



Année Universitaire : 2012-2013



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

**Étude du régime hydrologique du bassin versant du
bas Ouergha, Maroc septentrional**

Présenté par:

Djeinaba Sall

Encadré par:

- Lahcen Benaabidate, FST - Fès

Soutenu Le 20 Juin 2013 devant le jury composé de:

- Pr. A.LAHRACH
- Pr. L.BENAABIDATE
- Pr. H. TABYAOUI
- Pr. A.CHAOUNI

Stage effectué à : FST, Fès





Résumé

Le bassin versant Ouergha au passage entre le Rif et le Moyen Atlas s'étale sur 7300 Km, occupant 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 278,61 Km et cumulant une superficie de 1175,56 Km², soit 4,03% de la surface du bassin versant de Sebou. Le bassin reçoit une pluie moyenne annuelle de 593,30 mm, un volume de $697,46 \times 10^6 m^3$ /an et une température moyenne annuelle de 18,42°C. L'évapotranspiration réelle dans le bassin versant est de 399,73 mm/an.

Sur le plan de l'étude hydrologique du bassin Ouergha a montré un régime typique méditerranéen, caractérisé par l'abondance pluviale à très forts débits hivernaux, donc d'une part par des fortes crues, et d'autre part, par une saison sèche fortement prononcée, donc les étiages. Le module annuel ainsi que les différents coefficients, mettent en évidence des fluctuations hydroclimatiques, en relation avec un climat semi aride conclu par la synthèse climatologique.

La répartition fréquentielle des crues est régit par des lois dissymétriques basées sur des méthodes des moments et de maximum de vraisemblance en l'occurrence avec des lois de Log-Pearson, Gamma, GEV et Gumbel. Mais celle des étiages est adéquatement aux lois de GEV et Gumbel.

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



Dédicace

Je dédie ce travail

À ma Mère, Salamata Dia

À mon père, Mountaga Sall

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.

À mes très chers frères et sœurs :

Hama Sall, Djibril Sall, Mektar Sall, Assiou Sall

Aissata Sall, Khardjata Sall, Racky Sall

À mes oncles et mes tantes

À mes cousins et cousines

À tous mes amis (es) et mes collègues

À tous ceux qui me sont chères.

Djeinaba



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, 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.

Mes grands remerciements et respect pour Monsieur ABDARRAHIM LAHRACH, professeur de la faculté des sciences et Techniques de Fès et responsable du Master Hydrologie de Surface et Qualité des eaux. Je suis très sensible à l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider le jury de ce mémoire.

Il m'est agréable de remercier Monsieur A.CHAOUNI, Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de Fés et Monsieur H.TABYAOUI, 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 étudiantine.

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.



Sommaire

Résumé	i
Dédicace.....	ii
REMERCIEMENTS.....	iii
Table des matières	Erreur ! Signet non défini.
Liste des figures	vii
Liste des Tableaux.....	ix
INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre I : LES CARACTERISTIQUES PHYSIOGRAPHIQUES DU BASSIN VERSANT DE L'OUERQHA.....	2
I. Introduction	3
II. Situation géographique	3
III. Les caractéristiques physiques du bassin versant	4
1. Surface	5
2. Périmètre.....	5
IV. Caractéristique de forme	5
1. Indice de compacité de Gravelius K_G	5
2. Indice de compacité de Horton	6
3. Les caractéristiques du relief	6
a. Carte hypsométrique	7
b. Courbe hypsométrique	7
4. Temps de concentration.....	10
5. Le rectangle équivalent.....	10
6. Représentation triédrale	11
7. 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
8. Le réseau hydrographique	14
a. La densité du drainage.....	15
Chapitre II : Aperçu géologique du bassin versant	17
I. Introduction	18
II. Géologie de la chaîne du Rif	18
III. Aperçu sur la géologie du bassin versant de l'Oued l'Ouergha	19
1. Les dépôts post-nappe	19
2. Zone Intra-Rifaine	19
3. Unité de Ketama	19



4. Unité de Tanger	19
5. Zone Mésio-Rifaine	19
IV. Tectonique	19
V. Facies Litho stratigraphie	20
1. Les formations secondaires	20
2. Le Crétacé.....	20
3. Les formations tertiaires et quaternaires.....	20
Conclusion.....	22
Chapitre III : Climatologie du bassin versant	23
I. Introduction	24
II. Précipitation	24
1. Variation temporelle des précipitations	24
a. Précipitations annuelles	24
b. Précipitations saisonnières	25
c. Précipitations moyennes mensuelles	25
2. Evaluation de la lame d'eau moyenne tombée sur le bassin	26
a. La moyenne arithmétique.....	26
b. Méthodes des polygones de Thiessen.....	27
c. Méthodes des isohyètes	29
3. Estimation de la moyenne de la lame d'eau calculée par les trois méthodes	30
III. Etudes des températures	30
1. Température moyenne mensuelle	30
2. Relation température et précipitation	31
a. L'indice Xérothermique de Gaussen	31
b. L'indice d'aridité annuelles de De Martonne et les indices mensuelles d'aridité	32
c. Le quotient pluviaux-thermique d'Emberger	33
d. Indice de Stewart.....	33
IV. Evapotranspiration.....	34
1. L'évapotranspiration potentielle.....	34
2. Evapotranspiration réelle	36
a. Méthode de turc.....	36
b. Méthode de coutagne	36
Conclusion.....	37
Chapitre IV : Étude du régime hydrologique.....	38
I. Introduction	39
II. Etude du régime du débit.....	39
1. Débit moyenne annuelle	39
a. Variation des débits annuels par la méthode des écarts à la moyenne.....	40
b. L'Irrégularité interannuelle des débits par la méthode du simple cumul.....	41
c. Coefficient et indice de la variabilité des débits	42
2. Débit moyenne mensuel	43
a. Module mensuel	44



3. Débits journalières	47
III. Relation entre les débits et les précipitations	48
1. Coefficient de ruissellement	49
2. Bilan Hydrologique	50
a. Ecoulement total.....	50
b. Le ruissellement	50
c. Infiltration	51
IV. Etudes des crues et d'étéage	51
1. Les crues	51
a. Etude des débits maxima instantanés annuels	51
b. Puissance des crues	52
c. Analyse fréquentielle des crues maximales annuelles.....	53
d. Données et méthode	54
e. Statistique de base	56
2. Les étiages	68
a. Analyse de fréquence des étiages	68
b. Statistique de base	69
Conclusion.....	75
Conclusion Générale	76
REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUES	77



Liste des figures

Fig I.1 : Carte de la situation géographique de l’oued de l’Ouergha	4
Fig I.2 : Carte morphologie de l’oued de l’Ouergha en amont du barrage El Wahda	6
Fig I.3 : Carte hypsométrique de l’oued de l’Ouergha.....	7
Fig I.4 : Interprétation de la courbe hypsométrique	8
Fig I.5 : Histogramme de fréquence de l’altitude en fonction de la superficie.....	9
Fig I.6 : Courbe hypsométrique du bassin versant de l’Oued de l’Ouergha	10
Fig I.7 : Histogramme des fréquences cumulées des pourcentages des surfaces des pentes du bassin versant de l’Oued de l’Ouergha	12
Fig I.8 : Carte des pentes du bassin versant de l’oued de l’Ouergha	13
Fig I.9 : Carte du réseau hydrographique du bassin versant de l’Ouergha en amont du barrage El Wahda.....	15
Fig II.1 : Carte géologique et lithologie du bassin versant de l’Oued de l’Ouergha.....	21
Fig III.1 : Variation des précipitations moyenne annuelles dans le bassin versant de l’oued de l’Ouergha.....	25
Fig III.2 : Variation des précipitations moyennes saisonnières dans le bassin versant de l’Ouergha.....	25
Fig III.3 : Variation des précipitations moyennes mensuelles dans le bassin versant de l’oued de l’Ouergha.....	26
Fig III.4 : Carte des polygones de Thiessen relative du bassin versant de l’oued de l’Ouergha	28
Fig III.5 : Carte des isohyètes relatives au bassin versant de l’oued de l’Ouergha.....	29
Figure III.6 : Variation de températures moyenne mensuelles au niveau de la station Hajria	31
Fig III.7 : Diagramme ombrothermique de Gaussen au niveau de la station Hajria.....	32
Fig III.8 : Evolution mensuelle de l’indice d’aridité au niveau de la station de Hajria	33
Fig III.9 : Evolution de l’ETP en fonction de Précipitation et la Température au niveau de la station Hajria	35
Fig IV.1 : Variation interannuel des débits moyens annuels pour la station Had Kourt.....	39
Fig IV.2 : Variation interannuel des débits moyens annuels pour la station Mjaara	40
Fig IV.3 : Variation des écarts des débits moyens annuels et interannuels de Had Kourt.....	41
Fig IV.4 : Variation des écarts des débits moyens annuels et interannuels de Mjaara	41
Fig IV.5 : Simple cumul des lames d’eau écoulées au niveau de la station de Had Kourt.....	42
Fig IV.6 : Simple cumul des lames d’eau écoulées au niveau de la station de Mjaara.....	42
Fig IV.7 : Variation du coefficient d’hydraulicité dans le bassin versant de l’Ouergha.....	43
Fig IV.8 : Variation des débits mensuels à la station de Had Kourt	44
Fig IV.9 : Variation des débits mensuels à la station de Mjaara.....	45
Fig IV.10 : Variation des débits moyens saisonniers dans le bassin versant de l’Ouergha	45



Fig IV.11: Variation du coefficient mensuel des débits au niveau de la station Had Kourt et celle de la station Mjaara.....	46
Fig IV.12 : Courbes des débits classés des trois années caractéristiques pour la station Haad Kourt.....	47
Fig IV.13 : Courbes des débits classés des trois années caractéristiques pour la station Mjaara	48
Fig IV.14 : Evolution des précipitations et des débits au niveau de la station Had Kourt.....	48
Fig IV.15 : Evolution des précipitations et des débits au niveau de la station Mjaara	49
Fig IV.16 : Les débits maxima instantanés pour la station Had Kourt	52
Fig IV.17 : Les débits maxima instantanés pour la station Mjaara	52
Fig IV.18 : Evolution des indices de sévérité dans la station de Had Kourt et celle de Mjaara	53
Fig IV.19 : Histogramme de fréquence des débits maximum annuel pour la station de HadKourt.....	57
Fig IV.20 : Histogramme de fréquence de débit maximum annuel pour la station de Mjaara	57
Fig IV.21 : Courbe chronologique des sommes cumulatives pour la station Had Kourt.....	58
Fig IV.22 : Courbe chronologique des sommes cumulatives pour la station Mjaara	58
Fig IV.23 : Ajustement graphiquement de la serie maxima instantannés à la loi Gumbel pour la station Had Kourt et celle de la station Mjaara	60
Fig IV.24 : Ajustement graphiquement de la série des débits maxima instantanée à la loi de GVE pour la station Had Kourt et celle de la station Mjaara.....	62
Fig IV.25 : Ajustement graphiquement de la série des débits maxima instantanés à la loi de Gamma pour la station Had Kourt et celle de la station Mjaara	63
Fig IV.26 : Ajustement graphiquement de la série des débits maxima instantanée à la loi de Log Perason III pour la station Had Kourt et celle de la station Mjaara.....	64
Fig IV.27 : Résultats de comparaison des ajusterments graphique au niveau de la station Had Kourt et celle de Mjaara	65
Fig IV.28 : Temps de retour correspondant aux debits maxima annuels enregistrés au niveau de la station Had Kourt.....	67
Fig IV.29 : Temps de retour correspondant aux debits maxima annuels enregistrés au niveau de la station Mjaara	68
Fig IV. 30 : Courbe chronologique des sommes cumulatives au niveau de la station de Had Kourt et celle da la station Mjaara.....	70
Fig IV.31 : Ajustement graphiquement de la série des débits maxima instantanée à la loi de GVE pour la station Had Kourt et celle de la station Mjaara.....	71
Fig IV.32 : Ajustement graphiquement de la série des débits maxima instantanée à la loi de Gumbel pour la station Had Kourt et celle de la station Mjaara	72
Fig IV.33 : Temps de retour correspondant aux debits minima annuels enregistrés au niveau de la station Had Kourt.....	74
Fig IV.34 : Temps de retour correspondant aux debits minima annuels enregistrés au niveau de la station Mjaara	Erreur ! Signet non défini.



Liste des Tableaux

Tab I.1 : Répartition de la surface totale par tranche d'altitude	8
Tab I.2 : Tableau de fréquences et des pourcentages cumulés au dessus de la limite inférieure8	
Tab I.3 : Classe des pentes	12
Tab I.4 : Superficies et fréquences cumulées en fonction des classes des pentes	12
Tab I.5 : Classification du relief selon Ig donné par l'ORTOM	14
Tab I.6 : Caractéristique morphologie du bassin versant de l'Ouergha	16
Tab III.1 : Coordonnées des stations pluviométriques du bassin versant de l'Ouergha	24
Tab III. 2 : Calcul de la lame d'eau tombée par la méthode de Thiessen	28
Tab III.3 : Calcul de la lame d'eau tombée par la méthode des Isohyètes	30
Tab III.4 : Estimation de la lame d'eau moyenne	30
Tab III.5 : ETP mensuel (2003/2004-2008/2009) selon la méthode de Thornthwaite.....	35
Tab III.6 : Recapitulatifs des données dans le bassin versant de l'Ouergha	37
Tab IV.1 : La valeur du coefficient de ruissellement dans la station Had Kourt et celle de Mjaara.....	50
Tab IV.2 : Résultat du test de Wald Wolfowitz sur les donnés issues de ces deux stations	55
Tab IV.3 : Résultats du test de Kendal sur les donnés issues des deux stations	56
Tab IV.4 : Résultats des statistiques de base de l'oued de l'Ouergha dans la station de Had Kourt et celle de Mjaara	56
Tab IV.5 : Résulta de l'ajustement à la loi de Gumbel (Maximum de vraisemblance pour les deux stations.....	60
Tab IV.6 : Résultats et les paramètres du test de l'ajustement à la GEV pour la station de Had Kourt et celle de la station de Mjaara.....	61
Tab IV.7 : Résultats et les paramètres du test de l'ajustement à la loi de Gamma pour la station Had Kourt et celle de la station Mjaara	63
Tab IV.8 : Résultats et les paramètres du test de l'ajustement à la loi de Log Pearson III pour la station Had Kourt et celle de la station Mjaara	64
Tab IV.9 : Résultat d'ajustement graphique de la serie des debits maxima instantnnés de la station Had Kourt aux différents lois	66
Tab IV.10 : Résultat d'ajustement graphique de la serie des debits maxima instantnnés de la station Mjaara aux différents lois	67
Tab IV.11 : Résultat du test Wald Wolfowitz sur les données issues de la station Had Kourt et celle de la station Mjaara.....	68
Tab IV.12 : Résultat du test Kendal sur les données issues de la station Had Kourt et celle de la station Mjaara	69
Tab IV.13 : Résultats des statistiques de base de l'oued de l'Ouergha dans la station de Had Kourt et celle de Mjaara	69



Hydrologie de Surface et Qualité des Eaux

Tab IV.14 : Résultats et les paramètres du test de l'ajustement à la GEV pour la station Had Kourt et celle de la station Mjaara.....	71
Tab IV.15 : Résultat de l'ajustement à la loi de Gumbel (Maximum de vraisemblance) pour les deux stations	72
Tab IV.16 : Résultats des débits d'étiage estimés pour les différents périodes de retour	73



INTRODUCTION GENERALE

Les ressources en eau, plus que toute autre forme de ressources, 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 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.

Notre site d'étude est le bassin versant de l'Ouergha qui s'étale sur 7300 Km², en occupant l'essentiel de l'arc rifain. Il s'étend sur la majeure partie de la montagne rifaine et forme un passage entre le Rif et le Moyen atlas, administrativement la zone d'étude se trouve répartie sur cinq provinces administratives : Chefchaouen et Sidi Kasem, de la région économique centre Hoceima, Taza et Taounate de la région économique Centre-Nord. Cette situation géographique favorise la pénétration de la douceur 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.

Le bassin versant de l'Ouergha comporte le plus grand aménagement hydraulique au Maroc : barrage El wahda de retenue importante de 3714 Mm³ grâce à son installation sur un sillon profond (ABHS, 2006). Ce bassin est dépourvu d'un réservoir d'eau souterraine. Cependant les eaux de surface sont vulnérables à plusieurs risques naturelles (la sécheresse, les inondations, la pollution...) et anthropique (surexploitation).

En aval du barrage, l'oued de l'Ouergha est canalisé, ce qui nous a obligé de limiter notre étude aux régions situées en amont du barrage El wahda. Cette zone d'étude est soumise à un climat semi-aride et l'impact de ce climat sur l'écoulement de l'eau est bien marqué dans le temps et dans l'espace. L'organisation de ce travail se focalisera autour de quatre volets comme suit :

- Cadre générale de la zone d'étude
- Etude géologique
- Etude climatique du bassin versant de l'Ouergha
- Etude hydrologique



**Chapitre I : LES CARACTERISTIQUES
PHYSIOGRAPHIQUES DU BASSIN
VERSANT DU BAS OUERQHA**

I. Introduction

Un bassin versant est une unité territoriale correspondant à l'ensemble du territoire qui alimente un cours d'eau en eau.

Le bassin versant du bas Ouergha s'inscrit dans le domaine méditerranéen, à la fois par son contexte bioclimatique (ambiance semi-aride, semi-humide à humide, un régime fluvial à étiage en été et crue en hiver et le couvert végétal à composition floristique caractéristique) et par son style structural. En effet la chaîne rifaine est un élément de la chaîne alpine transméditerranéenne. .

On retrouve à l'intérieur d'un bassin versant des caractéristiques qui lui sont propres, soit : hydrographie et hydrologie, géomorphologie et reliefs, pédologie et géologie, utilisation et couverture des sols, écologie, etc...

Dans ce chapitre nous allons étudier la situation géographique du bassin versant du bas Ouergha. C'est à partir de cette étude 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.

L'étude des données du milieu physique du bassin versant du bas Ouergha permet d'apprécier le rôle de chacun de ces paramètres dans l'évolution morpho structural et morpho-dynamique au cours du Quaternaire et en particulier au Pléistocène supérieur et à l'Holocène.

II. Situation géographique

L'oued Ouergha, couvrant une superficie de 7300 Km², une longueur d'environ de 1486.5 Km se situe dans le Maroc Nord entre 34°5 et 34°36 N et les longitudes 4°00 et 5°45 W, il occupe l'essentiel du versant Sud atlantique de l'arc rifain et s'étend sur la majeure partie de la montagne rifaine.

Il représente le deuxième affluent principal de l'oued de Sebou après l'oued baht, ses effluents se concentrent à la rive droite, les principaux affluents sont Sra, Amzaz, Aoulay et Aoudour.

L'évolution de son hydrologie est influencée par les changements climatiques qu'a vécus le bassin du bas Ouergha, manifeste par le réchauffement climatique et la régression pluviométrique qui prennent aux dernières décennies de plus en plus d'ampleur.

La variabilité spatiotemporelle des débits est accentuée par les conditions du milieu qui interviennent défavorablement dans la régularisation des ressources hydriques et dans la minimisation des effets de la sécheresse météorologique qui s'atténue de plus en plus au profil.

1. Surface

Le bassin versant étant l'aire de réception de précipitations et d'alimentation des cours d'eau, les débits vont donc être en partie relié à sa surface. Celle-ci correspond à l'aire délimitée par l'ensemble des points les plus hauts qui constituent la ligne des partages des eaux.

Dans notre étude la surface du bassin versant qui est de 1175,56 Km² est déterminée à partir de la carte topographique de 500000^{ème}.

- Un petit bassin versant réagit très vite à une averse, les eaux se rassemblent rapidement ;
- Un grand bassin versant réagit très lentement à une averse (effet ressenti très lent à l'exutoire).

2. Périmètre

Le périmètre représente toutes les irrégularités du contour ou de la limite du bassin versant, il est exprimé en Km. Le contour du bassin est constitué par une ligne joignant tous les points les plus élevés.

Le périmètre de ce bassin est de 278,61 Km.

IV. Caractéristique de forme

1. 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.

Cet indice est déterminé à partir de la carte topographique en mesurant le périmètre du bassin versant et sa surface. Il est proche de 1 pour un bassin versant quasiment circulaire et supérieur à 1 lorsque le bassin est de forme allongé.

Il est défini comme le rapport du périmètre du bassin au périmètre du cercle ayant la même surface par la formule mathématique suivante :

$$K_G = \frac{P}{2 \cdot \sqrt{\pi * A}} \approx 0,28 \cdot \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Avec

K_G : Indice de compacité de Gravelius

A : Surface du bassin versant

P : périmètre du bassin

Dans le cas de ce bassin $K_G = 2,27$

Donc le bassin versant de l'oued de l'Ouergha a une forme allongée.

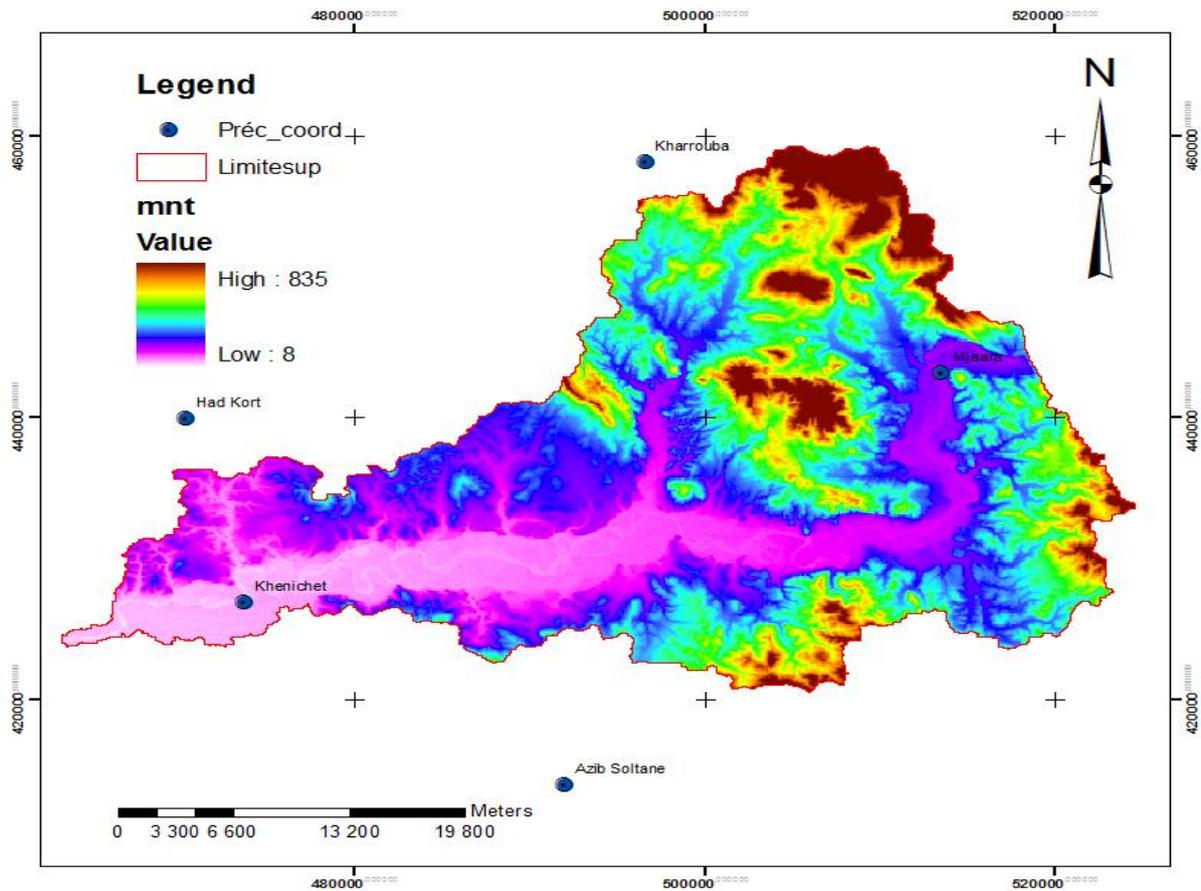


Fig I.2 : Carte morphologie de l’oued de l’Ouergha en aval du barrage El Wahda

2. Indice de compacité de Horton

Cet indice exprime le rapport de la largeur moyenne du bassin versant à la longueur L du cours d’eau principal. Il est calculé de la manière suivante :

$$K_H = \frac{l}{L^2} = 0,0026$$

Avec :

l : la largeur moyenne du bassin versant (m)

L : longueur du cours d’eau principal (m)

Dans le cas du bassin versant de l’Ouergha, cet indice est 0,0026 est ≤ 1 . Il confirme la forme allongé de ce bassin versant.

3. Les caractéristiques du relief

C’est à partir de l’étude de ces caractéristiques qu’on peut déterminer la morphologie du bassin versant, sa réaction aux phénomènes météorologiques et son comportement hydrologique.

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’égal

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.

On a déterminé la répartition des altitudes à partir d'une carte topographique de 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 (Figure I.3), dans la quelle se succèdent des zones de hautes altitudes supérieurs à 697,2 m et des basses altitudes inférieures à 116,2 m.

