} = 0,19 \text{ Km}^{-1}$$

IV. Conclusion

La détermination des divers paramètres physiques du bassin versant de l'oued Ouergha nous a permis de définir les caractéristiques topographiques. Le bassin versant topographique présente un périmètre de 462Km, une superficie de 6190Km² et un cours d'eau principal de 255Km de long.

L'analyse de la répartition des tranches d'altitudes montre que l'altitude moyenne de ce bassin versant est de 776m. Le bassin versant de l'oued Ouergha montre que le relief est fort. Avant d'entamer la partie Géologie du bassin versant, nous avons récapitulé les différents paramètres physiques étudiés dans ce chapitre dans le tableau suivant (Tab.6) :

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

Paramètres	Valeurs
Surface	6190 Km ²
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%

〔 Chapitre II: CADRE GEOLOGIQUE 〕

I. Introduction

Le bassin versant Ouergha s'étend vers le Sud du domaine Rifain interne. La géologie du bassin versant est un facteur primordial des écoulements superficiels. Lorsque le bassin versant est caractérisé par des formations très perméables, en plus d'une couverture végétale contenue, automatiquement la densité du drainage sera faible ce qui explique une meilleure infiltration des eaux superficielles. Par contre, si les formations géologiques du bassin versant sont imperméables et meubles, avec une végétation moyenne, cela favorise l'érosion et par la suite la densité du drainage sera élevée, donc le ruissellement des eaux superficielles l'emporte sur l'infiltration.

II. Géologie de la chaîne du Rif

La chaîne rifaine appartient au système des chaînes alpines de la Méditerranée occidentale (Fig.11). Elle se prolonge vers l'Est dans le tel Algérien avec lequel elle forme les maghrébides (Auboion et Debelmas, 1980 ; Durant et Delga, 1980 ; In Frizon et al. 1991). Dans cette orogénèse, on distingue du Nord au Sud trois grands domaines :

Les zones internes, les zones externes et les rides sud rifaines. Les zones internes (Dorsale calcaire, Ghomarides paléozoïques, Sebtides métamorphiques) font partie d'un terrain d'Alboran qui se prolonge au-delà du détroit de Gibraltar dans les Cordillères bétiques (Malaguides, Alpujarrides). Ces zones qui forment le socle de la mer d'Alboran sont communes aux deux chaînes (Frizon et al, 1991). Elles sont constituées d'un empilement de nappes où deux grands ensembles litholo-structuraux sont distingués ; le complexe Sebtide et le complexe Ghomaride auquel sont associés la dorsale calcaire (Didon et al. 1973). L'articulation entre le domaine externe et interne montre un dispositif structural particulier : les Ghomarides et la dorsale calcaire sont verticalisées et reposent sur les unités externes (Favre, 1995).

Le domaine externe représente la marge téthysienne du continent africain. Ces séries sédimentaires d'âge cénozoïque sont subdivisées en trois unités : les unités intra-rifaines méso-rifaines et pré-rifaines. Il est considéré depuis longtemps (Suter, 1967) comme un empilement de nappes de charriage à vergence Sud. On peut citer les nappes des flyschs situées entre les zones internes au Nord et les unités intra-rifaines de Tanger-Kétama au Sud (Suter, 1980), la nappe de Senhadja (Hottinger et Suter, 1961), la nappe d'Ouazzane (Suter, 1967) et la nappe de Tamsamani et nappe d'Aknoul. Les structures développées au Jurassique subissent une inversion tectonique du Crétacé, où les failles normales jurassiques ont joué en chevauchement, ensuite elles sont reprises en décrochements NE-SW et NW-SE (Asebry et al. 1987). Des observations récentes, litho-stratigraphiques et tectoniques, effectuées dans le rif central montrent que les affleurements jurassiques, situés dans le

secteur méridional du domaine subriftain, comme le cœur d'anticlinaux sont parautochtones et ont une structuration tortonienne qui s'est achevée par le jeu de chevauchement au cours du Messinien (Asebriy et al, 1992).

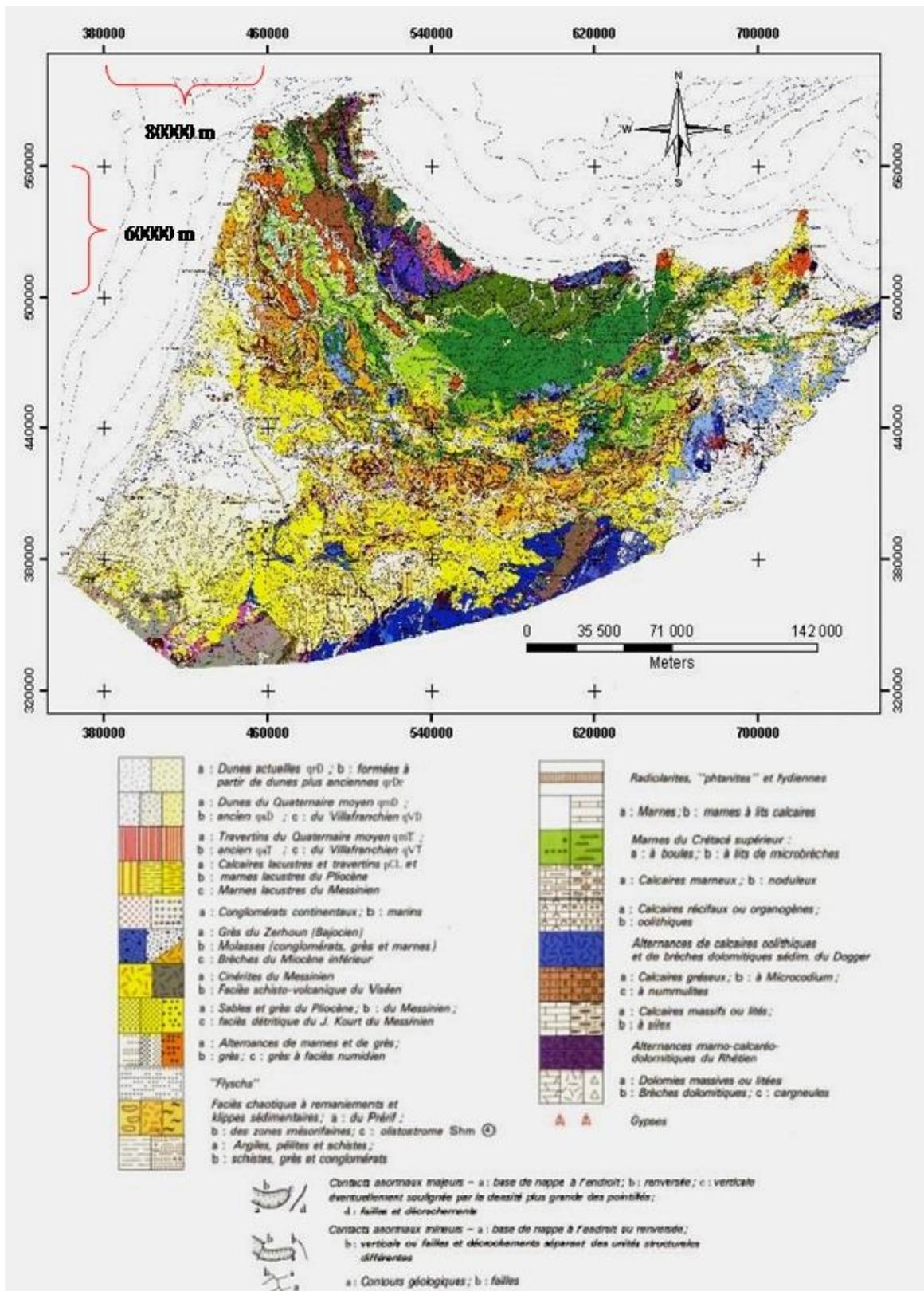


Figure 11: Extrait de la carte géologique du Maroc (1951)

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

Trois ensembles d'unités morpho-structurales sont distingués dans le bassin versant de l'Ouergha. De l'amont vers l'aval (Fig.12), on distingue les formations post - orogéniques, les unités intra rifaines et les unités méso-rifaines.

1. Les dépôts post-nappe

Les dépôts post-nappe correspondent à des formations autochtones du Miocène déposées pendant la transgression tortonienne. Ils sont formés par des sédiments grossiers conglomératiques à la base. Au sud de Taounate, cette formation molassique montre un pendage fort vers le SE justifiant ainsi une déformation tectonique récente. Ces formations deviennent plus fines en haut donnant des grés puis une série épaisse des marnes argileuses bleues. Ces formations marneuses sont surmontées par des roches sédimentaires continentales déposées dans deux systèmes structurellement distincts. Il s'agit d'un ensemble de bassins de subsidence qui se sont mis en place au Tortonien suite à un effondrement de la partie nord de la chaîne Moyen Atlasique et qui ont formé des bras de mer dans la région. Le plus important de ces bras de mer est celui du Sillon Sud-rifain.

Dans la région d'étude, deux bassins de ce type sont séparés par la ride mésorifaine de Taounate, le bassin de Taounate au Sud situé entre Aïn Aïcha et la partie sud de la ville de Taounate et celui de Tahar Souk au Nord.

2. Zone Intra-Rifaine

Cette zone formée par deux nappes de charriage ; les unités de Ketama et de Tanger. Ce sont des formations mobiles, para-autochtones constituées par des éléments allant du Trias jusqu'au Tortonien inférieur.

3. Unité de Ketama

Elle affleure essentiellement dans le Rif oriental, mais elle touche la partie amont du bassin versant de l'Oued Amzazelle et elle comporte un flysch schisto-gréseux du Crétacé inférieur épais de quelques kilomètres.

4. Unité de Tanger

Cette unité affleure dans la partie occidentale du Rif. Elle est considérée comme la couverture plus ou moins décollée de l'unité de Ketama. Elle est formée par un Crétacé moyen et par un Crétacé supérieur de schistes et de calcaires.

N.B : les nappes rifaines constituent la couverture décollée des unités de Ketama-Tanger.

5. Zone Méso-Rifaine

Les terrains de cette unité sont constitués dans la zone d'étude par les marnes surmontées par une formation molassique composée de conglomérat et de grés.

IV. Tectonique

Le Rif est découpé en blocs cristaux séparés par des failles actives. L'unité intrarifaine de Ketama-Tanger est chevauchée vers le Nord par des nappes de flyschs et elle-même chevauche vers le Sud des unités méso-rifaines (Andrieux, 1971).

Le méso-rif est constitué par des séries jurassico-crétacées (Suter et Marçais, 1966). Ses unités sont souvent en position structurale anticlinale qui correspond à des fenêtres en position d'autochtone relatif sous les nappes rifaines (ou d'origine Intra-Rifaine).

La nappe rifaine d'Ouezzane est une nappe de glissement qui a été mise en place jusque dans le Prérif externe.

Ce canevas structural est responsable en grande partie de l'orientation du réseau hydrographique de la région.

V. Facies Litho stratigraphie

1. Les formations secondaires

- Trias : Le trias se situe au Sud de l'oued de l'Ouergha. Il est imperméable, salée et gypsifère. Les argiles du Trias contribuent fortement à rendre inutilisable les nappes qui circulent à leurs contacts. Leur action se fait sentir également sur les eaux superficielles et les nappes alluviales qui leurs sont liées. Les pensées gréseuses ou conglomératiques sont toujours de faible importance et le peu d'eau qu'ils peuvent contenir est toujours salée.
- Lias : Les calcaires et les dolomites du Lias des causes constituent un important aquifère dont l'alimentation est d'origine salée et météorologique. Sur la périphérie du cause émerge de nombreuses sources qui sont à l'origine de plusieurs oueds. Le Lias affleure entre le Nord et le Sud de l'oued de l'Ouergha.

2. Le Crétacé

Les formations crétacées affleurent dans l'ensemble du bassin versant de l'oued de l'Ouergha.

3. Les formations tertiaires et quaternaires

- Le Miocène transgressif est venu se déposer sur la Causse depuis le Jurassique, érodé, plissé et fracturé. Il s'est moulé sur les structures anciennes, qu'il les a fossilisées, avant d'être à son tour plissé par des mouvements tardifs de faible importance.

-Le Miocène Supérieur est qualifié de post nappe. Il est concordant sur le Miocène inférieur ou, discordant sur n'importe quelle série antérieure. IL est formé par d'épaisses séries transgressives et comble les bassins effondrés du moyen et haut Ouergha.

-Le Miocène inférieur, qualifié d'anti-nappe, est constitué par une série marno-gréseuse détritique. Il affleure largement dans le secteur de Rhafsai, Tafrant et relativement moins dans le secteur de Taounate.

- Le Pliocène repose sur le Tortonien et débute par une série détritique, caractérisée par un gonflement de base surmonté directement d'un calcaire tufeux. Le bassin versant du bas Ouergha offre peut de dépôts pliocènes.

Les dépôts quaternaires sont essentiellement représentés par les glaciés et des terrasses fluviales.

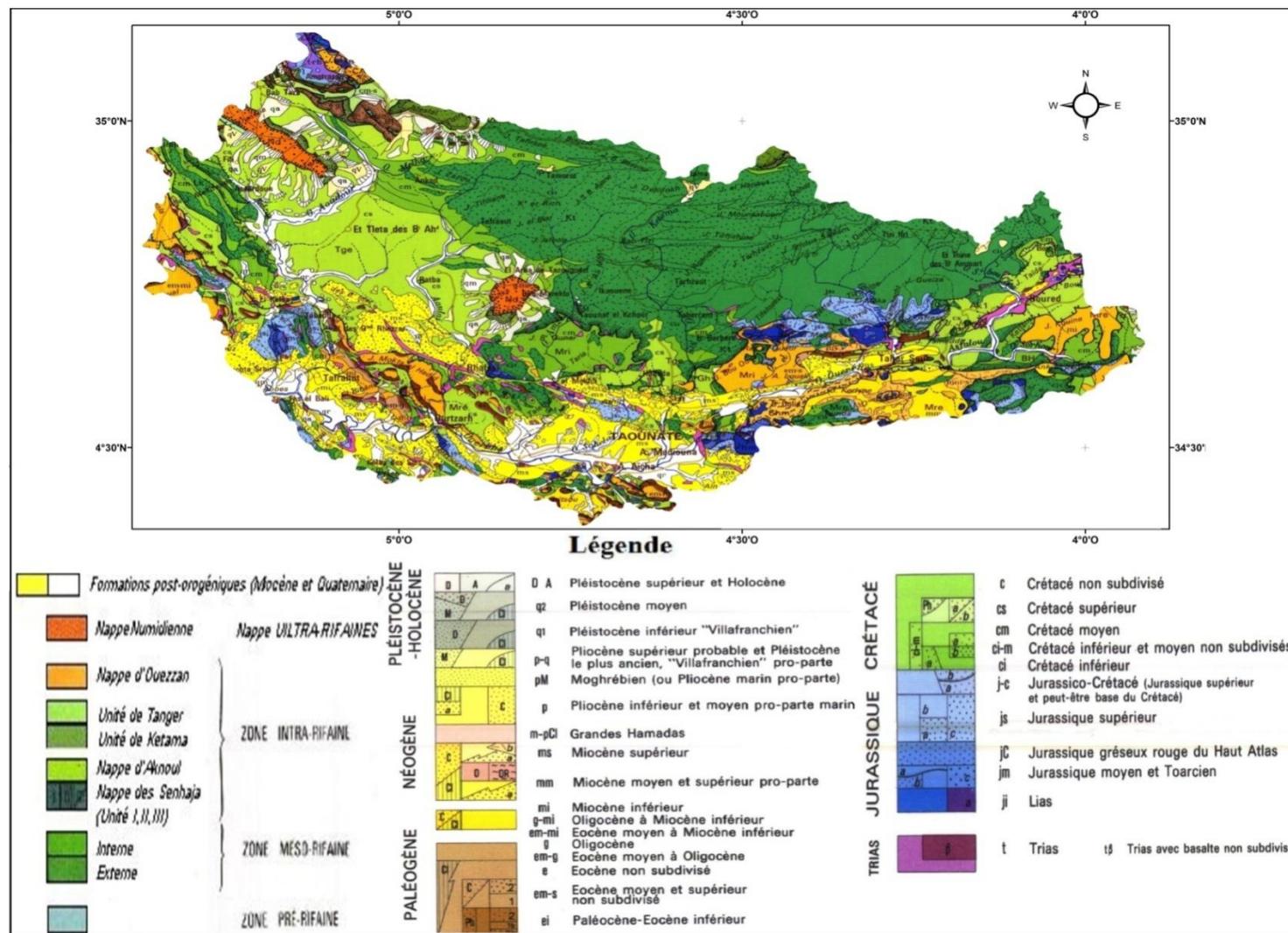


Figure 12: Carte géologique et lithologique du bassin versant de l'oued l'Ouergha

VI. Conclusion

Le bassin versant Ouergha comporte trois gouttières orientées sensiblement E-W, situées dans les sillons, synclinaux miocènes et dans la vallée moyenne et supérieure. Après le coude Mjaara, l'Ouergha reprend une direction N-S, selon une ligne de faille.

On observe des failles dues aux déformations et à des mouvements épirogéniques qui se sont produits au cours du secondaire et tertiaire, notamment ceux qui ont provoqué la formation et la surrection du bassin sud-rifain.

L'évolution structurale, dans le domaine Rifain, est caractérisée par une déformation majeure, antérieure à la mise en place des nappes pré-rifaines qui portent la marque tectonique contrôlée par des failles de socle.

**Chapitre III : CLIMATOLOGIE DU
BASSIN VERSANT**

I. Introduction

Le climat dans la zone d'étude est en relation direct avec l'éloignement des cotes méditerranéennes et atlantiques et ainsi avec le contexte général du climat du pays qui est influencé par l'anticyclone des Açores et le climat chaud et aride saharien (Benaabidate et al, 2006).

Le rôle du climat est déterminant dans le cycle hydrologique. Le potentiel hydrogéologique ainsi que la variabilité spatio-temporelle des paramètres climatiques (précipitation, température, humidité et évaporation) sont régis par le climat. Certes, la connaissance des conditions climatiques s'avère primordiale afin de définir les différents étages bioclimatiques qui marquent la zone étudiée.

Ce chapitre sera focalisé sur les variables qui donnent le contraste spatio-temporel des précipitations et des températures. C'est ainsi qu'une analyse mensuelle, saisonnière et annuelle seront entamées dans le but de les cartographier. L'étude a été réalisée sur la base des données de sept stations météorologiques (Mjaara, Ain aicha, Bab Ouender, Bab taza, Boured, Jbel Oudka et Tabouda) qui sont représentées dans le tableau suivant fournies par la direction de l'Agence du Bassin Hydraulique de Sebou (Tab.7) :

Tableau 7: Coordonnées des stations pluviométriques du bassin versant de l'oued Ouergha au cours de la période (1981 à 2007)

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

Sur la figure ci-dessous sont présentées les différentes stations du bassin versant de l'oued Ouergha (Fig.13) :

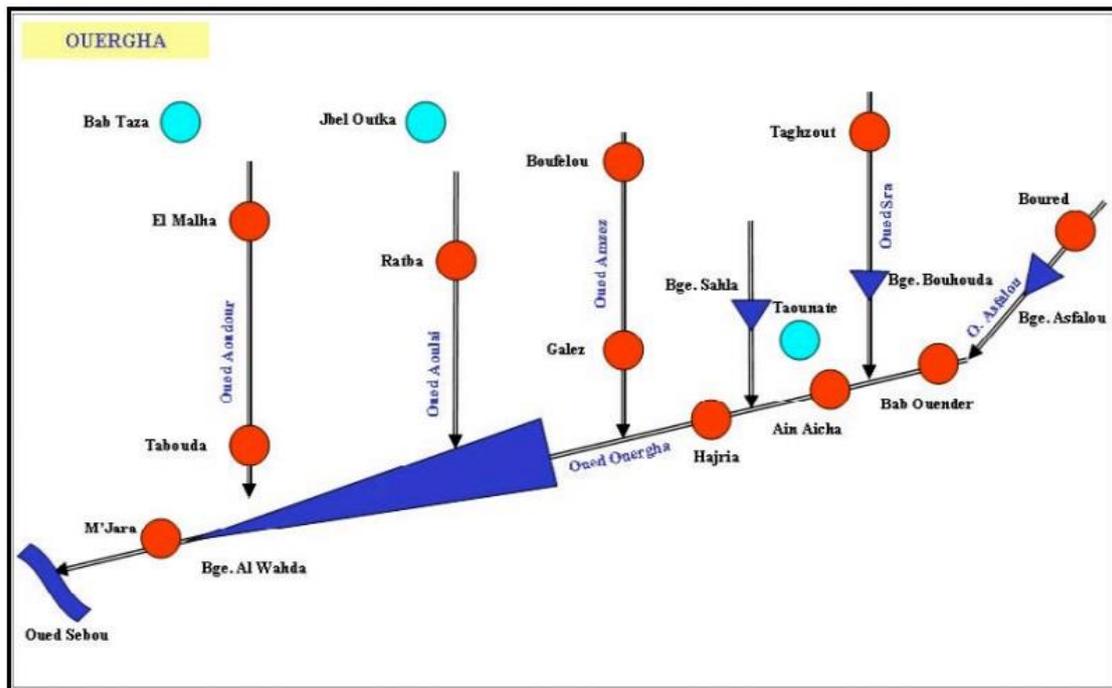


Figure 13: Fiche synoptique du bassin versant de l'oued Ouergha

II. Précipitation

Elles désignent toutes les eaux météoriques qui tombent sur la surface de la terre sous différentes formes (liquide ou solide) et les précipitations déposées ou occultes (rosée, gelée blanche...). Elles sont provoquées par un changement de température ou de pression.

1. Variation temporelle des précipitations

La connaissance de la répartition des précipitations permet, en particulier, de calculer la lame d'eau tombée sur la totalité du bassin.

Cette opération, qui reste relativement délicate, nécessite la combinaison de différentes méthodes à savoir la méthode des isohyètes et la méthode des polygones de Thiessen afin de prendre en considération les contraintes géographiques existantes telles que l'altitude, la topographie, l'exposition...

a) Précipitations annuelles

L'analyse de l'histogramme des précipitations moyennes annuelles (Fig.14), recueillies aux différentes stations pluviométriques concernées par cette étude, permet de distinguer un maximum au niveau de la station Jbel Oudka (1359.6 mm) et le minimum est enregistré au niveau de la station Ain Aicha (484.1 mm). On note également une diminution le long des stations qui jalonnent l'oued de l'Ouergha en allant de l'amont vers l'aval.

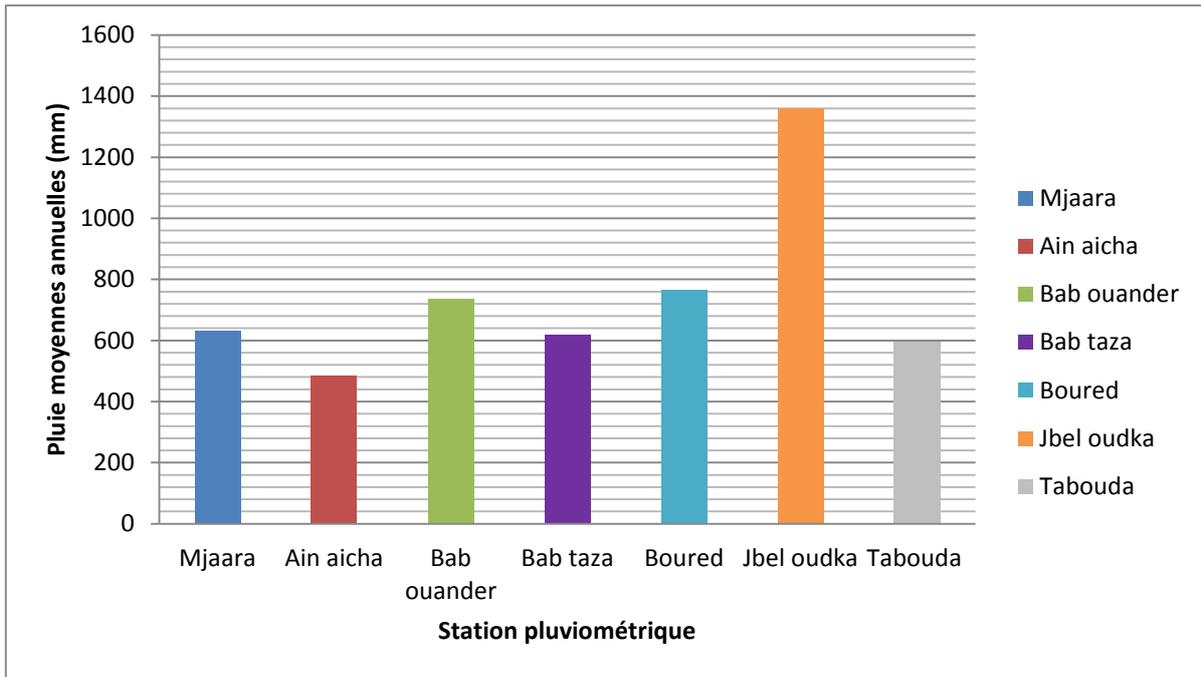


Figure 14: Variation des précipitations moyennes annuelles dans le bassin versant de l'oued Ouergha

b) Précipitations saisonnières

La variation saisonnière des précipitations moyennes dans le bassin versant de l'oued de l'Ouergha montre que les trois mois de Juin, Juillet et Août reçoivent des précipitations faibles.

La Figure (15) montre que la saison la plus pluvieuse est celle d'hiver suivie de celle du printemps. Donc le régime pluviométrique du bassin versant de l'oued de l'Ouergha est de type méditerranéen. En effet, ce dernier se caractérise par une sécheresse estivale accentuée et par un maximum pluviométrique concentré en hiver.

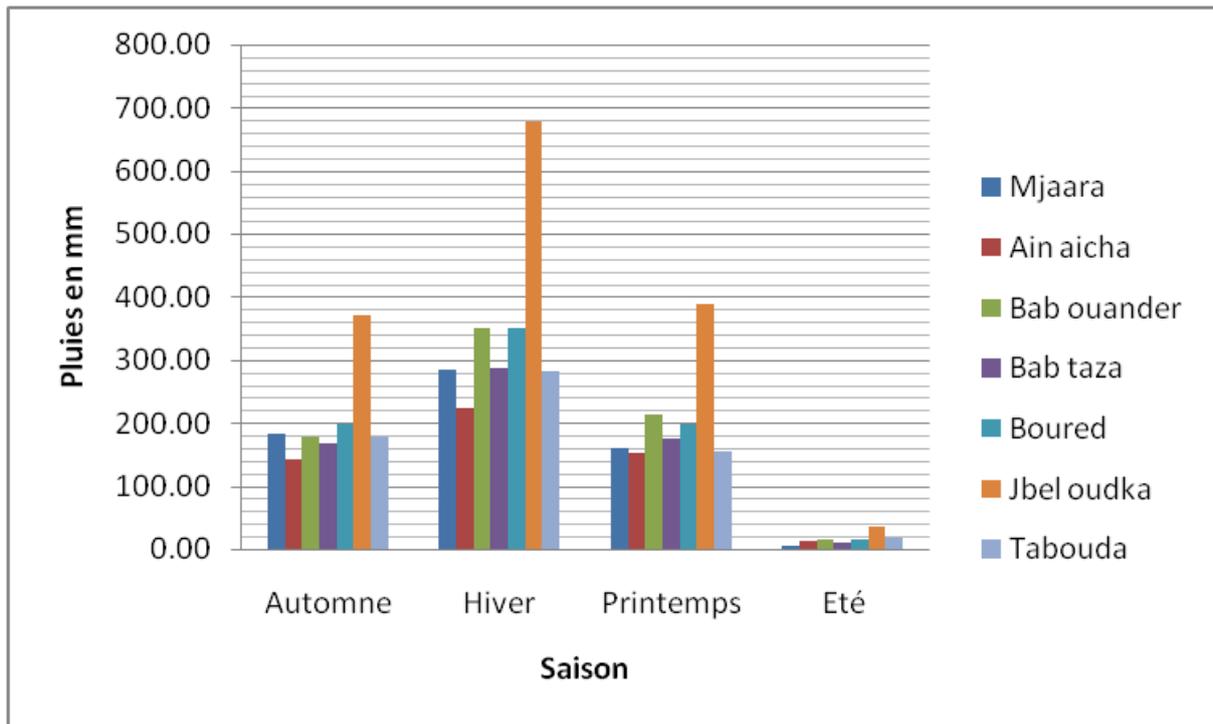


Figure 15: Variation des précipitations moyennes saisonnières dans le bassin versant de l'oued Ouergha

c) Précipitations moyennes mensuelles

Cette étude permet de connaître la répartition des pluies au cours de l'année. C'est ce qu'on appelle le régime pluviométrique.