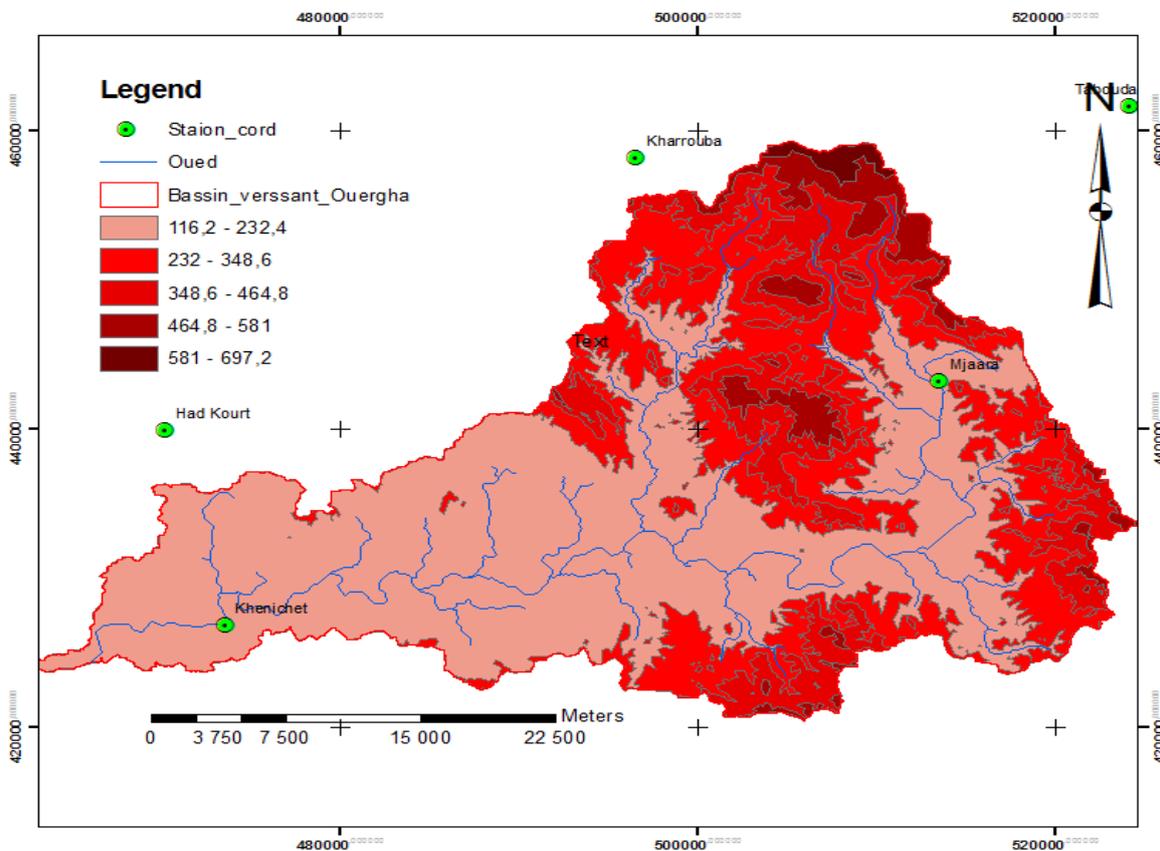


Fig I.3 : Carte hypsométrique du bassin versant du bas Ouergha

b. Courbe hypsométrique

Pour mieux comprendre les variations d'altitudes au sein du bassin versant du bas Ouergha, on va appliquer une méthode statistique (1) qui permet grâce à un histogramme et une courbe hypsométrique de traduire la répartition des altitudes à l'intérieur de la zone d'étude et permet en outre de déterminer les altitudes caractéristiques.

La méthode consiste à calculer les pourcentages des surfaces en fonction des altitudes, puis le calcul des pourcentages au-dessus du cumulé (Tab I.1). Pour les bassins versants jeunes, la superficie est faible par rapport au changement d'altitude, ce qui caractérise des versants abrupts, Les vieux bassins présentent l'inverse, une plaine douce près d'un cours d'eau où

l'altitude varie peu malgré une superficie importante (Fig I.4). En ce qui concerne le bassin versant du bas Ouergha, on a commencé par le calcul des surfaces en fonction des altitudes, puis les pourcentages des surfaces cumulées.

Tab I.1 : Répartition de la surface totale par tranche d'altitude

Classe des altitudes	Surface en (Km ²)	Pourcentage de la surface (%)
116,2-232,4	658,36	56,01
232,4-348,6	296,81	25,25
348,6-464,8	153,80	13,09
464,8-581	57,85	4,92
>581	8,59	0,73
Total	1175,41	100,00

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

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

Classe des altitudes	Surface en (Km ²)	% de la surface	Surface cumulée	Altitude	% de la surface cumulée
116,2-232,4	658,36	56,01	1175,41	116,2	100
232,4-348,6	296,81	25,25	517,05	232,4	43,99
348,6-464,8	153,80	13,09	220,24	348,6	18,74
464,8-581	57,85	4,92	66,43	464,8	5,65
581-697,2	8,59	0,73	8,59	581	0,73
Total	1175,41	100,00	0,00	697, 2	0,00

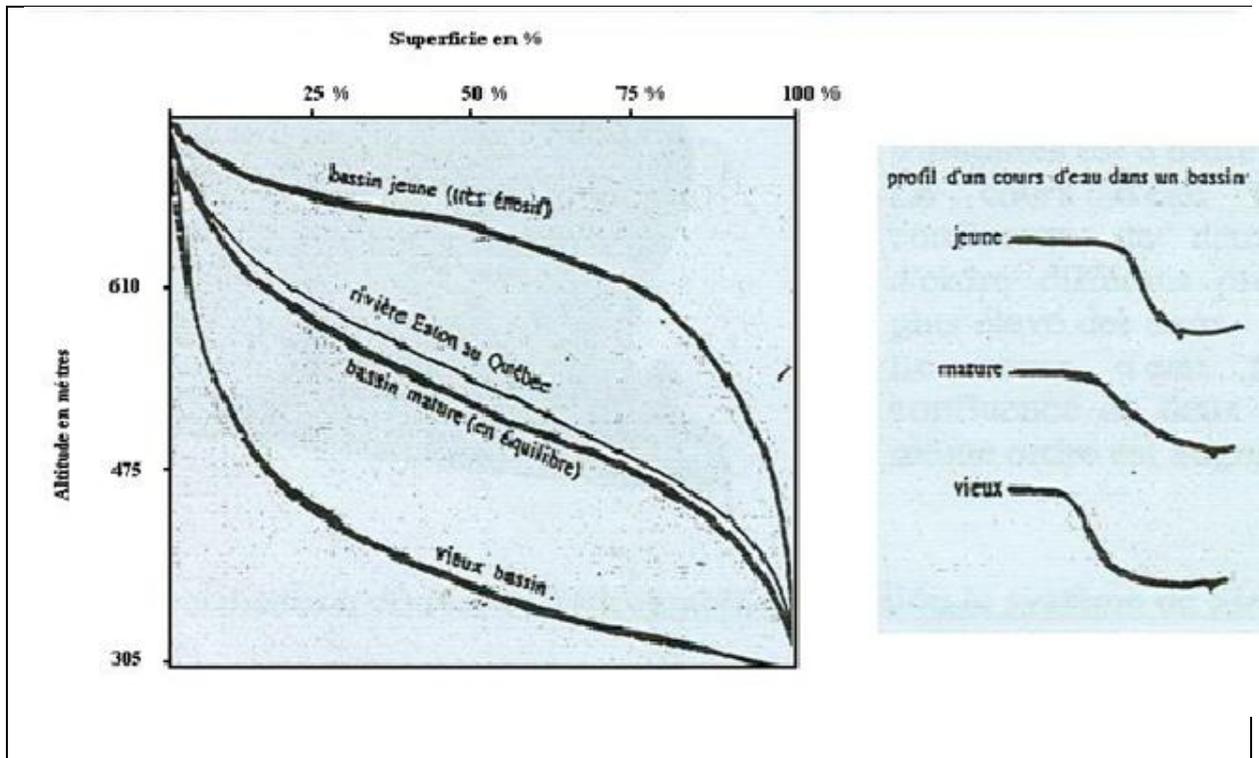


Fig I.4 : Interprétation de la courbe hypsométrique

Toutes ces données ont été réparties sur un graphique (Fig I.5) qui va permettre de dégager les différentes caractéristiques :

➤ **Altitude la plus fréquente :**

Elle correspond au maximum de l'histogramme des fréquences altimétriques en d'autres termes c'est l'altitude de la plus grande surface élémentaire comprise entre deux courbes de niveau successives.

➤ **Altitude de fréquence $\frac{1}{2}$ (la médiane) :**

Correspond au point d'ordonnée 50% de la courbe hypsométrique pour notre bassin la classe médiane est 232,4 -348,6.

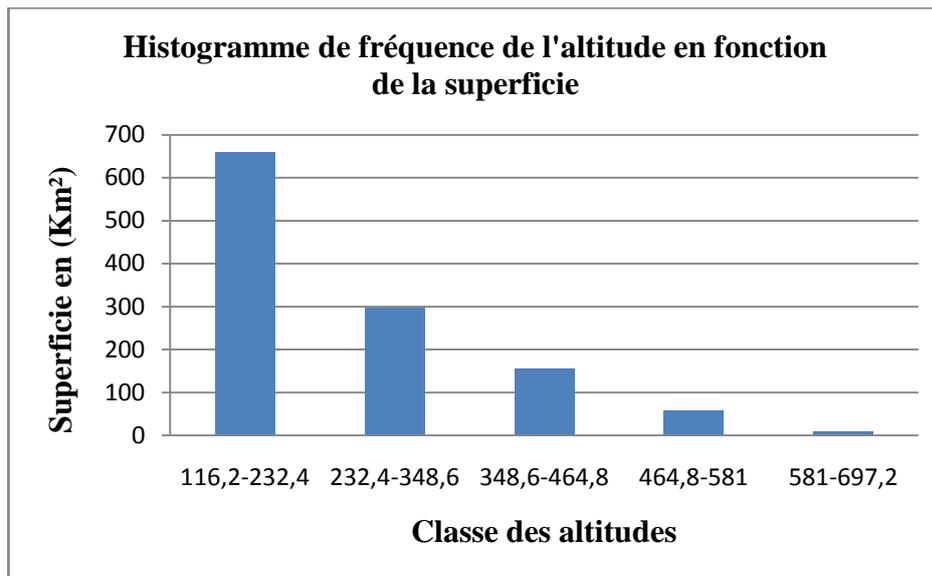


Fig I.5 : Histogramme de fréquence de l'altitude en fonction de la superficie

• **Interprétation de l'aspect de la courbe hypsométrique**

L'analyse de l'aspect de la courbe (Fig I.6) est en comparaison avec la classification citée plus haut, 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 de 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.

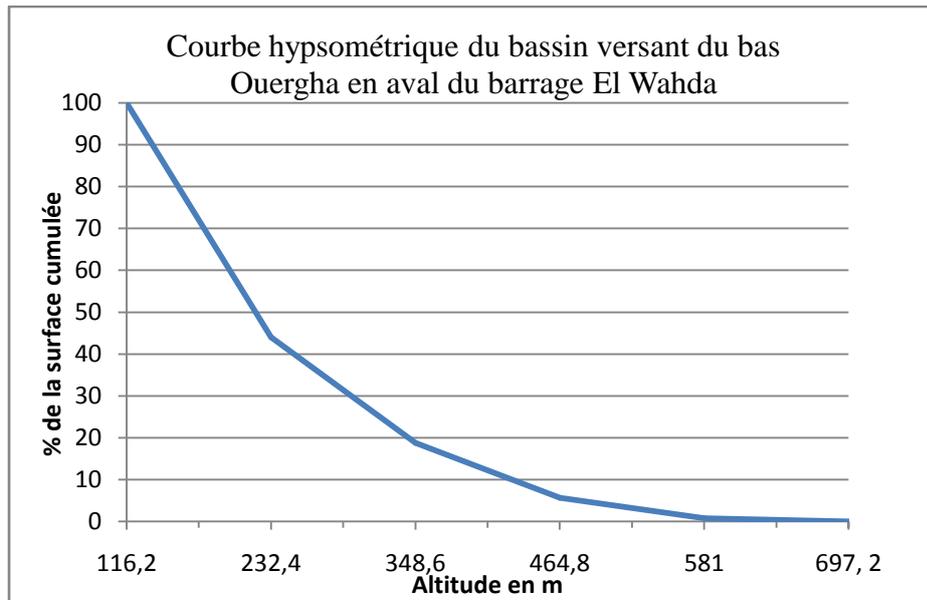


Fig I.6 : Courbe hypsométrique du bassin versant du bas Ouergha

4. Temps de concentration

Le temps de concentration (t_c) des eaux sur un bassin versant se définit comme le maximum de durée nécessaire à une goutte d'eau pour parcourir le chemin hydrologique entre un point du bassin et l'exutoire de ce dernier, pour son calcul nous faisons appel à la formule de Giandotti :

$$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{H_{\text{moy}}}}$$

t_c : Temps de concentration (heure)

A : Superficie du bassin (Km^2)

L : Longueur du plus thalweg (Km)

H_{moy} : Altitude moyenne (m)

5. Le rectangle équivalent

Le rectangle équivalent ou rectangle de Gravelius est un modèle géométrique mis point à partir d'une roche. Il prend alors une forme rectangulaire tout en gardant la même superficie, le même périmètre, le même indice de compacité et donc par conséquent la même répartition hypsométrique. Dans ce cas, les courbes de niveau deviennent parallèle au coté du rectangle équivalent. La climatologie, la répartition des sols, la couverture végétale et la densité du drainage restent inchanger entre les courbes de niveau.

Plus le rectangle équivalent est allongé et moins il sera drainé. Les dimensions du rectangle équivalent sont déterminées par la formule suivante :

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

Avec :

KG : indice de compacité de Gravelius

A : superficie de bassin versant (Km)

L : longueur du rectangle équivalent (Km)

l ; largeur du rectangle équivalent (Km)

On obtient : L =129,93 Km et l = 9,04 Km

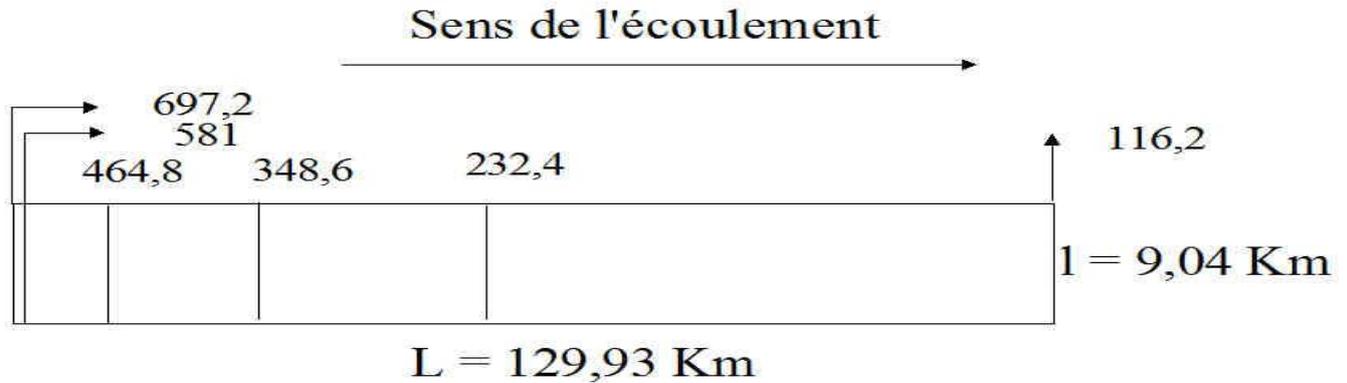


Fig I.7 : Rectangle équivalent du bassin versant du bas Ouergha

6. Représentation triédrale

Le modèle est un trièdre correspond à la somme de deux triangles rectangles dont le sommet afférent à l'angle droit correspond à la ligne de partage des eaux entre les deux rives du bassin, un coté de ligne de l'angle droit désigné par L représente la cour principale.

$$\alpha = \text{Arctg} \left(\frac{2A}{L^2} \right)$$

Avec :

α : Angle du triangle exprimé en radian

A : aire de la rive droite

L : Longueur du cours principale

D'où $\alpha = 14,57^\circ$

7. Etude de la pente

La pente joue un 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.

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 coté de pixel et pour classifier les pentes suivantes 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 I.3), on a utilisé l'extension spacial 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 de rassembler les classes de pentes dans des polygones.

Tab I.3 : Classe des pentes

Classes	Type de pente
1.	Nulle à faible (0-3%)
2.	Modérée (3%-12%)
3.	Abrupte (12%-20%)
4.	Très abrupte (20%-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 I.5). Les résultats obtenus montrent un pourcentage de 21,13% et de 50,47% pour les classes 2 et 5 respectivement. Les pentes faibles et modérées représentent un pourcentage de 10,36% et 6,10%.

Tab I.4 : Superficies et fréquences cumulées en fonction des classes des pentes

Code	Classe	Surface (km ²)	Fréquence cumulée	%de la surface	% cumulé
1	0 - 3	278,11	278,11	11,94	11,94
2	03-12	492,03	770,15	21,13	33,07
3	12 - 20	241,18	1011,32	10,36	43,43
4	20 -35	141,96	1153,28	6,10	49,53
5	> 35	1175,35	2328,63	50,47	100,00
	Total	2328,63	4657,27	100,00	

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 vu que l'inclinaison de moins de 3% occupe seulement 2% du bassin versant et que sur 68% de la Surface du bassin elle est supérieure à 20%.

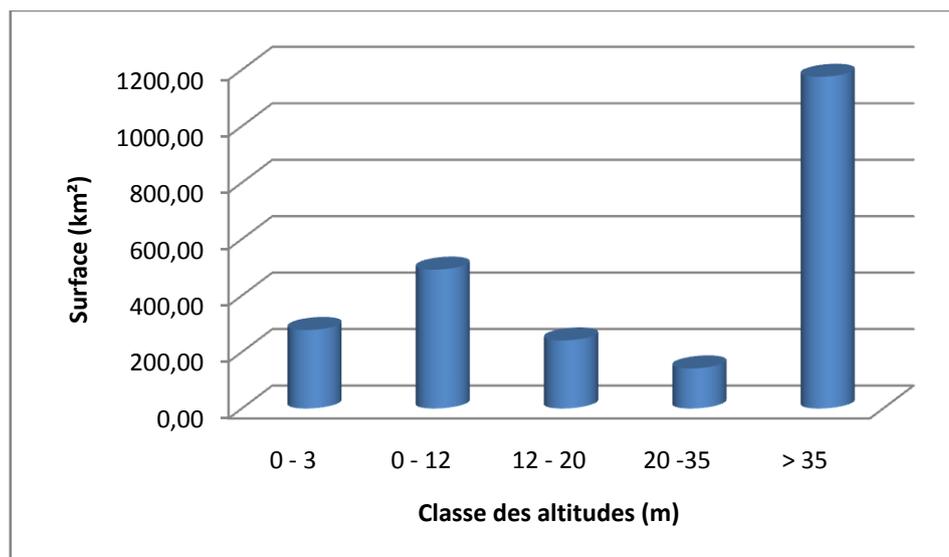


Fig I.8 : Histogramme des fréquences cumulées des pourcentages des surfaces des pentes du bassin versant du bas Ouergha

La répartition des surfaces des différentes classes de pentes (Fig I.7) montre un ordre au sein du bassin versant du bas 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 I.8). Cette différence peut être liée soit à la géologie du terrain soit à une forte activité des eaux.

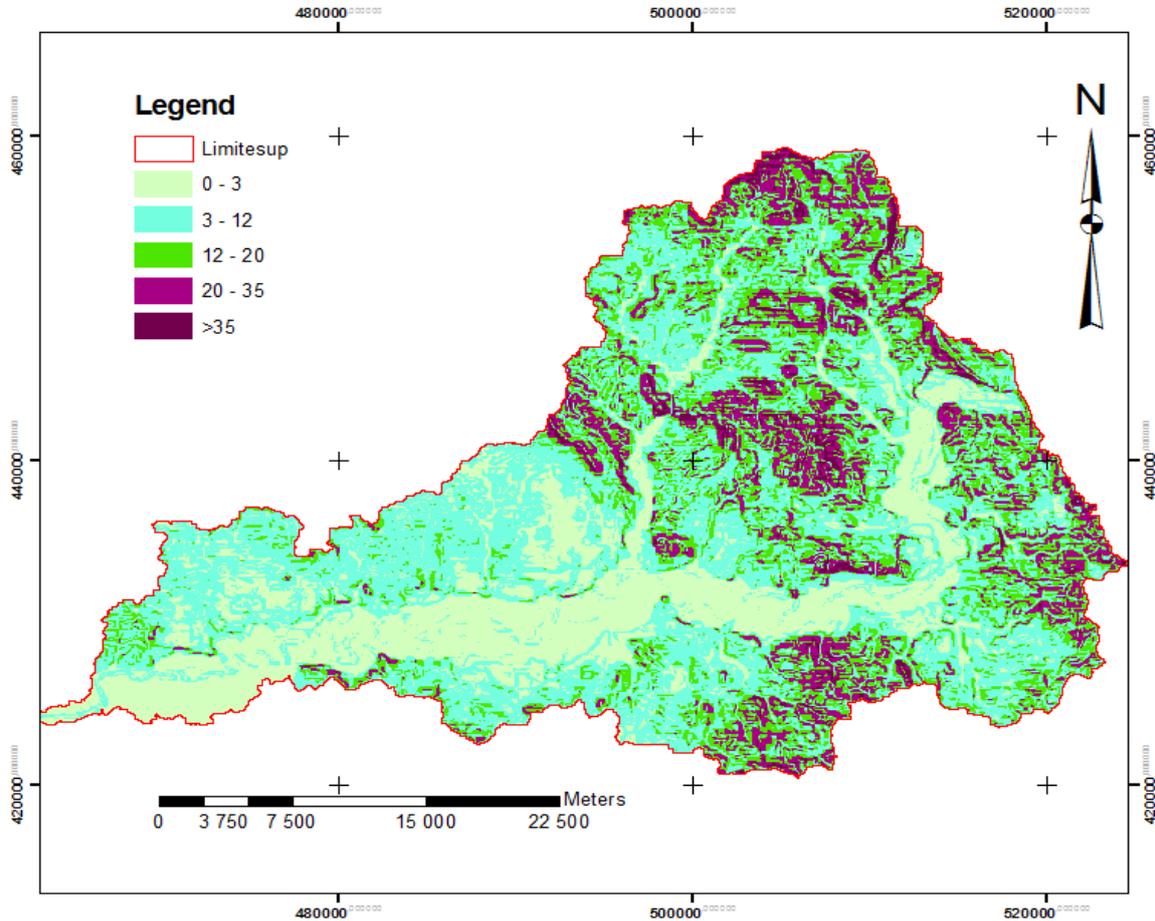


Fig I.9 : Carte des pentes du bassin versant du bas Ouergha

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.

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

P : La pente moyenne du bassin versant

ΔH : L'altitude moyenne

L : Longueur du rectangle équivalent

D'où $P_{\text{moy}} = 4,81$

Donc la pente moyenne du bassin versant du bas Ouergha est égal à 0,05%, une valeur qui montre que le relief est assez 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.

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

I_g : Indice de pente global en m /km

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

L_{eq} : Longueur du rectangle équivalent

$H_{5\%}$: 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 2,25 soit 0,02%.

Selon la classification du relief donné par l'ORSTOM, la valeur de l'indice de pente global du bassin versant de l'Oued de l'Ouergha montre que le relief est assez fort.

Tab I.5 : Classification du relief selon I_g donné par l'ORTOM

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	$I_g > 0,5$

8. Le réseau hydrographique

Le réseau hydrographique se définit comme l'ensemble des cours d'eau naturels ou artificiels, permanent ou temporaire, qui participe à l'écoulement dans le bassin versant.

Pour définir les limites de ce bassin versant du bas Ouergha jusqu'au barrage El Wahda et sortir ses caractéristiques physiques, on a procédé à une carte de 500000^{ème}, ce qui nous a permis de sortir la carte hydrographique.

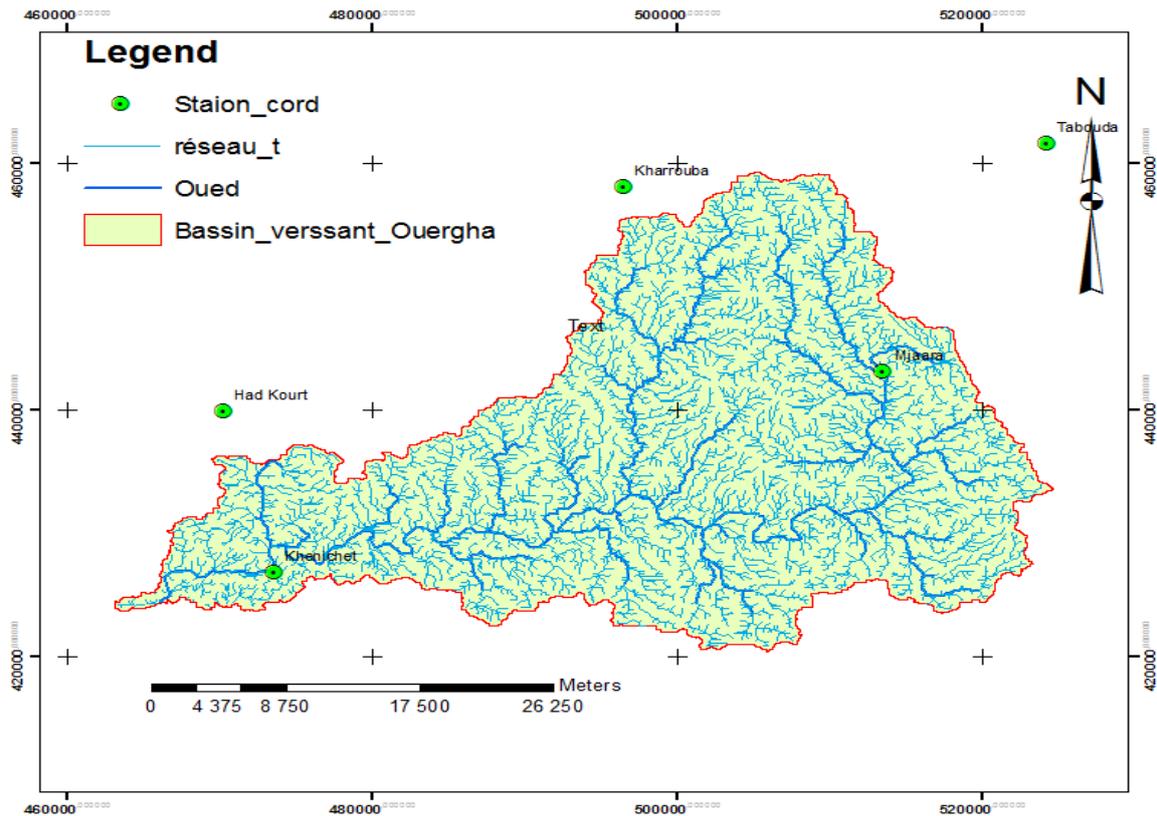


Fig I.10 : Carte du réseau hydrographique du bassin versant du bas Ouergha en aval du barrage El Wahda

a. 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.

$$D_i = \frac{\sum L_i}{A} = 0,08 \text{ Km}^{-1}$$

Conclusion

Le bassin versant Ouergha occupe la majeure partie de la montagne rifaine avec une superficie de 7300 Km².

La détermination des divers paramètres physiques du bassin versant du bas Ouergha nous a permis de définir les caractéristiques topographiques.

Le bassin versant topographique présente un périmètre de 278,56 Km, une superficie de 1175,56 Km² et un cours d'eau principal de 95,3 Km de long.

Le bassin versant du bas Ouergha montre que le relief est assez fort.

Avant d'entamer la Géologie du bassin versant, nous avons récapitulé les différents paramètres physiques étudiés dans ce chapitre sous forme d'un tableau I.7 :

Tab I.6 : Caractéristique morphologie du bassin versant de l'Ouergha

Paramètres	Valeurs
Surface	1175,56 Km ²
Périmètre	278,61 Km
Indice de compacité de Gravelus	2,27
Indice de compacité de Horton	0,0026
Longueur du cours d'eau principale	95,3 Km
Longueur du rectangle équivalent	129,93 Km
Largeur du rectangle équivalent	9,04 Km
Altitude maximale	625 m
Altitude minimale	25 m
Altitude moyenne	325 m
Pente moyenne	5%



Chapitre II : Aperçu géologique du bassin versant

I. Introduction

Le bassin versant Ouergha s'étend vers le Sud du lac Rifain. 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 II.1), 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, Sebides 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 Sebide 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 verticalisés 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 nappe de charriage à vergence Sud ; nappes des flyschs situées entre les zones internes au Nord et les unités intra rifaines de Tanger-Kétama au Sud (Suter, 1980) ; nappe de Senhadja (Hottinger et Suter, 1961) ; nappe d'Ouazzane (Suter, 1967) ; nappe de Temsamane et nappe d'Aknoul. Les structures développées au jurassique subissent une inversion tectonique de créacé, 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, lithostratigraphiques et tectoniques, effectuées dans le rif central montrent que les affleurements jurassiques, situés dans le secteur méridional du domaine subrifain, comme le cœur d'anticlinaux qui sont parautochtones et dont la structuration tortoniënne s'est achevée par le jeu de chevauchement au cours du Messinien (Asebriy et *al.* ,1992).

III. Aperçu sur la géologie du bassin versant du bas Ouergha

Trois ensembles d'unités morpho-structurales sont distingués dans le bassin versant de l'Oued l'Ouergha substrat dans notre bassin de l'amont vers l'aval, on distingue ; les formations post-orogéniques, les unités intra rifaines, les unités méso-rifaines.

1. Les dépôts post-nappe

Les dépôts post-nappe correspondent à des formations autochtones du Miocène déposées pendant la transgression tortonien. 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 distincts structurellement, 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 Méso-rifaine 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

Affleure essentiellement dans le rif oriental, mais elle touche la patrie amont du bassin versant de l'Oued Amzazelle comporte un flysch schisto-gréseux du Crétacé inférieur épais de quelques kilomètres.

4. Unité de Tanger

Affleure dans la partie occidentale du rif, elle est considérée comme la couverture plus au 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 Intra-Rifaine 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 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 liés. Les pensées gréseuses ou conglomératique, 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 causses contribuent un important acquière dont l'alimentation est d'origine salée et météologique. Sur la périphérie du cause émerge de nombreuses sources qui sont à l'origine de plusieurs oueds. Il affleure entre le N-S 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. Au Nord, elles se trouvent généralement en contact anormal avec les calcaires de haut Atlas Central et oriental. Au Sud, elles reposent sur les terrains primaires de l'Anti-Atlas. (J.Margat (1954)).

3. Les formations tertiaires et quaternaires

- Le Miocène transgressifs est venu se déposé sur la Gausse 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 tours 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 qu'elle sérié antérieur. IL est formé par d'épaisses séries transgressives, et comble les bassins effondrés du moyen et haut Ouergha.

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

- Le pliocène repose sur le Tortonien, qui débute par une série détritique, caractérisé 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 fluviatiles.

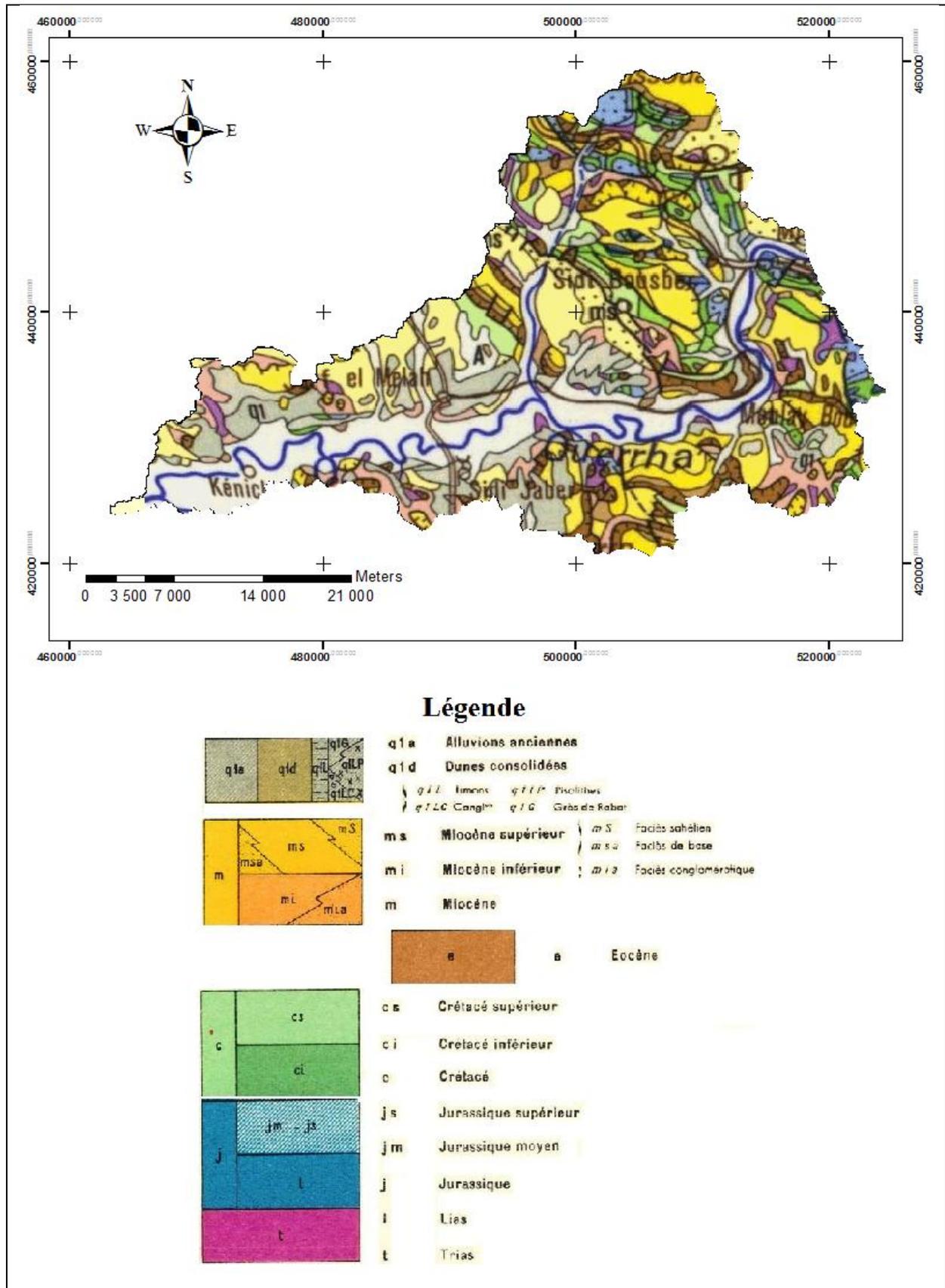


Fig II.1 : Carte géologique et lithologie du bassin versant du bas Ouergha

Conclusion

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

On observe des failles dues aux déformations à des mouvements épirogéniques qui se sont produit au cours du secondaire et tertiaire, notamment ceux qui ont provoqué la formation et la surrection du bassin Sud-rifain. La partie septentrionale du Moyen-Atlas a connu la même évolution que celle du Causse.

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 atlantique 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.

Le rôle du climat est déterminé 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 sera entamée dans le but de les cartographier. L'étude a été réalisée sur la base des données de cinq stations météorologiques (Mjaara, Khenichet, Kharrouba, Had-Kour, Azib Soltane) qui sont représentés dans le tableau suivant (Tab III.1) :

Tab III.1 : Coordonnées des stations pluviométriques du bassin versant du bas Ouergha

Station	X(Km)	Y(Km)	Z(m)
Mjaara	513,6	443,2	15
Khenichet	473,7	426,9	92
Had Kourt	470,35	439,93	30
Kharrouba	496,625	458,15	170
Azib Soltane	492	413,9	45

II. Précipitation

Elles désignent toutes les eaux météorologiques 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 l'altitude, la topographie, exposition.....

a. Précipitations annuelles

L'analyse de l'histogramme des précipitations moyennes annuelles (Fig III.1) recueillis aux différentes stations pluviométriques concernées par cette étude, permet de distinguer un maximum au niveau de la station Kharrouba (826,2 mm) et le minimum est enregistré au niveau de la station Khenichet (456,4 mm). On note également une diminution le long des stations qui jalonnent de l'oued de l'Ouergha en allant de l'amont vers l'aval.

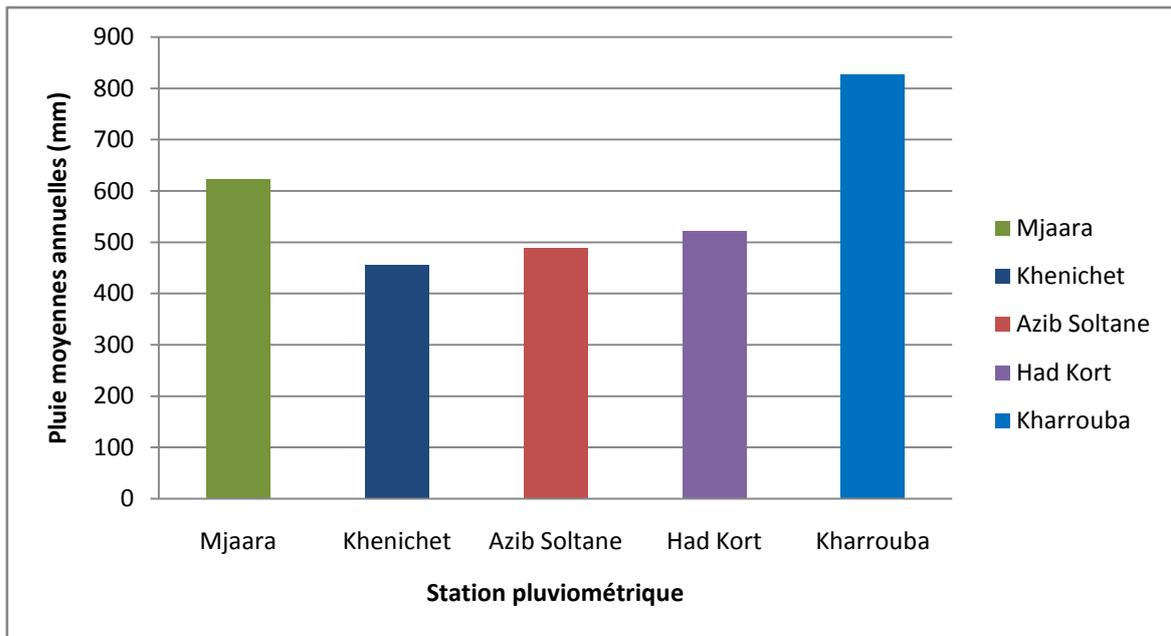


Fig III.1 : Variation des précipitations moyenne annuelles dans le bassin versant du bas Ouergha

b. Précipitations saisonnières

La variation saisonnière des précipitations moyennes dans le bassin versant de l’oued de l’Ouergha montrent que les trois mois de Juin, Juillet, et Août reçoivent des précipitations faibles. La figure (III.2) montre que la saison la plus pluvieuse est celle d’hiver suivie de celle du printemps.

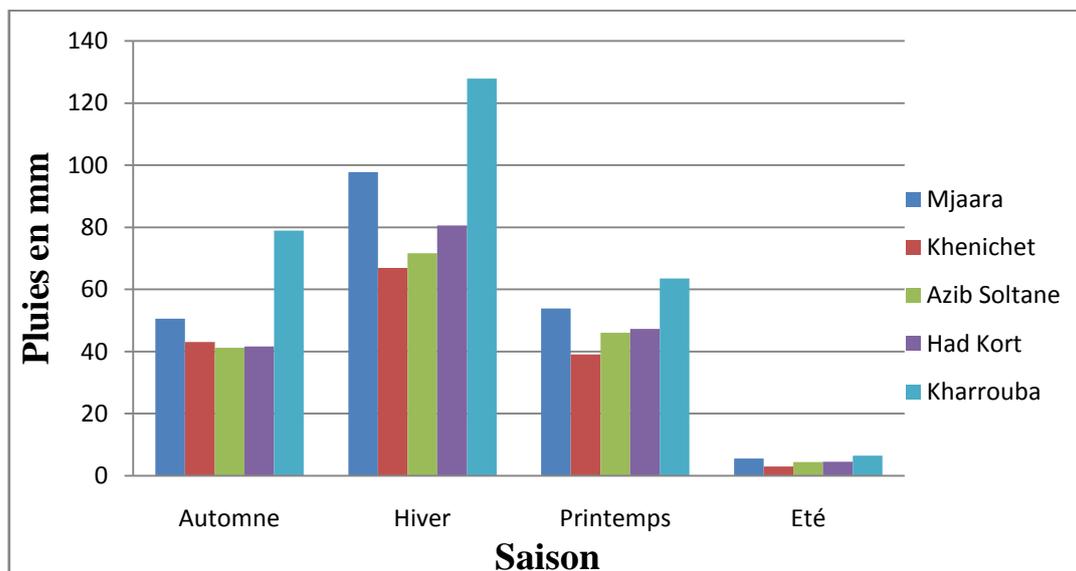


Fig III.2 : Variation des précipitations moyennes saisonnières dans le bassin versant du bas Ouergha

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 du bas Ouergha la variation

des pluies moyennes mensuelles est représentée dans la figure (III.3) sous forme de diagramme.

Ce diagramme montre plus de 80% de la pluviométrie mensuelle est concentrée durant la période pluvieuse qui s'étale entre les mois d'Octobre jusqu'à Mai. On remarque que dans toutes les cinq stations pluviométriques, les valeurs moyennes mensuelles maximales sont enregistrées au mois de Novembre tandis que les valeurs minimales sont enregistrées dans les mois de Juillet.

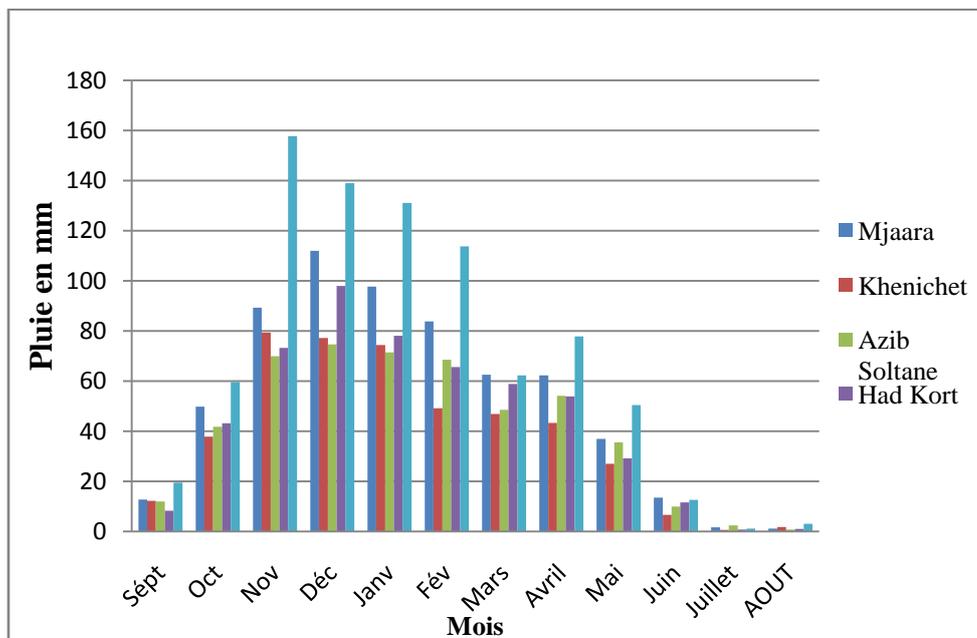


Fig III.3 : Variation des précipitations moyennes mensuelles dans le bassin versant du bas Ouergha

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

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

- La moyenne arithmétique
- Méthodes des polygones de Thiessen
- Méthodes des isohyètes

a. La moyenne arithmétique

C'est une méthode la plus simple, elle 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 station sur le bassin

La moyenne de précipitations obtenues par cette méthode est de : $P_{moy} = 583,54$ 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 méthodes de la manière suivante :

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

Avec :

E : L'erreur

c_v : Coefficient de variation ($c_v = 22,89\%$)

P_{moy} : Précipitation moyenne du bassin versant ($P_{moy} = 583,54$ mm)

∂ : L'écart type ($\partial = 133,6$ mm)

n : Nombre des stations sur le bassin versant (n = 5)

Donc l'erreur estimer par la méthode arithmétique est de : **E= 8,92 %**

C'est la raison pour laquelle on fait recours à d'autres méthodes plus fiables.

b. Méthodes des polygones de Thiessen

C'est une méthode statistique, qui revient à effectuer la moyenne pondérée des précipitations mesurés 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 du bas Ouergha dispose de 5 stations, pour laquelle sont tracées les stations (Fig III.4).

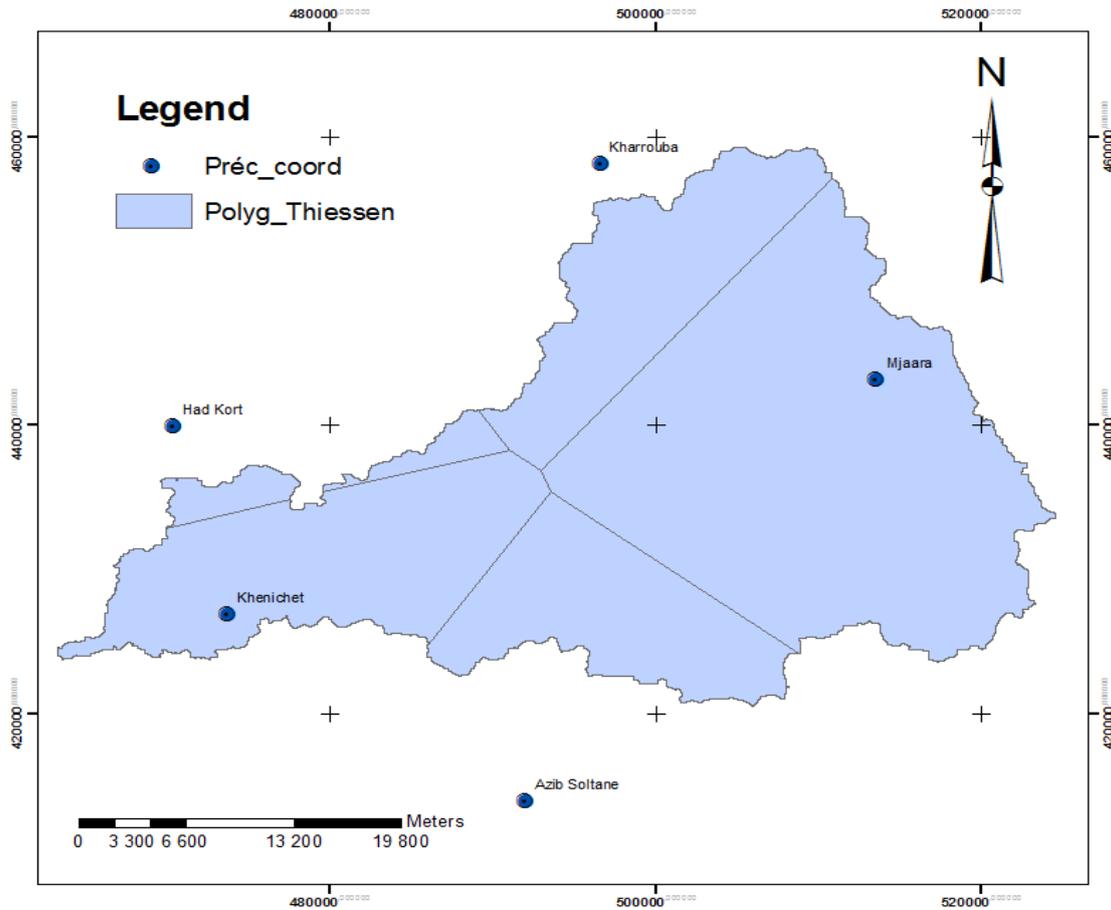


Fig III.4 : Carte des polygones de Thiessen relative du bassin versant du bas Ouergha

La superficie de chaque polygone est déterminée par un logiciel Arc Gis (Tab III.2).

On calcul la lame d'eau annuelle en appliquant la formule suivante :

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

Avec :

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

P_i : Précipitation enregistré à la station i (mm)

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

A : aire totale du bassin

Selon cette méthode la lame d'eaux tombée sur le bassin versant de l'oued est

$$P_{moy} = 598,77 \text{ mm}$$

Tab III. 2 : Calcul de la lame d'eau tombée par la méthode de Thiessen

Station	Pi (mm)	Ai (Km ²)	Ai*Pi
Khenichet	456,4	233,37	106511,01
Azib Soltane	489,7	162,99	79814,82
Had Kort	521,8	37,43	19528,76
Mjaara	623,6	566,63	353349,22
Kharrouba	826,2	175,04	144621,82
Total	2917,7	1175,46	703825,64

c. Méthodes des isohyètes

La méthode d'isohyète c'est une méthode graphique qui se base sur l'interpolation des moyennes de précipitation pour une période, des stations situés à l'intérieur du bassin et ce 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 aux autres stations avoisinantes si nécessaires (Fig III.5).