Au niveau du bassin versant de l'Ouergha, la variation des pluies moyennes mensuelles est représentée dans la figure (16) sous forme de diagramme. Ce diagramme montre que plus de 90% de la pluviométrie mensuelle est concentrée durant la période pluvieuse qui s'étale entre les mois d'Octobre jusqu'au Mai. On remarque que dans toutes les sept stations pluviométriques, les valeurs moyennes mensuelles maximales sont enregistrées au mois de Décembre alors que les valeurs minimales sont enregistrées dans les mois de Juillet.

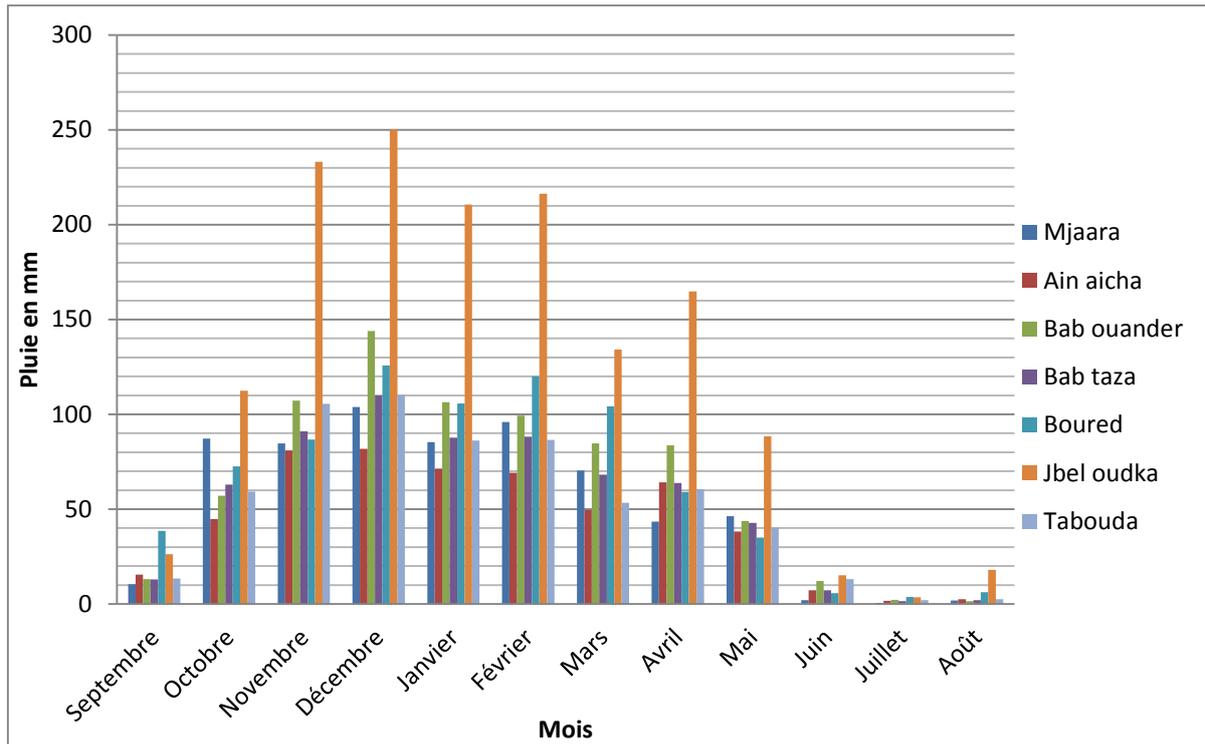


Figure 16: Variation des précipitations moyennes mensuelles dans le bassin versant de l'oued Ouergha

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

Parmi les méthodes généralement proposées pour calculer la moyenne des pluies à partir de l'ensemble des mesures ponctuelles obtenues à plusieurs stations pluviométriques sur le bassin ou à proximité, on fait appel à trois méthodes qui sont les plus utilisées :

- ❖ Méthode arithmétique
- ❖ Méthodes des polygones de Thiessen
- ❖ Méthodes des isohyètes

a) Méthode arithmétique

C'est une méthode plus simple qui consiste à calculer la moyenne arithmétique des valeurs obtenues aux stations étudiées.

Elle peut être estimée par la formule suivante :

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

Avec :

P_{moy} : Précipitation moyenne sur le bassin versant (mm)

P_i : Hauteur des précipitations à la station (mm)

n : Nombre des stations sur le bassin versant

La moyenne des précipitations obtenue par cette méthode est $P_{moy}=741.08 \text{ mm}$

Cette méthode ne reflète pas souvent la hauteur réelle de pluies tombées sur la totalité du bassin versant, puisque la répartition des stations pluviométriques n'est pas uniforme en plus d'un relief hétérogène. C'est ainsi qu'on peut estimer l'erreur par cette méthode de la manière suivante :

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

Avec :

E : L'erreur

Cv : Coefficient de variation (Cv= 35.9 %)

P_{moy} : Précipitation moyenne du bassin versant ($P_{moy}=741.08 \text{ mm}$)

∂ : L'écart type ($\partial = 266.5 \text{ mm}$)

n : Nombre des stations sur le bassin versant (n = 7)

Donc l'erreur estimée par la méthode arithmétique est de : **E= 13.6 %**

C'est la raison pour laquelle on fait recours à d'autres méthodes plus fiables, Des méthodes graphiques (tracé d'isohyètes et polygones de Thiessen).

b) Méthodes des polygones de Thiessen

C'est une méthode statistique qui revient à effectuer la moyenne pondérée des précipitations mesurées dans des stations pluviométriques du bassin versant. La surface d'influence de chaque station de mesure, dite polygone de Thiessen constitue le facteur de pondération. Cette méthode consiste à tracer autour des stations pluviométriques voisines un polygone formé par les médiatrices des segments reliant ces stations. Le bassin versant de l'Ouergha dispose de sept stations, pour lesquelles sont tracés les polygones (Fig.17).

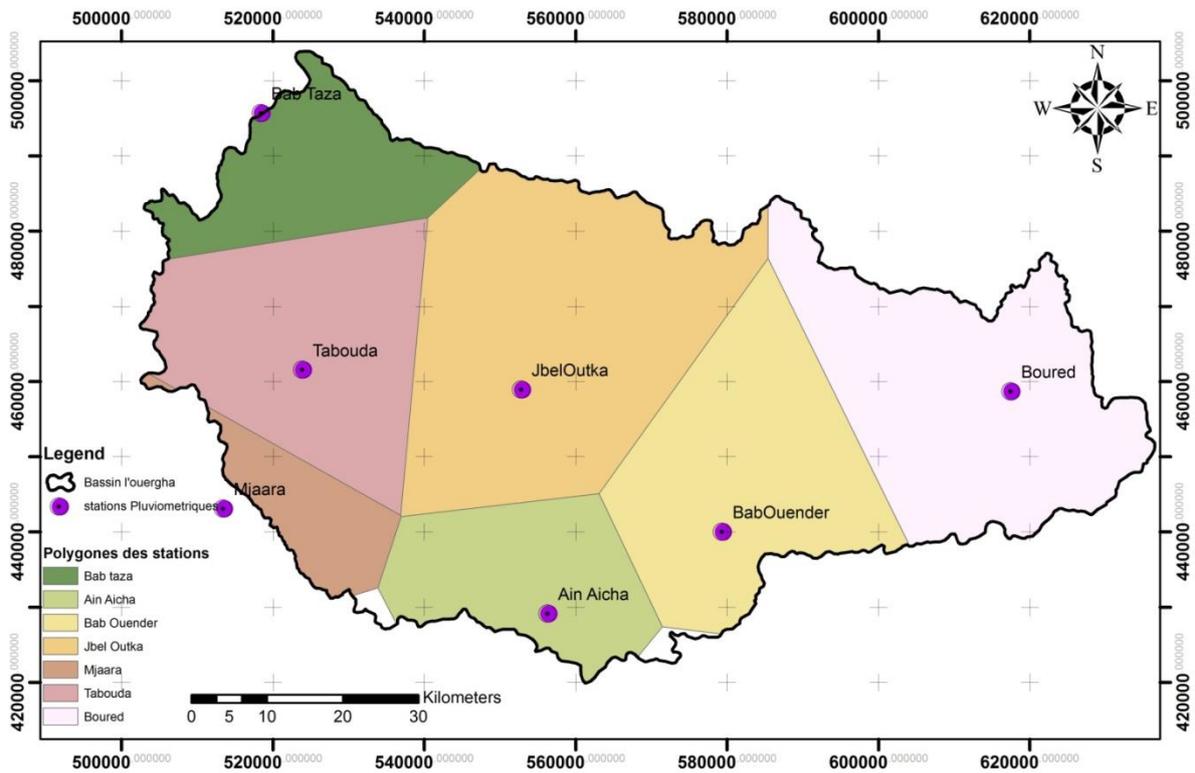


Figure 17: Carte des polygones de Thiessen relative au bassin versant de l'oued Ouergha

La superficie de chaque polygone est déterminée par le logiciel Arc Gis (Tab.8). On calcule la lame d'eau annuelle en appliquant la formule suivante :

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

P_{moy} : Précipitation moyenne sur le bassin versant (mm)

P_i : Précipitation enregistrée à la station i (mm)

A_i : Superficie du polygone associé à la station i (Km²)

A : aire totale du bassin en (Km²)

Selon cette méthode, la lame d'eaux tombée sur le bassin versant de l'oued Ouergha $P_{\text{moy}}=821.49$ mm

Tableau 8: Calcul de la lame d'eau tombée par la méthode de Thiessen

Station	Pi (mm)	Ai (Km ²)	Pi*Ai
Mjaara	631.82	281.23	177686.74
Ain aicha	484.14	582.72	282118.06
Bab ouander	734.81	1032.41	758627.02
Bab taza	616.92	543.11	335057.55
Boured	763.25	1208.89	922685.29
Jbel oudka	1359.68	1501.99	2042231.27
Tabouda	596.93	949.18	566598.27
Total	5187.56383	6190	5085004.20

c) Méthode des isohyètes

La méthode d'isohyète est une méthode graphique qui se base sur l'interpolation des moyennes de précipitation, pour une période donnée, des stations situées à l'intérieur du bassin et éventuellement celles qui se trouvent aux alentours.

Les isohyètes sont des lignes de même pluviosité (iso-valeurs de pluies annuelles) tracées grâce aux valeurs pluviométriques acquises aux stations du bassin et éventuellement aux autres stations avoisinantes si nécessaires (Fig.18).

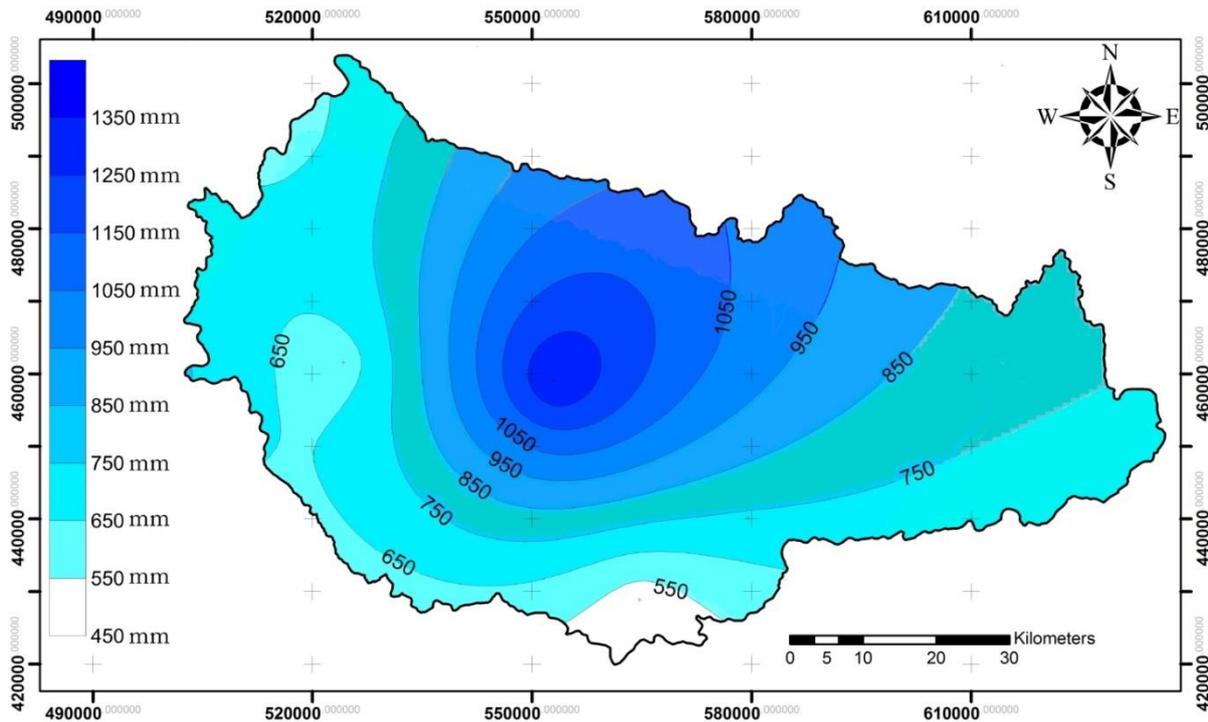


Figure 18: Carte des isohyètes relatives au bassin versant de l'oued Ouerga

La superficie comprise entre les deux isohyètes (Tab.9) est déterminé avec le logiciel Arc Gis et la pluie moyenne peut être calculée de la manière suivante :

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

Avec :

P_{moy} : Précipitation moyenne sur le bassin versant (mm)

S_T : Surface totale du bassin (Km²)

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

n : nombre total des isohyètes

P_i : Hauteur moyenne entre les deux isohyètes (mm)

Tableau 9: Calcul de la lame d'eau tombée par la méthode des Isohyètes

Isohyètes	Pi (mm)	Ai (Km ²)	Ai*Pi
<550	484.14	129.65	62769.59
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	1359.68	271.06	368555.49
Total	8143.82	6190.00	5196934.36

Selon cette méthode, la lame d'eaux tombée sur le bassin versant est de : $P_{moy} = 839.56$ mm

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

La lame d'eau estimée par les trois méthodes, évoquées précédemment, montrent des valeurs différentes. Dans le but de rapprocher entre ces valeurs trouvées, une moyenne entre elles est calculée dans le tableau (10) suivant :

Tableau 10: Estimation de la lame d'eau moyenne

	Méthode arithmétique	méthode des polygones de thiessen	méthode des isohyètes
Précipitation moyenne (mm)	741.08	821.49	839.56
La lame d'eau moyenne	800.71		

Le volume d'eau tombé sur le bassin versant peut être déterminé par la relation suivante :

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

$$V = 800.71 \times 10^{-3} \times 6190 \times 10^6$$

$$V = 4956.4 \times 10^6 \text{ m}^3$$

D'où :

Le bassin versant de l'oued Ouergha reçoit un volume d'eau estimé à 4.9 milliards de mètre cube par an.

III. Etudes des températures

L'étude du facteur température constitue une étape primordiale pour caractériser le contexte climatique d'un bassin versant. La combinaison de ce facteur aux précipitations permet de contrôler plusieurs paramètres du cycle de l'eau surtout les indices climatiques et l'évapotranspiration. Malheureusement, dans la zone d'étude les données relatives aux températures ne sont disponibles que dans la station de Hajria.

1. Température moyenne mensuelle

L'analyse de la (Fig.19) donne une première estimation concernant la répartition des mois chauds et des mois froids. Les mois de Décembre, Janvier, Février et Mars constituent les mois les plus froids (saison froide), avec une moyenne minimum au mois de Janvier (11 °C). Par contre Juin, Juillet, Août et Septembre caractérisent la saison chaude avec une moyenne maximum au moi Août de 30,01°C.

Les variations temporelles des températures sont en relation avec les caractéristiques climatiques des saisons. Par contre les variations spatiales sont en relation avec les facteurs géographiques telle que l'altitude, la latitude en plus de la nature du sol et la couverture végétale (l'albédo).

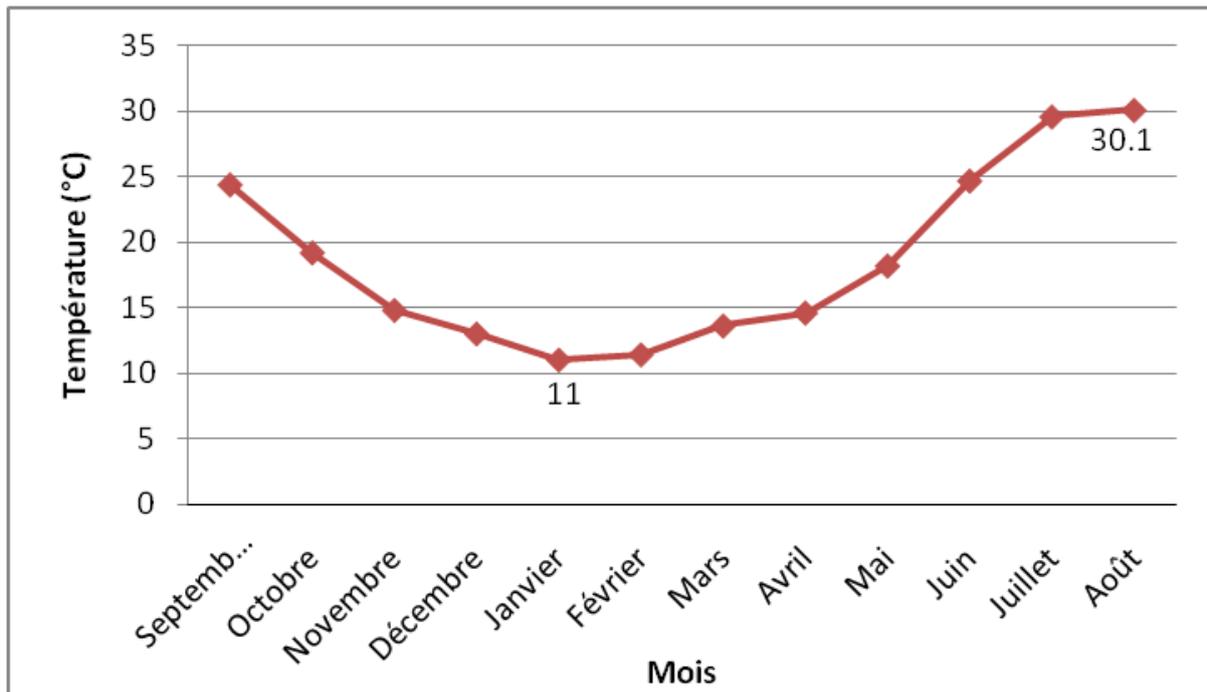


Figure 19: Variation de températures moyennes mensuelles au niveau de la station Hajria au cours de la période 1981 à 2007 (ABHS-Fès)

2. Relation température et précipitation

Le climat régnant dans une région peut être estimé à travers certains paramètres qui mettent en relation la température et les précipitations caractérisant la région. Dans cette optique le calcul des indices suivants semble utile :

- ❖ L'indice Xérothermique de Gaussen
- ❖ L'indice d'aridité de De Martonne et les indices mensuelles d'aridité
- ❖ Le quotient pluvio-thermique d'Emberger

a) L'indice Xérothermique de Gaussen

Cet indice appelé aussi diagramme ombrothermique de Gaussen permet de distinguer les périodes sèches et des périodes humides. Ainsi, une période est considérée comme sèche, lorsque le total des précipitations (P en mm) est inférieur ou égal au double de la température moyenne mensuelle (T en °C), dans le cas contraire la période est considérée comme humide, par contre lorsqu'il y a une égalité entre les précipitations et le double de la température ($P=2T$) les besoins en eau sont satisfaisantes. Cet indice est commodément figuré par le diagramme ombrothermique de Gaussen (Fig.20). Ce dernier est un mode de représentation sur le même graphique. Les Températures et les précipitations moyennes mensuelles.

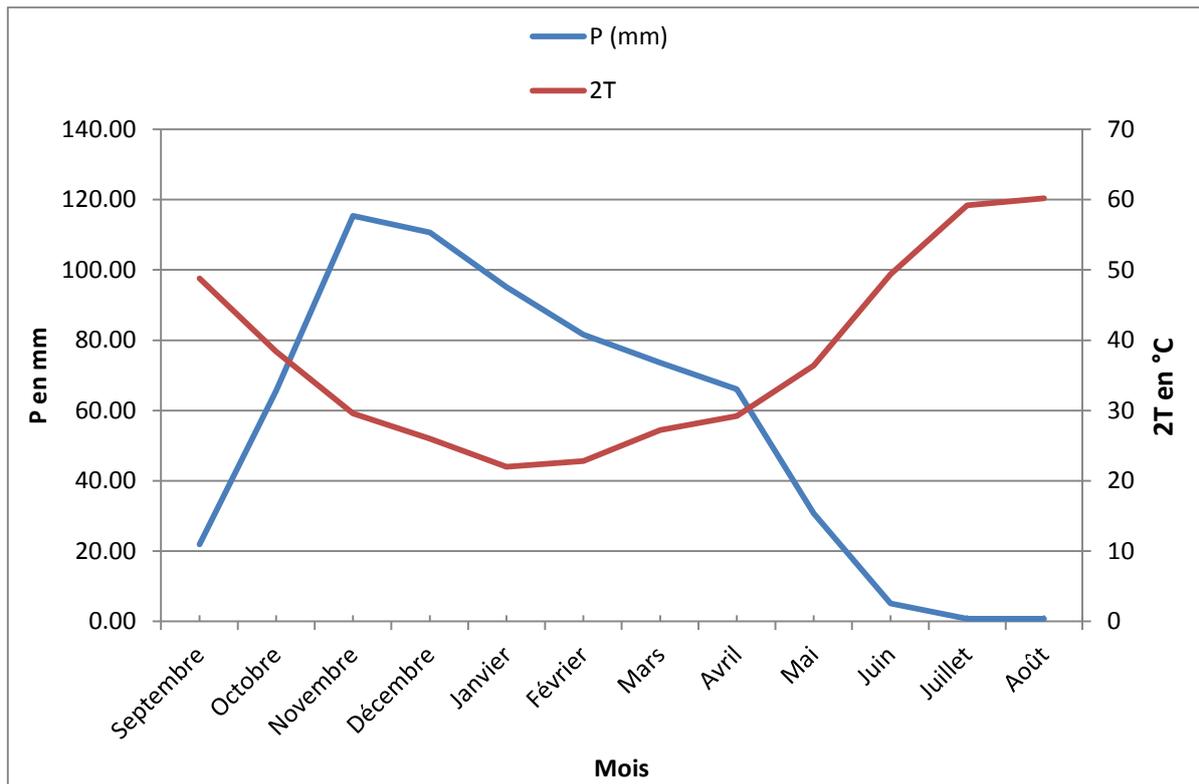


Figure 20: Diagramme ombrothermique de Gausson au niveau de la station Hajria

L'analyse de ce diagramme permet de définir une égalité entre la période humide et la période sèche. La première s'étend du mois d'Octobre jusqu'en Avril, par la suite une sécheresse prend le relais.

b) L'indice d'aridité annuelle de De Martonne et les indices mensuelles d'aridité

Les données de température et de précipitation sont utiles pour exprimer les conditions climatiques du milieu et l'indice d'aridité de De Martonne qui est donné par la formule suivante qui met en relation la pluviométrie et la température moyenne annuelle :

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

Avec :

P : Précipitation moyenne annuelle (mm)

T : Température moyenne annuelle (°C)

Dans cette étude **I= 25.8**

Cette valeur d'indice caractérise un climat **semi humide** ($20 < i < 30$).

On peut estimer les indices mensuels d'aridité par la formule suivante :

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

Avec :

P : précipitation moyenne mensuelle en mm

t : température moyenne mensuelle en °C

L'analyse de l'évolution de l'indice mensuel d'aridité au niveau de Hajria (Fig.21) montre que les mois de Juin, Juillet et Août jouissent d'un climat hyperaride ($i < 5$), un régime aride au mois de septembre, un régime semi-aride règne sur cette station pendant le mois de Mai, par contre les autres mois se caractérisent par un régime semi-humide à humide.

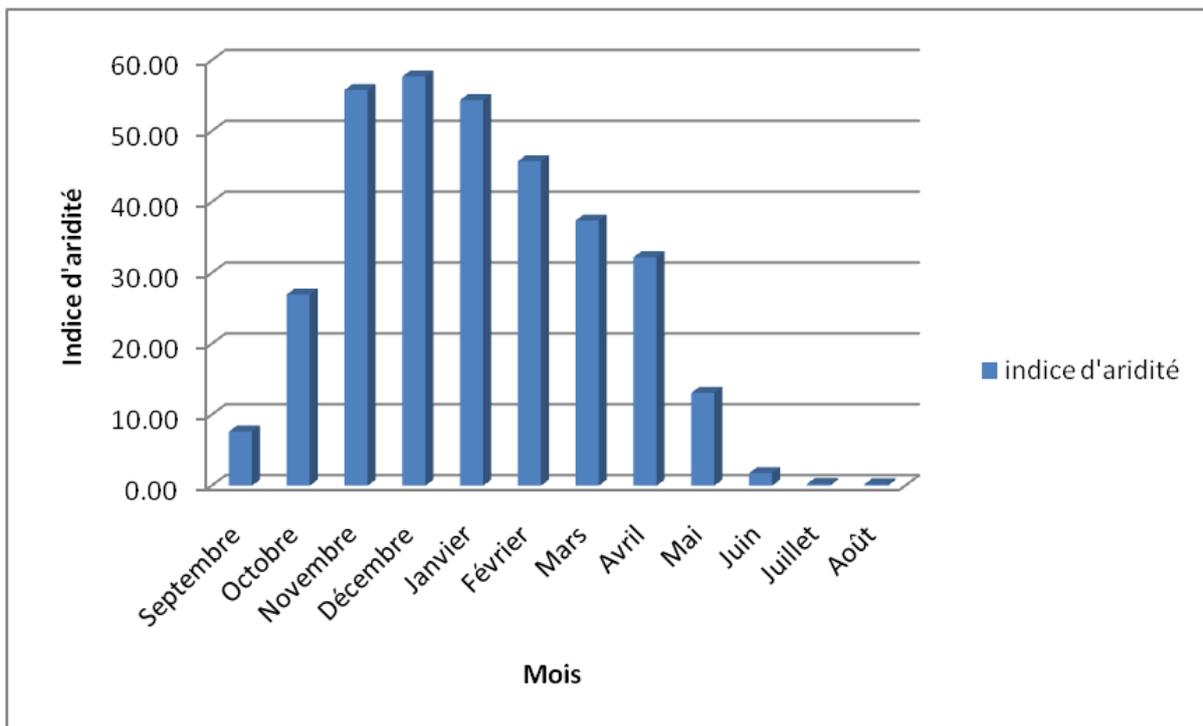


Figure 21: Evolution mensuelle de l'indice d'aridité au niveau de la station de Hajria

c) Quotient pluviométrique d'Emberger

Le quotient pluviométrique d'Emberger (Q_2) correspond à une expression synthétique du climat méditerranéen tenant compte de la moyenne annuelle des précipitations et des températures (Sauvage, 1960).

Ces dernières prennent en considération d'une part, la moyenne des minimums du mois le plus froid « m » et d'autre part, la moyenne des maximums du mois le plus chaud

«M». Ces deux valeurs thermiques extrêmes permettent d'évaluer la température moyenne $(M+m)/2$ et l'amplitude thermique extrême moyenne $(M-m)$.

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

Avec :

Q_2 : Le quotient pluviométrique d'EMBERGER

P : Précipitation moyenne annuelle ($P=741\text{mm}$)

M : Moyenne des maxima du moi le plus chaud ($M=303.25^\circ\text{Kelvin}$)

m: Moyenne des minima du mois le plus froid ($m=284.15^\circ\text{Kelvin}$)

$Q_2=132$

Le climat d'Emberger comporte la moyenne des minima du mois le plus froid «m» en abscisse et le quotient pluviométrique « Q_2 » en ordonnée. Il est également subdivisé en zones correspondant à divers étages bioclimatiques méditerranéens (Fig.22).

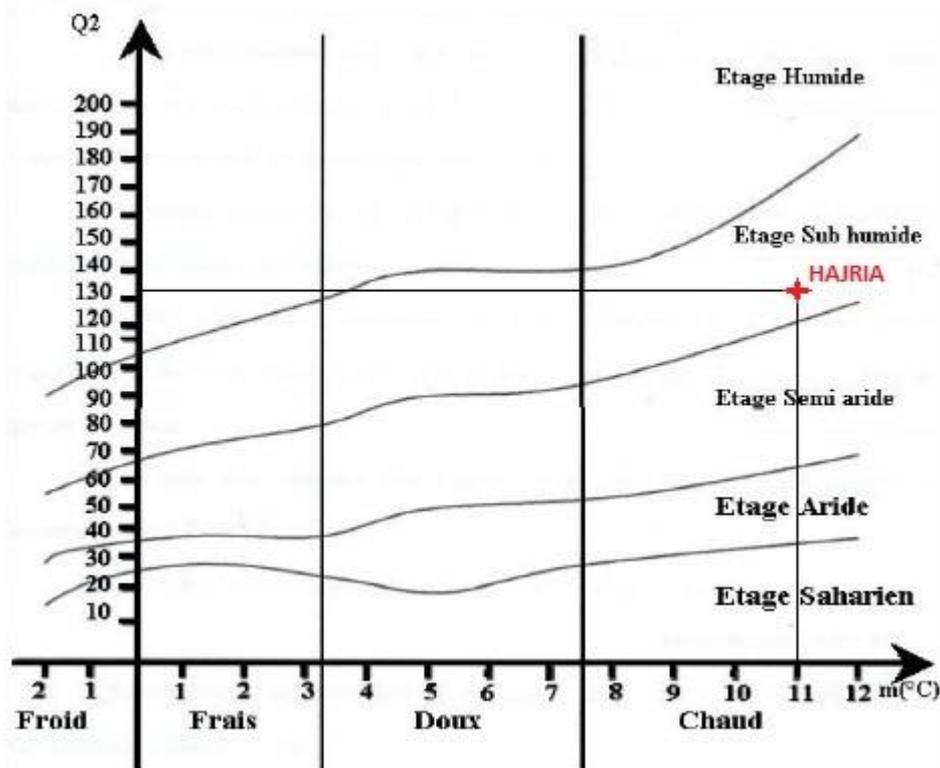


Figure 22: Climagramme d'Emberger dans le bassin versant de l'oued Ouergha (Hajria)

Le résultat de ce climagramme montre que le bassin versant de l'oued Ouergha, au niveau de la station Hajria, est dans un étage climatique **semi humide**.

IV. Evapotranspiration

L'évaporation est une des composantes fondamentales du cycle hydrologique et son étude est essentielle pour connaître le potentiel hydrique d'une région ou d'un bassin versant. En hydrologie, on utilise l'évapotranspiration qui prend en compte la combinaison de l'évaporation et la transpiration.

- L'évaporation est un phénomène physique de transformation de l'eau en vapeur se produisant à tous les stades du cycle de l'eau. Elle dépend du pouvoir évaporant de l'atmosphère et de la nature de la surface d'évaporation.
- La transpiration est un phénomène physiologique ou biologique de transformation de l'eau en vapeur par les êtres vivants en particulier les végétaux. En plus des facteurs physiques communs à l'évaporation, elle dépend de l'espèce végétale, de l'âge et de la saison.

L'évapotranspiration représente la somme de toutes les pertes d'eau par transpiration des végétaux et par évaporation. Elle est régie par plusieurs facteurs de nature climatique (température, humidité relative, pression atmosphérique, vent), végétale (stade de croissance ,espèce ,état sanitaire....) ou de sol (porosité, perméabilité, couleur). L'évaluation des pertes par évapotranspiration fait appelle à deux concepts :

- ❖ L'évapotranspiration potentielle
- ❖ L'évapotranspiration réelle

1. L'évapotranspiration potentielle

L'évapotranspiration potentielle ou l'évapotranspiration de référence (ETP) désigne la quantité maximale d'eau susceptible d'être transformée en vapeur par l'évaporation de l'eau du sol et la transpiration des végétaux pendant un temps considéré et pour un terrain donné. Pour son estimation, Thornthwaite (1948) a établi une équation qui se base sur la température moyenne mensuelle qui s'écrit comme suit :

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

Avec :

ETP : L'évapotranspiration potentielle (mm)

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

T_K : Température moyenne du mois considéré en °C

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

$I = \sum i_K$: Indice thermique annuel ($I=92.72$)

$\alpha = \left(\frac{1.6 \times I}{100}\right) + 0.5$: Coefficient exprimé en fonction de i_K ($\alpha=1.98$)

Le calcul de l'ETP mensuelle par la méthode de Thornthwaite a été établi pour la station de Hajria uniquement, puisque c'est là où on dispose des données nécessaires. Les indices thermiques mensuels ainsi que la température moyenne du mois et l'ETP sont résumés dans le (Tab.11). Par la suite, les évolutions de l'ETP mensuelle en fonction de la température et des précipitations moyennes mensuelles de la station Hajria sont représentées respectivement dans la figure (23).

Tableau 11: ETP mensuel selon la méthode de Thornthwaite

	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	24.4	19.2	14.8	13	11	11.4	13.6	14.6	18.2	24.7	29.6	30.1
i_K	11.02	7.67	5.17	4.25	3.30	3.48	4.55	5.07	7.07	11.23	14.77	15.15
ETP	114.12	61.53	30.29	23.43	16.38	19.03	34.84	45.21	80.29	148.09	211.90	204.23

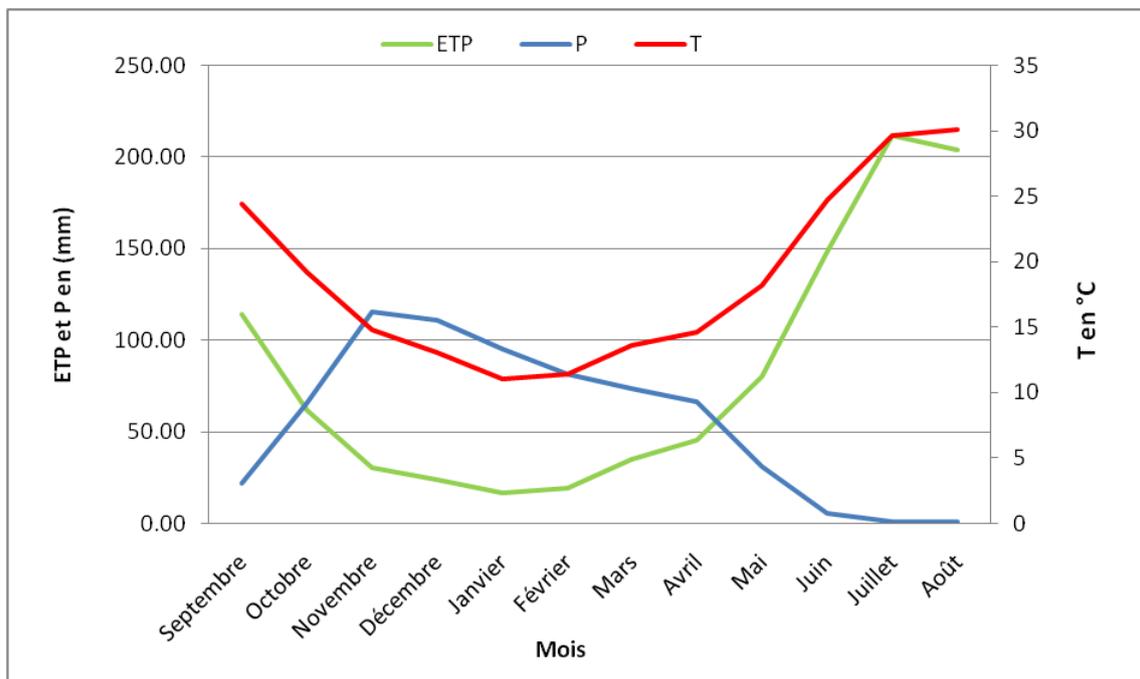


Figure 23: Evolution de l'ETP en fonction de Précipitation et Température au niveau de la station Hajria

Les valeurs de l'ETP mensuelle, calculées pour la zone d'étude, montrent des fluctuations importantes au cours de l'année. En effet, un contraste est observé ; un minimum de 16.38 mm au mois de Janvier et un maximum de 211.9 mm au mois de Juillet.

Les faibles valeurs enregistrées à partir du mois de Novembre jusqu'au Avril peuvent être expliquées par les basses températures en cette période en plus de l'humidité relative élevée de l'air, sans oublier le faible taux de transpiration par les végétaux en relation avec le flux thermique et le stade de leur développement.

2. Evapotranspiration réelle

On désigne par ETR la quantité d'eau effectivement évaporée dans les conditions réelles et compte tenu de l'eau disponible.

Pour l'estimation de cette évapotranspiration, diverses formules basées sur la température et la hauteur des précipitations moyennes annuelles ou mensuelles ont été élaborées. Parmi les méthodes les plus utilisées pour la quantification de l'ETR, on peut citer la méthode de Turc (1961), Coutagne (1954) et le bilan de Thornthwaite (1955).

a) Méthode de Turc

Turc a proposé la formule suivante pour le calcul de ETR :

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

Avec :

ETR : évapotranspiration réelle (mm)

P : précipitation moyenne annuelle (mm)

$L = 300 + 25T + 0,05T^3 = 1096$

T : température moyenne annuelle (°C)

La valeur d'ETR est égale à **636 mm/an**.

b) Méthode de Coutagne

Coutagne a évalué le déficit d'écoulement en fonction de la température de la manière suivante :

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

Avec :

ETR : évapotranspiration réelle (mm)

P : précipitation moyenne annuelle (mm)

T : température moyenne annuelle

D'où l'ETR est égale à **544.81 mm/an.**

c) Méthode du bilan de Thornthwaite

L'évapotranspiration réelle est calculée par la méthode du bilan de Thornthwaite (Tab.12) qui se base sur le bilan hydrique du sol. Dans cette méthode, Thornthwaite a admis qu'un sol est saturé lorsqu'il absorbe une lame équivalente à une précipitation de 100 mm. D'après certains auteurs, cette valeur peut être ramenée à 50 mm dans les zones arides ou semi arides.

Le calcul de l'ETR dépend de la valeur de la quantité de la réserve facilement utilisable (RFU). Par ailleurs, on considère pour ce bilan deux peut être établi pour deux périodes distinctes :

En période humide, on a plus de précipitations : $P > ETP$ donc $ETP = ETR$. Il y a donc un surplus hydrique qui est égal à $P - ETR$. Dans un premier temps ce surplus, comble le déficit hydrique du sol, c'est-à-dire la RFU. Lorsque la RFU est complète, il reste un excédent qui va alimenter l'écoulement de surface et l'infiltration profonde.

En période sèche, on a : $P < ETP$, donc $ETR = P + RFU$. Deux cas se peuvent se produire :

- ❖ 1^{ère} cas : la RFU est suffisante, alors $ETR = ETP$, la RFU est réduite de la partie P, $RFU = ETP - P$.
- ❖ 2^{ème} cas : la RFU est insuffisante ou nulle, on aura alors : cela entraîne l'apparition d'un déficit agricole $DA = ETP - ETR$.

Nous admettons qu'en période pluvieuse pour laquelle $P > ETP$, $P - ETP$ va alimenter la RFU dans les couches superficielles jusqu'à saturation (maximum $RFU = 100\text{mm}$, Région semi-humide). Une fois le max de la RFU est éteint, il y aura un excédent pour l'infiltration profonde et le ruissellement. Mais en saison sèche, $P < ETP$ la RFU va alimenter alors l'ETR. EN général, quand on arrive à la saison sèche, la RFU est nulle.

Tableau 12: calcul de l'ETR mensuelle par la méthode de Thornthwaite

	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août
P	21.88	65.61	115.33	110.61	95.17	81.61	73.56	66.06	30.76	5.08	0.80	0.75
ETP	114.12	61.53	30.29	23.43	16.38	19.03	34.84	45.21	80.29	148.09	211.90	204.23
RFU	0	4.08	89.12	100	100	100	100	100	50.47	0	0	0
ETR	21.88	61.53	30.29	23.43	16.38	19.03	34.84	45.21	80.29	55.55	0.80	0.75
Excédent	-	-	-	76.3	78.79	62.58	38.72	20.85	-	-	-	-
Déficit	92.24	-	-	-	-	-	-	-	-	44.45	211.1	203.49

L'analyse du tableau ci-dessus nous permet de dire que l'ETR mensuelle au niveau de Hajria est maximale en automne et au printemps, en relation avec les conditions météorologiques qui sont favorables. En suite, le déficit d'écoulement atteint son maximum pendant les mois de Juin, Juillet, Août et Septembre, ceci s'explique par les valeurs importantes de l'ETP. Enfin, l'ETR annuelle obtenue par cette méthode est de **390 mm/an.**

Les valeurs de l'ETR obtenues par les trois méthodes permettent d'évaluer une ETR moyenne de **523.6 mm/an**, ce qui représente **70.6%** des précipitations moyennes annuelles.

3. Bilan hydrique

Le dévenir de l'eau apportée par les précipitations au cours de l'année peut être décrit par le bilan hydrique. Ce dernier permet de dévoiler la nature de chaque période de l'année en fonction des entrées et des sorties. D'après le bilan hydrique du bassin versant de l'oued Ouergha (Fig.24), conçu à partir de la moyenne des bilans de la station Hajria, on peut distinguer les périodes suivantes :

- ❖ Phase D : considérée comme phase déficitaire et qui s'étend du mois Juin jusqu'au moi de Septembre.
- ❖ Phase R : c'est une phase de reconstitution des réserves en eau du sol, utilisées pendant les mois précédents. Cette reconstitution est favorisée par une évolution inversement proportionnelle des précipitations et de l'évapotranspiration pendant le mois d'Octobre.
- ❖ Phase S : Elle s'étend du mois Novembre jusqu'au mois d'Avril. C'est une phase où un surplus d'eau apparait à cause des précipitations qui dépassent largement l'évapotranspiration. Ce surplus sera ruisselé et assure l'alimentation des nappes.
- ❖ Phase E : Elle s'étend du mois d'Avril jusqu'au mois de Juin. Dans cette phase, l'évapotranspiration s'effectue au détriment des réserves facilement utilisables qui s'épuisent progressivement et disparaissent au mois de Juillet.

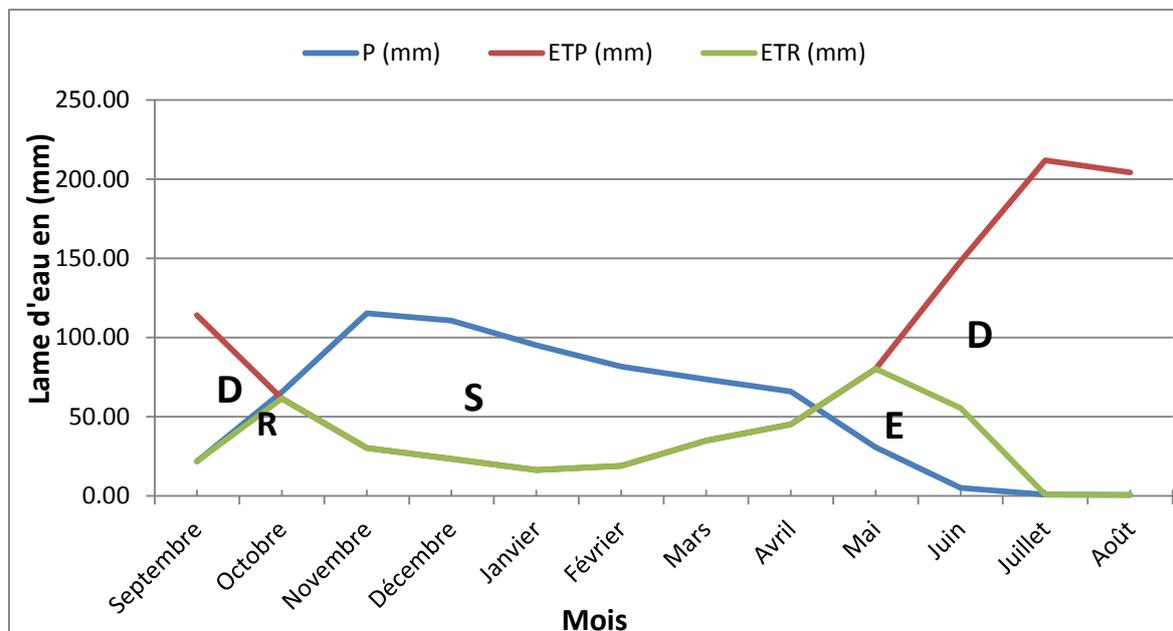


Figure 24: Bilan hydrique du bassin versant de l'oued Ouergha au niveau de Hajria, estimé à partir de précipitations, L'ETP et l'ETR de la méthode de Thornthwaite

V. Conclusion

A fin de ce chapitre, et avant d'entamer l'étude hydrologique, il nous semble que l'analyse des données sur les paramètres climatiques du bassin versant de l'oued Ouergha a permis de déduire que :

- Les précipitations recueillies dans les stations se caractérisent par des fluctuations entre les différentes stations ainsi que le cycle hydrologique. 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. 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 versant de l'oued Ouergha 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 et 30.1 °C. La température moyenne annuelle est de 18.7 °C. 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 523.6 mm. Cette valeur reste toutefois inférieure à la précipitation moyenne annuelle qui est de 741 mm et ainsi en résulte un surplus qui va contribuer à l'alimentation des nappes souterraines ou l'alimentations du ruissellement superficiel.
- D'après le bilan hydrique du bassin versant de l'oued Ouergha, on peut distinguer quatre périodes : une période déficitaire qui s'étend du mois Juin jusqu'au moi 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.

**Chapitre IV : ETUDE
HYDROLOGIQUE**

I. Introduction

La direction de l'écoulement des oueds du bassin de l'oued l'Ouergha est généralement ENE-OSO. Tous ces oueds montrent un débit qui varie d'une année à une autre et aussi d'un mois à un autre. L'étude hydrologique du bassin versant de l'oued Ouergha est réalisée en se basant sur les données hydrométriques des stations :

- Station Tabouda sur oued Aoudour (1980 à 2012)
- Station Galaz sur oued Amzez (1983 à 2011)
- Station Ain Aicha sur oued Ouergha (1981 à 2011)

Pour étudier le fonctionnement hydrologique de ce bassin versant, ainsi que son bilan, nous entreprendrons principalement l'étude du régime des débits et leurs fluctuations pour ces stations puis la relation entre les précipitations et les débits. Enfin, nous préciserons quelques caractéristiques du bilan hydrologique et la genèse des crues et les étiages.

II. Etude du régime du débit

1. Débits annuels

L'évolution des débits moyens annuels reflètent les irrégularités spatiotemporelles, en tenant compte des variations interannuelles dans les stations. Les irrégularités spatiales sont en relation direct avec la situation amont-aval. Par ailleurs, les irrégularités temporelles mettent en relief une succession de période humide et de période sèche (Fig.25), (Fig.26) et (Fig.27).

Le module annuel dans la station de Ain Aicha est de $22.84 \text{ m}^3/\text{s}$ est plus important qu'au niveau des stations Galaz ($8.37 \text{ m}^3/\text{s}$) et Tabouda ($11.69 \text{ m}^3/\text{s}$). Ceci reflète la situation amont-aval des stations et la succession de période humide et de période sèche.

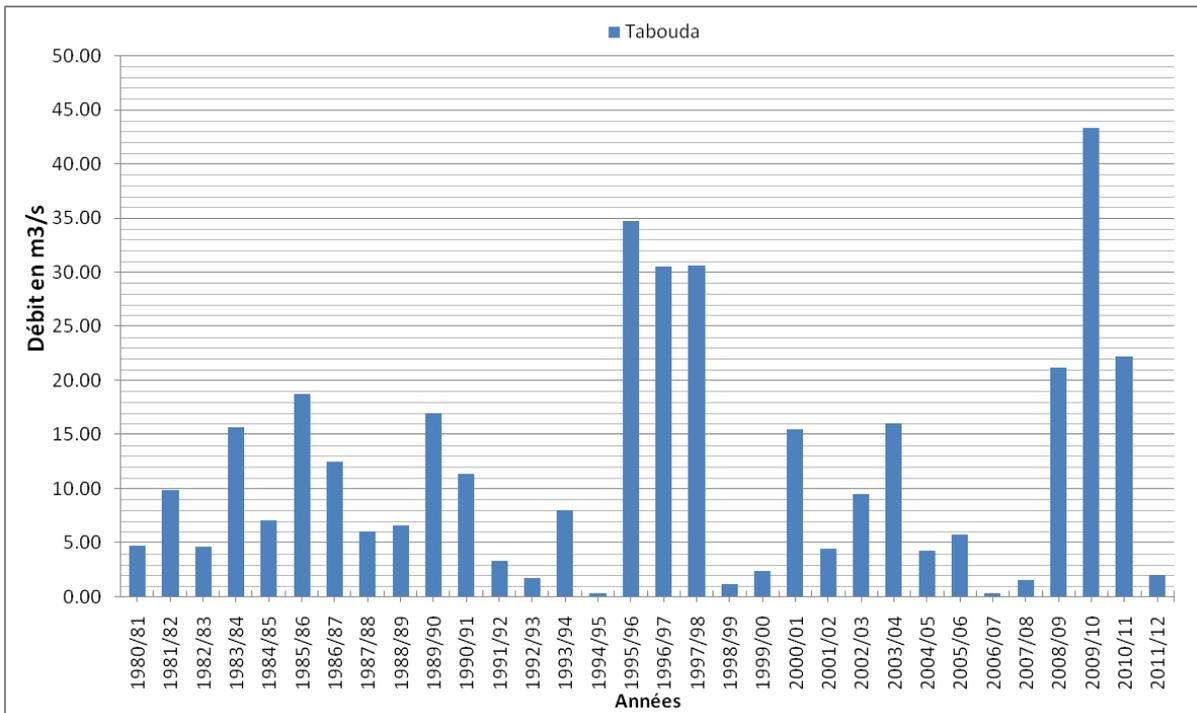


Figure 25: Variation interannuel des débits moyens annuels pour la station Tabouda

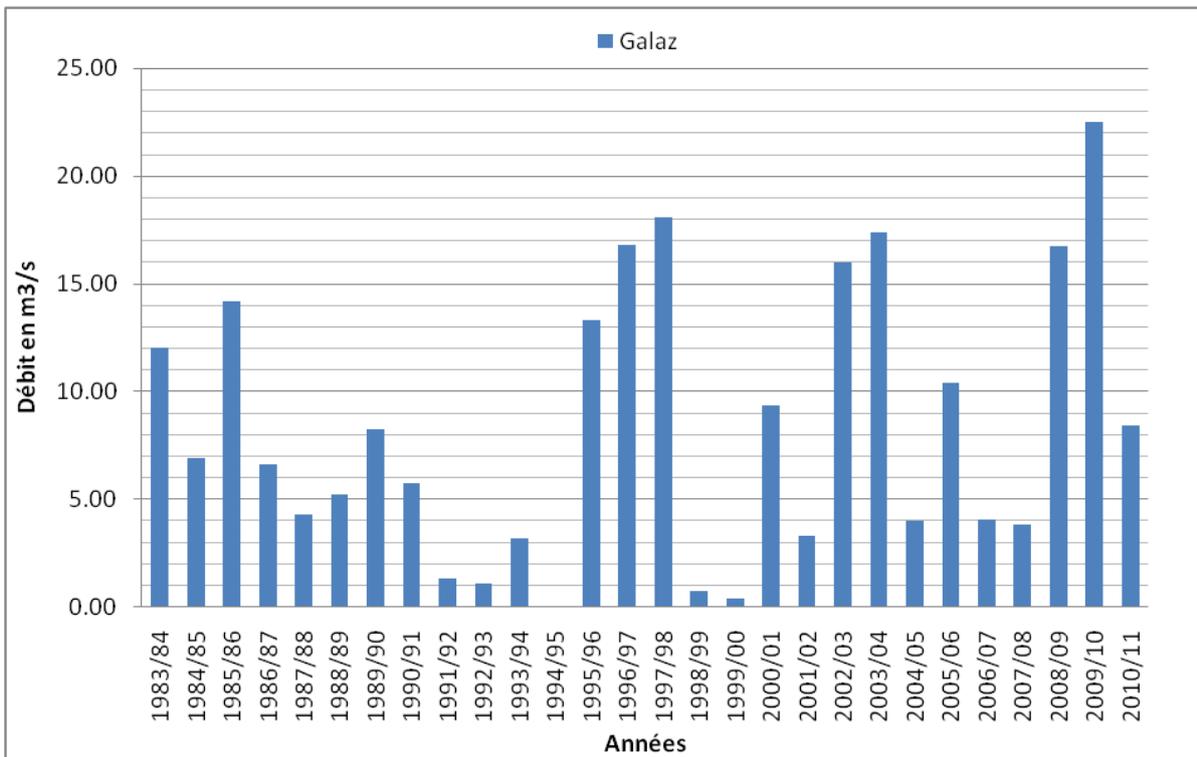


Figure 26: Variation interannuel des débits moyens annuels pour la station Galaz

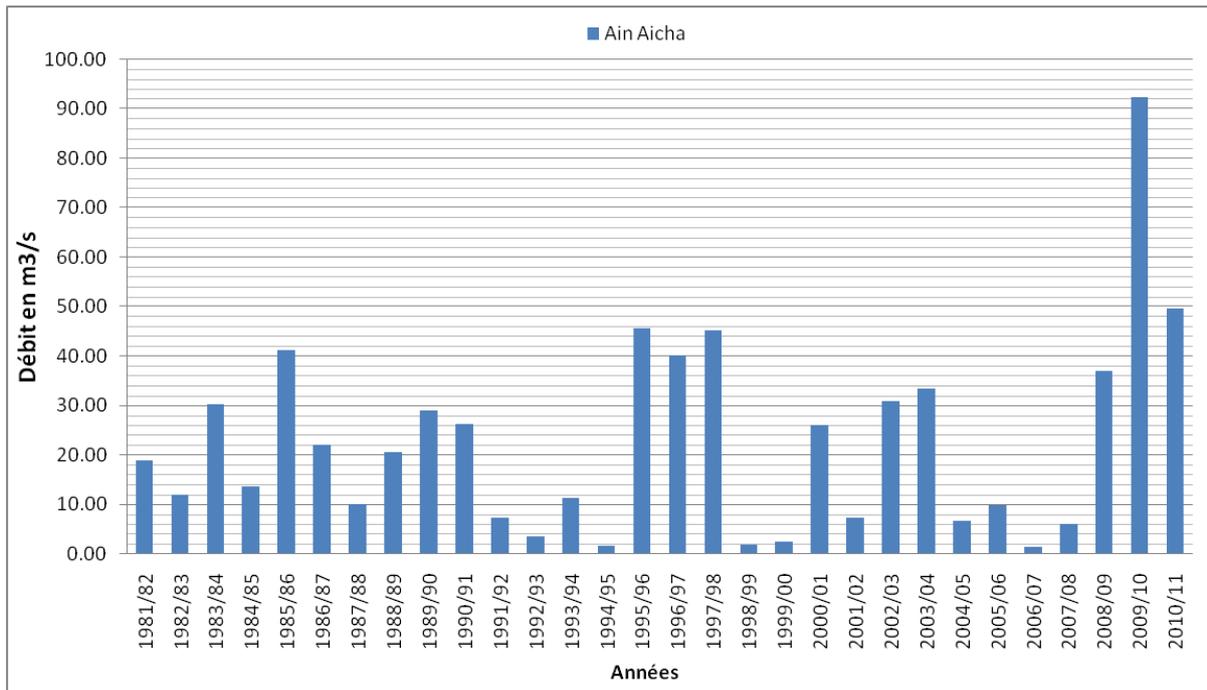


Figure 27: Variation interannuel des débits moyens annuels pour la station Ain Aicha

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

Pour mettre en évidence les fluctuations hydroclimatiques qui ont affecté le bassin, la méthodologie des écarts des débits moyens annuels aux débits moyens interannuels semblent adéquates. Cette méthode permet de distinguer les périodes humides ou excédentaires ($E_c > 0$) et des périodes sèches ou déficitaires ($E_c < 0$). La formule utilisée est :

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

Q_{mi} : Débit moyen interannuel

Q_{ma} : Débit moyen annuel

Les résultats obtenus (Fig.28, Fig.29 et Fig.30) révèlent une alternance des séries de périodes excédentaires et de périodes déficitaires au niveau de chaque station.