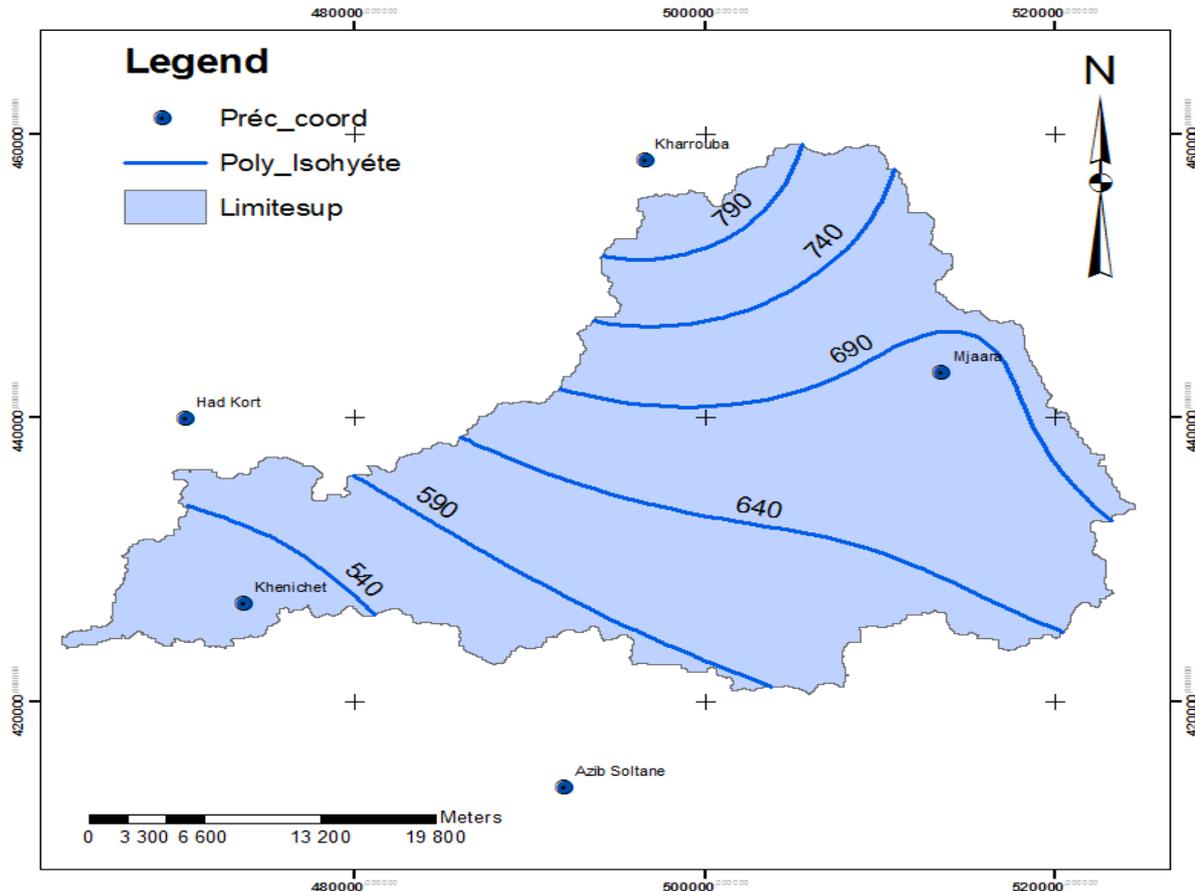


Fig III.5 : Carte des isohyètes relatives au bassin versant du bas Ouergha

La superficie comprise entre les deux isohyètes est déterminé avec un 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 (mm)

S_T : Surface total 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)

Tab III.3 : Calcul de la lame d'eau tombée par la méthode des Isohyètes

Classe	Pi	Ai	Ai*Pi
<540	415	100,35	41645,25
540 - 590	565	486,40	274816,00
590 - 640	615	153,05	94123,70
640 - 690	665	125,76	83630,40
690 - 740	715	100,05	71532,18
740 - 790	765	76,51	58532,70
> 790	815	46,90	38223,50
Total	4555	1089,02	662503,73

Selon cette méthode, la lame d'eaux tombée sur le bassin versant est égale est de :

$$P_{moy} = 608,35 \text{ mm}$$

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

La lame d'eau estimée par les trois méthodes, évoquée précédemment, montrent des valeurs différentes. Dans le but de rapprocher entre ces valeurs trouvées, une moyenne entre elle est calculée dans le tableau (III.4) suivant :

Tab III.4 : Estimation de la lame d'eau moyenne

Moyenne arithmétique	Carte des isohyètes	Polygone de Thiessen	La lame d'eau moyenne
583,54 mm	608,35 mm	598,77 mm	596,89 mm

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

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

$$V = 596,89 \times 10^{-3} \times 1175,56 \times 10^6$$

$$V = 701,68 \times 10^6 m^3 / \text{an}$$

Le bassin versant du bas Ouergha reçoit un volume d'eau estimé à million 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 disponible que dans la station de Hajria.

1. Température moyenne mensuelle

L'analyse de la figure (III.6) 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 le 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, tel que l'altitude, latitude en plus de la nature du sol et la couverture végétale (l'albédo).

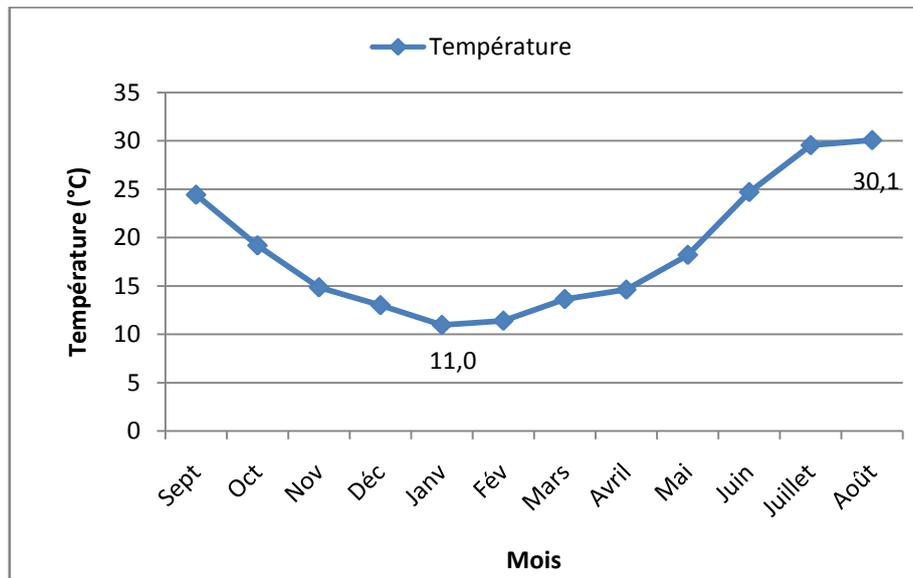


Figure III.6 : Variation de températures moyennes mensuelles au niveau de la station Hajria

2. Relation température et précipitation

Le climat, régnant dans une région, peut être estimé à travers certain 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 Martonne et les indices mensuelles d'aridité
- Le quotient pluvio-thermique d'Emberger

a. L'indice Xérothermique de Gaussen

Cet indice Xérothermique de Gaussen appelé aussi diagramme ombrothermique de Gaussen permet de distinguer les périodes sèches et des périodes humides. Ainsi, une période est considéré comme sèche ; lorsque le total des précipitations (P en mm) est inférieur ou égale au double de la température moyenne mensuelle (T en °C), dans le cas contraire la période est considéré 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 III.7).

Ce dernier est un mode de représentation sur le même graphique, les Températures et les précipitations moyennes mensuelles.

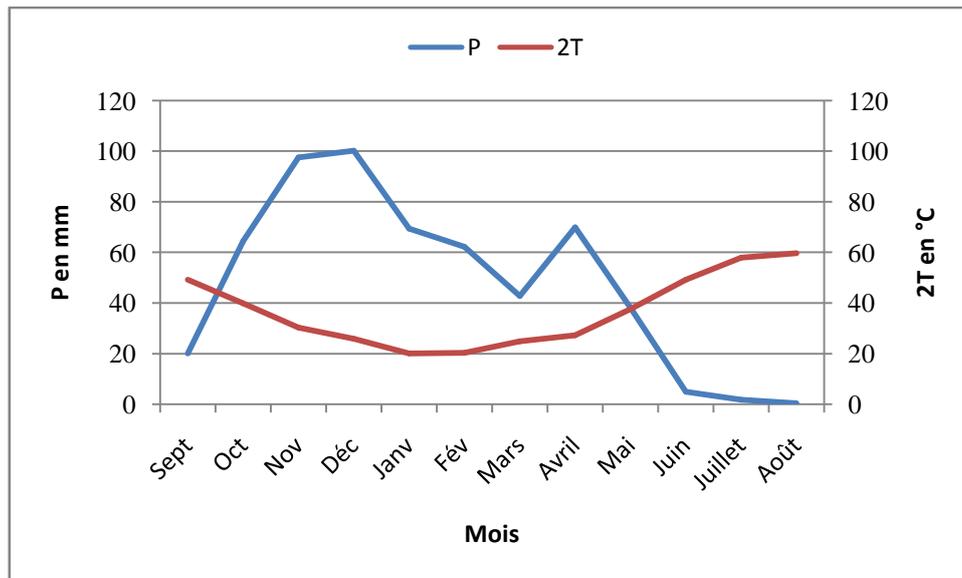


Fig III.7 : Diagramme ombrothermique de Gausson au niveau de la station Hajria

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 Mai, par la suite une sécheresse prend le relais.

b. L'indice d'aridité annuelles de De Martonne et les indices mensuelles d'aridité

Une valeur est utile afin d'exprimer les conditions climatiques du milieu et l'indice d'aridité de De Martonne qui est donné par la formule suivante mettant 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 $I = 1,8$: Cette valeur d'indice caractérise un climat hyperaride.

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 III.8) montre que les mois de Juin, Juillet et Août jouissent d'un climat hyperaride ($i < 5$), les mois d'Octobre, Décembre, Janvier et Avril sont humide, par contre les autres mois se caractérisent par un régime semi-humide et hyper humide.

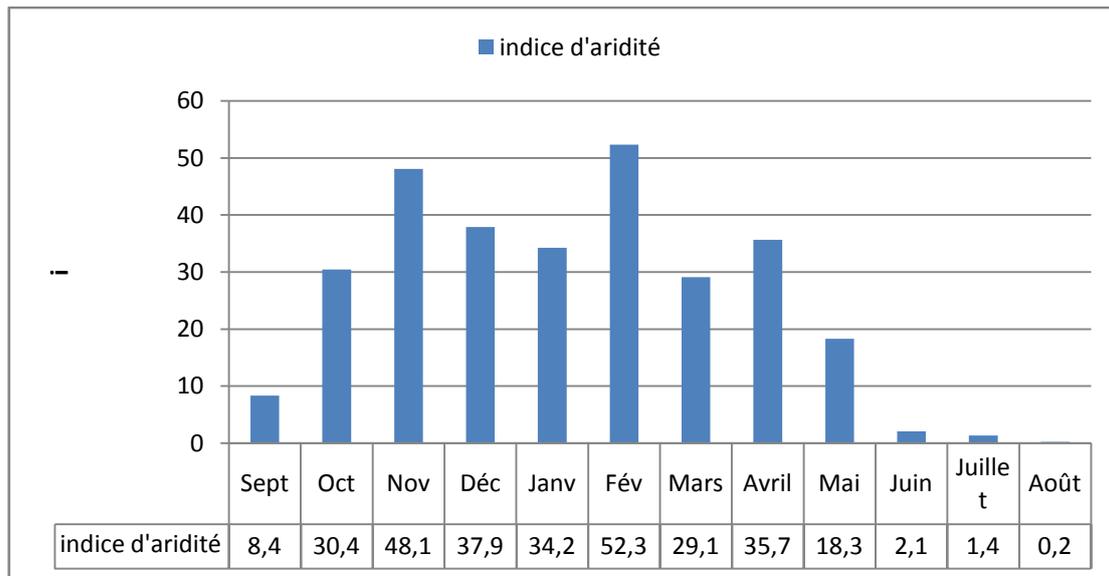


Fig III.8 : Evolution mensuelle de l'indice d'aridité au niveau de la station de Hajria

c. Le quotient pluviaux-thermique d'Emberger

Le quotient pluviaux-thermique d'Emberger (Q_2) correspond à une expression synthétique du climat méditerranéen tenant compte de la moyenne annuelle des précipitations et des températures. 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 total annuelle (mm)

M : Moyenne des maxima du moi le plus chaud (°Kelvin)

m: Moyenne des minima du mois le plus froid (°Kelvin)

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

Le Q_2 est inversement proportionnel à l'aridité, ce climagramme nous permet de déterminer les étages bioclimatiques et les variantes thermiques, c'est ainsi nous obtenons la valeur de Q_2 égale à **9,1**, est classée dans l'étage saharien.

d. Indice de Stewart

L'indice de Stewart est un autre moyen de vérifier l'étiage bioclimatique d'une région. Trois types de climats peuvent être distingués selon cet indice :

- Climat semi-aride ; pour Q_s comprise entre 10 et 50 ;
- Climat désertique ; pour Q_s comprise entre 2 et 10
- Climat insaturé ; pour Q_s inférieur à 2

Q_s est une nouvelle forme du quotient pluviométrique d'Emberger donné par Stewart :

$$Q_s = \frac{3,43P}{(M - m)}$$

P, M et m sont les paramètres utilisés dans l'équation Q_2 d'Emberger .

On obtient : $Q_s = 9,2$

Les résultats obtenus par la méthode de Stewart, confirme bien ceux obtenus par la formule d'Emberger. Ce qui confirme que la station Hajria est dans un étage saharien.

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.

Evapotranspiration représente la somme de toutes les pertes d'eau par transpiration des végétaux et par évaporation. Elle est régie par plusieurs facteurs et nature climatique (température, humidité relative, pression atmosphérique, vent), végétal (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
- Evapotranspiration réelle

1. L'évapotranspiration potentielle

L'évapotranspiration potentielle ou l'évapotranspiration de référence, on désigne par ETP, la quantité maximal 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 établie une équation qui se base sur la température moyenne mensuelle qui s'écrit comme suit :

$$ETP = 1,6 \times \left(\frac{10 \times T_k}{I} \right) \times K$$

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

$I = \sum i_k$: Indice thermique annuel ($I= 204,1$)

i_k = Indice thermique mensuel

$\alpha = \left(\frac{1,6 \times I}{100}\right) \times 0,5$: Coefficient exprimé en fonction de i_k ($\alpha = 3,8$)

Le calcul d'ETP mensuel, par la méthode de Thornthwaite a été établi pour la station de Hajria uniquement, dont on dispose des données nécessaires. Les indices thermiques mensuels ainsi que la température moyenne du mois et ETP sont résumés dans le tableau (III.5). Par la suite les évolutions de l'ETP mensuels, en fonction de la température et des précipitations moyennes mensuelles de la station Hajria, sont représentés respectivement dans la figure(III.9).

Tab III.5 : ETP mensuel (2003/2004-2008/2009) selon la méthode de Thornthwaite

Année	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août
T	24,4	19,2	14,8	13,0	11,0	11,4	13,6	14,6	18,2	24,7	29,6	30,1
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
i	22,2	17,4	13,5	11,8	10,0	10,4	12,4	13,3	16,5	22,5	26,9	27,3
ETP	868,9	591,3	377,3	330,3	271,0	304,9	471,1	569,1	814,0	1113,0	1331,8	1263,3

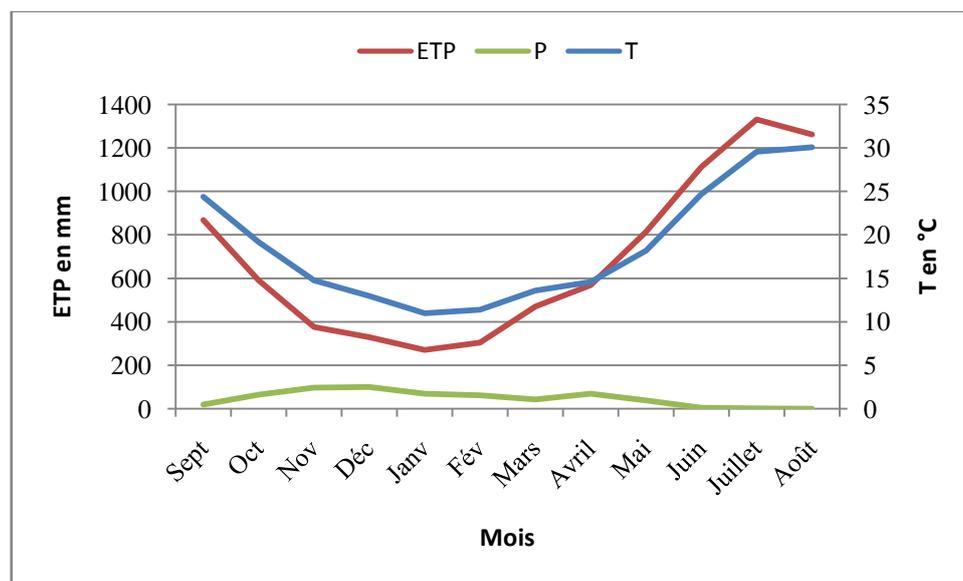


Fig III.9 : Evolution de l'ETP en fonction de Précipitation et la Température au niveau de la station Hajria

Les valeurs de l'ETP mensuels, calculés pour la zone d'étude montrent des fluctuations importantes au cours de l'année. En effet un contraste est observé, un minimum de 271 mm au moi de Janvier et un maximum de 1331,8 mm au moi de Juillet.

Les faibles valeurs enregistrés à partir du mois de Novembre jusqu'au Mars, 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.

Pendant la période fraîche et chaude, les tendances de la période froide s'inversent, ce qui se traduit par les valeurs élevées de l'ETP.

2. Evapotranspiration réelle

On désigne ETR, c'est 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 d'ETR. Il s'agit de 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 (P = 68 mm)

$L = 300 + 25T + 0,05T^3 = 780,0$

T : température moyenne annuelle (T = 19,2°C)

La valeur d'ETR est égale à **71,4 mm/an**.

b. Méthode de coutagne

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

$$ETR = P - \gamma P^2 \quad \text{Avec} \quad \gamma = \frac{1}{0,8 + 0,14 \times T} = 0,3$$

Avec :

ETR : évapotranspiration réelle (mm)

P : précipitation moyenne annuelle (mm)

T : température moyenne annuelle (°C)

D'où ETR est égal à **742,60 mm/an**.

Conclusion

A travers cette étude portant sur l'analyse des données sur les paramètres climatiques du bassin versant du bas Ouergha, nous pouvons 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 quatre mois de Juin, Juillet, Août et Septembre reçoivent des précipitations faibles. La précipitation moyenne annuelle et la précipitation moyenne mensuelle enregistrées pendant cette période sont de 583,54 mm et 48,62 mm.
- 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 Saharien.

On note que le calcul de l'évapotranspiration réelle par des différentes méthodes a donné une valeur moyenne de 407 mm/an. Cette valeur reste toutefois inférieure à la précipitation moyenne annuelle qui est de 583,54 mm et ainsi il en résulte un surplus qui va contribuer à l'alimenter les nappes souterraines et/ ou l'alimentation du ruissellement superficiel.

Nous avons récapitulé les différentes données étudiées dans ce chapitre sous forme d'un tableau (III.6) :

Tab III.6 : Recapitulatifs des données dans le bassin versant de l'Ouergha

Paramètre	Valeurs
Précipitation moyenne annuelle	583,54 mm
Précipitation moyenne mensuelle	48,62 mm
Volume	$6701,68 \times 10^6 m^3 / an$
Température moyenne	18,7 °C
Q_2	9,1
Q_s	9,2
ETP réelle	407 mm/an



Chapitre IV : Étude du régime hydrologique

I. Introduction

L'étude hydrologique du bassin versant du bas Ouergha est réalisée en se basant sur les données métriques Had Kourt et Mjaara, étant donné que les mesures hydrométriques de ces stations ne correspondent pas aux mêmes cycles hydrologiques, cette étude a été portée sur chacun séparément.

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

II. Etude du régime du débit

1. Débit moyenne annuelle

L'évolution des débits moyens annuels reflètent les irrégularités spatiotemporelles, en tenant compte les variations interannuelles dans les deux stations. Les irrégularités spatiales sont en relation direct avec la situation amont, par contre les irrégularités temporelles mettent en relief une succession de période humide et de période sèche.

Le module annuel dans la station de Had Kourd (1970 à 1999) est de **67,69** est plus importante au niveau de la station Mjaara (1983 à 2007), sa valeur est de **8,11**. Ceci reflète la situation amont –aval des deux stations et la succession de période humide et de période sèche.

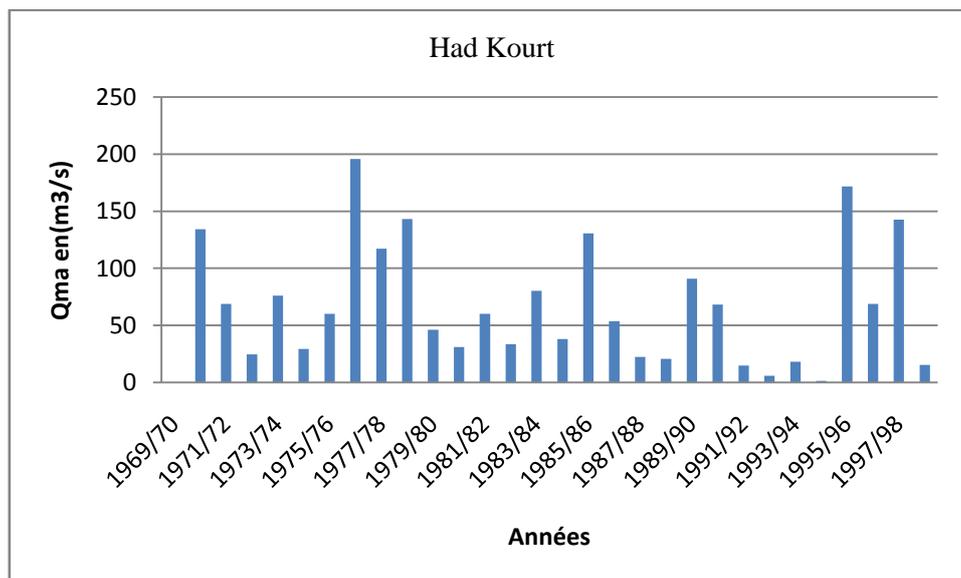


Fig IV.1 : Variation interannuel des débits moyens annuels pour la station Had Kourt

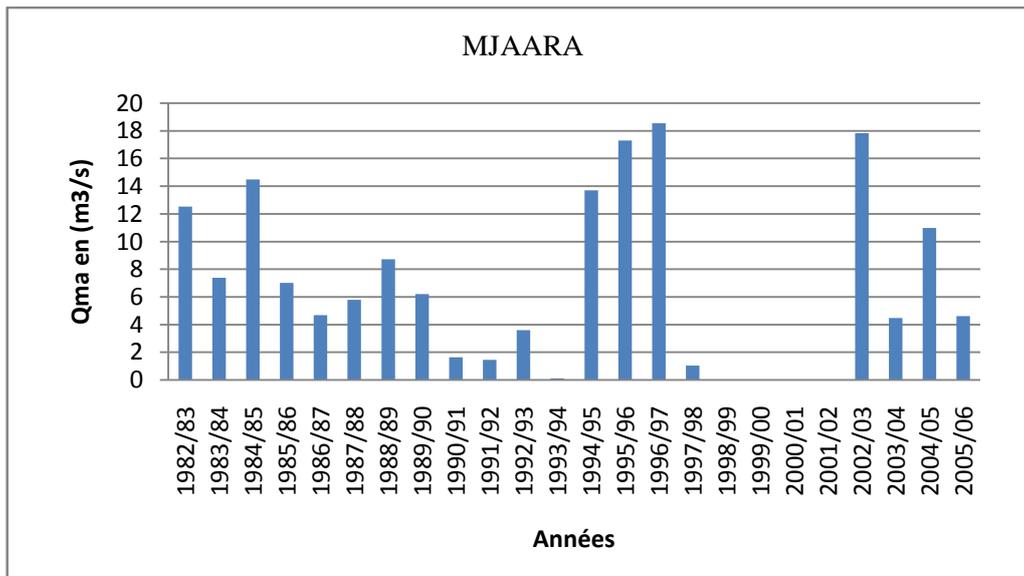


Fig IV.2 : Variation interannuelle des débits moyens annuels pour la station Mjaara

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 semble adéquate.

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 moyenne interannuel

Q_{ma} : Débit moyen annuel

Les résultats obtenus révèlent une alternance des séries de période excédentaire et de période déficitaire au niveau de chaque station.

Cette alternance des séries de périodes humides et périodes sèches n'est pas conforme dans les deux stations. Par contre une caractéristique essentielle observée entre les deux, malgré la différence du nombre d'année d'observation, il s'agit de l'importance de période déficitaire par rapport à celle excédentaire.

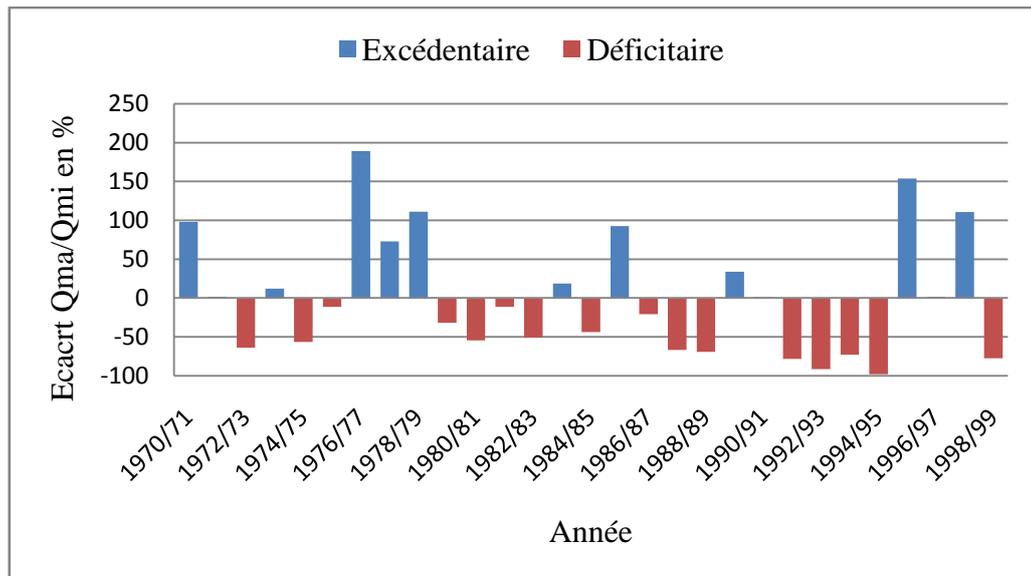


Fig IV.3 : Variation des écarts des débits moyens annuels et interannuels de Had Kourt

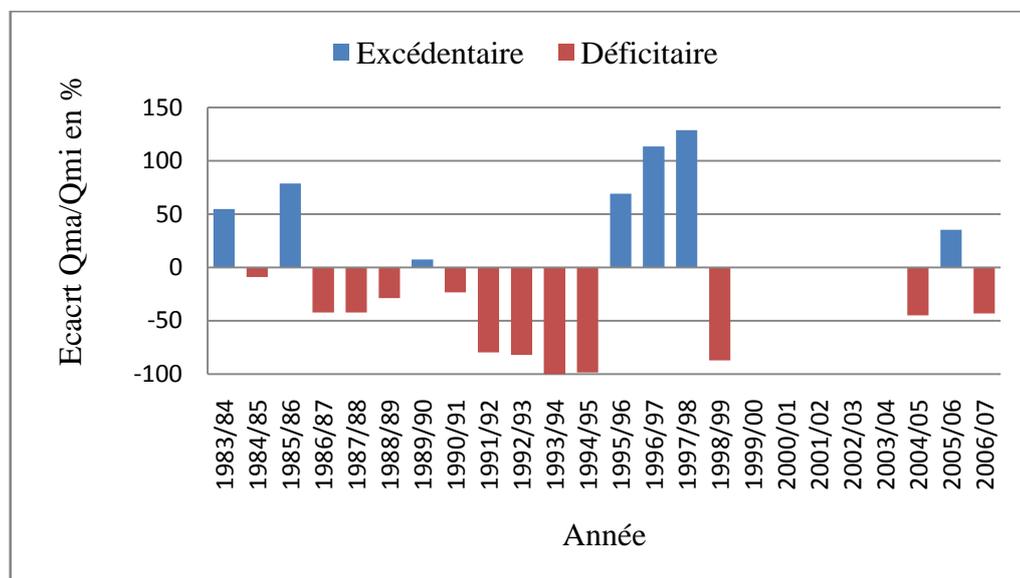


Fig IV.4 : Variation des écarts des débits moyens annuels et interannuels de Mjaara

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 du bas Ouergha à travers les deux stations permanent par la méthode du simple cumul (fig IV.5). 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.