Cette alternance des séries de périodes humides et périodes sèches n'est pas conforme dans ces stations.

L'alternance de ces périodes est expliquée par les fluctuations climatiques qui permettent de recharger les réservoirs hydrologiques en périodes humides, alors qu'elles seront vidées en périodes sèches.

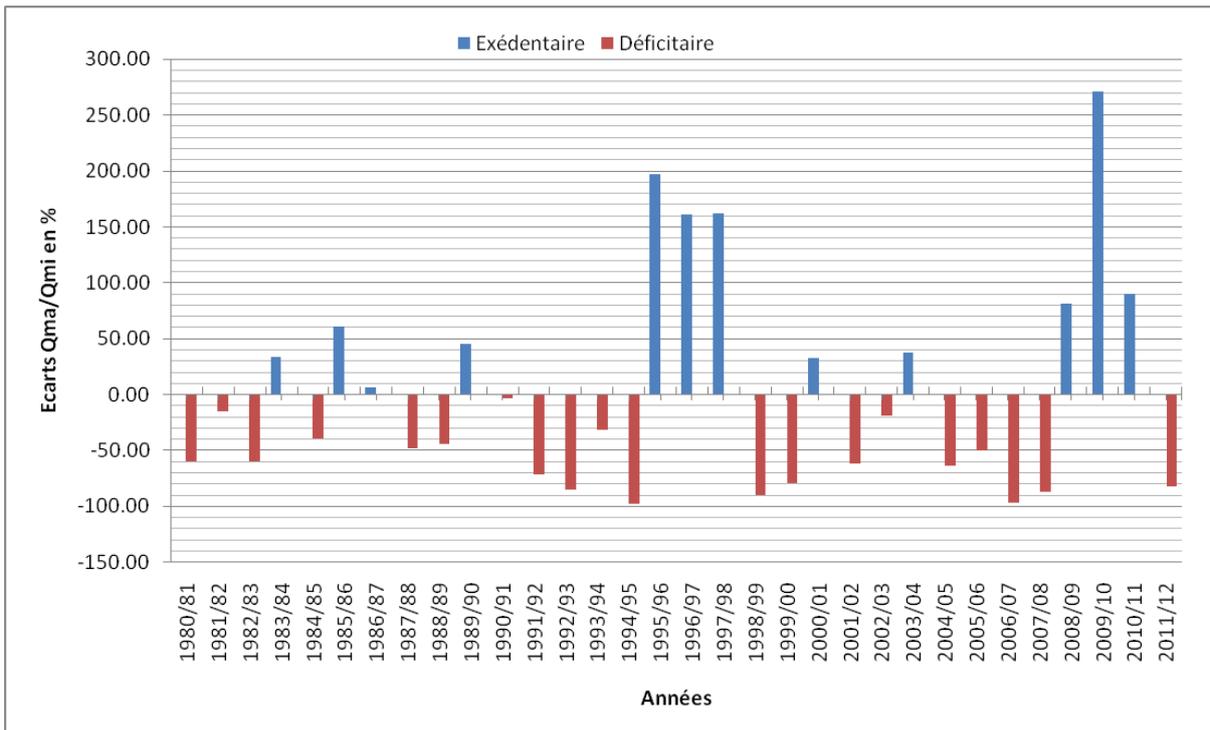


Figure 28: Variation des écarts des débits moyens annuels et interannuels de Tabouda

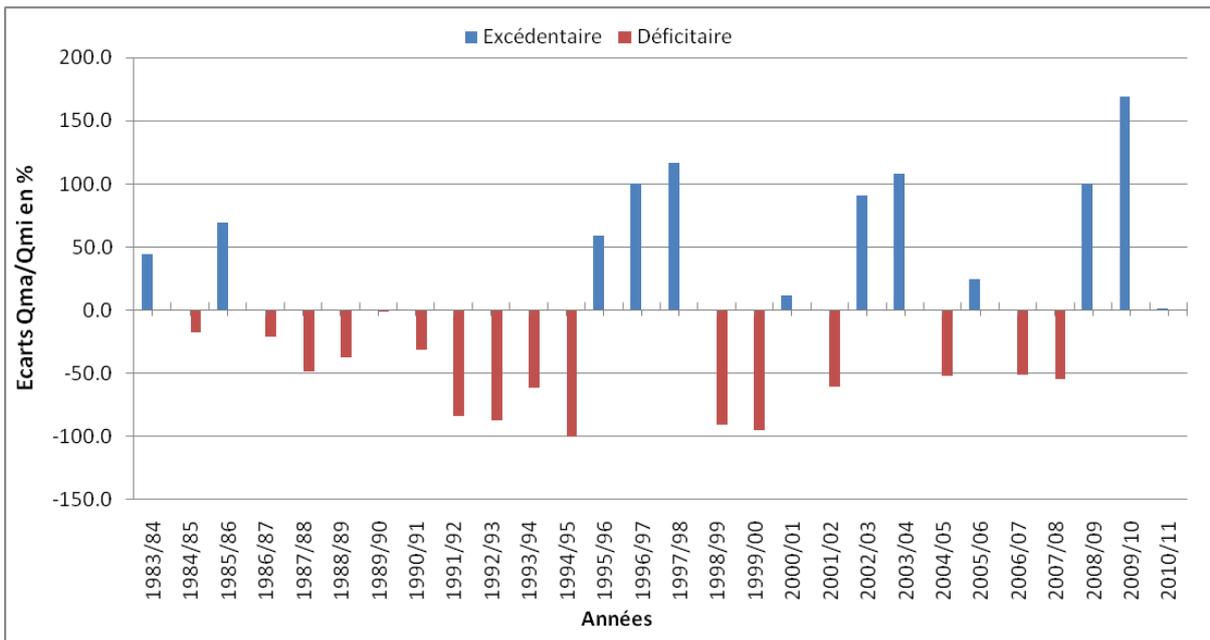


Figure 29: Variation des écarts des débits moyens annuels et interannuels de Galaz

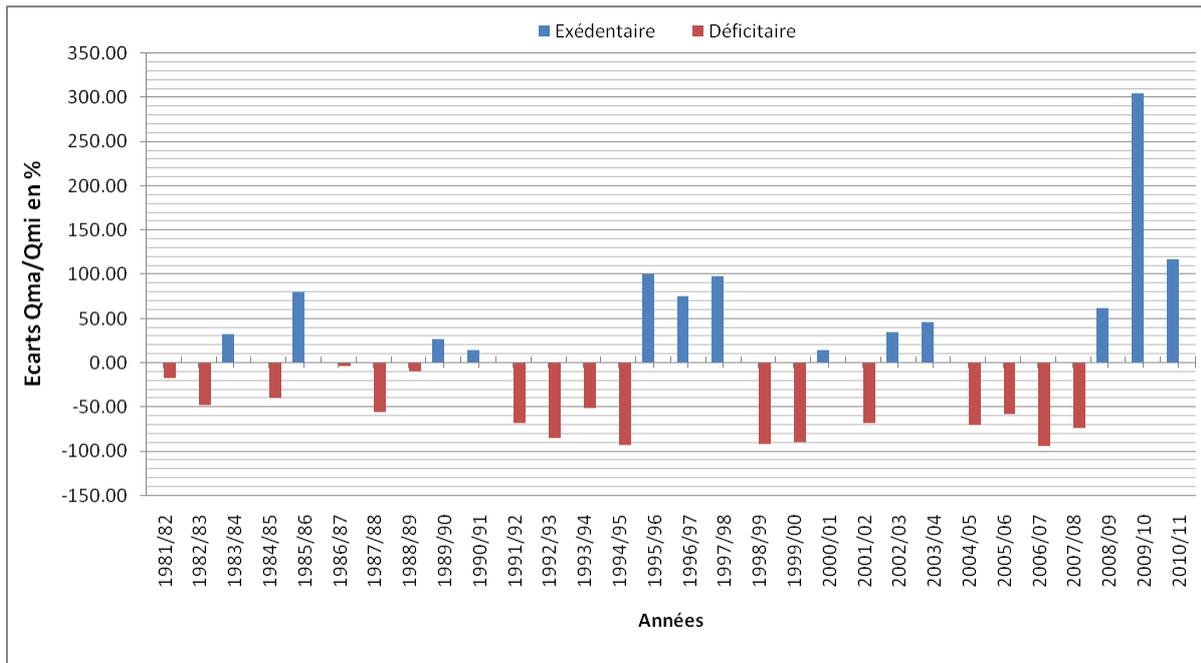


Figure 30: Variation des écarts des débits moyens annuels et interannuels d'Ain Aicha

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

Pour avoir une idée sur l'irrégularité interannuelle des débits, on doit faire une analyse des lames d'eaux écoulées dans le bassin versant de l'oued Ouergha à travers les trois stations permanentes par la méthode du simple cumul. L'intérêt de cette méthode réside dans les ruptures des pentes qui caractérisent le profil de la lame d'eau écoulée et qui correspondent au contraste d'homogénéité entre les séries de ces lames au cours de la période d'observation.

Les figures (31, 32 et 33) montrent plusieurs points de rupture de pente, ce qui signifie la modalité d'alternance des phases de sécheresse et d'humidité. Autrement dit, l'alternance des années qui se caractérisent par un module annuel de débit élevé et de celles qui se caractérisent par un faible module annuel de débit.

Tableau 13: Simple cumul des lames d'eau écoulées au niveau de la station Galaz (1983 à 2011)

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

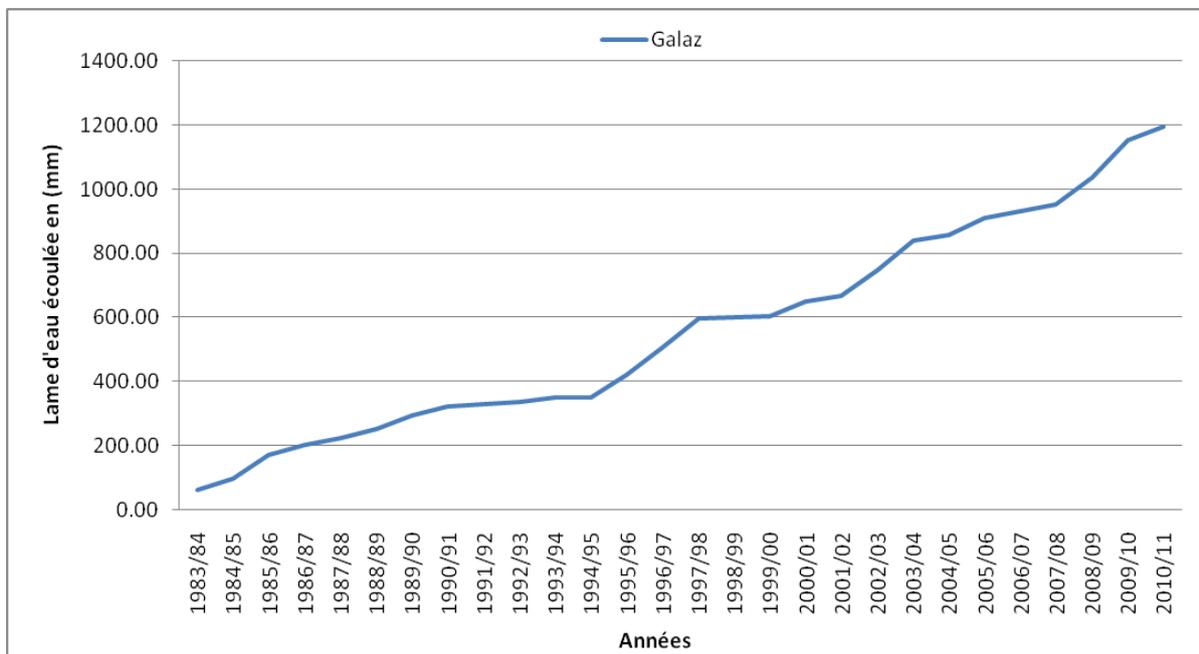


Figure 31: Simple cumul des lames d'eau écoulées au niveau de la station Galaz (1983 à 2011)

Tableau 14: Simple cumul des lames d'eau écoulées au niveau de la station Tabouda (1980 à 2012)

Tabouda				
Année	Débit moyen (m3/s)	Débit spécifique (l/s/Km2)	la lame d'eau écoulée (mm)	la lame d'eau écoulée cumuléé(mm)
1980/81	4.76	0.77	24.23	24.23
1981/82	9.92	1.60	50.54	74.77
1982/83	4.69	0.76	23.88	98.65
1983/84	15.67	2.53	79.81	178.47
1984/85	7.12	1.15	36.29	214.76
1985/86	18.78	3.03	95.68	310.44
1986/87	12.48	2.02	63.59	374.03
1987/88	6.12	0.99	31.15	405.19
1988/89	6.59	1.06	33.57	438.75
1989/90	16.98	2.74	86.51	525.27
1990/91	11.36	1.84	57.88	583.15
1991/92	3.39	0.55	17.28	600.43
1992/93	1.77	0.29	9.00	609.43
1993/94	8.07	1.30	41.12	650.55
1994/95	0.33	0.05	1.70	652.26
1995/96	34.76	5.61	177.07	829.33
1996/97	30.52	4.93	155.46	984.79
1997/98	30.67	4.95	156.26	1141.05
1998/99	1.25	0.20	6.35	1147.40
1999/00	2.42	0.39	12.31	1159.71
2000/01	15.51	2.51	79.00	1238.72
2001/02	4.51	0.73	22.97	1261.69
2002/03	9.54	1.54	48.59	1310.28
2003/04	16.04	2.59	81.71	1391.99
2004/05	4.32	0.70	22.01	1414.00
2005/06	5.81	0.94	29.58	1443.58
2006/07	0.40	0.06	2.04	1445.61
2007/08	1.59	0.26	8.11	1453.72
2008/09	21.20	3.42	108.01	1561.73
2009/10	43.37	7.01	220.96	1782.69
2010/11	22.24	3.59	113.32	1896.01
2011/12	2.07	0.33	10.55	1906.56

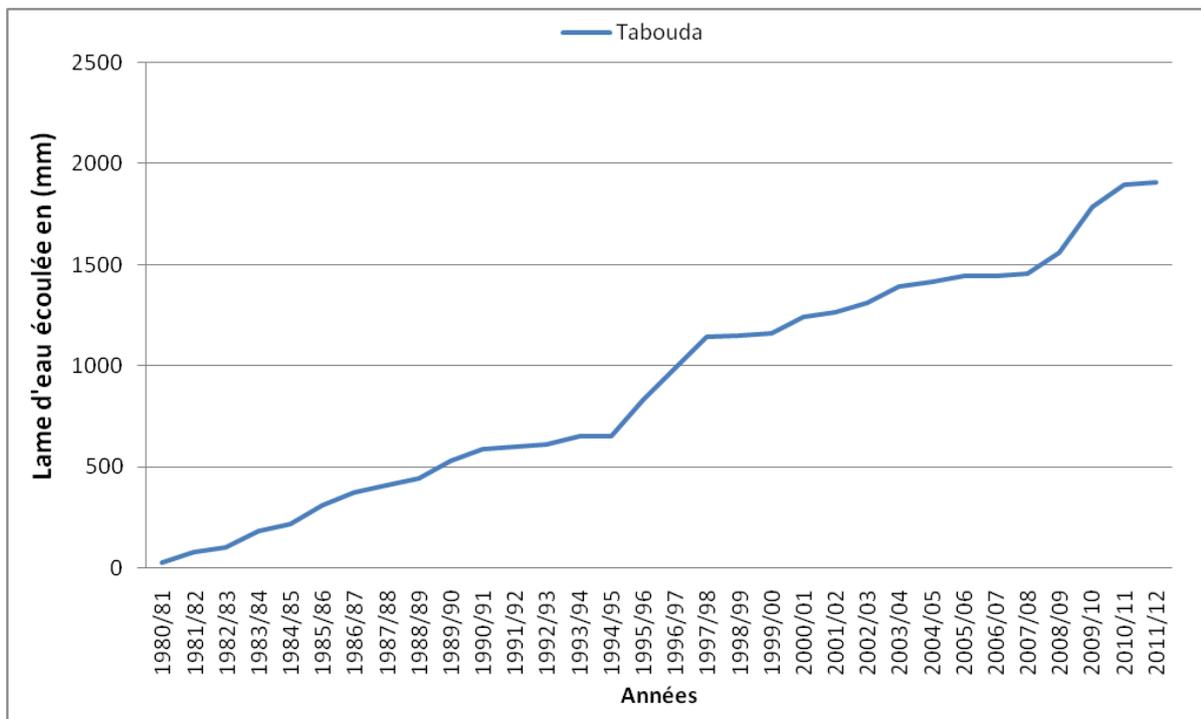


Figure 32: Simple cumul des lames d'eau écoulées au niveau de la station Tabouda (1980 à 2012)

Tableau 15: Simple cumul des lames d'eau écoulées au niveau de la station Ain Aicha (1981 à 2011)

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

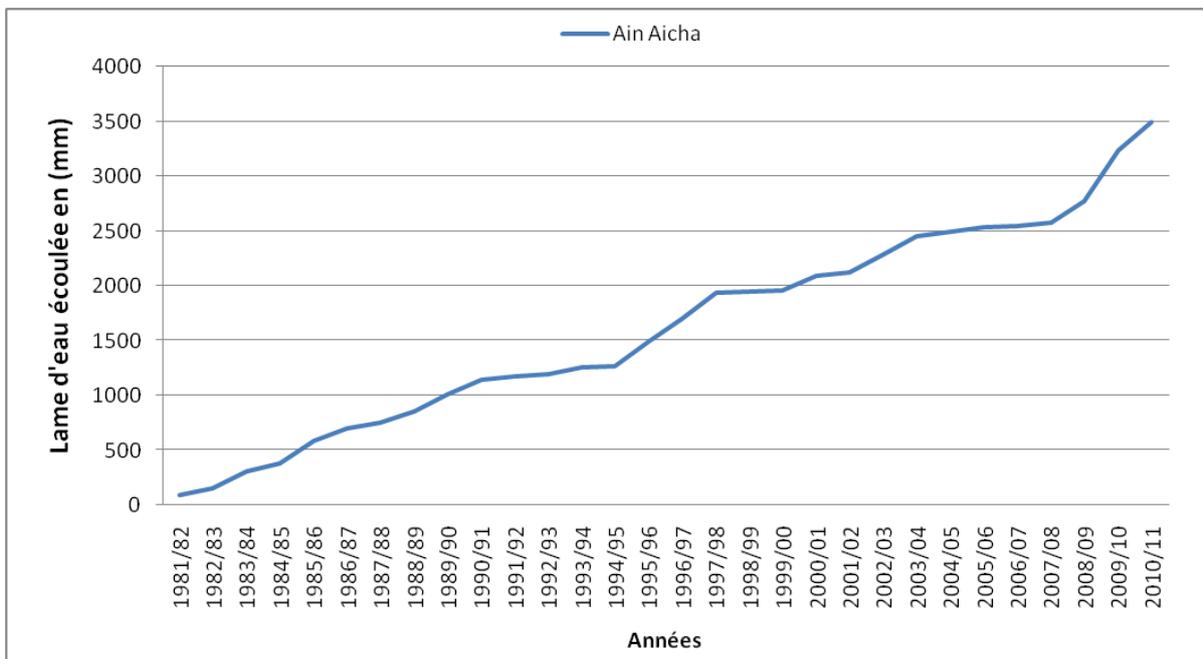


Figure 33: Simple cumul des lames d'eau écoulées au niveau de la station Ain Aicha (1981 à 2011)

c) Coefficient et indice de la variabilité des débits

L'irrégularité interannuelle de l'écoulement peut être mesurée par les variations du coefficient d'hydraulicité (CH), c'est-à-dire le rapport du débit d'une année donnée (Qi) au débit moyen d'une longue série d'observation (Qmoy). Elle peut être complétée par d'autres critères statistiques simples tels que l'écart type, le coefficient de variation (CV), ainsi que le coefficient d'immodération (R) donné par rapport des modules extrêmes ($R = QM/Qm$).

c.1) Coefficient d'hydraulicité (CH)

Pour un cours d'eau, le coefficient d'hydraulicité est le débit d'une année donnée sur le débit moyen interannuel donné (Fig.34).

Pour un coefficient ($CH > 1$), on a une année humide à écoulement important. Dans le cas contraire, c'est une année à faible hydraulicité, c'est-à-dire de faible débit du cours d'eau ou du bassin versant.

Les résultats du coefficient d'hydraulicité pour les trois stations permanentes confirment les fluctuations hydroclimatiques, déjà démontrées par la méthode des écarts des débits moyens interannuels aux débits moyens interannuels.

En effet, plus de 50% des années hydrologiques sont déficitaires au niveau des trois stations. En plus, on note un déphasage dans l'évolution du coefficient d'hydraulicité pour la série commune entre les stations.

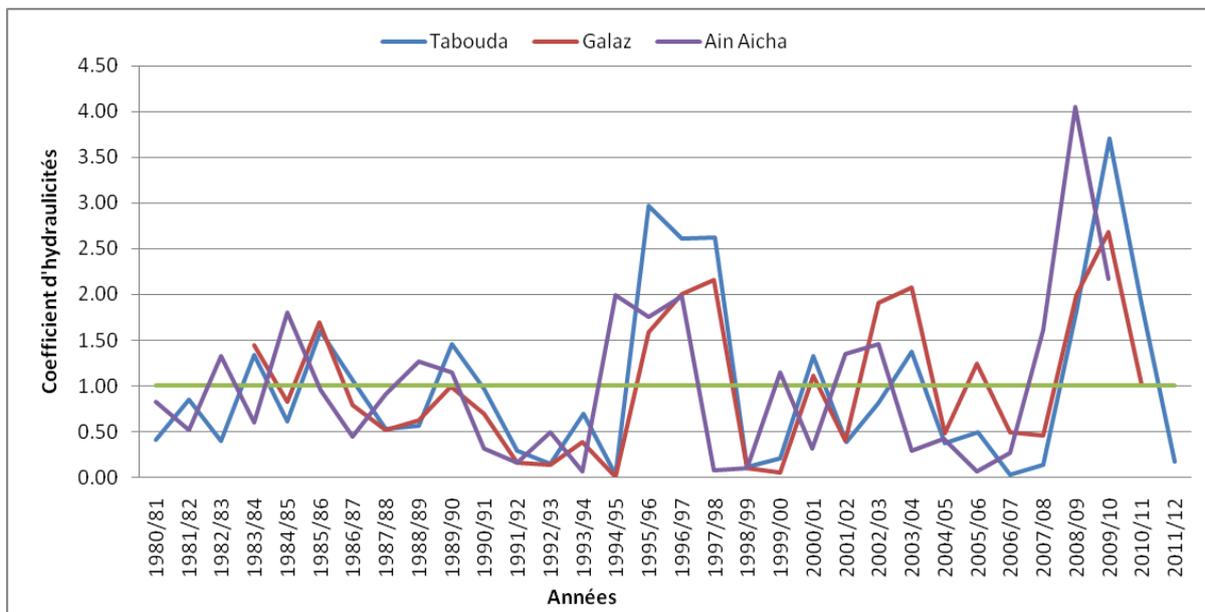


Figure 34: Variation du coefficient d'hydraulicité dans le bassin versant de l'oued l'Ouergha

c.2) Coefficient d'immodération (CI)

Le coefficient d'immodération est défini comme étant le rapport des modules extrêmes ($CI=Q_{max}/Q_{min}$). Les valeurs du coefficient d'immodération sont 129.75 pour la station de Tabouda, 224.99 pour la station de Galaz et 58.83 pour la station d'Ain Aicha.

Pour la station de Tabouda et Galaz, la valeur de ce coefficient est supérieure au module le plus élevé de la série, reflétant ainsi une forte irrégularité des débits annuels. Par contre, pour la station d'Ain Aicha, la valeur de ce coefficient reflète des irrégularités moins importantes, liées à une variabilité à l'échelle spatiale des débits annuels.

c.3) Coefficient de variation (CV)

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

Les valeurs du coefficient de variation sont de 0.93, 0.76 et 0.87 respectivement pour la station Tabouda, Galaz et Ain Aicha.

Ces valeurs, qu'on peut considérer comme légèrement élevées, contribuent à une variabilité des débits extrêmes.

2. Débits moyens mensuels

Les débits moyens mensuels sont les paramètres classiques qui permettent de caractériser le régime d'écoulement d'un cours d'eau. Ils sont très influencés par le régime pluviométrique.

a) Module mensuel

D'après les trois figures (Fig.35, Fig.36 et Fig.37), on note que les écoulements moyens mensuels des débits liquides montrent une évolution non régulière qui est illustrée par des fluctuations observées au cours de l'année. A partir du mois de Septembre, les débits augmentent progressivement pour atteindre le maximum en Février pour la station Ain Aicha, puis on assiste à une diminution progressive jusqu'à atteindre un minimum au mois d'Août. Au niveau des stations Tabouda et Galaz à partir du mois de Septembre, les débits augmentent progressivement pour atteindre le maximum en Décembre puis on assiste à une diminution progressive jusqu'à atteindre un minimum au mois de Juillet.

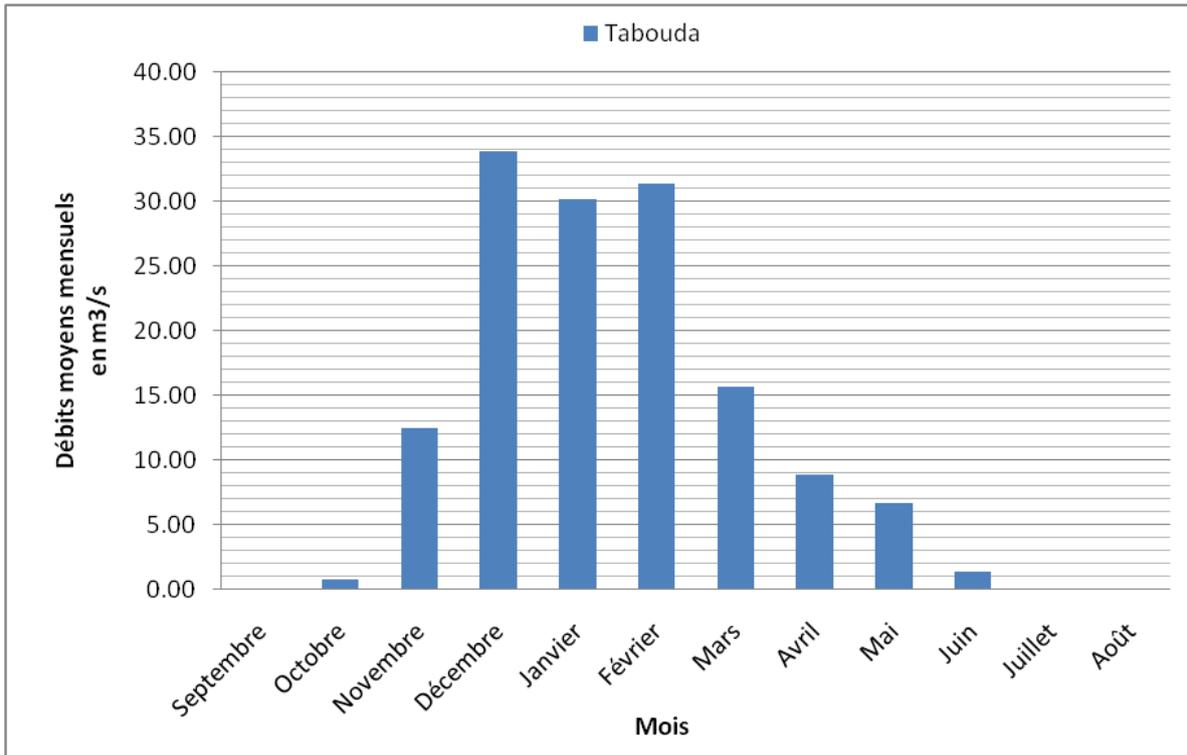


Figure 35: Variation des débits mensuels à la station de Tabouda

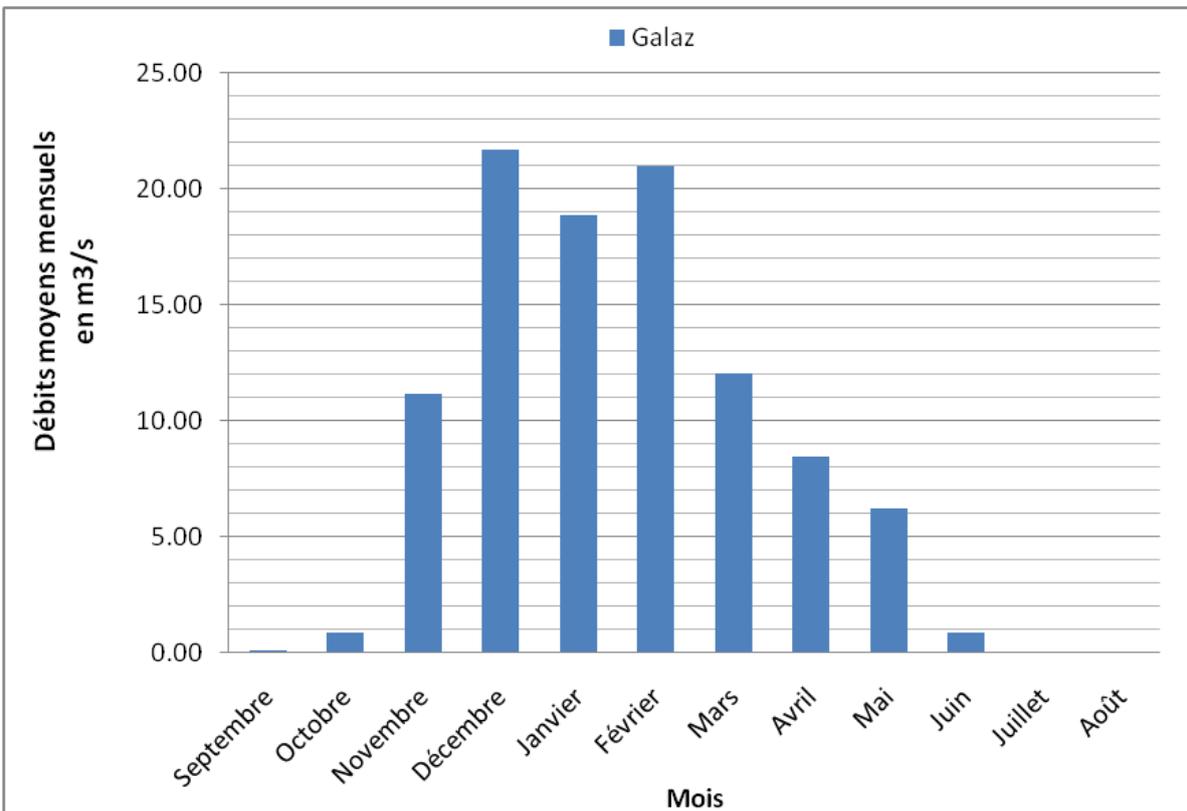


Figure 36: Variation des débits mensuels à la station de Galaz

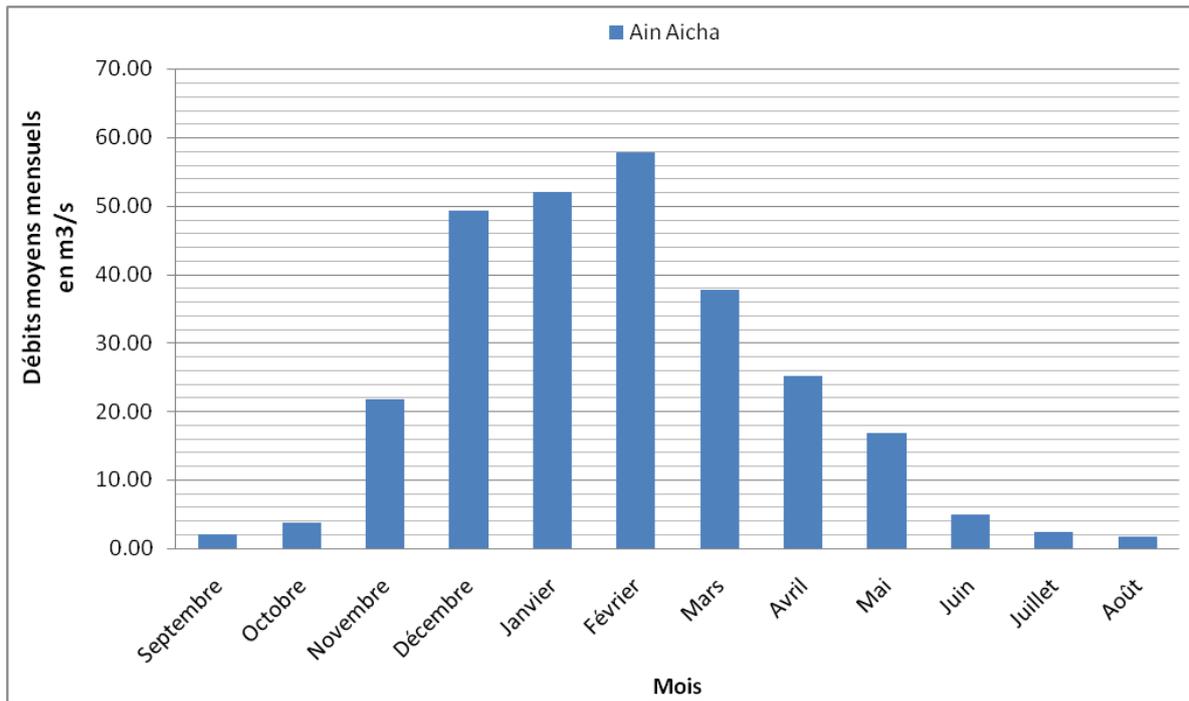


Figure 37: Variation des débits mensuels à la station d'Ain Aicha

Les variations mensuelles du débit sont étroitement liées aux précipitations moyennes mensuelles. On constate que les différences observées entre les variations mensuelles des débits dans ces stations peuvent être dues d'une part, soit à la lithologie du terrain, la surface des zones drainées et le réseau hydrographique et d'autre part soit à leurs situations géographiques.

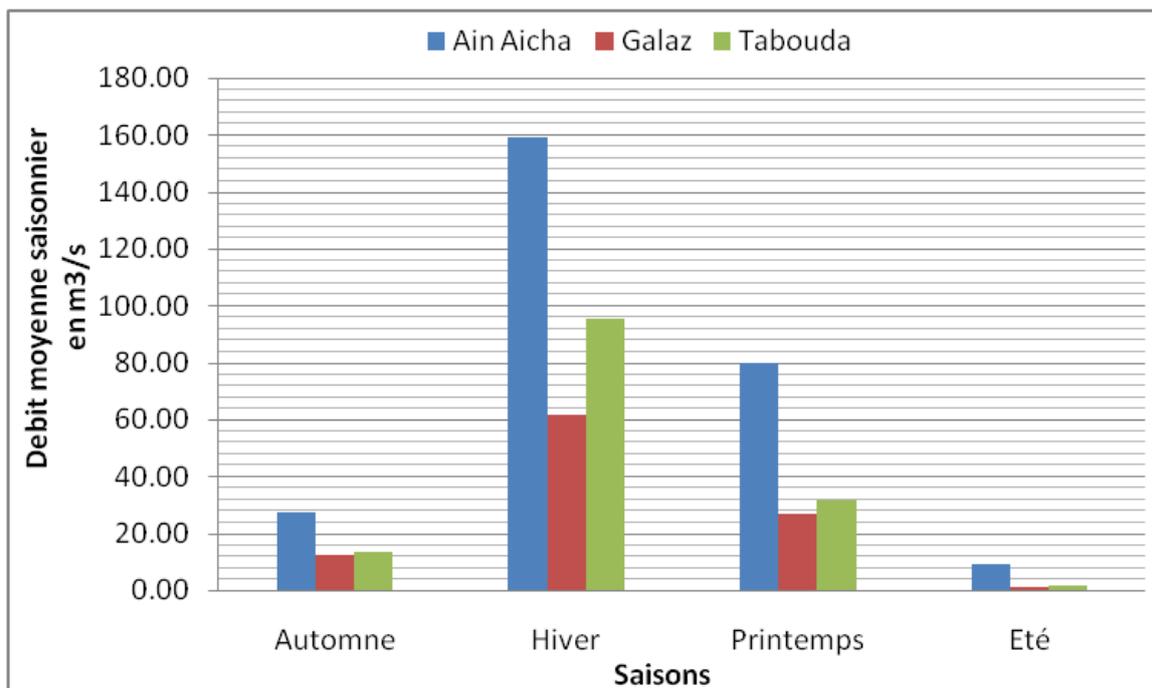


Figure 38: Variation des débits moyens saisonniers dans le bassin versant de l'oued Ouerga

En effet, à partir de l'automne, les débits liquides augmentent avec les pluies occasionnelles de ces stations pour atteindre un maximum pendant la saison d'hiver et par conséquence, la saturation des sols favorise le ruissellement intense qui va renforcer le débit de l'oued à partir du mois de Décembre jusqu'au mois d'Avril, mais sous l'effet de l'écoulement hypodermique et souterrain, la diminution des débits suit une loi exponentielle.

b) Coefficient mensuel des débits

Le coefficient mensuel des débits est la relation entre le débit moyen mensuel et le module brut annuel. Il permet de rendre compte de l'importance d'un mois sur l'année. Il met en évidence la variabilité des écoulements qui se manifestent par des périodes de hautes et basses eaux. Ce coefficient est déterminé par le rapport des débits moyens mensuels sur le débit moyen interannuel.

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

Avec :

C : Coefficient mensuel des débits

Q_m : Débit moyen mensuel

Q_{mi} : Débit moyen interannuel

Les variations du coefficient mensuel des débits au niveau de ces trois stations (Fig.39) montrent que le régime hydrologique se distingue par une période des hautes eaux ($C > 1$) et des basses eaux ($C < 1$). En effet, la période de hautes eaux s'étale de Novembre jusqu'en Avril. Elle en résulte des crues violentes caractérisant le mois de Février pour la station d'Ain Aicha et le mois Décembre pour les deux stations Tabouda et Galaz. Par contre, la période de basses eaux s'étale du mois de Mai jusqu'en Novembre pour les trois stations. Elle en résulte des étiages plus sévères pendant le mois de Juillet, Août et Septembre.

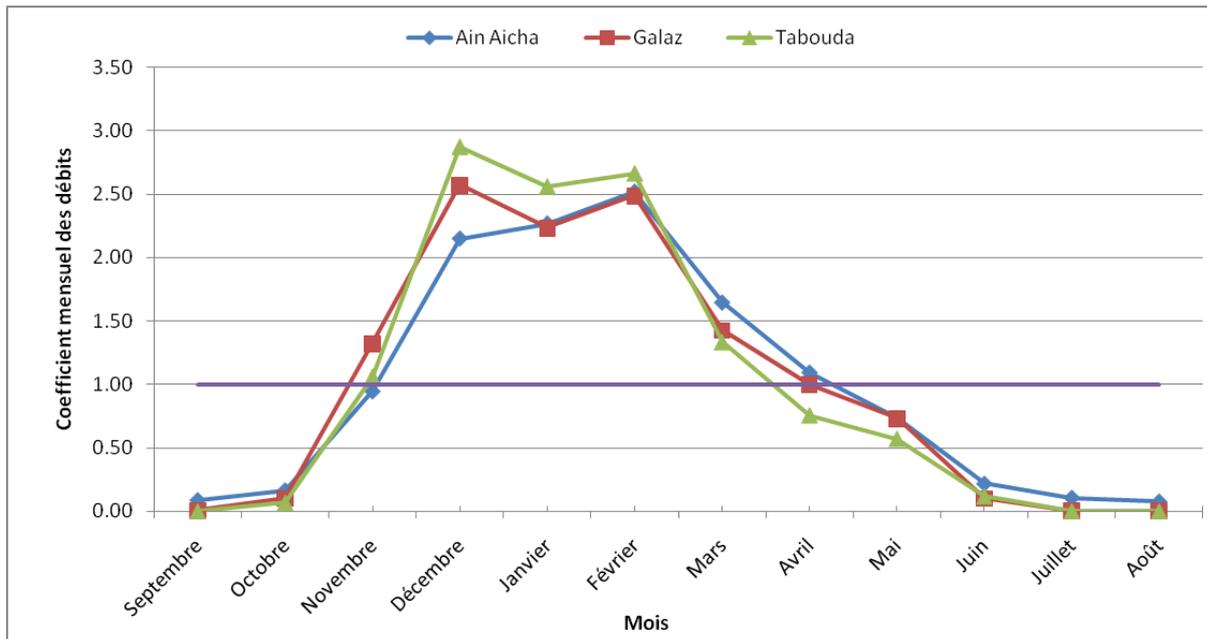


Figure 39: Variation du coefficient mensuel des débits

Ces variations spatio-temporelles, déterminées par le coefficient moyen mensuel des débits, peuvent être expliquées par les caractéristiques physiques du bassin versant, l'intensité pluviale, les particularités hydrodynamiques du milieu et la propagation des eaux. D'autre part, le régime hydrologique de l'oued de l'Ouergha se caractérise par un coefficient mensuel des débits élevés pendant la période pluviale et donc, il peut être parmi les fleuves à régime pluvial.

3. Débits journalières

L'analyse des débits journaliers permet de voir la relation entre précipitations-débits et leurs variations journalières et spatiales. On possède des débits journaliers de la station d'Ain Aicha qui s'étalent de 1981/1982 à 2010/2011.

Dans le but de cette analyse des débits moyens journaliers, on va cibler les débits journaliers de ces années. L'analyse des courbes de débits classés (Fig.40) donne une idée sur le régime d'écoulement.

a) Débit journaliers d'une année humide

Pour l'année humide (2009-2010), l'évolution de la courbe des débits (Fig.40) suit un régime saisonnier. En effet, l'hiver et le printemps sont caractérisés par des débits très importants avec un maximum de 1297 m³/s. L'été correspond à une saison de tarissement, expliquée par la rareté des précipitations, l'accentuation de l'évapotranspiration en plus de nombreux prélèvements anthropiques le long de l'oued. Pendant l'automne, une grande partie de la lame d'eau précipitée ruisselle, étant donné que le sol est complètement sec et étanche à cause d'une longue période estivale et sèche.

b) Débits journaliers d'une année moyenne

Pour l'évolution des débits de l'année moyenne (1986-1987) (Fig.40), l'automne est marqué par des faibles débits. En hiver et en printemps, les crues sont plus importantes et répétées, avec un maximum des débits de l'ordre de 811 m³/s. La saison d'été est toujours sèche. La montée brusque des eaux et leur décroissance progressive s'explique par l'intensité des précipitations et la nature lithologique, en plus du soutien des cours d'eaux par de nombreuses sources.

c) Débits journaliers d'une année sèche

L'année 2006-2007 est la plus sèche du bassin versant de l'oued de l'Ouergha (Fig.40), du fait que l'évolution de ses débits journaliers est différente que celle d'une année humide. Les débits journaliers étaient presque nuls.

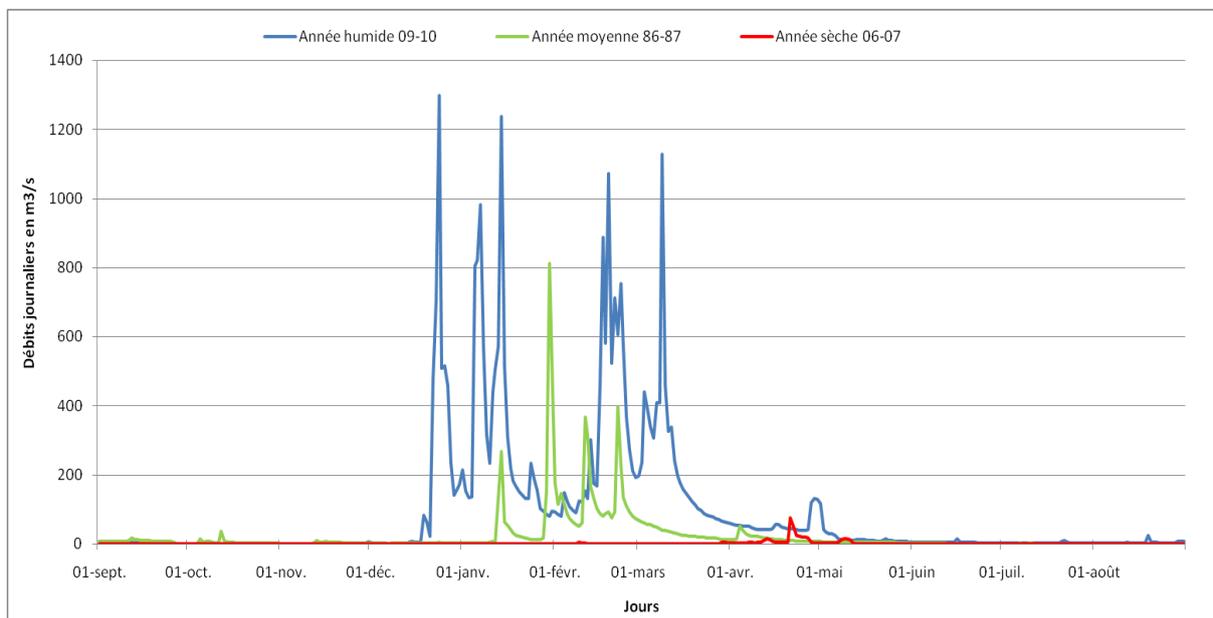


Figure 40: Débits journaliers à la station d'Ain Aicha pour l'année humide, moyenne et sèche

III. Relation entre les débits et les précipitations

1. Relation entre les débits et les précipitations mensuelles

La relation entre la tranche d'eau précipitée et la lame d'eau écoulee, permet de montrer celle entre l'évolution des débits et les hauteurs mensuelles pluviométrique. Lorsqu'on compare les variations mensuelles des débits à l'évolution des précipitations mensuelles des trois stations du bassin de l'oued de l'Ouergha (Fig.41, Fig.42 et Fig.43), on constate qu'il existe une simultanéité entre les débits et les précipitations mensuelles.

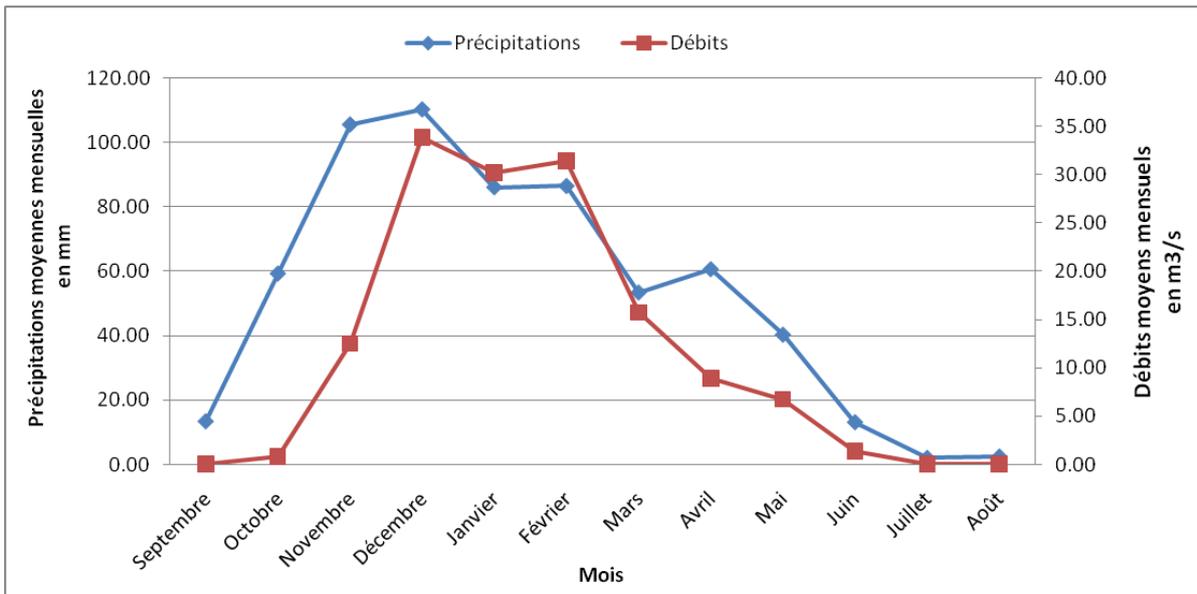


Figure 41: Evolution des précipitations et des débits au niveau de la station de Tabouda

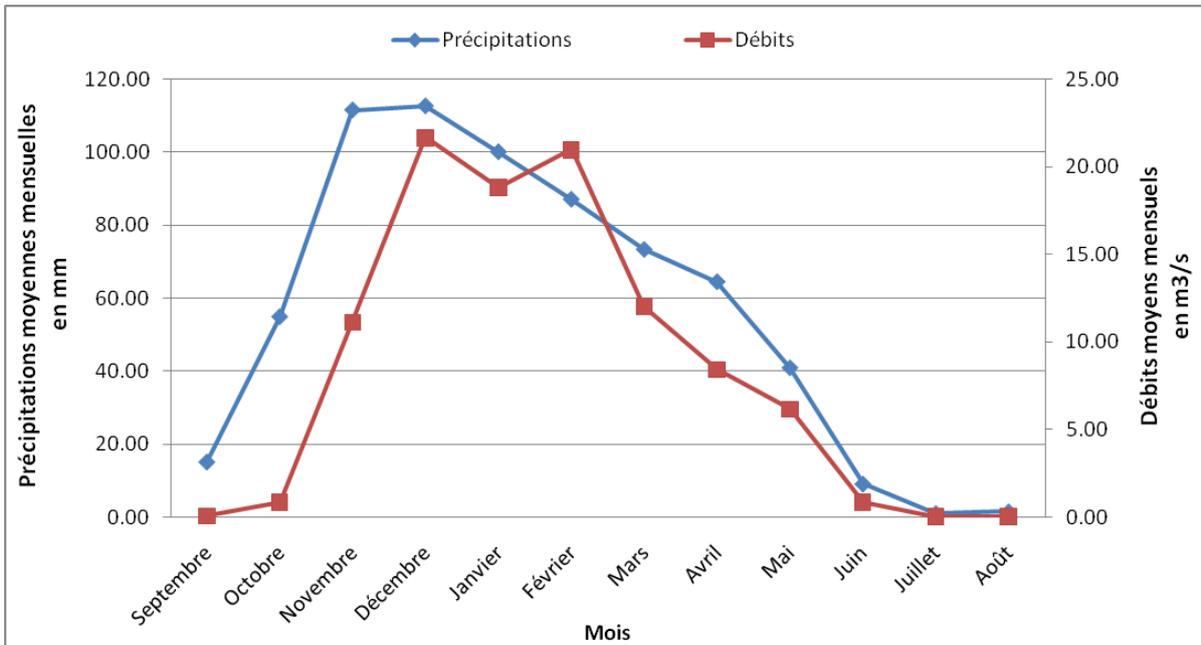


Figure 42: Evolution des précipitations et des débits au niveau de la station de Galaz

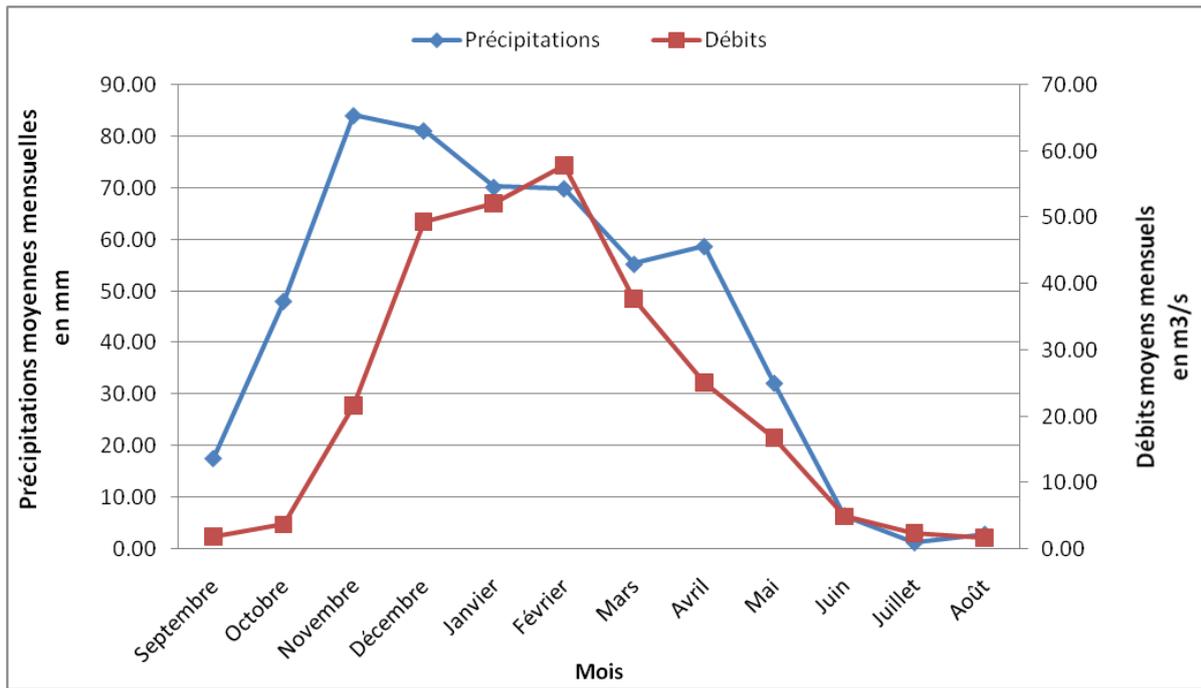


Figure 43: Evolution des précipitations et des débits au niveau de la station d'Ain Aicha

L'analyse de ces figures montrent qu'il y a une succession des crues et des averses. Pour les stations tabouda et Galaz, on assiste à un maximum de précipitation et de débit. En Décembre par contre, la station d'Ain Aicha présente un maximum de précipitation en Novembre suivi d'un maximum de débit avec un retard de deux mois en Février. Ce décalage peut aussi être expliqué par la nature lithologique du bassin versant de l'Ouergha (impluvium essentiellement semi-perméable à perméable). Ainsi, Les eaux qui y précipitent ruissellent immédiatement après leur arrivée au sol. Le retard dû au laps de temps séparant le déclenchement de l'averse et sa circulation après infiltration étant très faible et dénote de ce fait l'imperméabilité du milieu.