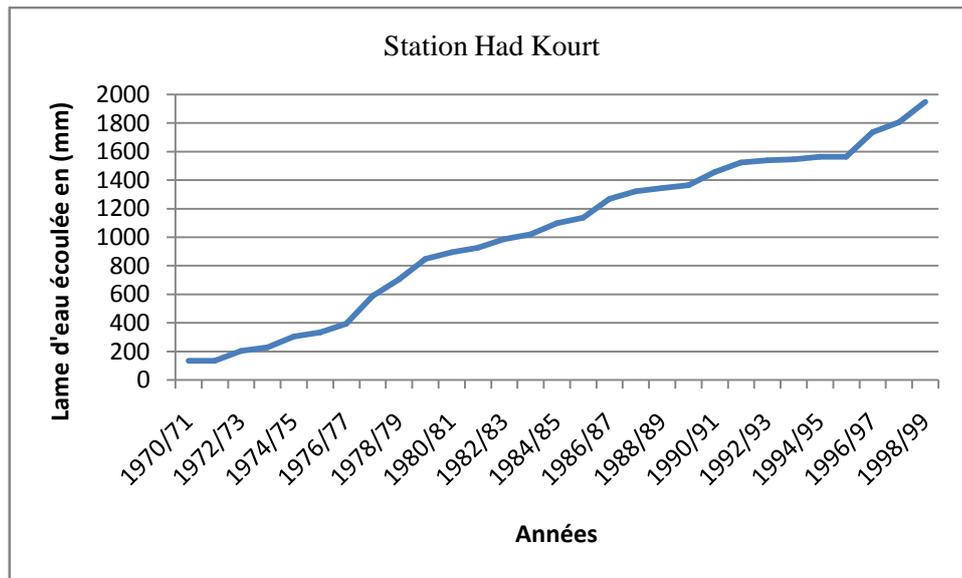


Fig IV.5 : Simple cumulé des lames d'eau écoulées au niveau de la station de Had Kourt

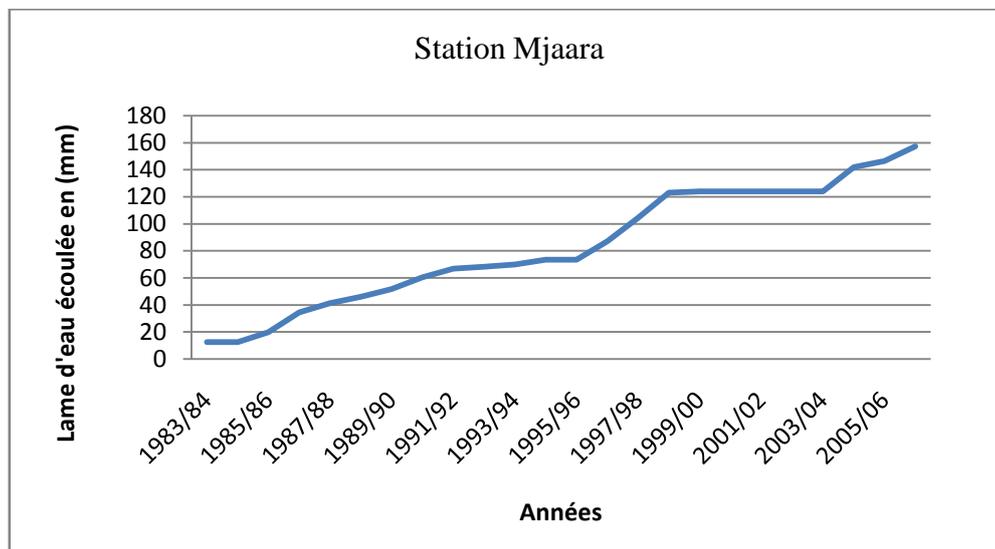


Fig IV.6 : Simple cumulé des lames d'eau écoulées au niveau de la station de Mjaara

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 (Q_i) au débit moyen d'une longue série d'observation (Q_{moy}). Elle peut être complétée par d'autres critères statistiques simples tel que l'écart type, le coefficient de variation (CV), ainsi que le coefficient d'immodération (R) donné par rapport des modules extrêmes ($R = Q_M/Q_m$).

c.1) Coefficient d'hydraulicité

Pour une cour d'eau, le coefficient d'hydraulicité, c'est le débit d'une année donnée sur le débit interannuelle donné.

Pour un coefficient ($CH > 1$), c'est 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 deux stations permanent 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 d'hydrologique sont déficitaires au niveau de la station Had Kourt, ce déficit est encore très accentué à la station Mjaara. En plus, on note un déphasage dans l'évolution du coefficient d'hydraulicité pour la série commune entre les deux stations.

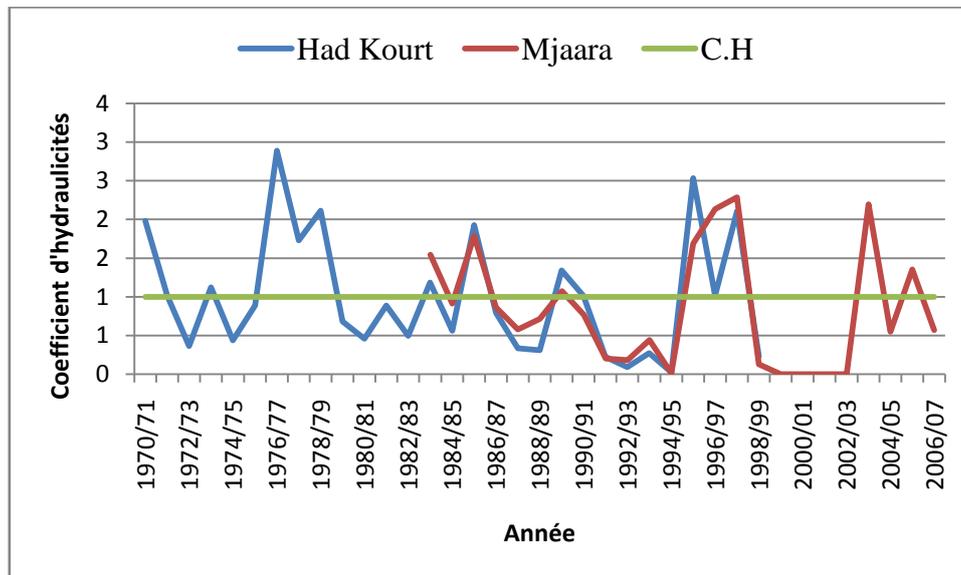


Fig IV.7 : Variation du coefficient d'hydraulicité dans le bassin versant du bas Ouergha

c.2) Coefficient d'immodération

Le coefficient d'immodération est défini comme étant le rapport des modules extrêmes ($R = Q_{max} / Q_{min}$). Les valeurs du coefficient d'immodération sont : **32,17** pour la station de Had Kourt et **98,3** pour la station de Mjaara.

Pour la station de Mjaara, 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 de Had Kourt, la valeur de ce coefficient reflétant ainsi des irrégularités moins importantes, liées à une variabilité à l'échelle spatiale des débits annuels.

c.3) Coefficient de variation

La variation interannuelle peut être aussi précisée par le coefficient de variation (CV), qui permet de mettre en évidence les fortes et les faibles variations du débit.

Les valeurs de ce coefficient sont presque identiques dans les deux stations (**0,91** pour la station Had Kourt et **0,90** pour la station de Mjaara). Ces variations peuvent les considérer légèrement élevées, contribuent à une variabilité des débits extrêmes, ce qui est déjà évoqué par l'indice de modération.

2. Débit moyenne mensuel

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

a. Module mensuel

Les variations mensuelles des débits liquides au niveau des deux stations (Had Kourt et Mjaara) (Fig IV.8 et IV.9) qui reflètent l'impact du climat semi-aride. Ainsi le régime hydrologique de l'oued de l'Ouergha montre des variations saisonnières avec une période humide et une période sèche avec une fluctuation pendant le mois de Février.

D'après ces 2 figures on note que les écoulements moyens mensuels des débits liquides montrent une évolution non régulière qui est illustrée par des fluctuations observés au cours de l'année. A partir du moi de Septembre les débits augmentent progressivement pour atteindre le maximum à Février pour la station Had Kourt, au niveau de la station Mjaara à partir du moi de Septembre les débits augmentent progressivement pour atteindre le maximum à Janvier puis on assiste à une diminution progressive jusqu'à atteindre un minimum au mois d'Août pour les deux stations.

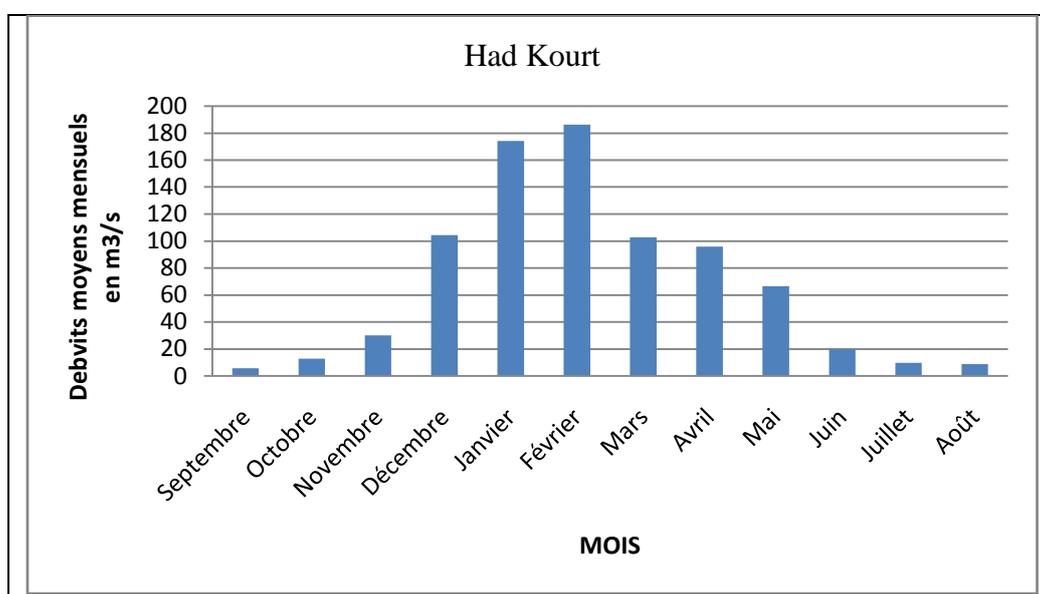


Fig IV.8 : Variation des débits mensuels à la station de Had Kourd

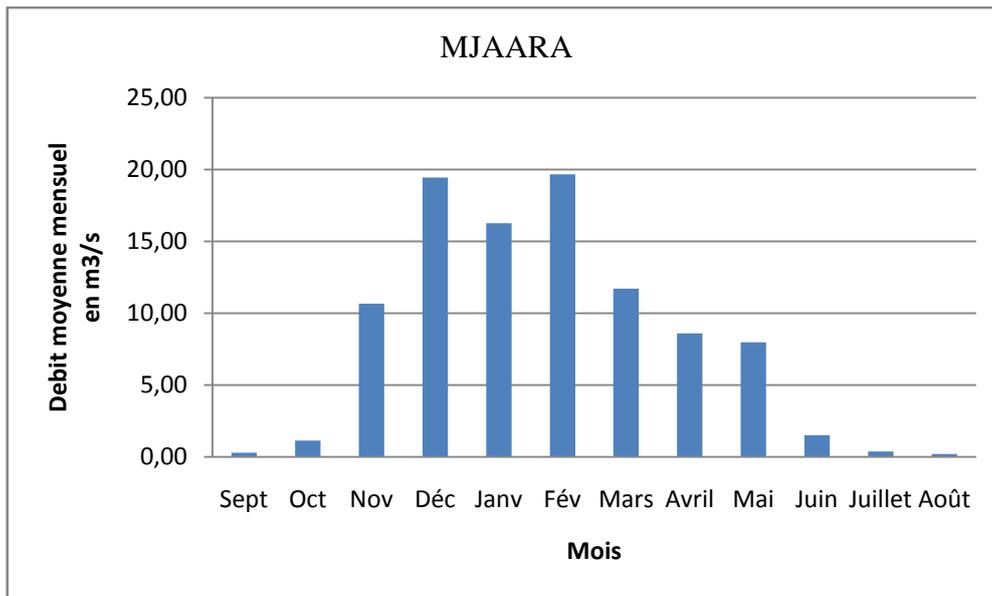


Fig IV.9 : Variation des débits mensuels à la station de Mjaara

On constate que les différences observées entre les variations mensuelles des débits dans les deux stations peuvent être dues d'une part soit par la lithologie du terrain, la surface des zones drainées et le réseau hydrographique et d'autre part soit par leur situations.

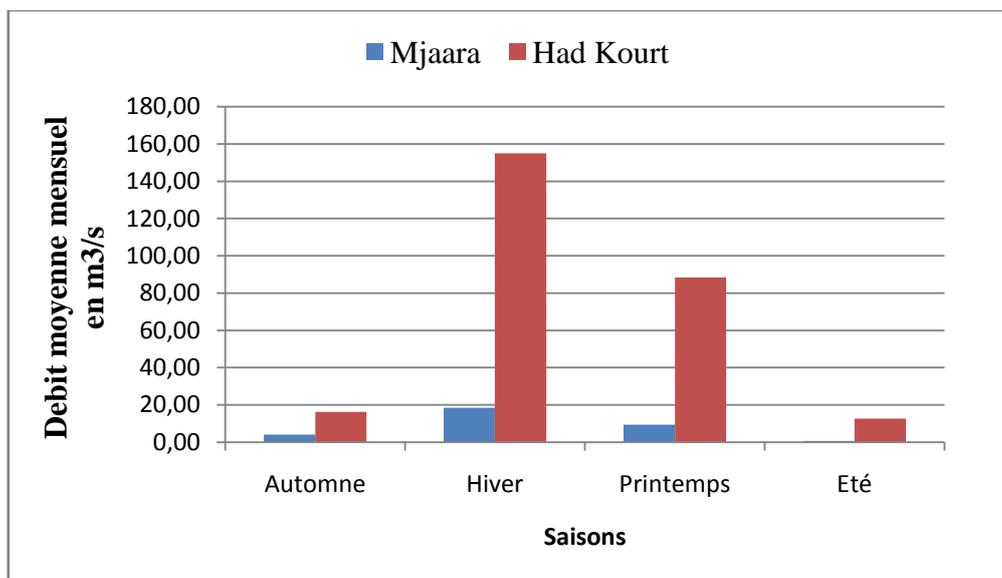


Fig IV.10 : Variation des débits moyens saisonniers dans le bassin versant du bas Ouergha

Les variations mensuelles du débit sont étroitement liées aux précipitations moyennes mensuelles. En effet, à partir de la station d'automne les débits liquides augmentent avec les pluies occasionnelles de ces stations pour atteindre un maximum pendant la saison d'hiver, avec pour conséquence la saturation des sols et ceci 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.

c.4) Coefficient mensuel du débit

Le coefficient mensuel du débit est la relation entre le débit moyen mensuel et le module brut annuel. Il permet de rendre compte de l'importance d'un moi sur l'année. Et il met en évidence la variabilité des écoulements, qui se manifeste 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 deux stations (Fig IV.11) 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 des hautes eaux s'étale de Décembre jusqu'en Avril. Elle en résulte des crues violentes caractérisant le moi de Février pour les deux stations. Par contre, la période de basse eau correspond à la période la plus longue s'étalant du moi de Mai jusqu'en Décembre. Elle en résulte des étiages plus sévères pendant le mois de Juillet, Août et Septembre.

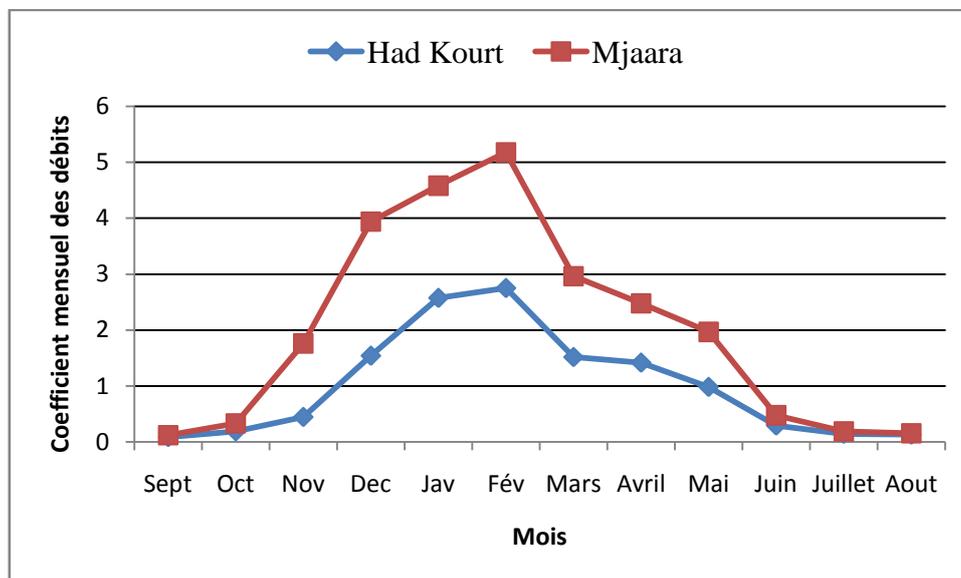


Fig IV.11: Variation du coefficient mensuel des débits au niveau de la station Had Kourt et celle de la station Mjaara

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 des milieux 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 pluvial 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 instantanés s'étalent de 11970/1971 à 1998/1999 pour la station de Had Kourt et 1983/1984 à 2006/2007 pour la station de Mjaara.

Dans le but de cette analyse des débits moyens journaliers dans les deux stations, on va cibler les débits journaliers instantanés de ces années comme : humide, moyenne et sèche.

L'analyse des courbes de débits classés (fig IV.12 et IV.13) au niveau des deux stations donne une idée sur le régime d'écoulement.

La partie gauche de la courbe (débits de crues) permet de donner une idée sur le comportement ruisselant du bassin versant du cours d'eau, c'est-à-dire la réaction plus ou moins forte à la pluviométrie. Plus, la pente du cours d'eau est importante, plus le bassin versant du court d'eau est dit « ruisselant ».

La partie situé à droite (débits d'étiages) caractérise l'importance du soutient de nappe à l'étiage : plus la pente est faible dans cette partie de la courbe, plus la cour d'eau aura tendance à s'approché d'une valeur asymptotique issue du soutient d'étiage par la nappe d'accompagnement du cours d'eau. En revanche, le débit d'étiage est presque nul au niveau des deux stations, ce qui permet de conclure qu'il n'y pas de soutient important par les nappes d'accompagnements, à cause de la présence de Karst dans la partie atlasique du bassin versant ou bien c'est à cause des prélèvements le long de l'oued ainsi que le captage de nombreuses sources pour l'alimentation en eau portable ou l'irrigation.

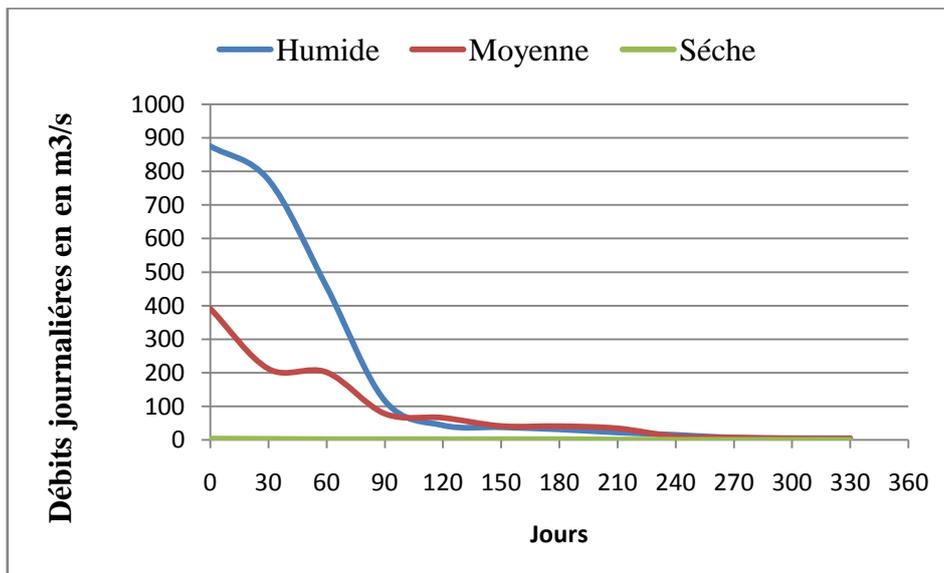


Fig IV.12 : Courbes des débits classés des trois années caractéristiques pour la station Haad Kourt

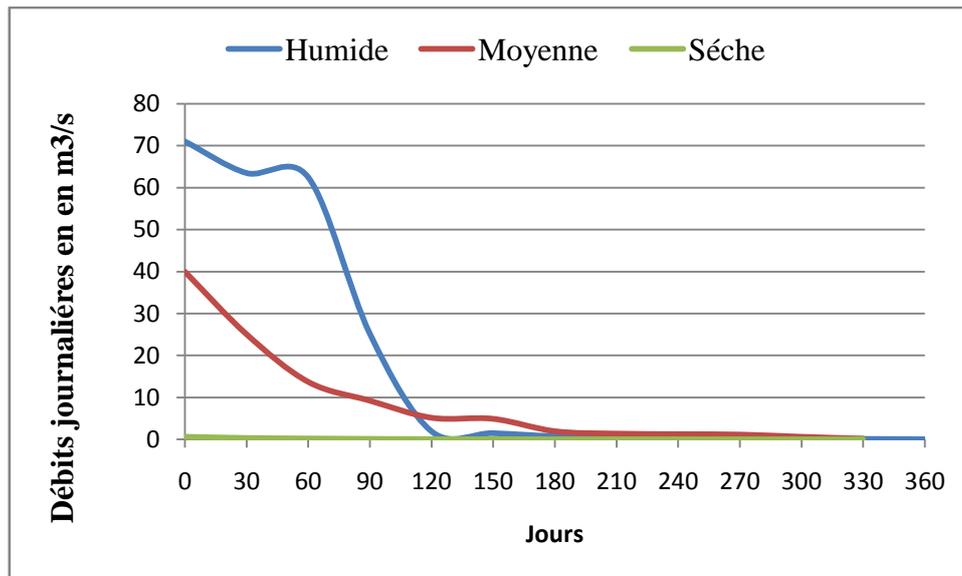


Fig IV.13 : Courbes des débits classés des trois années caractéristiques pour la station Mjaara

III. Relation entre les débits et les précipitations

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 deux stations de l'oued de l'Ouergha (fig IV.14 et IV.15), on constate qu'il existe une simultanéité entre les débits et les précipitations mensuelles.