Toutefois, la courbe des débits moyens mensuels montre pour les trois stations que le ruissellement répond uniquement aux fortes averses. Les faibles apports des mois de Mars, Avril, Mai, Juin et Juillet peuvent être expliqués par l'évapotranspiration intense et peut être aussi par l'irrigation.

2. Coefficient de ruissellement (Cr)

Le coefficient de ruissellement est le rapport entre la hauteur d'eau ruisselée à la sortie d'une surface considérée "pluie nette" et la hauteur d'eau précipitée "pluie brute". Mais la notion du coefficient de ruissellement reste néanmoins assez délicate d'emploi car, il est loin d'être constant, pour un même site, avec la nature, le volume et l'intensité de la pluie, ainsi qu'avec les divers types de surface (Pratt et al, 1984 ; Schaake et al, 1967 in Zian 2011).

La détermination précise de la valeur de Cr et de ces variations reste donc difficile et passe par des mesures sur site. En effet on adopte la méthode la plus simple pour

déterminer le C_r , qui consiste à utiliser le rapport de la lame d'eau écoulée (H en mm) sur la lame précipité (P en mm)

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

Les valeurs du coefficient de ruissellement sont de 9%, 6% et 22% respectivement pour la station Tabouda, Galaz et Ain Aicha.

3. Bilan Hydrologique

La détermination du bilan hydrologique consiste à faire le recensement des apports d'une part et des sorties (ou perte) d'autre part, en se rapportant à une unité de volume nettement délimitée pour une période de référence bien déterminée. Dans la formulation la plus générale, le bilan s'écrit :

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

Avec :

P : Précipitation annuelle moyenne du bassin versant en (mm)

Q : Débit d'écoulement total en (mm/an)

ETR : Evapotranspiration réelle du bassin versant (mm)

R : Ruissellement en (mm)

I : Infiltration en (mm/an)

ΔR : Variation des reserves

a) Ecoulement total

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

Avec :

P : Précipitation annuelle moyenne du bassin versant en (mm)

ETR : Evapotranspiration réelle du bassin versant (mm)

Q : Débit d'écoulement total en (mm/an)

D'où $Q=217.4$ mm/an, soit 29.3% de P

Par conséquent, le volume écoulé (V_e) peut être déduit à partir du volume annuel précipité (V_p) déjà calculé, et ce en se basant sur l'estimation de la moyenne de la lame d'eau tombée, dans le chapitre de la climatologie.

$$V_e = 29.3 \times 10^{-2} \times V_p \text{ Avec } V_p = 4956.4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$$

Donc : **$V_e = 1452.1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$.**

b) Le ruissellement

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

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

Avec

R : ruissellement en (mm)

P : précipitation moyenne annuelle (741 mm)

ETP : évapotranspiration potentielle (989.34mm)

D'où $R = 138.56 \text{ mm/an}$, soit 18.69% de P

$$V_R = 18.69 \times 10^{-2} \times V_p \text{ Avec } V_p = 4956.4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$$

Donc : **$V_R = 926.35 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$.**

c) Infiltration

L'infiltration représente la quantité d'eau qui pénètre dans le sol et le sous sol pour alimenter les aquifères. Ce paramètre est difficile à évaluer car il échappe aux mesures directes. Grâce à l'équation du bilan hydrique, on peut déduire les infiltrations :

$$P = ETR + R + I \quad \longleftrightarrow \quad I = P - (ETR + R)$$

Avec :

I : infiltration en (mm)

R : ruissellement ($R = 138.56 \text{ mm/an}$)

ETR : Evapotranspiration réelle du bassin versant (523.6mm/an)

P : précipitation moyenne annuelle (741mm/an)

D'où $I = 78.84 \text{ mm/an}$, soit 10.63% de P

On a $V_i = 10.63 \times 10^{-2} \times V_p$ Avec $V_p = 4956.4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$

Donc $V_i = 526.86 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$.

IV. Etudes des crues

Les crues constituent des situations qui ne peuvent être cernés que dans leur succession chronologique allant quelques heures à plusieurs jours. Leur analyse constitue une prévision des risques et des défaillances en année de bonne ou mauvaise hydraulicité.

Selon Frécaut (1972), il convient de distinguer crues et hautes eaux. Certes, les hautes eaux moyennes représentent une situation saisonnière durable. Les crues au contraire, constituent avec les étiages extrêmes le comportement des cours d'eaux. Il s'agit de gonflements fluviaux exceptionnels et irréguliers, tant en saison froide (période de hautes eaux), qu'en saison chaude (période de basses eaux). Pour certains auteurs, les crues sont des débits égaux ou supérieurs à un certain multiple du module annuel.

D'après Remeniaras (1976), une crue annuelle est le débit le plus fort observé dans l'année. On peut caractériser une crue par un débit maximum instantané observé au cours du phénomène qui s'appelle débit de pointe.

1. Etude des débits maxima instantanés annuels

L'étude des crues est portée sur les débits maxima instantanés. Les débits maxima instantanés annuels pour les deux stations d'Ain Aicha et Galaz, en fonction de leurs périodes correspondantes, sont représentés dans les (Fig.44 et Fig.45).

L'examen de ces figures révèle que le maximum annuel survient généralement en Décembre, Janvier et Février. Ainsi, on peut considérer les crues survenant en Novembre, Décembre et en Janvier comme normales, c'est-à-dire se produisant à un moment où leur probabilité d'occurrence est maximale (ce sont les mois les plus pluvieux de l'année).

On remarque d'ailleurs qu'elles sont survenues en années fortement déficitaires et précoces sur le plan apport pluviométrique. Enfin, les crues des mois d'Avril et Mai sont de toute évidence tardive.

Ces variations spatio-temporelles, des débits de pointes, peuvent être expliquées par les caractéristiques physiques du bassin, la pluviosité, les particularités hydrodynamiques du milieu et la propagation des eaux. Les débits de pointes enregistrés aux stations d'Ain Aicha et Galaz feront l'objet d'une étude statistique dont le but est d'assigner au débit maximal une probabilité d'occurrence.

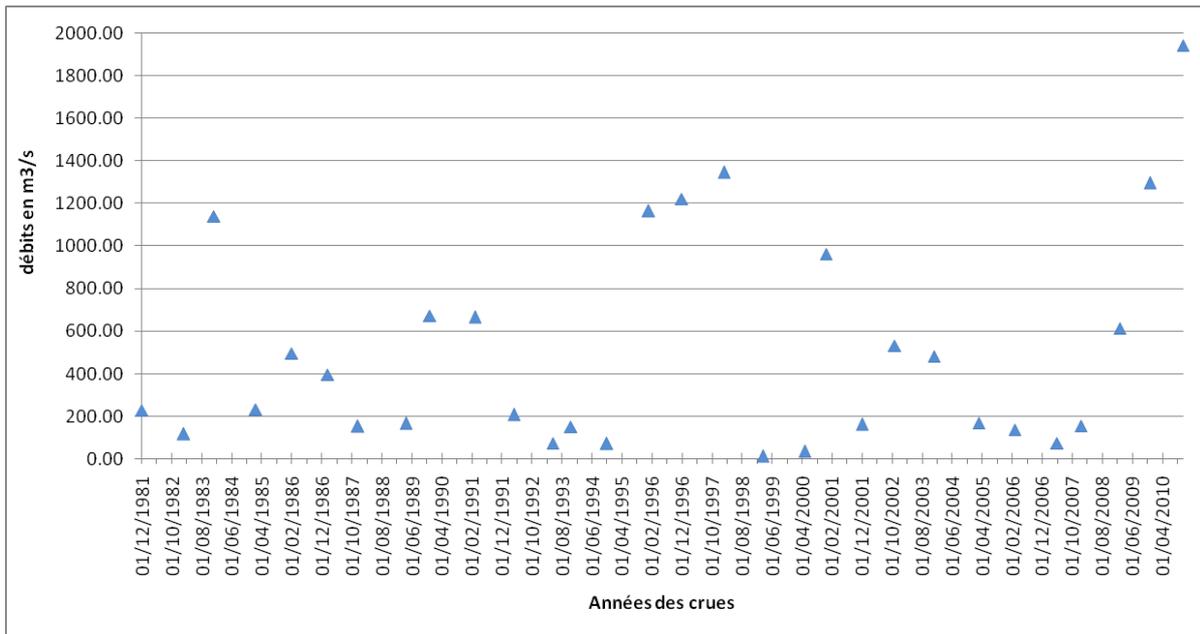


Figure 44: Les débits maxima instantanés pour la station d'Ain Aicha

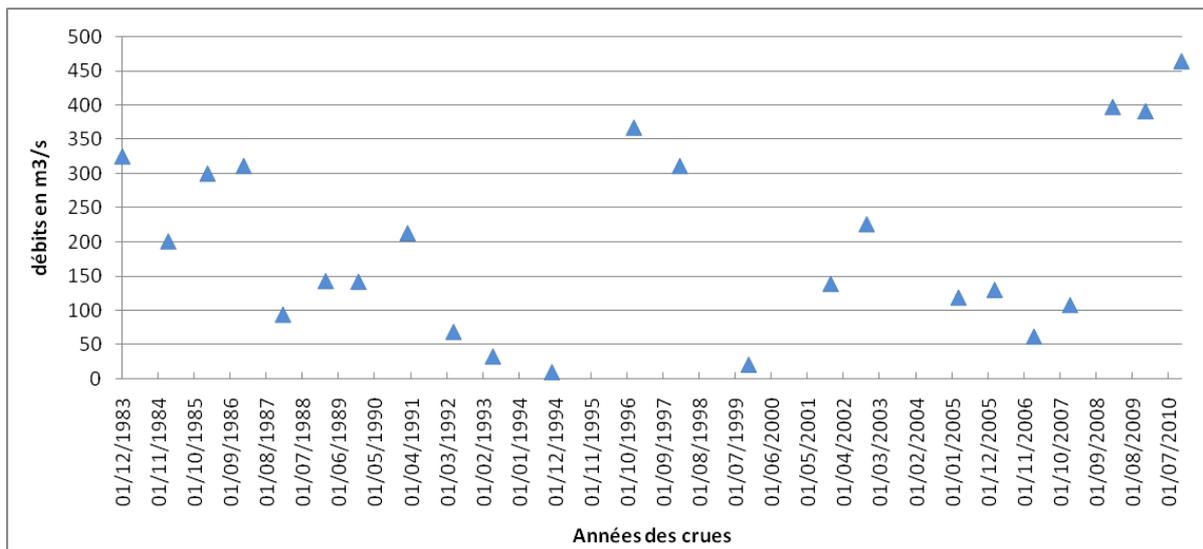


Figure 45: Les débits maxima instantanés pour la station Galaz

2. Puissance des crues

Les crues sont caractérisées par leur soudaineté et leur violence. La puissance d'une crue peut être déterminée par le coefficient de Mayer et Coutagne dont la formule est la suivante.

$$I = \frac{Q}{\sqrt{S}}$$

Avec :

Q : le débit maximum de crue (m³/s)

S : surface du bassin versant (Km²)

Les valeurs de l'indice de Mayer et Coutagne «I» (Fig.46, Fig.47) à la station d'Ain Aicha sont beaucoup plus importantes que celle des crues à la station de Galaz, ce qui confirme une variation spatiotemporelle de la pluviométrie et des crues brutales et violentes surtout en amont du bassin.

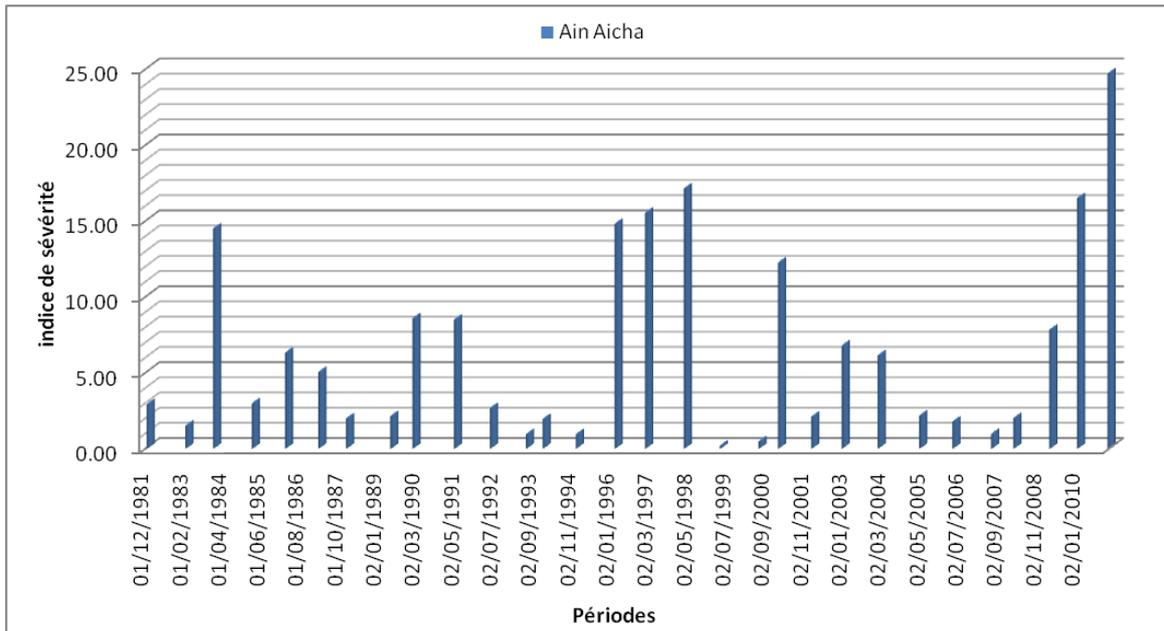


Figure 46: Evolution des indices de sévérité dans la station d'Ain Aicha

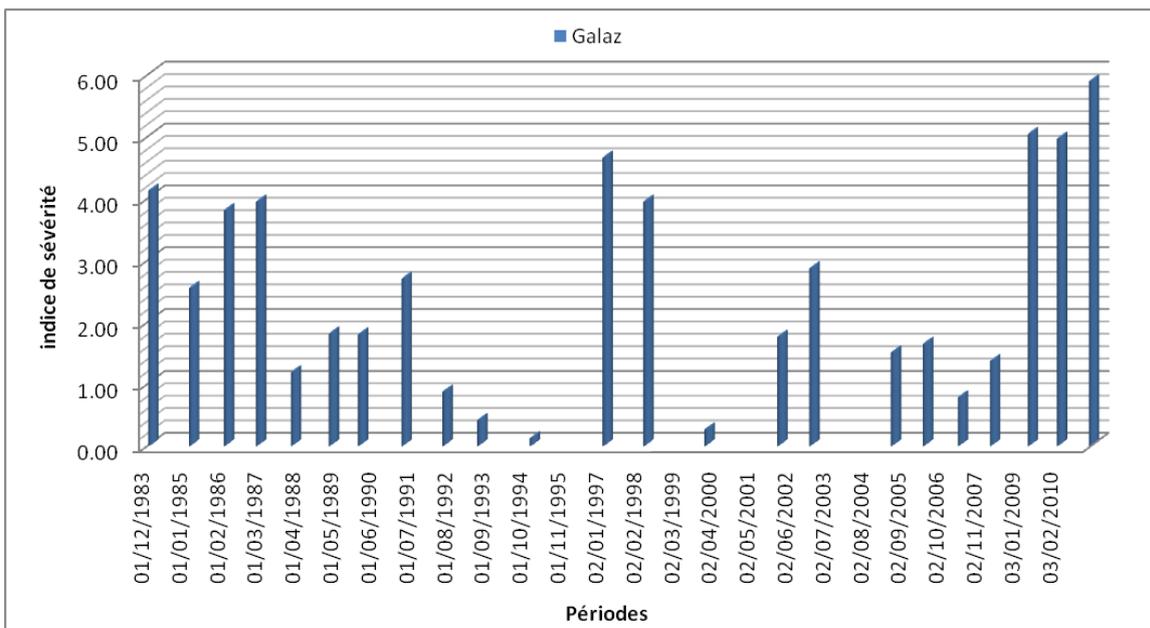


Figure 47: Evolution des indices de sévérité dans la station de Galaz

3. Analyse fréquentielle des crues maximales annuelles

Cette méthode est basée sur l'analyse statistique des débits maxima instantanés relevés en calculant la probabilité pour qu'un débit supérieur à une valeur fixée survienne un nombre de fois donné pendant une durée donnée. Cette méthode est conditionnée par la vérification de certaines conditions à savoir l'homogénéité, l'indépendance et la stationnarité des événements. La variable aléatoire, dans cette analyse statistique ou analyse fréquentielle, est donc le débit maximal instantané de crue. Sa distribution est étudiée en l'ajustant sur une des lois théoriques de probabilité connue de façon à interpréter aussi fidèlement que possible l'observation disponible (Wolting, 1999).

Après avoir extrait les débits maximums annuels de la série de débits journaliers disponibles, on doit s'assurer que cette série ainsi extraite, respecte certaines hypothèses de base afin que l'analyse de fréquence soit théoriquement acceptable. Bien que parfois, les données ne représentent pas des lacunes de mesures, il est important de contrôler leur fiabilité, du fait que les mesures de débits disponibles peuvent être affectés par certaines erreurs de différentes origines.

Ces hypothèses sont :

- ❖ L'homogénéité de l'échantillon, c'est-à-dire que toutes les observations proviennent de la même population statistique et que les caractères du phénomène étudié ne varient pas dans le temps en raison d'une intervention humaine ou des conditions particulières telles que les variations climatiques.
- ❖ L'indépendance des observations de l'échantillon, c'est-à-dire qu'aucun débit de la série n'est conditionné par les valeurs précédentes ou n'influence les débits suivants. Généralement les valeurs maximums annuelles de débit ne sont pas auto-corrélées, ce qui n'est pas le cas pour un échantillon de valeurs journalières ou hebdomadaires où chaque observation dépend des précédentes et est reliée aux observations suivantes.
- ❖ La stationnarité s'agit de vérifier l'indépendance temporelle des propriétés statistiques (moyenne, variance...) de la loi qui régit le phénomène.

4. Données et méthode d'analyse

Les séries étudiées représentent les débits instantanés maximums mesurés au niveau des deux stations permanentes (Ain Aicha et Galaz). Elles ne sont pas de la même étendue et ne se rapportent pas, par conséquent, toujours à la même période. Nous avons soumis ces données à une analyse fréquentielle moyennant le logiciel « Hydrology Frequency Analysis » (HYFRAN) conçu spécialement pour le traitement des données hydrologiques extrêmes.

HYFRAN est un logiciel d'ajustement des lois statistiques comprenant un ensemble d'outils mathématiques puissants, conviviaux et flexibles permettant en particulier l'analyse statistique des événements extrêmes et de manière plus générale l'analyse statistique des séries de données. HYFRAN a été développé par l'équipe de Bobée et son groupe de

recherche à l'Institut National de la Recherche Scientifique Eau, Terre - Environnement de l'université du Québec avec le parrainage d'hydro-Québec.

L'échantillon est soumis à un ajustement selon un ensemble de lois statistiques et à partir d'une analyse comparative des résultats, nous choisirons par la suite la meilleure adéquation.

a) Test d'homogénéité de Mann Whitney

Ce test permet de vérifier l'hypothèse d'homogénéité en comparant deux échantillons. La méthode consiste à diviser la série d'observation en deux groupes afin de les comparer sur la base des classements relatifs des valeurs prises par la variable des unes par rapport aux autres dans les deux échantillons. Ainsi, deux hypothèses H0 et H1 sont formulés :

H0 : les deux groupes sont issus de la même population,

H1 : les deux groupes sont issus des populations différentes

L'hypothèse H0 est testée contre H1 de confiance $\alpha = 5\%$. On détermine par la suite le rang de chacune des valeurs observées dans les deux groupes par rapport à l'ensemble des valeurs. Si on considère U1 et U2 les quantités calculées respectivement pour l'échantillon 1 et 2, leur évaluation est exprimée par la formule suivante :

$$U_1 = \frac{n_1 n_2 + (n_1(n_1 + 1))}{2} - Sr_1 \text{ (groupe 1)}$$

$$U_2 = \frac{n_1 n_2 + (n_2(n_2 + 1))}{2} - Sr_2 \text{ (groupe 2)}$$

Avec :

n_1 : taille du groupe 1 ; Sr_1 : sommes des rangs des valeurs du 1^{er} groupe

n_2 : taille du groupe 2 ; Sr_2 : sommes des rangs des valeurs du 2^{ème} groupe

Pour les données des deux stations, l'échantillon étudié a montré que la quantité de U calculée est supérieure à celle tabulée. L'hypothèse H0 est donc admise, ce qui prouve que le test d'homogénéité est positif.

b) Test d'indépendance de Wald Wolfowitz

C'est un test auto-corrélateur qui vérifie l'indépendance de deux échantillons subdivisés à partir de l'échantillon global. Ce test, est connu également comme test de l'aléa, utilisé pour tester l'hypothèse selon laquelle une série de nombre est aléatoire. La procédure consiste à ranger les valeurs de chaque groupe par ordre croissant tout en attribuant un code propre pour les valeurs de chaque ordre. On considère que l'hypothèse H0 d'indépendance est vérifiée L'ordre d'apparition des valeurs issues de deux groupes sera dû au hasard.

Le programme HYFRAN calcule la plus grande valeur statistique du test U et l'acceptation à un niveau $\alpha = 5\%$. Cette valeur doit remplir la condition suivante :

$$-U_{\alpha/2} \leq U \leq U_{\alpha/2}$$

La valeur critique au niveau 5% :

- 0.07 au niveau de la station d'Ain Aicha
- 1.3 au niveau de la station de Galaz

La décision sur l'hypothèse H_0 d'indépendance peut se faire autrement, en se basant sur la probabilité critique P (ou niveau de dépassement, ou au niveau de signification. La valeur p, fournie par la plus part des logiciels de test, comparée au risque de première espèce qu'on accepte de prendre, permet de conclure :

Si $P \leq \alpha$, on rejette H_0

Si $P \geq \alpha$, on accepte H_0

Le résultat du test Wald Wolfowitz sur les données de la station d'Ain Aicha montre que U calculée est comprise entre les valeurs critiques $-0.07 \leq U \leq 0.07$ et $P = 0.94 > \alpha$, et pour la station de Galaz $-1.3 \leq U \leq 1.3$ et $P = 0.19 > \alpha$.

Donc l'hypothèse de H_0 est acceptée au niveau de la signification de 5% pour les deux stations et par conséquents les observations sont indépendantes.

c) Test de stationnarité (Kendal)

Suite à un changement brusque ou graduel des dates d'échantillonnage, la stationnarité de l'échantillon sera affectée. Par conséquent, la vérification de cette stationnarité peut être faite par le test de Kendal. Ainsi, deux hypothèses H_0 et H_1 sont formulées :

H_0 : il n y a aucune tendance dans les observations

H_1 : il y a une tendance dans les observations

Les résultats de ce test sont représentés dans ce (Tab.16) suivant :

Tableau 16: Résultats du test de Kendal sur les données issues des deux stations

Station	Valeur de la statistique K	Probabilité critique P
Ain Aicha	0	1
Galaz	0.77	0.43

Donc l'hypothèse H_0 peut être acceptée au niveau de la signification de 5%.

5. Statistique de base

a) Résultats de statistique de base

Les résultats des statistiques de base pour les séries des débits maximums pour la station d'Ain Aicha et celle de la station de Galaz figurent dans le tableau (17) suivant :

Tableau 17: Résultats des statistiques de base de l'oued de l'Ouergha dans les deux stations

Statistique de base	Ain Aicha	Galaz
Nombre de donné	30	23
Minimum	14	10
Maximum	1940	464
Moyenne	503	199
Ecart type(σ)	502	134
Médiane	231	143
Coefficient de variation	0.99	0.67
Coefficient d'asymétrie	1.24	0.39
Coefficient d'aplatissement	3.27	1.76

Ces résultats nous permettent de ressortir les conclusions suivantes :

-Les valeurs extrêmes Max et Min de la station d'Ain Aicha sont plus importantes que celles de la station de Galaz, aussi pour les éducateurs de localisation (Moyenne et Médiane), la même chose pour les éducateurs de dispersions (Ecart type, coefficient de variation). Nous pouvons donc conclure que les crues de la station d'Ain Aicha sont plus importantes que celles de Galaz. L'écart type représente une variabilité absolue.

-le coefficient de variance permet de mettre en évidence de fortes variations de débits au niveau de la station d'Ain Aicha par rapport à la station de Galaz.

-Les paramètres de formes concrétisés par le Coefficient d'asymétrie et le Coefficient d'aplatissement nous permettent de conclure sur la répartition de l'échantillon ou de la distribution autour de la moyenne et la forme de la courbe de fréquence.

Le coefficient d'asymétrie et le coefficient d'aplatissement pour les deux stations sont positifs, ce qui permet de conclure, qu'on est devant une asymétrie gauche de la distribution.

b) Histogramme de fréquence

L'histogramme de fréquence est une représentation graphique de la distribution d'une variable quantitative et il permet une représentation claire où l'aire des rectangles représente fidèlement la fréquence de chaque classe (Morgenthaler, 1997).