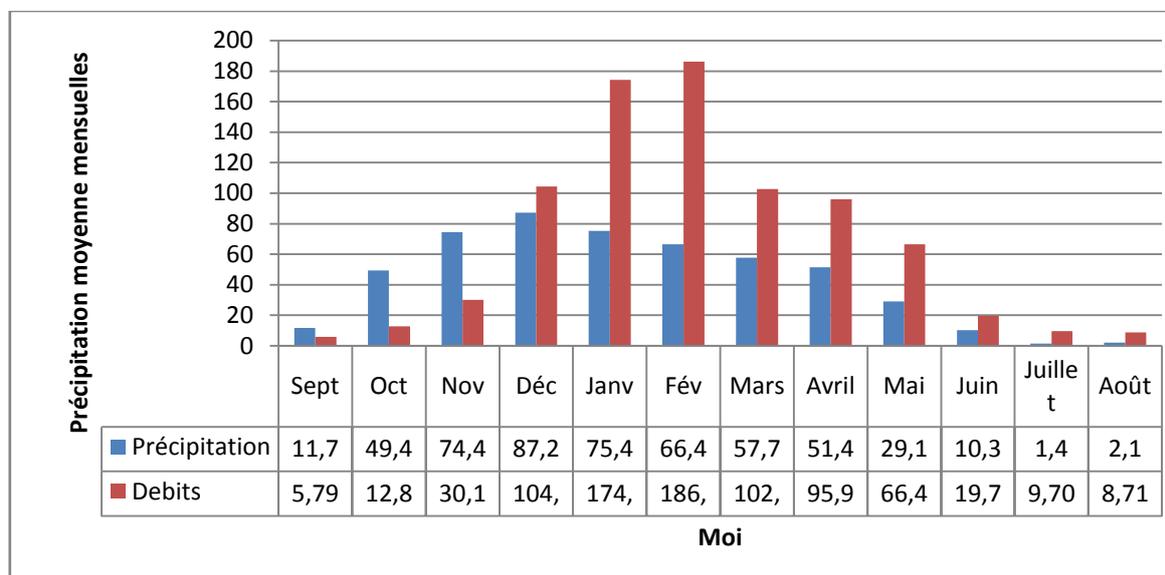


Fig IV.14 : Evolution des précipitations et des débits au niveau de la station Had Kourt

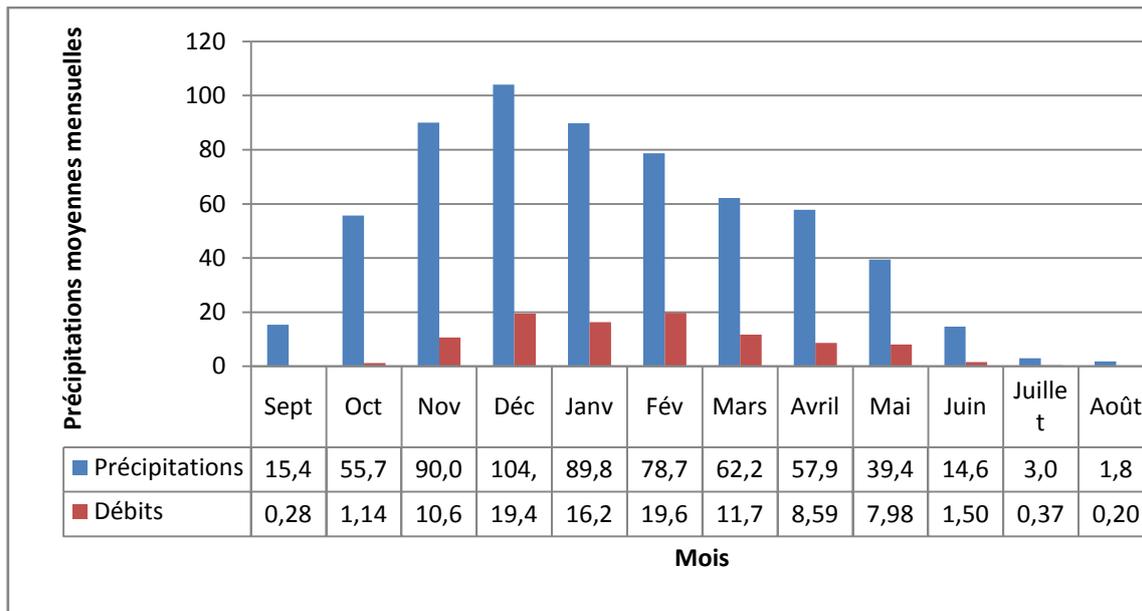


Fig IV.15 : Evolution des précipitations et des débits au niveau de la station Mjaara

L'analyse de ces figures montrent qu'il y a une successivité des crues et des averses, les deux courbes ainsi tracées (celle des débits et les précipitations) évoluent grossièrement dans le même sens et de la même façon, on assiste à un maximum de précipitation en Décembre suivie d'un maximum de débit avec un retard d'un mois en Février. Ce décalage peut aussi être expliqué par la nature lithologique du bassin versant du bas Ouergha (impluvium essentiellement semi-perméable à perméable). Les eaux qui y précipitent ruissellent immédiatement après leur arrivée au sol. Le retard du 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 que le ruissellement répond uniquement aux fortes averses. Les faibles apports sont les mois de Mars, Avril, Mai, Juin et Juillet bien qu'ils ne constituent aucune anomalie sur la courbe des débits mensuels. Les quantités d'eau précipitées lors de ces trois mois seraient reprises par évapotranspiration aussitôt et n'atteindraient pas les valeurs de la réserve utile pour qu'il y ait un excédent déterminant l'écoulement.

1. Coefficient de ruissellement

Le coefficient de ruissellement (C_r) est le rapport entre la hauteur d'eau ruisselée à la sortie d'une surface considérée (dite "pluie nette") et la hauteur d'eau précipitée (dite "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)

La détermination précise de la valeur de C_r 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 écoulee (H en mm) sur la lame précipitée (P en mm)

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

Les valeurs mensuelles du débit spécifique et de la hauteur de la lame d'eau écoulée sont rapportées dans le Tableau(IV.1) pour les stations de Had Kourt et Mjaara :

Tab IV.1 : La valeur du coefficient de ruissellement dans la station Had Kourt et celle de Mjaara

Station	H (mm/an)	P (mm)	Cr
Had Kourt	1815,88	67,69	26,82
Mjaara	217,56	8,11	26,82

2. 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 général, il 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)

a. Ecoulement total

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

D'où $Q = 176,54 \text{ mm/an}$; soit 30,24% de P

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

On a : $V_e = 31,4 \cdot 10^{-2} \times V_p$ Avec $V_p = 697,46 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$

Donc $V_e = 210,91 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$

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, il peut être estimé selon la formule suivante :

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

Avec

R : ruissellement en (m)

P : précipitation moyenne annuelle en (mm)

ETP : évapotranspiration potentielle en (mm)

D'où $R = 138,24$ mm/an ; soit 23,7% de P

On a $V_R = 23,7 \cdot 10^{-2} \times V_p$

D'où $V_R = 165,29 \cdot 10^6 \text{m}^3/\text{an}$

c. Infiltration

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

$$P = \text{ETR} + R + I \quad \Longleftrightarrow \quad I = P - (\text{ETR} + R)$$

Avec

I : infiltration en (mm)

R : ruissellement ($R=138,24$ mm/an)

D'où $I=38,3$ mm/an ; soit 6,56 % de P

On a $V_I = 6,56 \cdot 10^{-2} \times V_p$

Donc $V_I = 45,75 \cdot 10^6 \text{m}^3/\text{an}$

IV. Etudes des crues et d'étiage

Les crues et les étiages 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 hydraulité.

1. Les crues

Selon F.Frécaut(1971), il convient de distinguer crues et haute eaux ; les hautes eaux moyenne représentent une situation saisonnière durable. Les crues au contraire, constituent avec les étiages extrêmes dans 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 G.Remeniaras à 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.

a. Etude des débits maxima instantanés annuels

L'étude des crues est portée sur les débits maxima, instantanés. Les débits maxima instantanés maxima annuels observés pour les deux stations en fonction de leurs périodes correspondantes sont représentés dans les figures (IV.16 et IV.17) :

On constate qu'ils sont très importants dans la plaine alluviale de l'oued de l'Ouergha (station Had Kourt et Mjaara). Ces variations spatio-temporelles, des débits de pointes, peuvent être expliqué par les caractéristiques physiques du bassin, la pluviosité, les particularités hydrodynamiques des milieux et la propagation des eaux. Les débits de pointes enregistrés aux stations Had Kourt et Mjaara feront l'objet d'une étude statistique dont le but est d'assigner au débit maximal une probabilité d'occurrence.

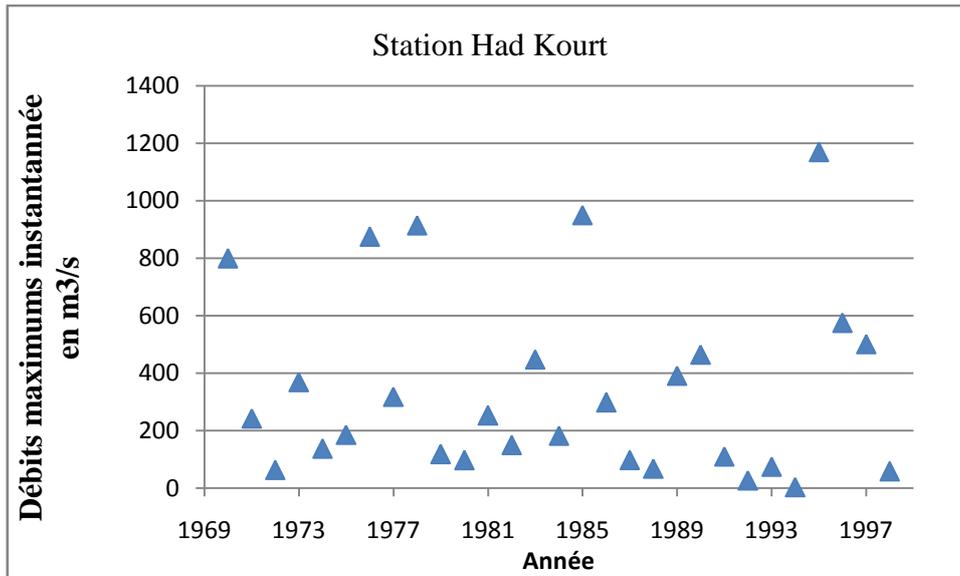


Fig IV.16 : Les débits maxima instantannés pour la station Had Kourt

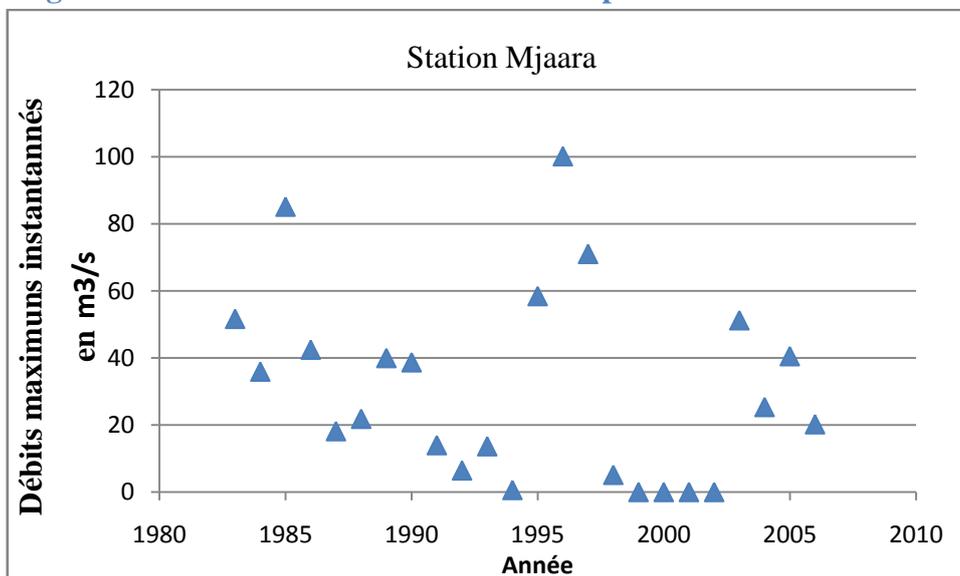


Fig IV.17 : Les débits maxima instantannés pour la station Mjaara

b. Puissance des crues

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

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

Avec :

Q : le débit maximum de crue

S : surface du bassin versant

Les valeurs de l'indice de Mryer et Coutagne «I » à la station de Had Kourt sont beaucoup plus importantes que celle des crues à la station de Mjaara, ce qui confirme une variation spatiotemporelle de la pluviométrie et des crues brutales et violente surtout en amont du bassin.

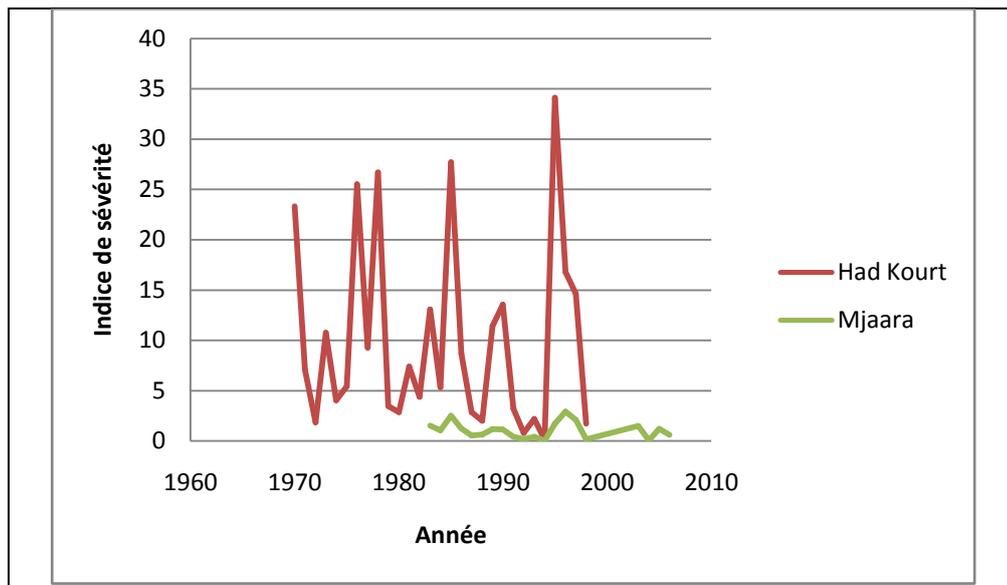


Fig IV.18 : Evolution des indices de sévérité dans la station de Had Kourt et celle de Mjaara

c. 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 connu de façon à interpréter aussi fidèlement que possible l'observation disponible.

Après avoir extraite les débits maximums annuels de la série des débits disponibles, on doit s'assurer que cette série ainsi extraite, respect certains 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 certain erreur de différents 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 telle que la variation climatique est importante.
- 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 de la série, une série de donnée est dite stationnaire, si en dépit des fluctuations aléatoires dans les valeurs classées chronologiquement, on ne retrouve pas de valeurs significatives dans le temps. La stationnarité s'agit de vérifier l'indépendance temporelle des propriétés statistiques (moyen, variance...) de la loi qui régit le phénomène.

d. Donnés et méthode

Les séries étudiées représentent les débits instantanés maximums annuels mesurés au niveau des deux stations permanentes (Had Kourt et Mjaara). 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 spatialement pour le traitement des données hydrologiques extrêmes. HYFRAN est un logiciel d'ajustement de loi statistique comprenant un ensemble d'outils mathématiques puissants, conviviaux et flexibles permettant en particulier l'analyse statistique d'événement extrêmes et de manière plus générale l'analyse statistique de série de données.

HYFRAN a été développé par l'équipe de Dr.B ; 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 loi statistique et à partir d'une analyse comparative des résultats, nous choisirons la meilleure adéquation.

d.1) 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 prise par la variable des unes par rapport aux autres dans les deux échantillons. Ainsi deux hypothèses H_0 et H_1 sont formulés :

- ✓ H_0 : les deux groupes sont issus de la même population
- ✓ H_1 : les deux groupes sont issus des populations différentes

L'hypothèse H_0 est testée contre H_1 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 U_1 et U_2 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 de la station de Had kourt de l'échantillon est inférieur à 20 .Donc l'acceptation ou le rejet de l'hypothèse H_0 , sera basé sur la comparaison de la plus petite valeur de U_1 et U_2 aux valeurs de U de Mann whitney. Si U calculé est inférieur à U lue sur la table, H_0 est rejetée.

d.2) Test d'indépendance de Wald Wolfowitz

C'est un test auto-corrélation vérifiant l'indépendance de deux échantillons subdivisé à partir de l'échantillon global. Ce test, est connu également comme test de l'éléa, utilisée 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 l'hypothèse H_0 d'indépendance sont vérifiées, l'ordre d'apparition des valeurs issues de deux groupes seront du au hasard.

Le programme de HYFRAN calcul 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% :

$U_{2,5\%} = 1,5$ au niveau de la station de Mjaara

$U_{2,5\%} = 0,27$ au niveau de la station de Had Kourt

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 , fourni par la plus part des logiciels de test, comparée au risque α 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

Les résultats du test Wald Wolfowitz sur les données, issues de la station de Mjaara et celle de la station Had Kourt sont représentés respectivement dans le Tableau (IV.2) suivant :

Tab IV.2 : Résultat du test de Wald Wolfowitz sur les données issues de ces deux stations

Station	U calculé	$U_{2,5\%}$	P	α
Had Kourt	0,18	0,27	0,79	5%
Mjaara	0,77	1,5	0,14	5%

Pour la station de Had Kourt et la station de Mjaara montrent que U calculé est comprise entre les valeurs critiques $-0,27 \leq U \leq 0,27$ et $P = 0,79 > \alpha$; et $-1,5 \leq U \leq 1,5$ et $P > \alpha$, ainsi l'hypothèse de H_0 est acceptée au niveau de la signification de 5% et par conséquents les observations sont indépendantes.

d.3) Test de stationnarité (Kendal)

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

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 tableau (IV.3) suivant :

Tab IV.3 : Résultats du test de Kendal sur les données issues des deux stations

Station	Valeur de la statistique de K	Probabilité critique P
Had Kourt	0,73	0,46
Mjaara	1,0	0,30

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

e. Statistique de base

e.1) Résultats de statistique de base

Les résultats des statistiques de base pour les séries des débits maximums annuels respectivement pour la station de Had Kourt et celle de la station de Mjaara figurent dans le tableau (IV.4) suivant :

Tab IV.4 : Résultats des statistiques de base de l'oued de l'Ouergha dans la station de Had Kourt et celle de Mjaara

Statistique de base	Valeurs de Had Kourt	Valeurs de Mjaara
Nombre de donné	30	17
Minimum	3,6	0,60
Maximum	1200	100
Moyenne	340	38
Ecart type(σ)	320	30
Médiane	240	37
Coefficient de variation(C_v)	0,93	0,78
Coefficient d'asymétrie (C_s)	1,2	0,72
Coefficient d'aplatissement (C_k)	2,9	2,2

Ces résultats nous permettent de ressortir les conclusions suivantes :

-Les valeurs extrêmes Max et Min de la station de Mjaara sont plus faibles que ceux de la station de Had Kourt du faite que ces deux stations sont situées respectivement en amont et en aval de l'oued de l'Ouergha.

-Les éducateurs de localisation (Moyenne et Médiane) sont différents aussi ; même chose pour les éducateurs de dispersions (Ecart type, coefficient de variation).

Nous pouvons donc conclure que les crues de la station de Had Kourt ($\sigma=320$) est plus importante que ceux de Mjaara ($\sigma=30$). L'écart type représente une variabilité absolue.

-Cela se réalise à l'aide du coefficient de variance(C_v) définit par le rapport exprimé en pourcentage. Ce coefficient permet de mettre en évidence des fortes variations de débits au niveau de la station de Had Kourt ($C_v=0,93$) par rapport à celle de la station de Mjaara ($C_v=0,78$).

-Les paramètres de formes concrétisés par le Coefficient d'asymétrie (C_s) et le Coefficient d'aplatissement (C_k) nous permettent, de conclure respectivement 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

e.2) Histogramme de fréquence

L’histogramme de fréquence est une représentation graphique de la distribution d’une variable quantitative et permet une représentation claire.

Les histogrammes des fréquences (Fig IV.19 et figure IV.20) 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.

Les classe des faibles débits au niveau de Had Kourt est [1000 – 1250] et [100 – 125] et [50 – 75] au niveau de Mjaara, celle des fort débits [0 – 250]est plus importante au niveau de Had Kourt.

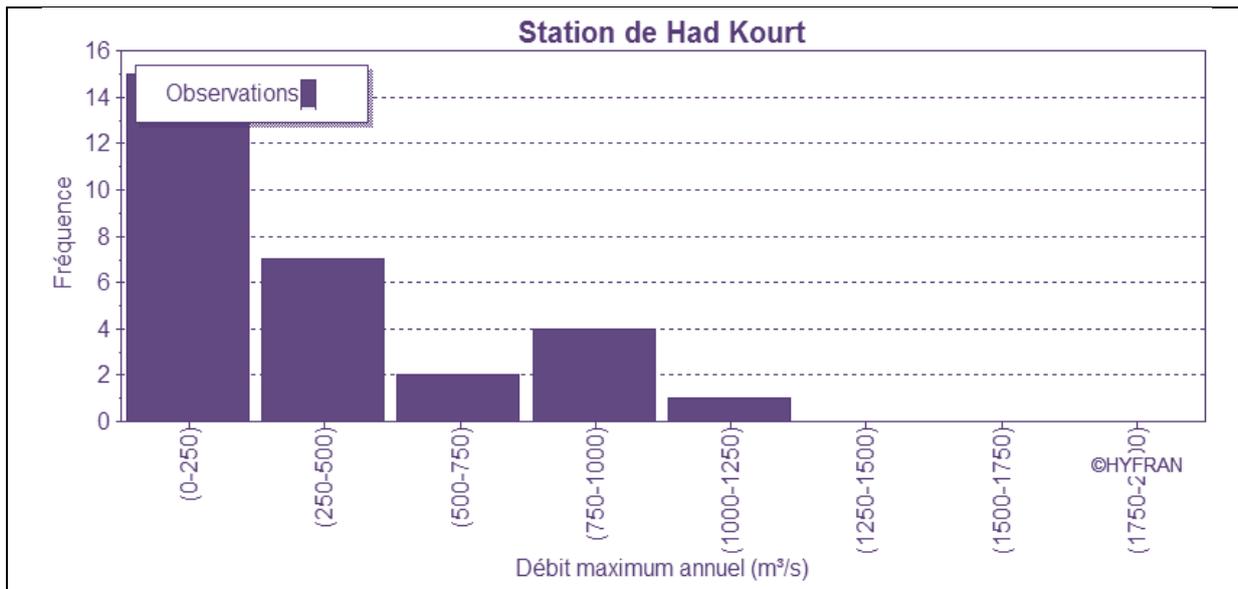


Fig IV.19 : Histogramme de fréquence des débits maximum annuel pour la station de HadKourt

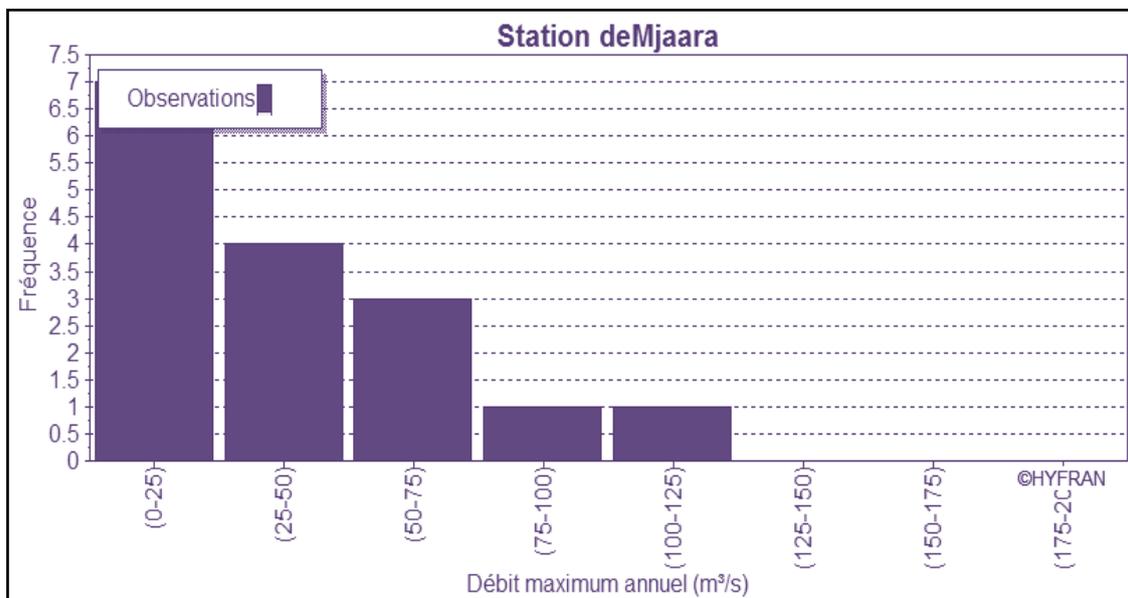


Fig IV.20 : Histogramme de fréquence de débit maximum annuel pour la station de Mjaara

e.3) Courbe chronologique des sommes cumulatives

Les courbes chronologiques des sommes cumulatives pour les deux stations, obtenues, sont représentées dans la figure (IV.21 et IV.22).

Les résultats obtenus dans les deux stations montrent deux tendances différentes :

Pour la station de Had Kourt, on a des pentes positives et deux pentes négatives, ce qui prouve les fluctuations des débits, par contre au niveau de la station Mjaara, à l'exception de l'année 1994 où on note une pente négative, le reste à une tendance positive.