Les histogrammes des fréquences (Fig.48 et Fig.49) sont plus élevés à gauche pour les deux stations. Cette allure confirme l'asymétrie gauche de la distribution, déjà mise en évidence par le coefficient d'asymétrie.

La classe des débits la plus fréquente pour la station d'Ain Aicha est [0 – 250] et pour la station de Galaz [62 – 124]. Par contre, les classes les moins fréquentes sont celles de [1500 – 1750] pour la station d'Ain Aicha et [248 – 310];[372 – 434] pour la station de Galaz.

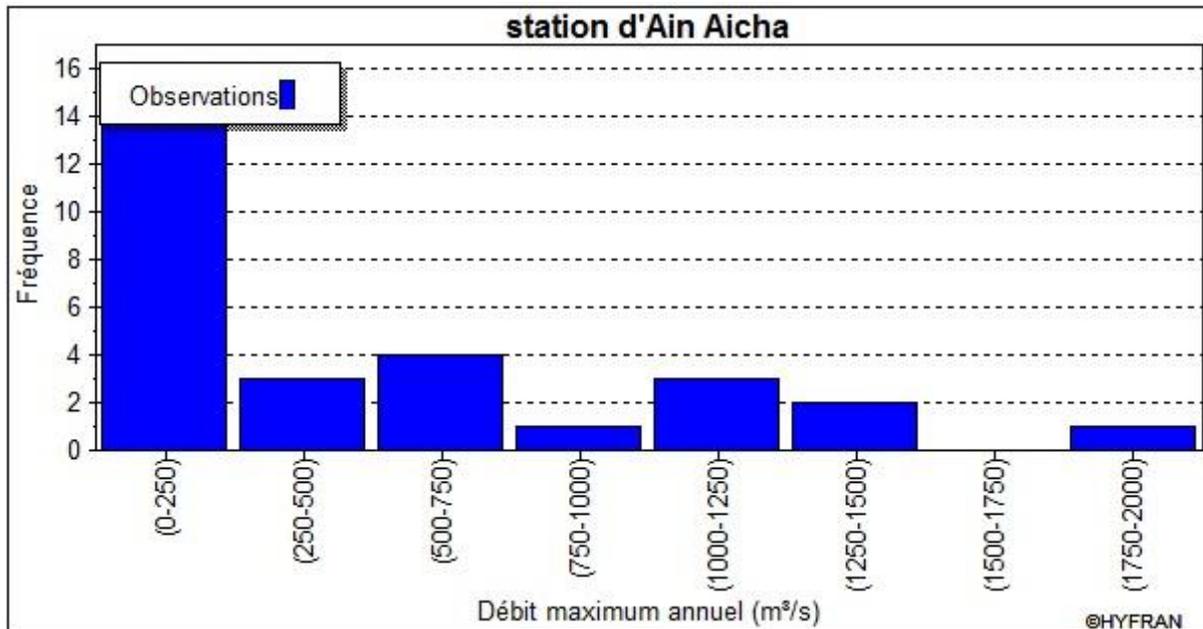


Figure 48: Histogramme de fréquence des débits maximum annuel pour la station d'Ain Aicha

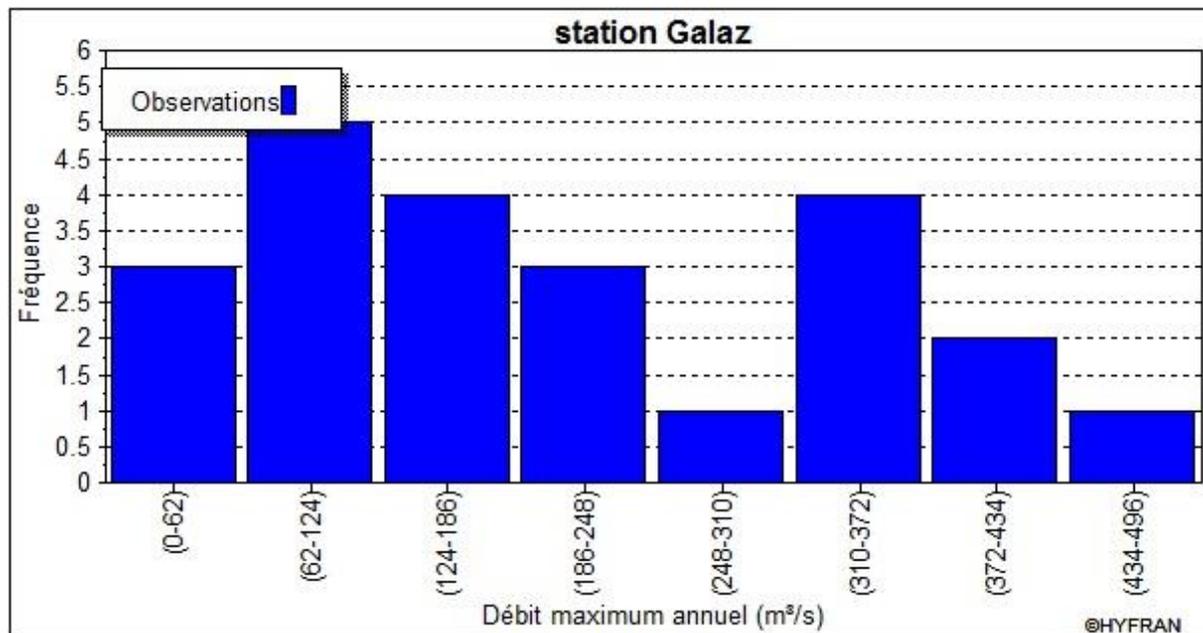


Figure 49: Histogramme de fréquence des débits maximum annuel pour la station de Galaz

c) Ajustement aux lois statistiques

Les séries des débits maximums annuels ont été utilisées pour l'analyse fréquentielle. Des lois statistiques pour l'étude des événements extrêmes ont été utilisées pour leurs ajustements. Il n'existe pas de règle théorique pour justifier le choix d'une telle

loi. Cependant, puisque on dispose des variables aléatoires représentant des crues maximales annuelles, les lois des valeurs extrêmes sont plus adéquates à la loi de Gamma, Gumbel, Jenkinson et Log Pearson III. Par conséquent, il existe des tests d'ajustements pour juger la qualité d'ajustement d'une loi théorique sur un échantillon d'observation.

Lorsque plusieurs lois peuvent être retenues, on peut choisir en fonction des considérations suivantes :

- ❖ Une loi à trois paramètres (ou plus) décrira correctement l'échantillon des observations (bon ajustement) mais en extrapolation, des incertitudes seront grandes.
- ❖ Une loi à deux paramètres décrira parfois moins bien les fréquences observées par contre en extrapolation, les incertitudes seront moins grandes que pour une loi k > 2 paramètres.

Ainsi le choix peut être guidé par l'usage que l'on veut faire des lois théoriques (descriptives ou extrapolation). Par conséquent, de ce qui est évoqué, seules les lois qui étaient réellement représentatives de l'échantillon ont été retenues pour chaque station donnée, aux intervalles de confiance à 95%.

c.1) Ajustement à la loi de Gumbel (méthode de vraisemblance)

La loi de Gumbel (Fig.50, Fig.51) s'ajuste particulièrement bien à la modélisation des événements extrêmes comme les crues (Meylan et Mesy, 1996 et El Morjani, 2003). Elle utilise une fonction double exponentielle avantageuse par l'utilisation de deux paramètres statistiques (paramètre de dispersion α et de position β), ce qui garanti une certaine robustesse à l'ajustement.

Soient :

X : une variable aléatoire appartenant à $]-\infty; +\infty[$ et suivant une loi de Gumbel

U : la variable définie par :

$U = \frac{X - \alpha}{\beta}$: C'est la variable réduite de Gumbel

La fonction densité de probabilité de la variable réduite est :

$$f_u(U) = e^{-U} e^{-e^{-U}} \quad (1)$$

D'où l'expression pour une variable x quelconque :

$$f_x(X) = \frac{1}{\beta} e^{-\frac{x-\alpha}{\beta}} e^{-e^{-\frac{1}{\beta}(x-\alpha)}} \quad (2)$$

La fonction de répartition de la variable réduite est :

$$F_u(U) = e^{-e^{-U}} \quad (3)$$

Et pour une variable x :

$$F_x(X) = e^{-e^{-\frac{1}{\beta}(x-\alpha)}} \quad (4)$$

On a obtenu les résultats suivants :

Tableau 18: Résultat de l'ajustement à la loi de Gumbel (Maximum de vraisemblance) pour les deux stations

Station	α	β	Résultat statistique (X2)	Probabilité critique (P)	Degré de liberté	Nombre de classe
Ain Aicha	332.18	285.35	21.80	0.0002	4	7
Galaz	112.15	134.21	4.70	0.32	4	7

Hypothèse :

-H0 : L'échantillon provient d'une loi de Gumbel

-H1 : L'échantillon ne provient pas d'une loi de Gumbel

Remarque :

- Au niveau de la station Ain Aicha, nous devons rejeter H0 au niveau de signification de 5%, mais on l'accepte au niveau de signification de 1%.
- Au niveau de la station Galaz, nous pouvons accepter H0 au niveau de signification de 5%.

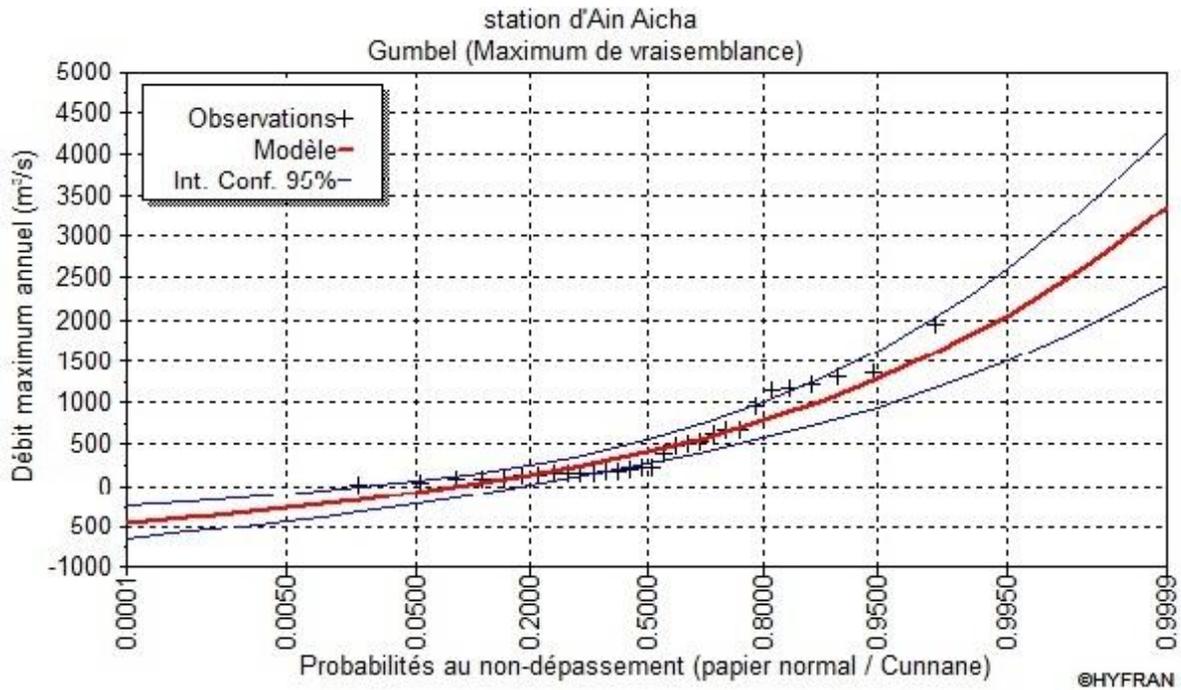


Figure 50: Ajustement graphique de la série maxima instantanée à la loi Gumbel pour la station d'Ain Aicha

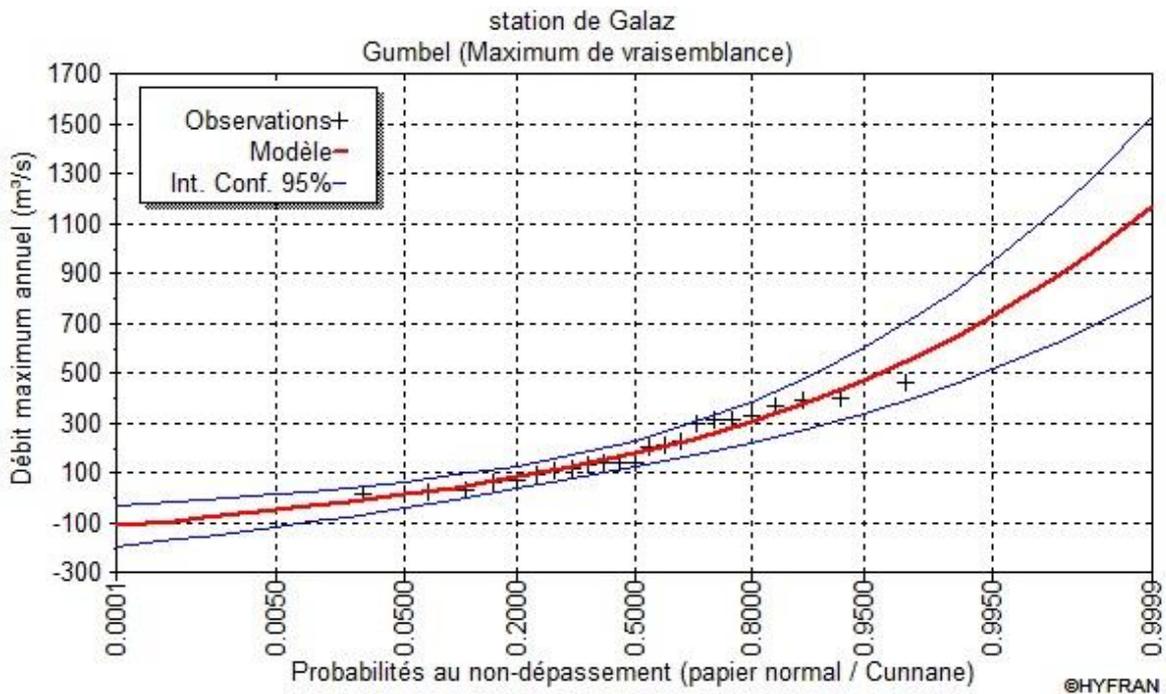


Figure 51: Ajustement graphique de la série maxima instantanée à la loi Gumbel pour la station de Galaz

c.2) Ajustement à la loi de Jenkinson GEV (méthode des moments pondérés)

L'estimation des moments pondérés (Fig.52, Fig.53) est une méthode statistique courante utilisée pour inférer les paramètres de la distribution de probabilité d'un échantillon donné. C'est une méthode de trois paramètres k , α et u .

k : Position variable s'assimilant en quelque sorte à la valeur moyenne pour une loi normale.

α : Echelle d'assimilant en quelque sorte à l'écart type (standard déviation) pour une loi normale centrée réduite.

u : Non nul qui forme la distribution.

Suivant le signe du paramètre k on trouve trois types de loi :

- $k > 0$: le domaine de variation des valeurs extrêmes est borné
- $k < 0$: le domaine de variation des valeurs extrêmes est illimité
- $k = 0$: on montre qu'alors $f(x)$ et $F(x)$ tendent une loi de Gumbel de deux paramètres u et α .

La fonction de densité de probabilité est exprimée par la formule suivante :

$$f_x(x) = \frac{1}{\alpha} \left[1 - \frac{k}{\alpha}(x-u) \right]^{\frac{1}{k}-1} e^{-\left[1 - \frac{k}{\alpha}(x-u) \right]^{\frac{1}{k}}}$$

La formule de répartition est :

Pour $K \neq 0$:

$$F(x) = e^{-\left[1 + \frac{k}{\alpha}(x-u) \right]^{\frac{1}{k}}}$$

Pour $K=0$:

$$F(x) = e^{-e\left(\frac{x-u}{\alpha}\right)}$$

Le quantile associé à la période de retour T est :

$$X_T = u - \frac{\alpha}{k} \left[1 - \left(-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right)^{-K} \right]$$

Hypothèse :

- H_0 : l'échantillon provient d'une loi de GEV
- H_1 : l'échantillon ne provient pas d'une loi de GEV

On a obtenu ce (Tab.19) suivant :

Tableau 19: Résultats et les paramètres du test de l'ajustement à la GEV pour les deux stations

Station	Paramètres			Résultat			
	k	α	u	Résultat statistique (X2)	Probabilité critique (P)	Degré de liberté	Nombre de classe
Ain Aicha	-0.26	281.56	242.65	17.13	0.0007	3	7
Galaz	0.09	121.63	138.85	3.48	0.32	3	7

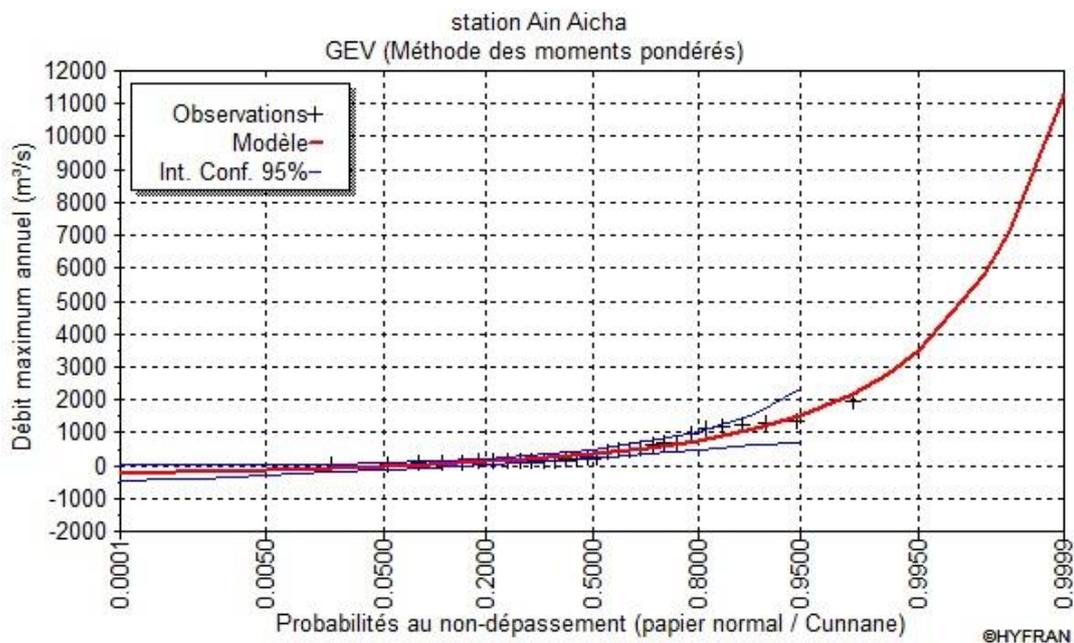


Figure 52: Ajustement graphique de la série des débits maxima instantanée à la loi de GEV pour la station Ain Aicha

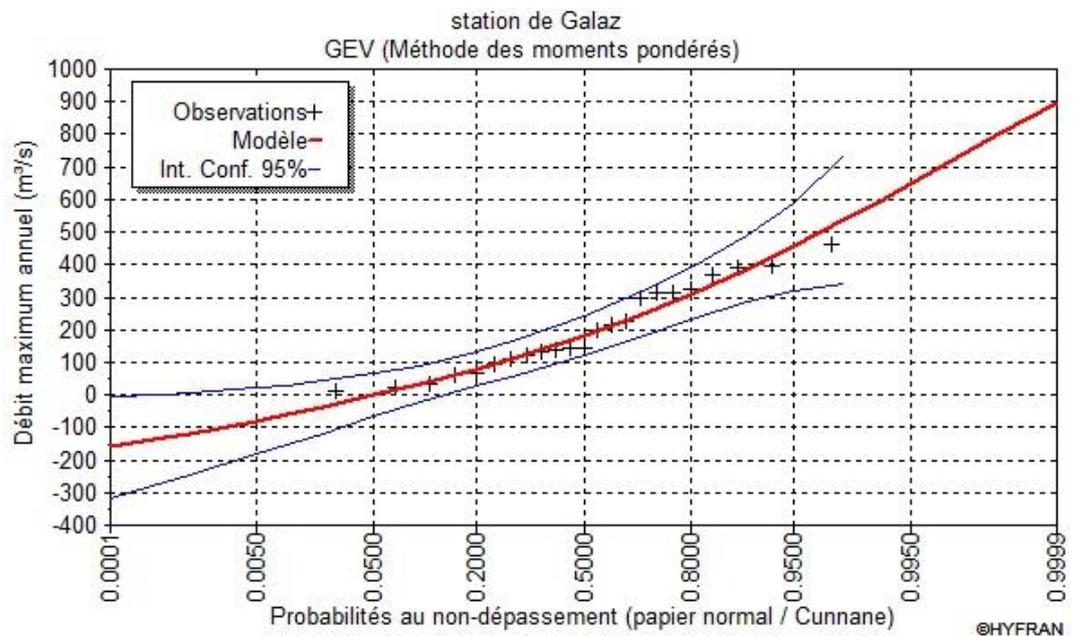


Figure 53: Ajustement graphique de la série des débits maxima instantanée à la loi de GEV pour la station Galaz

Donc l'hypothèse de H0 est acceptée au niveau de la signification de 5% pour la station Galaz et pour la station d'Ain Aicha, nous devons rejeter H0 niveau de la signification de 1%.

c.3) Ajustement de la loi de Gamma (ou pearson)

Ajustement de la loi de Gamma (Fig.54, Fig.55) qui est une loi à deux ou trois paramètres. Cette distribution convient pour modéliser les variables qui sont bornées inférieurement et n'ont pas de limite supérieure. La fonction de densité de probabilité est exprimée par la formule suivante :

$$f(x) = \frac{\alpha^\lambda}{\tau(\lambda)} x^{\lambda-1} e^{-x}$$

Avec :

$x > 0$

α : Paramètre de forme

λ : Paramètre d'intensité

$\tau(\lambda)$: La fonction Gamma

On a obtenu ce (Tab.20) suivant :

Tableau 20: Résultats et paramètres du test de l'ajustement à la loi de Gamma pour les deux stations

Station	α	λ	Résultat statistique (X2)	Probabilité critique (P)	Degré de liberté	Nombre de classe
Ain Aicha	0.002	1.01	7.33	0.12	4	7
Galaz	0.008	1.62	0.43	0.98	4	7

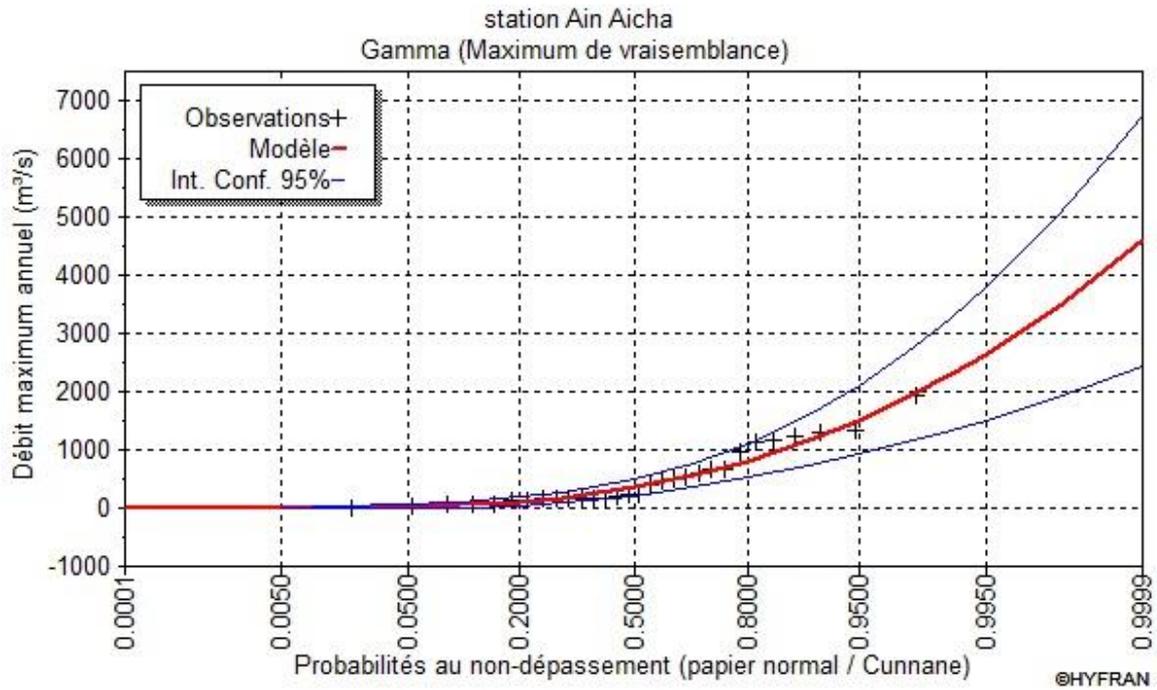


Figure 54: Ajustement graphique de la série des débits maxima instantanés à la loi de Gamma pour la station d'Ain Aicha

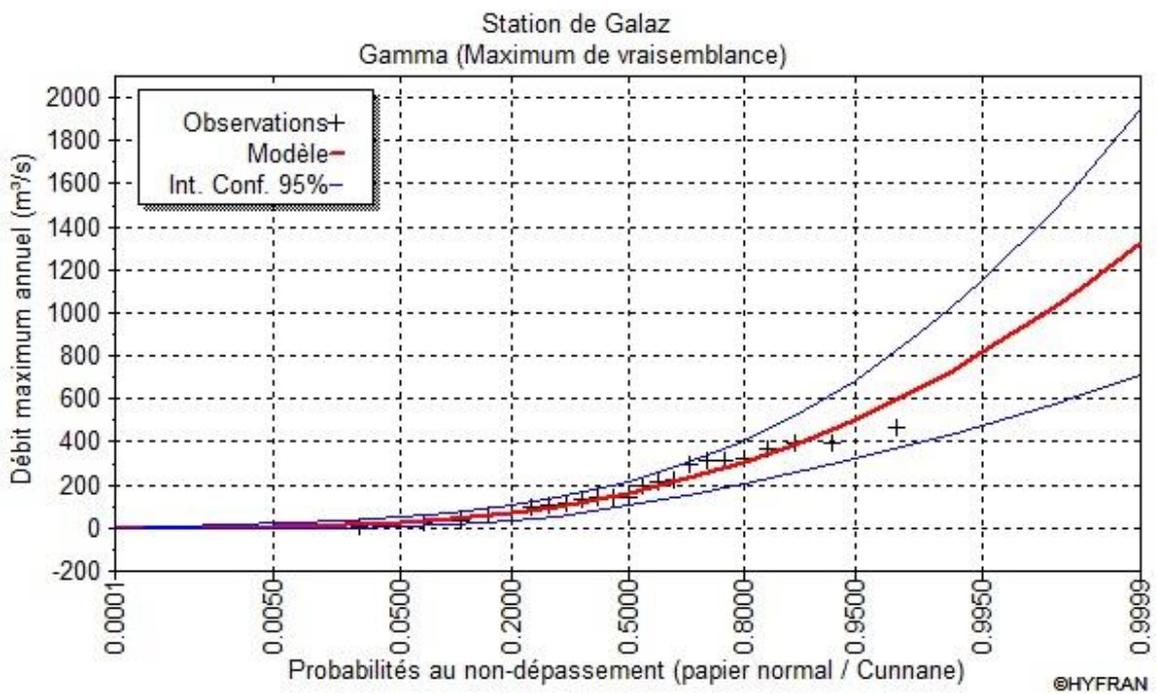


Figure 55: Ajustement graphique de la série des débits maxima instantanés à la loi de Gamma pour la station de Galaz