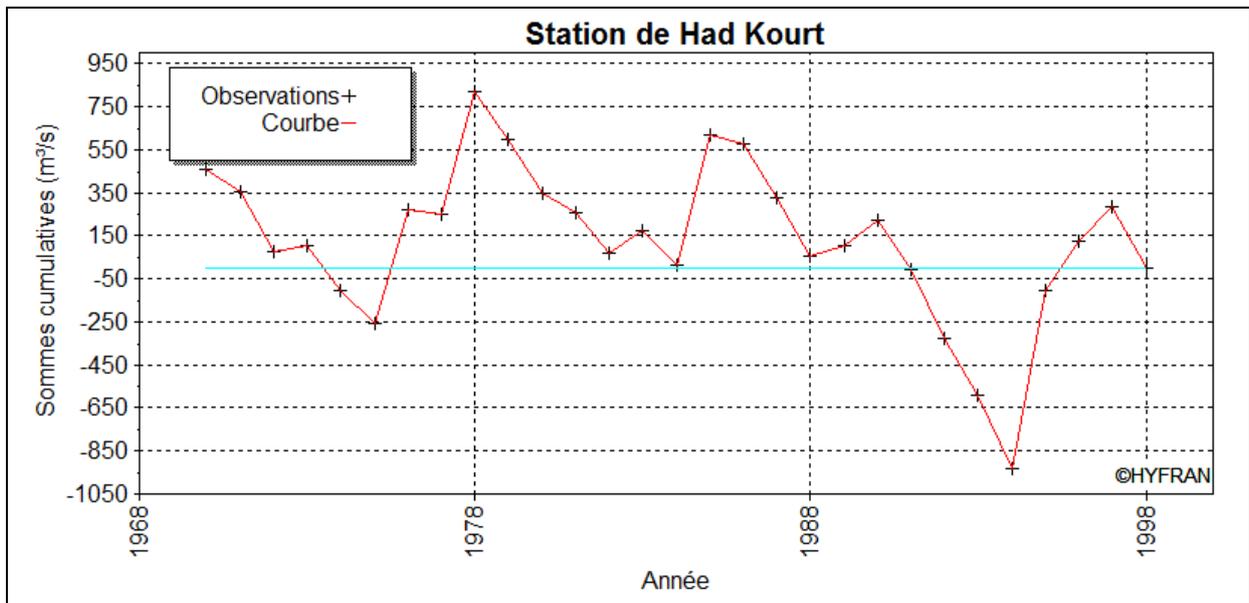


Fig IV.21 : Courbe chronologique des sommes cumulatives pour la station Had Kourt

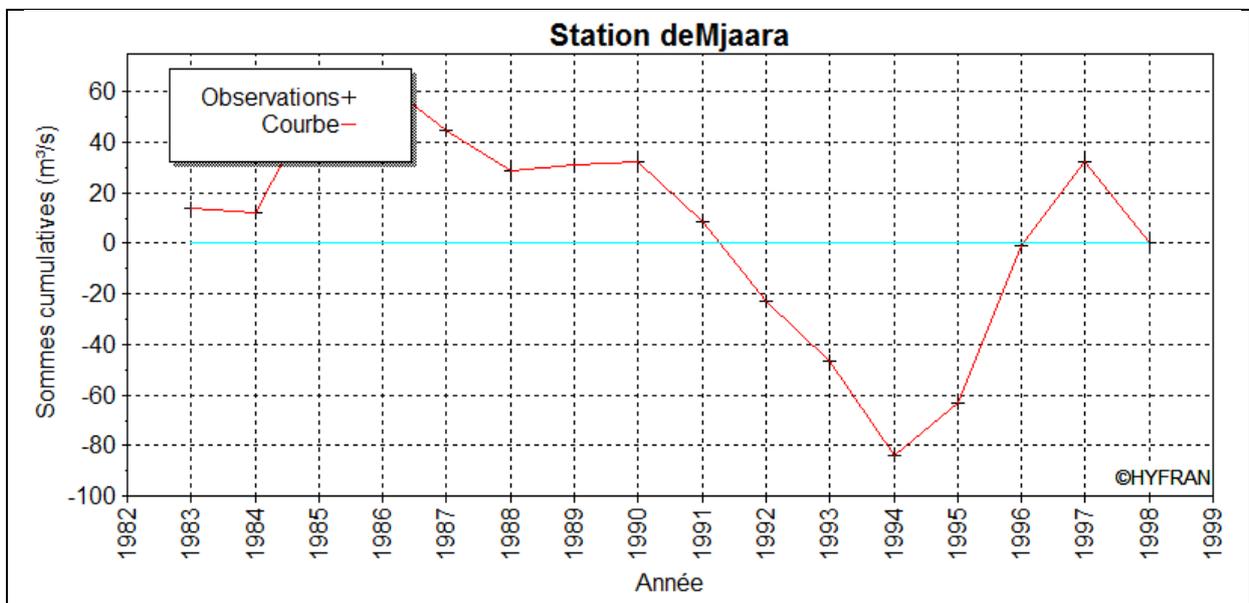


Fig IV.22 : Courbe chronologique des sommes cumulatives pour la station Mjaara

e.4) Ajustement aux lois statistiques

Les séries des débits maximums annuels ont été utilisés pour 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, mais 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 (GEV). Cependant, 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 (descriptif 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%.

e.4.1) Ajustement à la loi de Gumbel (méthode de vraisemblance)

La loi de Gumbel (Fig IV.24) 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 :

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

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 :

Tab IV.5 : Résultats de l'ajustement à la loi de Gumbel (Maximum de vraisemblance pour les deux stations)

Station	Paramètres		Résultats				
	α	β	Résultat statistique (X^2)	Probabilité critique (P)	Degré de liberté	Nombre de classe	Nombre d'observation
Had Kourt	216,739	202,739	11,79	0,0190	4	7	29
Mjaara	23,4053	23,827	200	0,5724	3	6	16

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 Had Kourt, 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 Mjaara, nous pouvons accepter H0 au niveau de signification de 5%.

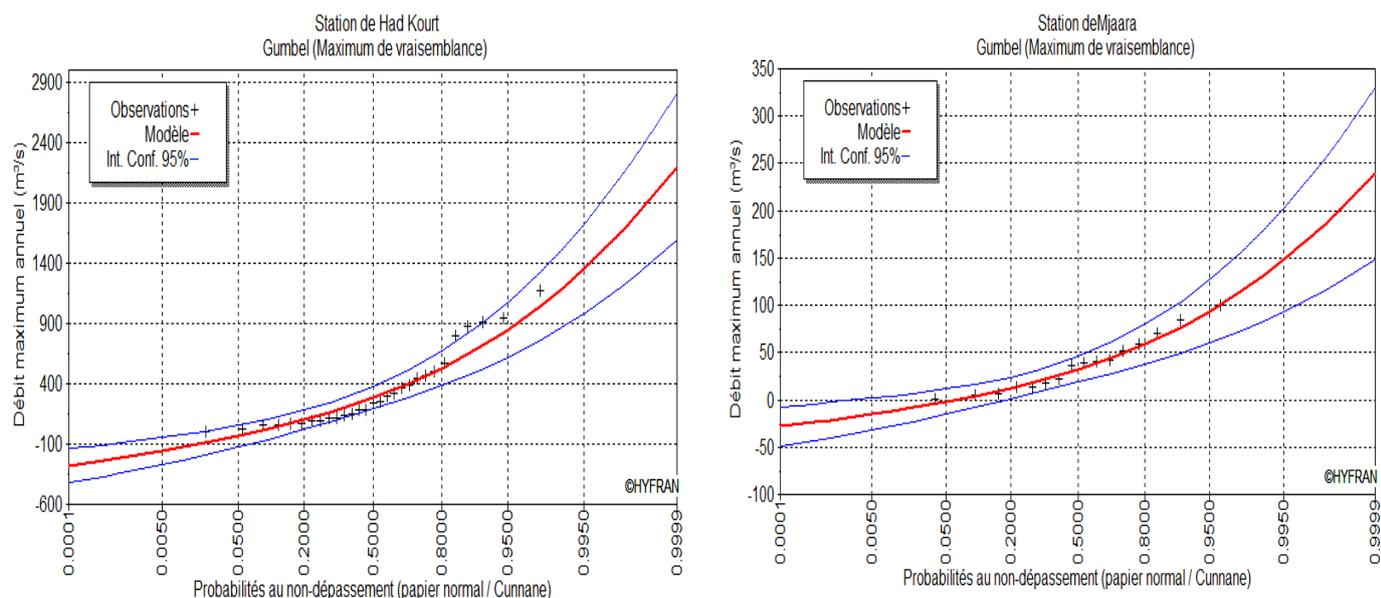


Fig IV.23 : Ajustement graphique de la série maxima instantanée à la loi Gumbel pour la station Had Kourt et celle de la station Mjaara

e.4.2) Ajustement à la loi de Jenkinson GEV (méthode des moments pondérés)

L'estimation des moments pondérés 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, u .

- k : Position variable s'assimilant en quelque sorte à la valeur moyenne pour une loi normale,
- α : Echelle s'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 : $X_T = u - \frac{\alpha}{k} \left[1 - \left(-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right)^{-K} \right]$

On a obtenu ce tableau (IV.6) suivant :

Tab IV.6 : Résultats et les paramètres du test de l'ajustement à la GEV pour la station de Had Kourt et celle de la station de Mjaara

Station	Paramètres				Résultats		
	k	α	u	Résultat de la statistique (X^2)	Probabilité critique(P)	Nombre de classes	Degré de liberté
Had Kourt	-0,228542	192,362	176,257	6	0,1116	6	3
Mjaara	-0,0300904	23,881	23,1701	2	0,3679	6	2

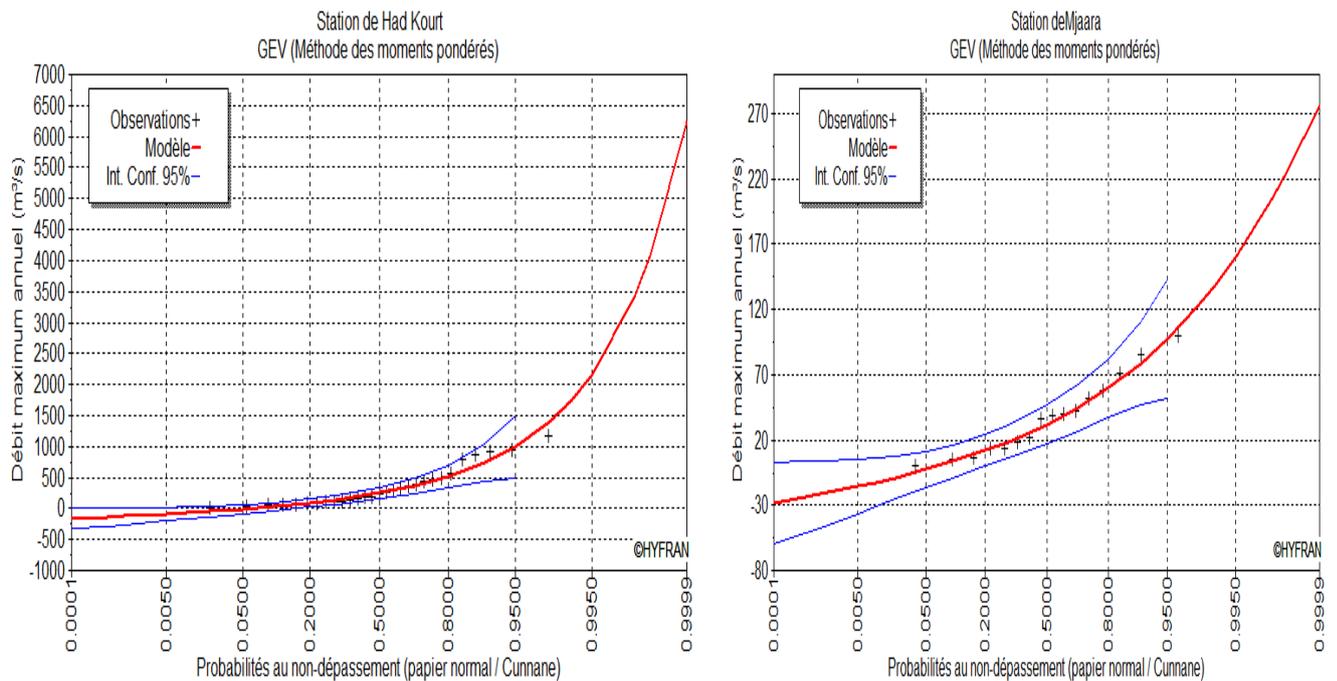


Fig IV.24 : Ajustement graphique de la série des débits maxima instantanée à la loi de GVE pour la station Had Kourt et celle de la station Mjaara

Hypothèse :

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

Donc l'hypothèse de H_0 est acceptée au niveau de la signification de 5% pour les deux stations.

e.4.3) Ajustement de la loi de Gamma (ou Pearson)

Ajustement de la loi de Gamma s'agit d'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'indensité

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

On a obtenu ce tableau IV.7 suivant :

Tab IV.7 : Résultats et les paramètres du test de l'ajustement à la loi de Gamma pour la station Had Kourt et celle de la station Mjaara

Station	Paramètres		Résultats			
	α	λ	Résultat de la statistique (X^2)	Probabilité critique(P)	Nombre de classes	Degré de liberté
Had Kourt	0,00310	1,06427	3,10	0,5407	7	4
Mjaara	0,0306546	1,15523	1,25	0,7410	6	3

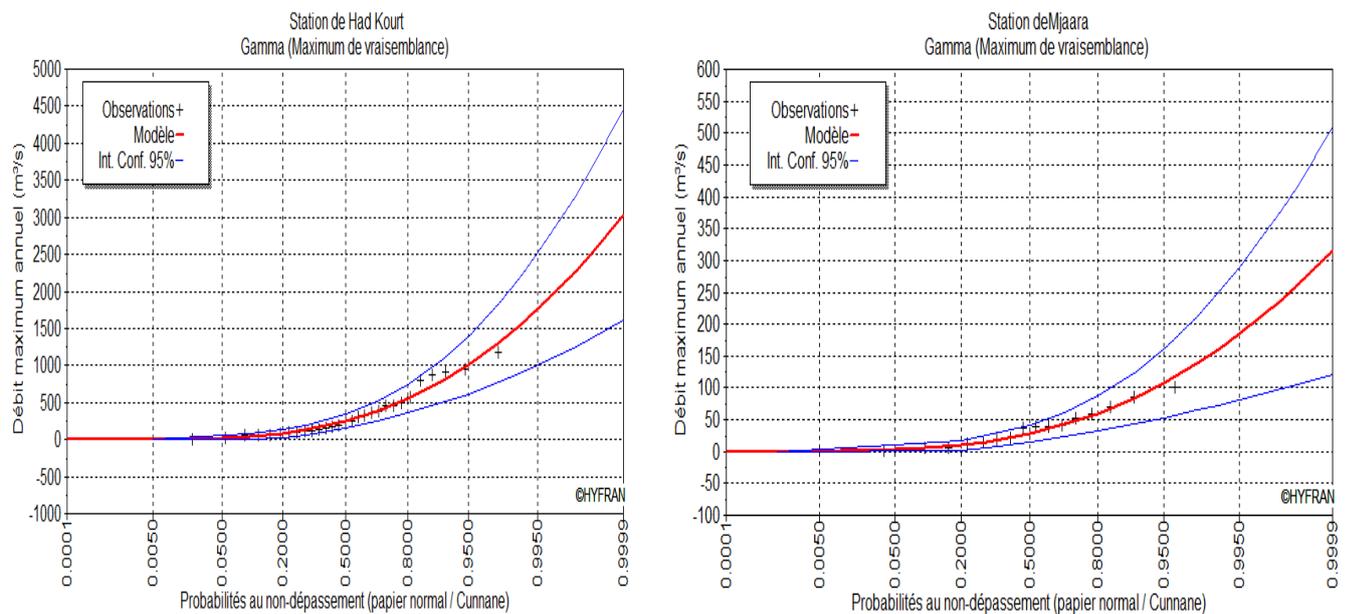


Fig IV.25 : Ajustement graphiquement de la série des débits maxima instantanés à la loi de Gamma pour la station Had Kourt et celle de la station Mjaara

Hypothèse

- H0 : L'échantillon provient d'une loi de Gamma
- H1 : L'échantillon ne provient pas d'une loi de Gamma

Donc l'hypothèse H0 est acceptée au niveau de signification de 5%.

e.4.4) Ajustement de la loi de Log Pearson III (méthode des moments)

Ajustement de la loi de Log Pearson III, c'est une loi à trois paramètres, sa fonction de densité de probabilité s'écrit :

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

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 obtient ce tableau IV.8 suivant :

Tab IV.8 : Résultats et les paramètres du test de l'ajustement à la loi de Log Pearson III pour la station Had Kourt et celle de la station Mjaara

Station	Paramètres			Résultats			
	α	λ	m	Résultat de la statistique (X^2)	Probabilité critique(P)	Nombre de classes	Degré de liberté
Had Kourt	-2,42345	2,25769	3,18993	4,55	0,2077	7	3
Mjaara	-2,48975	1,73408	2,06933	2	0,3679	6	2

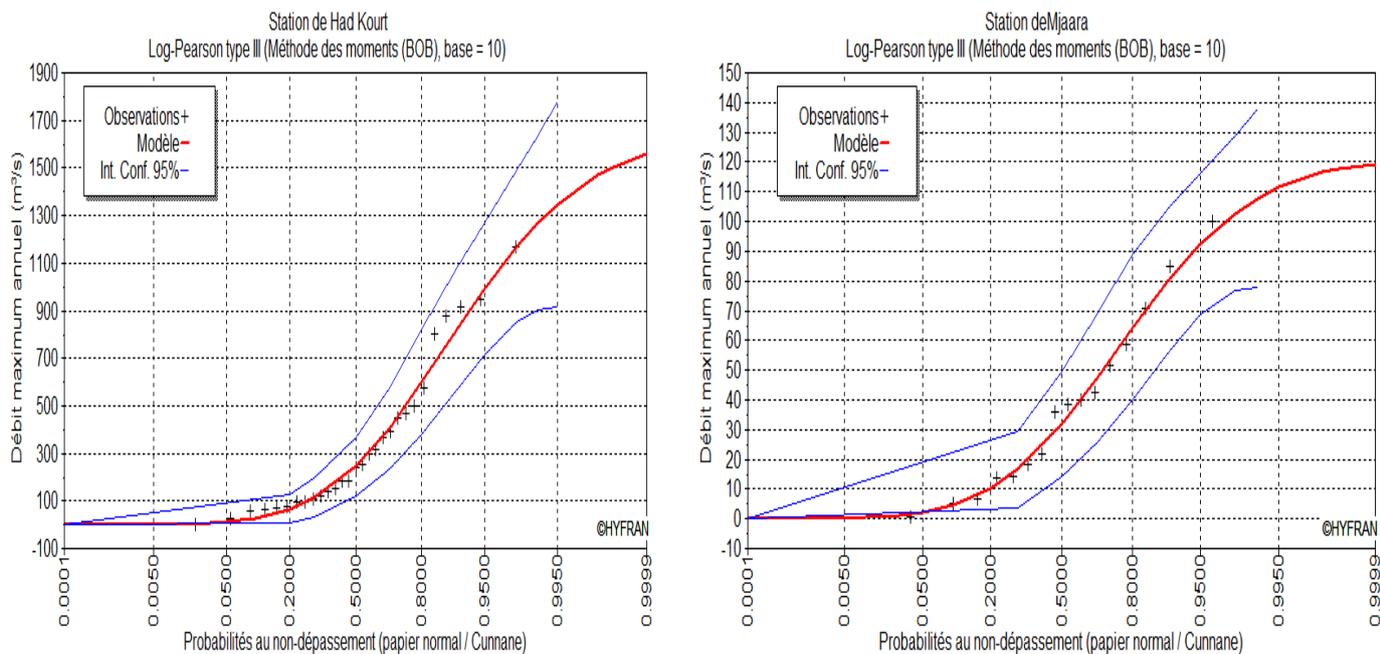


Fig IV.26 : Ajustement graphique de la série des débits maxima instantanée à la loi de Log Perason III pour la station Had Kourt et celle de la station Mjaara

Hypothèse

- H0 : L'échantillon provient d'une loi de Log Perason III
- H1 : L'échantillon ne provient pas d'une de Log Perason III

Donc l'hypothèse H0 est acceptée au niveau de signification de 5%.

f. Comparaison aux ajustements aux lois statistiques

Les débits maximums annuels dans ces bassins s'ajustent mieux à des lois dissymétriques basées sur les méthodes des moments et des maximums de vraisemblance en l'occurrence les lois Log-PearsonIII, ce que montrent les deux figures (IV.27) suivantes :

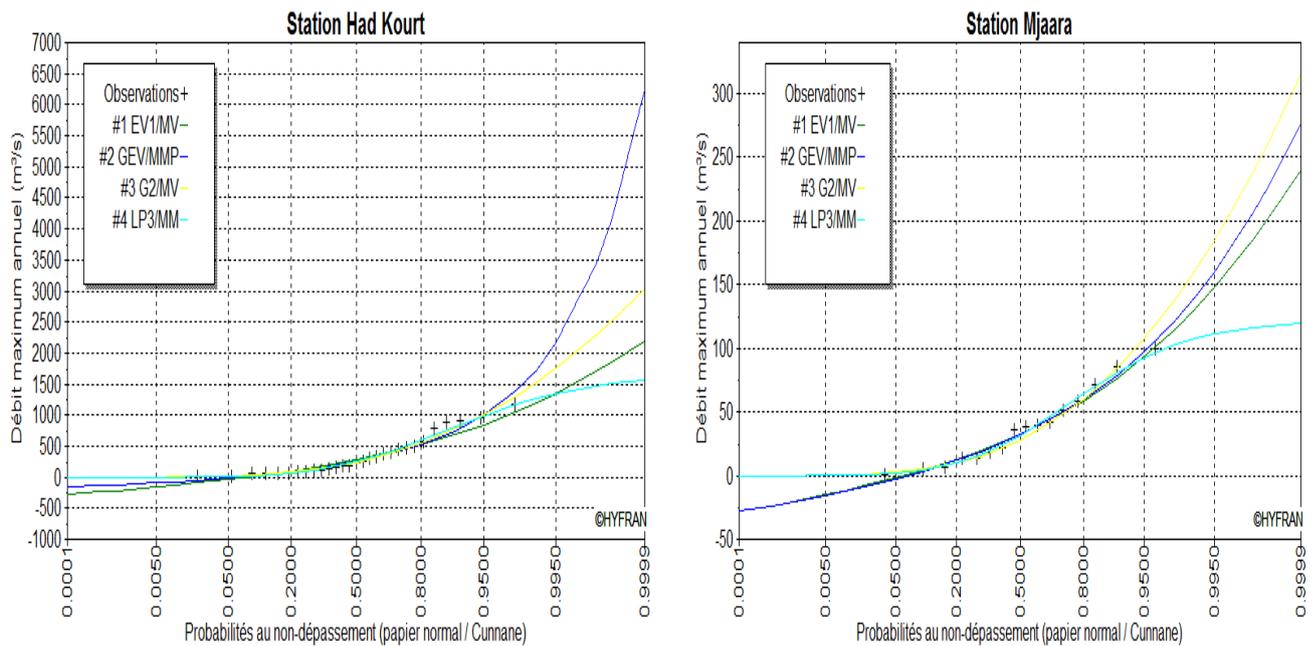


Fig IV.27 : Résultats de comparaison des ajustements graphique au niveau de la station Had Kourt et celle de Mjaara

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-perasonIII (méthode des moments).

g. Quantile estimés pour différente période de retour

La période de retour T d'un événement est la durée moyenne qui sépare de crues supérieures ou égale à cet événement. Inversement, une crue de période de retour T est une crue ou la moyenne est égalée ou dépassé 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 crues à 1% de chance d'arriver chaque année pendant 100 ans.

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, 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
$$\mathbf{T} = \frac{1}{1-F(X)_i}$$

Les résultats des quantiles estimés pour différentes périodes de retour T, au niveau des deux stations, sont représentés respectivement dans le tableau (IV.9) et (IV.10).

L'analyse de ses tableaux suivants montre que les quantiles estimés sont très proches pour les faibles périodes de retour ($T \leq 10$), par contre au-delà ils s'écartent suivant la loi d'ajustement. et pour une période de retour ($T \leq 20$), les quantiles estimés par la loi de GEV et Gamma sont plus importantes, mais par contre ceux estimés par la loi de Gumbel et Log-pearson III sont plus faibles dans les deux stations.