Hypothèse :

- H_0 : L'échantillon provient d'une loi de Gamma
- H_1 : L'échantillon ne provient pas d'une loi de Gamma

Donc l'hypothèse H0 est acceptée au niveau de signification de 5% pour les deux stations.

c.4) Ajustement de la loi de Log Pearson III (méthode des moments)

Ajustement de la loi de Log Perason III (Fig.56, Fig.57) qui est une loi à trois paramètres. Sa fonction de densité de probabilité s'écrit :

$$f_x(x) = \frac{\alpha^\lambda}{x\Gamma(\lambda)} (\ln - m)^{\lambda-1} e^{-\alpha(\ln x - m)}$$

Avec :

Les paramètres $\alpha \neq 0, \lambda > 0$ et $\Gamma(\lambda)$ fonction Gamma

La fonction de répartition est :

$$F(x) = \frac{\tau[-\alpha(\ln x - m)]}{\tau(\lambda)}$$

On a obtenu ce (Tab.21) suivant :

Tableau 21: Résultats et les paramètres du test de l'ajustement à la loi de Log Pearson III pour les deux stations

Station	Paramètres			Résultat			
	α	λ	m	Résultat statistique (X2)	Probabilité critique (P)	Degré de liberté	Nombre de classe
Ain Aicha	-2.04	2.04	3.37	15.27	0.001	3	7
Galaz	-2.61	1.46	2.70	4.70	0.19	3	7

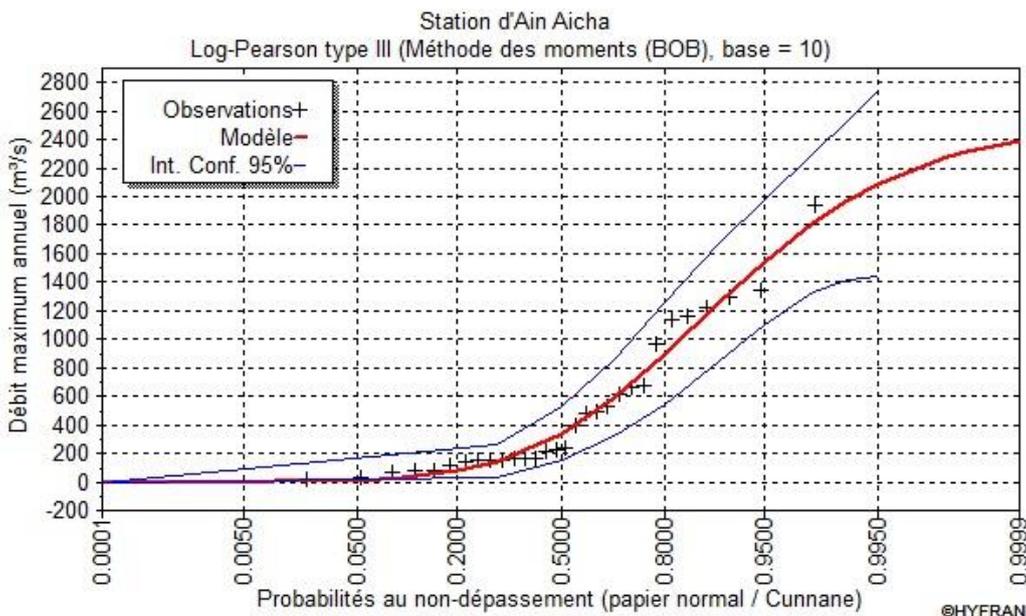


Figure 56: Ajustement graphique de la série des débits maxima instantanée à la loi de Log Perason III pour la station Ain Aicha

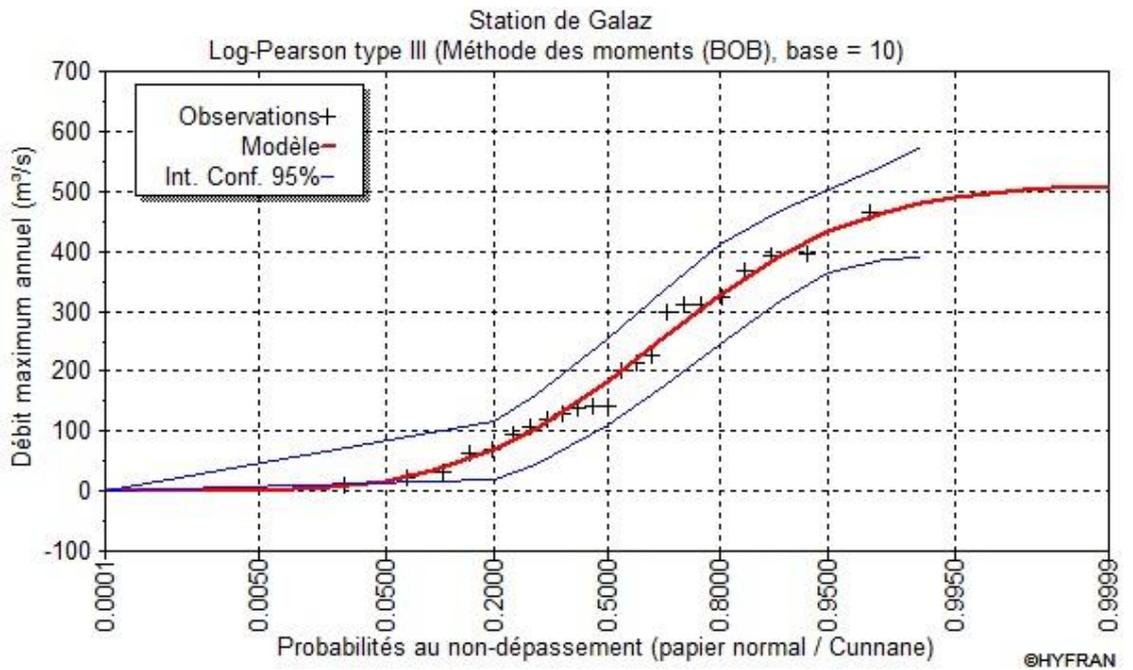


Figure 57: Ajustement graphique de la série des débits maxima instantanée à la loi de Log Perason III pour la station Galaz

Hypothèse :

- H_0 : L'échantillon provient d'une loi de Log Perason III
- H_1 : L'échantillon ne provient pas d'une de Log Perason II

Donc l'hypothèse de H_0 est acceptée au niveau de la signification de 5% pour la station Galaz et pour la station d'Ain Aicha, nous devons rejeter H_0 niveau de la signification de 1%.

6. Comparaison des ajustements aux lois statistiques

Comme le but de l'analyse fréquentielle est d'estimer le risque associé aux événements hydrologiques extrêmes et donc d'extrapoler les quantiles, nous avons privilégié les lois qui ajustaient le mieux les observations extrêmes visuellement. Nous avons donc conclu que les lois de Log-Pearson type III et Gamma représentent le meilleur compromis pour l'ajustement de la variable débit (Fig.58, Fig.59).

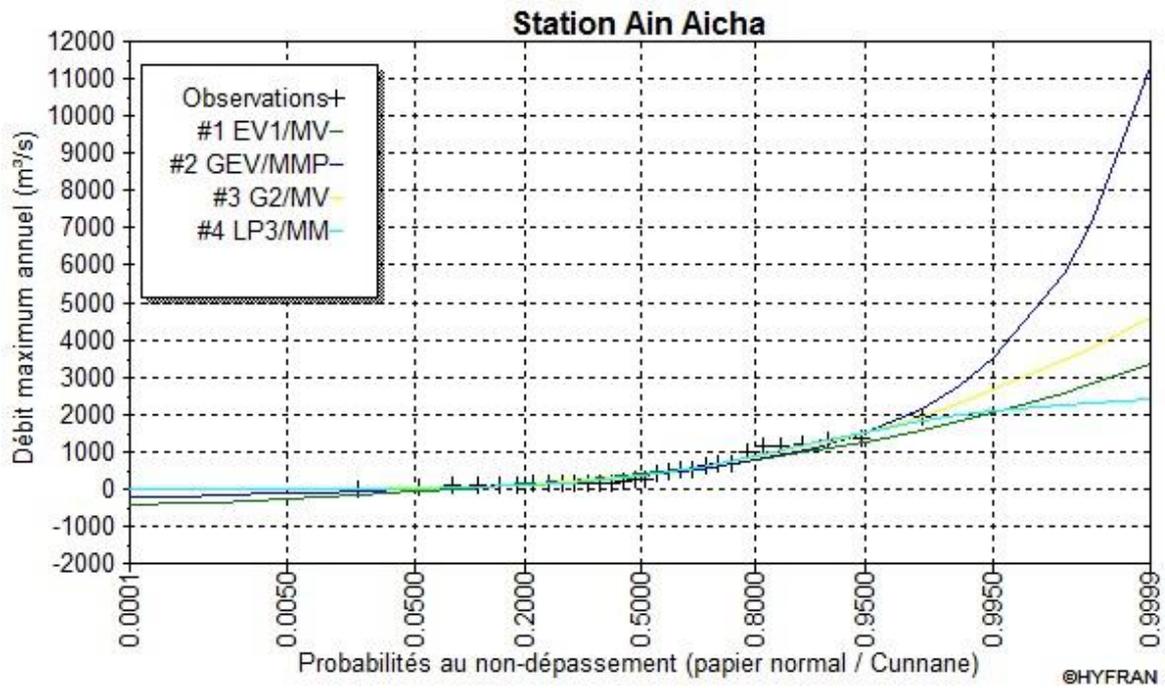


Figure 58: Résultats de comparaison des ajustements graphique au niveau de la station d'Ain Aicha

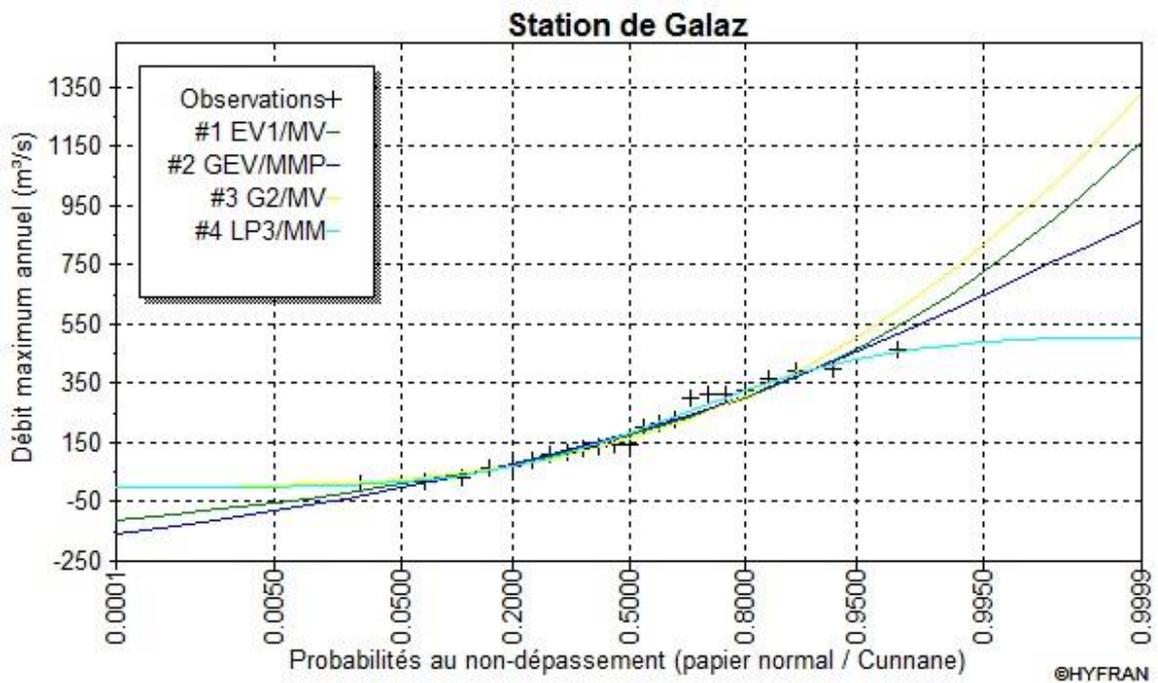


Figure 59: Résultats de comparaison des ajustements graphique au niveau de la station de Galaz

EV1/MV : loi de Gumbel (méthode de vraisemblance)

GEV/MMP : loi de Jenkinson GEV (méthode des moments pondéré)

G2/MV : loi de Gamma (méthode de vraisemblance)

LP3/MM : loi de Log-Pearson type III (méthode des moments).

a) Quantiles estimés pour différentes périodes de retour

La période de retour T d'un événement est la durée moyenne qui sépare deux crues supérieures ou égales à cet événement. Inversement, une crue de période de retour T est une crue où la moyenne est égalée ou dépassée à toutes les périodes de retour T d'unités de temps. En général, l'unité de temps est l'année. Cependant, une crue de période de retour T=100 ans, ne signifie pas quelle survient une fois tous les 100 ans, mais cette crue a 1% de chance d'arriver chaque année pendant 100 ans (Zian, 2011).

Mathématiquement, une période de retour T (an), affectée à une crue de débit maximum Q_t , signifie qu'on est devant une probabilité P égale $(1-1/T)$ que le débit ne dépasse pas la valeur de Q_t . Ainsi, les méthodes probabilistes assimilent les séries de données (débit, pluie ...) à des échantillons de variable aléatoires continues et infinies et par la suite, la fréquence de non dépassement de variable est :

$$F(X)_i = P(i \leq X_i)$$

La fréquence d'apparition est :

$$1 - F(X)_i = 1 - P(i \leq X_i)$$

Donc : $T = \frac{1}{1 - F(X)_i}$

Les résultats des quantiles estimés pour différentes périodes de retour T, au niveau des deux stations, sont représentés respectivement dans les (Tab.22, Tab.23) et (Fig.60, Fig.61).

L'analyse des tableaux suivants montre que les quantiles estimés sont très proches pour les faibles périodes de retour ($T \leq 20$) par contre, au-delà, ils s'écartent suivant la loi d'ajustement dans les deux stations.

Pour les grandes périodes de retour ($T \geq 2000$ ans), les quantiles estimés par la loi de GEV sont très importantes au niveau d'Ain Aicha et pour les autres lois, l'évolution est globalement constante. Pour la station de Galaz, les quantiles estimés par la loi de Gumbel et Gamma sont plus importantes, mais par contre ceux estimés par la loi de GEV et Log-pearson III sont plus faibles.

Tableau 22: Résultat d'ajustement graphique de la série des débits maxima instantanés de la station d'Ain Aicha

Période de retour :T(ans)	Probabilité de non dépassement de q	Quantile X (m3/s) différentes période de retour selon les lois d'ajustement :			
		Gumbel	GEV	Gamma	Log Perason III
2	0.5	407	351	351	339
3	0.6667	585	530	564	589
5	0.8	784	761	809	898
10	0.9	1030	1110	1160	1260
20	0.95	1270	1510	1500	1540
50	0.98	1580	2160	1960	1820
100	0.99	1810	2770	2300	1970
200	0.995	2040	3490	2650	2090
1000	0.999	2580	5780	3450	2270
2000	0.9995	2810	7110	3790	2320
10000	0.9999	3340	11300	4590	2390

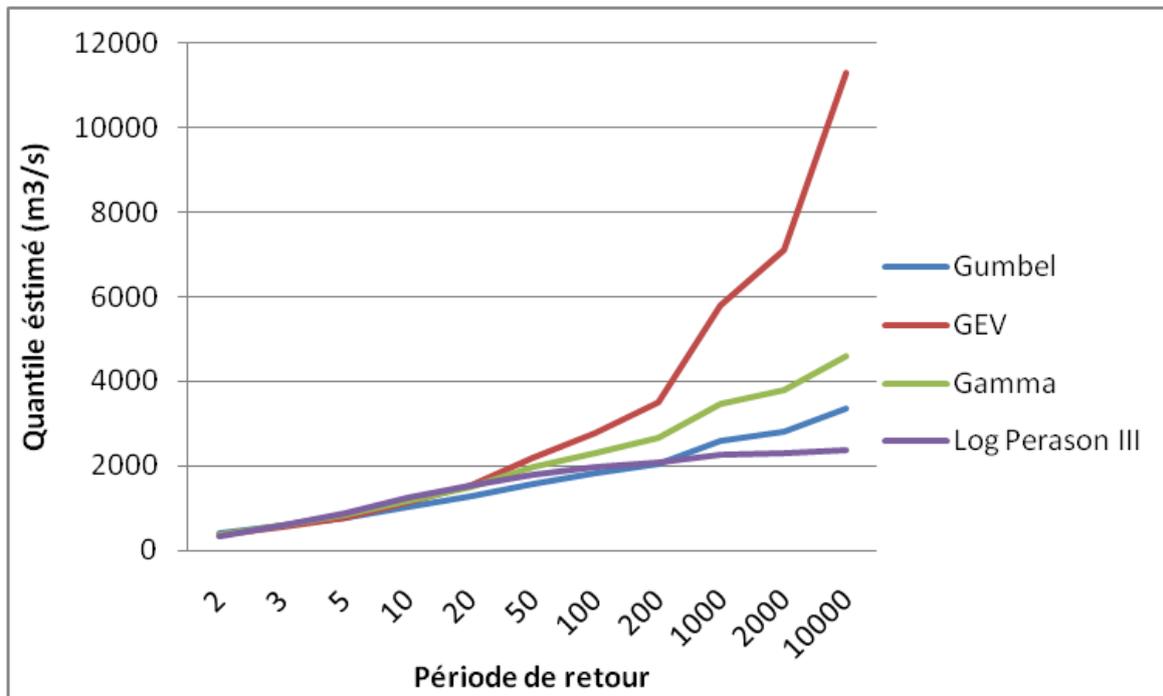


Figure 60: Temps de retours correspondant aux débits maxima annuels enregistrés au niveau de la station d'Ain Aicha

Tableau 23: Résultat d'ajustement graphique de la série des débits maxima instantanés de la station de Galaz

Période de retour :T(ans)	Probabilité de non dépassement de q	Quantile X (m3/s) différentes période de retour selon les lois d'ajustement :			
		Gumbel	GEV	Gamma	Log Perason III
2	0.5	175	183	160	183
3	0.6667	235	244	229	256
5	0.8	302	309	305	328
10	0.9	387	386	406	392
20	0.95	467	455	504	433
50	0.98	572	538	631	466
100	0.99	650	596	724	481
200	0.995	728	650	817	491
1000	0.999	909	763	1030	503
2000	0.9995	987	806	1120	505
10000	0.9999	1170	898	1330	507

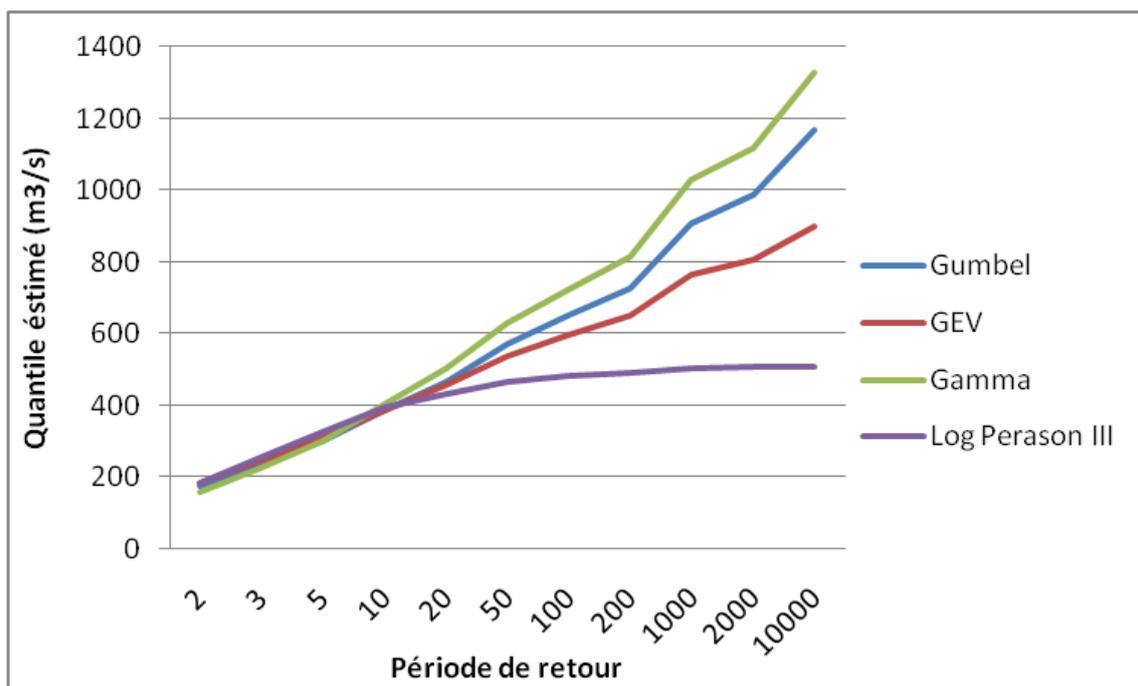


Figure 61: Temps de retours correspondant aux débits maxima annuels enregistrés au niveau de la station de Galaz

V. Conclusion

L'étude du régime hydrologique peut être considérée comme 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 de la station de 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 teste de simple cumul.

La méthodologie des écarts (E_c) 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 complétée par le coefficient de variation (CV), ainsi que le coefficient d'immodération (R). Ces coefficients permettent de conclure respectivement les fluctuations hydroclimatiques, la variabilité à l'échelle spatiale et la variabilité des débits extrêmes.

L'étude de la relation entre les précipitations et les lames d'eau écoulée permet de conclure grossièrement 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 existant 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'étude des formes extrêmes de l'écoulement, orientées tout d'abord sur les crues, a mis successivement en évidence les caractères torrentiels des crues principalement au forte Intensité des précipitations, leurs mécanismes de propagation et enfin leurs répartitions fréquentielles sont régis par des lois dissymétriques basées sur les méthodes des moments et de maximum de vraisemblance en l'occurrence les lois Log Pearson III et Gamma.

CONCLUSION GENERALE

Le bassin versant de l'oued l'Ouergha est étendu sur une superficie de 6190 Km² et un périmètre de 462 Km.

Le bassin versant de l'oued l'Ouergha est allongé, dont l'hypsométrie est caractérisée par des altitudes qui décroissent du Nord Nord-EST vers Sud Sud-Ouest (barrage Al Wahda). D'après la courbe hypsométrie, les altitudes moyennes occupent la majorité de la surface du bassin. Le relief est fort suivant l'indice de la pente globale.

Ce bassin versant comporte trois gouttières orientées sensiblement E-W, situés dans les sillons, synclinaux miocènes et dans la vallée moyenne et supérieure. Après le coude Mjaara, l'Ouergha reprend une direction N-S selon une ligne de faille.

La pluie présente une moyenne de 741mm sur tout le bassin avec une température moyenne annuelle de 18.7 °C.

La combinaison entre la précipitation et la température, par des différentes méthodes, a montré que le bassin est sous un climat semi humide. La valeur moyenne de l'évapotranspiration réelle est de 523.6 mm/an, signifiant ainsi l'existence d'un surplus, par à la précipitation annuelle.

Le régime hydrologique peut être considéré comme un régime pluvial, caractérisé par l'abondance pluviale à très forts débits hivernaux, donc des fortes crues.

La répartition fréquentielle des crues est régie par des lois dissymétriques basées sur les méthodes des moments et de maximum de vraisemblance notamment, les lois Gamma et Log Pearson III.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

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 pluies, débits et températures (1981 à 2011).

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

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.

ASEBRY 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.

ASEBRY L., BOURGOIS J., DE LUCA P.& BUTTERLIN J., 1992 : Importance 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.

Benaabidate L., Zian A., EL wartiti M. & EL rhaouti S., 2006 : Caractérisation climatique et hydrologique du bassin versant du R'dom. 18ème Colloque des Bassins Sédimentaires Marocains, Fès, 10-12, Novembre, 2005.

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 gibraltar. Bull. Soc. Géol. France, 8, t.17, 77-105.

Elmorijani Z.E. 2003: Conception d'un système d'information à référence spatiale pour la gestion environnementale ; application à la sélection des sites potentiels de stockage de déchets ménagers et industriels en région semi-aride (Souss, Maroc). Thèse de doctorat es sciences, n) 3370. Fac. Sc., Univ. De Genève, suisse.

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.

Frécaut R. 1972: Quelques problèmes actuels de la recherche fondamentale en hydrologie fluviale. Bull. Ass. Géogr. Franç. N°389-390, Paris, pp:291-290.

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

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

Larue J., « Tectonique, érosion et hydrographie sur la bordure nord-ouest du Massif central (France) », Géomorphologie : relief, processus, environnement, 4/2005 | 2006, 275-296.

Morgenthaler S., 1997: Introduction à la statistique, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 317p.

Musy, A. 2001. Hydrologie. Ecole Polytechnique Fédérale, Lausanne, Suisse.

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

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.

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 /50000ème. Note et Mém. Serv. Géol. Maroc, n° 166 bis.

Thorntwaite 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.

Wolting 1999: Statistique appliquée à la gestion des phénomènes naturels, Editeur, United Kingdom. 156p.

Zian A., 2011: Hydrologie, Qualité des Eaux de Surfaces et des sédiments et géochimie des eaux thermales du bassin versant de l'oued R'dom. Thèse doct.3ème cycle, FST FES, 276p.



Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme de Master Sciences et Techniques

Nom et prénom: MSATEF KARIM

Année Universitaire : 2014/2015

Titre: Etude hydrologique du bassin versant de l'Oued Ouergha

Résumé

Le présent travail porte sur le régime hydrologique du bassin versant de l'oued Ouergha. Ce bassin occupe l'essentiel du versant Sud atlantique de l'arc rifain et s'étend sur la majeure partie de la montagne rifaine. L'étude a été entamée par une caractérisation morphologique de la zone étudiée, suivie par une synthèse géologique et climatologique et enfin, une analyse du comportement hydrologique.

Ce bassin a un périmètre de 462 Km et cumulant une superficie de 6190 Km² soit 21.2% de la surface du bassin versant de Sebou, Le bassin reçoit une pluie moyenne annuelle de 741 mm, un volume de 4956.4×10^6 m³/an et une température moyenne annuelle de 18.7°C. L'évapotranspiration réelle dans le bassin versant est de 523.6mm/an ce qui représente 70.6% des précipitations moyennes annuelles.

Le régime hydrologique peut être considéré comme un régime pluvial, caractérisé par l'abondance pluviale à très forts débits hivernaux, donc des fortes crues. Le module annuel ainsi que les différents coefficients, mettent en évidence des fluctuations hydroclimatiques, la combinaison entre la température et la précipitation par les différentes méthodes a montré que le bassin versant de l'oud Ouergha est globalement sous un climat semi humide.

L'analyse du régime hydrologique avec les différentes méthodes ainsi que celle de la relation «précipitation-débit» a permis de définir un régime du type pluvial avec un débit moyen annuel de 14.3m³/s. La répartition fréquentielle des crues est régie par des lois dissymétriques basées sur les méthodes des moments et de maximum de vraisemblance, les lois Log Pearson III, et Gamma.

Mots clés : Bassin versant de l'Ouergha, précipitation, température, l'étude hydrologique, répartition fréquentielle.