Tab IV.9 : Résultat d'ajustement graphique de la serie des debits maxima instantnnés de la station Had Kourt aux différents lois

Période de retour :T(ans)	Probabilité de non dépassement de q	Quantile X_T (m ³ /s) pour différentes période de retour selon les lois d'ajustement :			
		Gumbel	GEV	Gamma	Log Perason III
10000.0	0.9999	2200	6200	3000	1600
2000.0	0.9995	1800	4100	2500	1500
1000.0	0.9990	1700	3400	2300	1500
200.0	0.9950	1400	2200	1800	1300
100.0	0.9900	1200	1700	1500	1300
50.0	0.9800	1000	1400	1300	1200
20.0	0.9500	850	990	1000	990
10.0	0.9000	690	740	780	820
5.0	0.8000	530	520	550	600
3.0	0.6667	400	370	390	410
2.0	0.5000	280	250	240	250
1.4286	0.3000	160	140	130	110
1.2500	0.2000	99	90	83	65
1.1111	0.1000	22	30	41	27
1.0526	0.0500	35	10	20	12
1.0204	0.0200	93	49	7.8	4.0
1.0101	0.0100	130	72	3.5	1.8
1.0050	0.0050	160	90	1.3	0.83
1.0010	0.0010	220	120	0.14	0.14
1.0005	0.0005	240	140	0.41	0.069
1.0001	0.0001	280	160	1.6	0.013

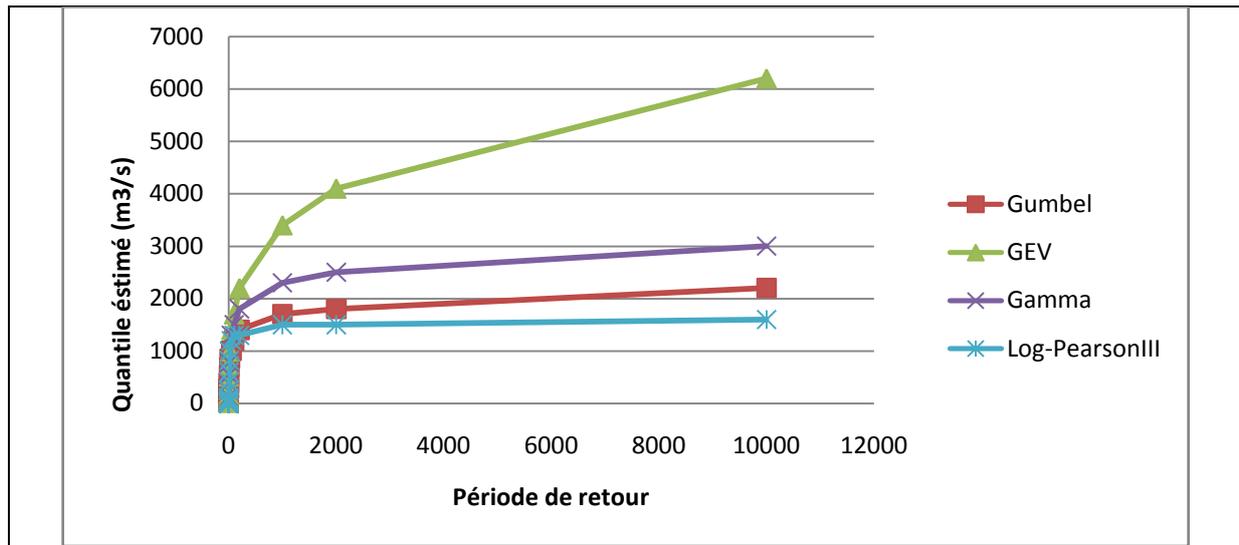


Fig IV.28 : Temps de retour correspondant aux débits maxima annuels enregistrés au niveau de la station Had Kourt

Tab IV.10 : Résultat d'ajustement graphique de la serie des débits maxima instantnnés de la station Mjaara aux différents lois

Période de retour :T(ans)	Probabilité de non dépassement de q	Quantile X_T (m3/s) pour différentes période de retour selon les lois d'ajustement :			
		Gumbel	GEV	Gamma	Log Perason III
10000.0	0.9999	240	280	310	120
2000.0	0.9995	200	230	260	120
1000.0	0.9990	190	210	240	120
200.0	0.9950	150	160	180	110
100.0	0.9900	130	140	160	110
50.0	0.9800	120	120	140	100
20.0	0.9500	93	97	110	92
10.0	0.9000	76	79	84	81
5.0	0.8000	59	60	60	64
3.0	0.6667	45	45	43	48
2.0	0.5000	32	32	28	32
1.4286	0.3000	19	19	15	17
1.2500	0.2000	13	12	9.9	10
1.1111	0.1000	4.3	3.5	5.1	4.7
1.0526	0.0500	1.9	2.6	2.7	2.2
1.0204	0.0200	8.1	8.7	1.1	0.83
1.0101	0.0100	12	12	0.54	0.40
1.0050	0.0050	15	16	0.21	0.20
1.0010	0.0010	21	22	-0.050	0.039
1.0005	0.0005	24	24	-0.055	0.020
1.0001	0.0001	28	28	0.033	0.0040

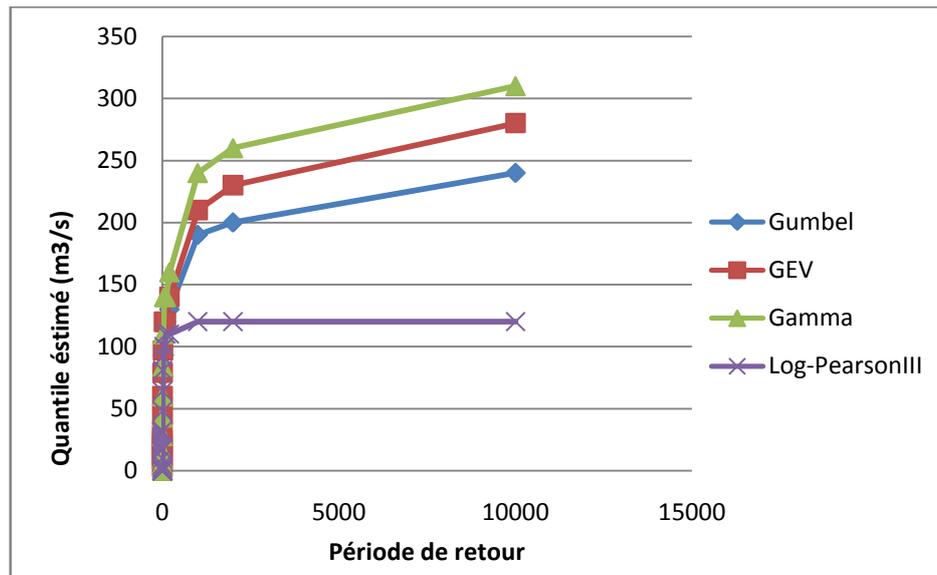


Fig IV.29 : Temps de retour correspondant aux débits maxima annuels enregistrés au niveau de la station Mjaara

2. Les étiages

Plusieurs difficultés sont rencontrés par l'utilisateur dans la pratique de l'étude des étiages, on trouve souvent, le choix de la variable d'étiage à retenir. Contrairement aux débits de crue qui peuvent être représentés par un débit maximal instantané ; la préhension du phénomène d'étiage est beaucoup plus délicate, l'effets des multiples prélèvement, dérivation et rejet dont un nombre de fleuve se font l'objet, mais surtout l'effet de la durée des périodes d'étiages influe considérablement sur le choix de la variable. Ce sont des interventions humaines qui sont généralement responsables des perturbations et des débits d'étiage, très conséquente en été et des difficultés de mesure inhérentes au phénomène lui même. Les jaugeages et période d'étiage nécessitent une grande précision et les résultats sont souvent attaché d'erreurs.

a. Analyse de fréquence des étiages

On utilise les débits minimums, annuel pour faire l'analyse fréquentielle des étiages et on doit respecter certains hypothèses de base (debit naturel, homogénéité, stationnarité, ect...), avant de procéder au choix de la distribution statistique qui s'ajuste le plus adéquatement aux débits minimums annuels .

a.1) Test d'indépendance de Wald Wolfowitz

Les résultats du test Wald Wolfowitz sur les données, issues de la station Had Kourt et celle de la station Mjaara sont représentés respectivement dans le tableau (IV.11) suivant :

Tab IV.11 : Résultat du test Wald Wolfowitz sur les données issues de la station Had Kourt et celle de la station Mjaara

Station	Valeur de la statistique $ U $	Probabilité critique
Had Kourt	1,6	0,100
Mjaara	1,2	0,25

Hypothèse :

-H₀ : Les observations sont indépendantes

-H₁ : Les observations sont dépendantes (auto_corrélation d'ordre 1)

Donc, nous pouvons accepter H₀ au niveau de la signification de 5%.

a.2) Test de stationnarité (Kendal)

Les résultats du test Kendal sur la stationnarité des données issues de la station Had Kourt et celle de la station Mjaara sont représentés respectivement dans le tableau (IV.12) suivant :

Tab IV.12 : Résultat du test Kendal sur les données issues de la station Had Kourt et celle de la station Mjaara

Station	Valeur de la statistique K	Probabilité critique
Had Kourt	1,9	0,053
Mjaara	0,32	0,75

Hypothèse :

-H₀ : Il n'y a aucune tendance dans les observations

-H₁ : Il y a une tendance dans les observations

Donc, nous pouvons accepter H₀ au niveau de la signification de 5%.

b. Statistique de base

b.1) Résultat de statistique de base

Les résultats de la statistique de base pour les séries de débits minimums annuels pour les deux stations figurent dans le tableau (IV.13) suivant :

Pour les valeurs extrêmes (Max et Min), on enregistre des minimums nuls au niveau de la station Mjaara et une valeur maximale d'étiage plus faible.

Les valeurs des indicateurs de dispersions (Variance, Ecart type et coefficient de variation) ne montrent pas de grande variabilité dans les deux stations.

Le coefficient d'asymétrie est positif dans les deux stations, cela signifie une distribution plus étalée à gauche.

Coefficient d'aplatissement nous permet de conclure une distribution plus aplatie pour la station Mjaara que celle de la station Had Kourt.

Tab IV.13 : Résultats des statistiques de base de l'oued de l'Ouergha dans la station de Had Kourt et celle de Mjaara

Statistique de base	Valeurs de Had Kourt	Valeurs de Mjaara
Nombre de données	30	17
Minimum	0,10	0
Maximum	5,4	0,36
Moyenne	2,9	0,064
Ecart type	1,4	0,096
Médiane	2,7	0,012
Coefficient de variation	0,50	1,5
Coefficient d'asymétrie	0,15	2,2
Coefficient d'aplatissement	2,4	5,9

b.2) Courbe chronologique des sommes cumulatives

La figure (IV.30) représente la courbe chronologique des sommes cumulatives.

Les résultats de cette courbe montrent qu'on a une pente négative et plusieurs pentes positives au niveau de la station Had Kourt, au niveau de la station de Mjaara, on a une pente positive et plusieurs pentes négatives, ce qui prouve les fluctuations des débits d'étiage.

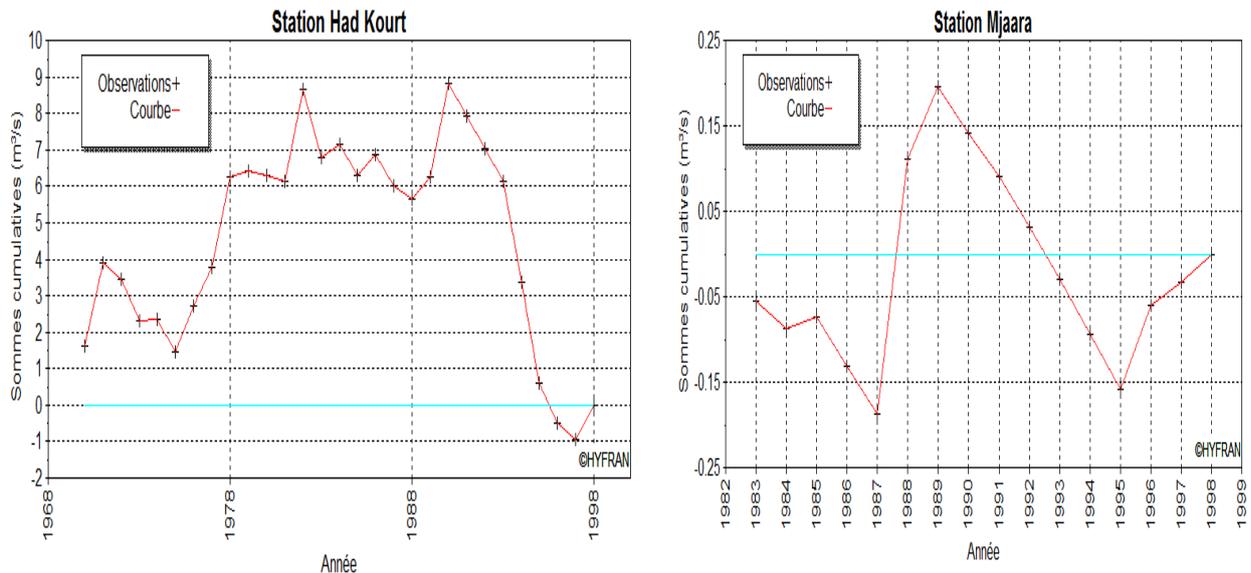


Fig IV. 30 : Courbe chronologique des sommes cumulatives au niveau de la station de Had Kourt et celle de la station Mjaara

b.3) Ajustement aux lois statistiques

Les séries des débits minimums mensuels ont été utilisées pour l'analyse fréquentielle, le choix de la loi statistique pour leur ajustement est inspiré des résultats de comparaison des ajustements aux différentes lois, puisqu'il n'existe pas de règle théorique pour justifier le choix d'une telle loi. Mais d'après les travaux antérieurs de certains auteurs sur le choix des lois statistiques pour l'ajustement des débits minimums annuels, nous retenons les conclusions suivantes :

- Zian A , (2011) a appliqué la loi de Weibull, la loi Pareto généralisée, la loi normale et la loi de Gumbel pour ajuster les débits d'étiages de l'oued R'dom. D'après ses résultats, il a retenu la loi de Pareto comme la loi la plus adéquate .
- Noura J, (2012) a conclu que la loi de Pareto et Log-Pearson sont les plus adéquates pour le bassin versant de l'Inaouene à la station Bab Marzouka.

Face à cette problématique du choix des lois statistiques pour l'ajustement, nous sommes renforcés à tester plusieurs lois et les comparées pour retenir les lois les plus adéquates.

La figure (IV.31) montre la comparaison de lois utilisées pour l'ajustement de débits minimum mensuel des deux stations de l'oued de l'Ouergha.

• **loi de Jenkinson GEV(méthode de vraisemblance)**

On a obtenu ce tableau suivant

Tab IV.14 : Résultats et les paramètres du test de l'ajustement à la GEV pour la station Had Kourt et celle de la station Mjaara

Station	Les paramètres			Résultats			
	k	α	u	Résultat de la statistique (X^2)	Probabilité critique(P)	Nombre de classes	Degré de liberté
Had Kourt	0,279617	1,38785	2,38524	5,03	0,1693	2	3
Mjaara	-1,6019	0,0131885	0,00711597	2	0,3679	6	2

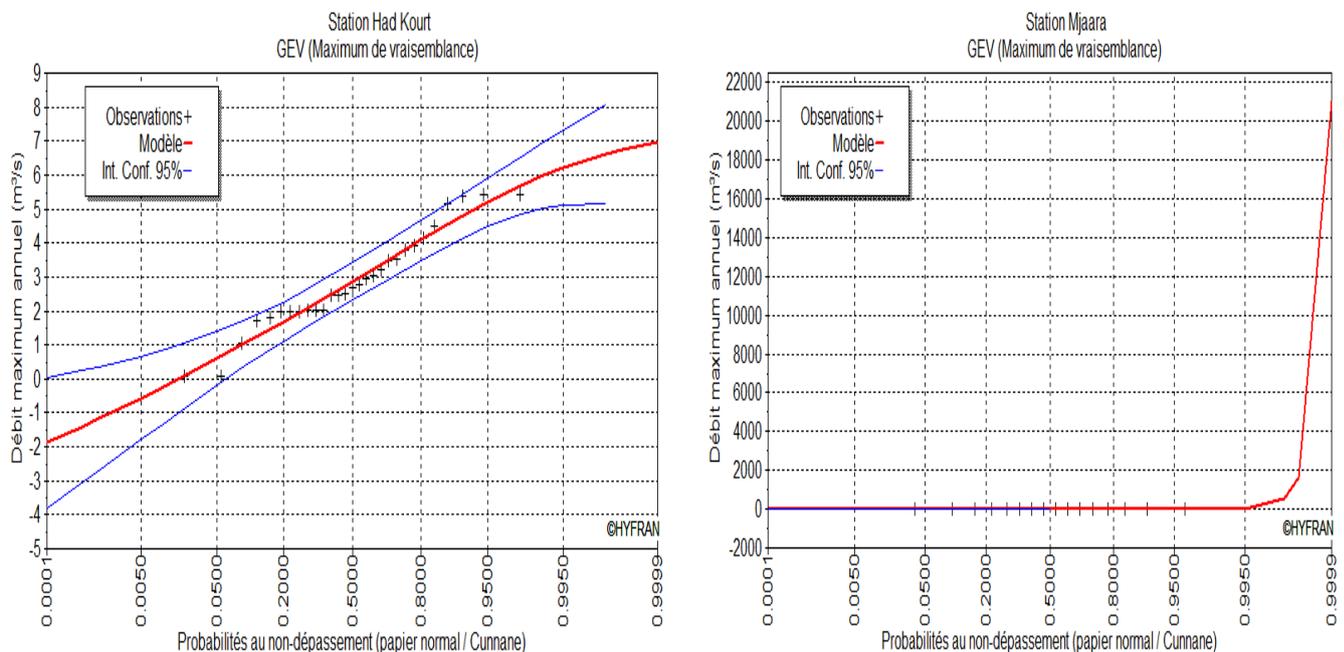


Fig IV.31 : Ajustement graphique de la série des débits maxima instantanée à la loi de GVE pour la station Had Kourt et celle de la station Mjaara

Hypothèse :

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

Donc l'hypothèse de H_0 est acceptée au niveau de la signification de 5% pour les deux stations.

• **loi de Gumbel**

On a obtenu ce tableau (IV.15) suivant :

Tab IV.15 : Résultat de l'ajustement à la loi de Gumbel (Maximum de vraisemblance) pour les deux stations

Station	Paramètres		Résultats				
	α	β	Résultat statistique (X^2)	Probabilité critique (P)	Degré de liberté	Nombre de classe	Nombre d'observation
Had Kourt	1,36975	2,17121	3,10	0,5407	4	7	29
Mjaara	0,0541824	1,36975	21,50	0,0001	3	6	16

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 Mjaara, 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 Had Kourt, nous pouvons accepter H0 au niveau de signification de 5%.

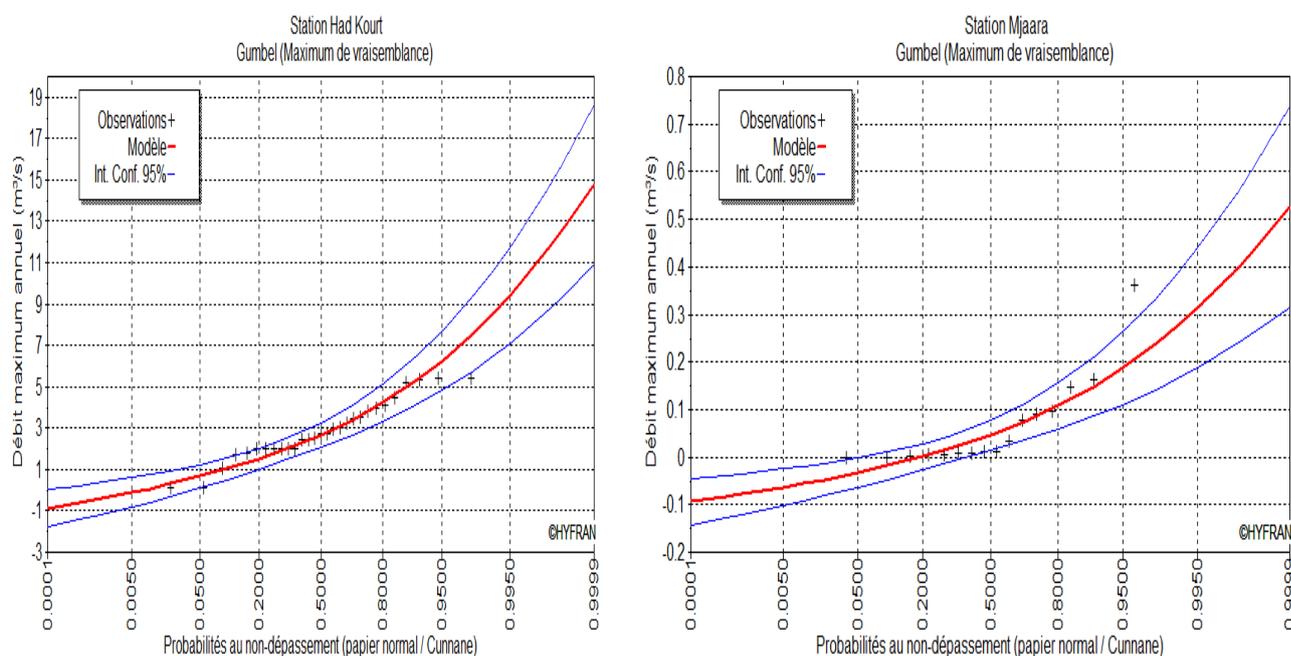


Fig IV.32 : Ajustement graphique de la série des débits maxima instantanée à la loi de Gumbel pour la station Had Kourt et celle de la station Mjaara

b.4) Quantile des débits d'étiage

Pour déterminer les quantiles de débits Q_T pour une probabilité $P(X \leq Q_T = 1 - 1/T)$, on utilise les lois d'ajustement qui sont avérées adéquates pour chaque station.

Le tableau (IV.16) montre des débits d'étiage estimé pour les différents périodes de retour :

Tab IV.16 : Résultats des débits d'étiage estimés pour les différents périodes de retour

Période de retour :T(ans)	Probabilité de non dépassement de q	Quantile X_T (m ³ /s) pour différentes période de retour selon les lois d'ajustement :			
		Station Had Kourt		Station Mjaara	
		Gumbel	GEV	Gumbel	GEV
10000.0	0.0001	0.607	1.89	0.094	0.00088
2000.0	0.0005	0.476	1.40	0.083	0.00080
1000.0	0.0010	0.113	1.17	0.078	0.00074
200.0	0.0050	0.0793	0.563	0.064	0.00055
100.0	0.0100	0.303	0.259	0.056	0.00040
50.0	0.0200	0.323	0.0805	0.047	0.00019
20.0	0.0500	0.668	0.603	0.033	0.00030
10.0	0.1000	1.52	1.08	0.019	0.0010
5.0	0.2000	1.52	1.68	0.00082	0.0027
3.0	0.3000	1.92	2.12	0.017	0.0050
2.0	0.5000	2.67	2.87	0.046	0.014
1.4286	0.6667	3.41	3.49	0.076	0.034
1.2500	0.8000	4.23	4.09	0.020	0.090
1.1111	0.9000	5.25	4.70	0.11	0.30
1.0526	0.9500	6.24	5.19	0.15	0.96
1.0204	0.9800	7.52	5.68	0.19	4.3
1.0101	0.9900	.47	5.98	0.24	13
1.0050	0.9950	9.43	6.22	0.28	40
1.0010	0.9990	11.6	6.63	0.31	530
1.0005	0.9995	12.6	6.76	0.40	1600
1.0001	0.9999	14.8	6.97	0.44	1800

Pour la station de Had Kourt, les étiages les plus sévères ont une grande période de retour, par contre les moins sévères ont une période de retour qui ne dépasse pas 2 ans. Cela peut expliquer par l'accroissement de l'influence climatique durant des mois d'été que pour des périodes de retour plus importante, les débits d'étiage diminuent.

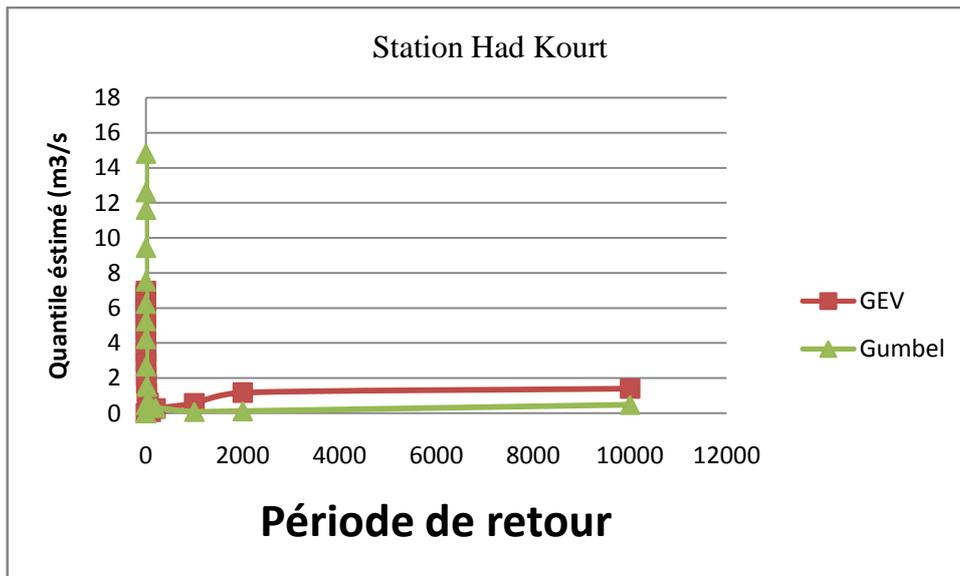


Fig IV.33 : Temps de retour correspondant aux debits minima annuels enregistrés au niveau de la station Had Kourt

Conclusion

Au terme de ce chapitre concernant l'étude du régime hydrologique, on retiendra que ce régime peut être considéré comme un régime typique méditerranéen, caractérisé par l'abondance pluviale à très forts débits hivernaux, donc des fortes crues, d'une part et d'autre part, par une saison sèche fortement prononcée, donc les étiages. Ce phénomène se reproduit à l'échelle de l'année et marque des saisons d'abondance et des saisons de sécheresse hydrologique.

Le module annuel des débits au niveau de la station Had Kourt est plus importante que celle de la station Mjaara, ceci reflète la situation amont-aval des deux stations et la succession de période humide et de période sèche qui est confirmée par le teste de simple cumul.

La méthodologie des écarts (E_c) des débits moyens annuels au débit moyen interannuel a révélé une alternance de périodes excédentaires et de périodes déficitaires, non conforme dans les deux stations, avec l'importance des périodes déficitaires par rapport à celle excédentaire. 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 hydroclimatique, 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 entre les deux phénomènes avec un maximum de précipitation en Décembre suivi d'un maximum de débits avec un retard d'un 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, ruissellement et infiltration prennent respectivement 30.24%, 23.7% et 6.56%.

L'étude des formes extrêmes de l'écoulement, orientée tout d'abord sur les crues, a mis successivement en évidence : les caractères torrentiel des crues principalement à la forte intensité des précipitations, leur mécanisme de propagation et enfin leur répartition fréquentielle est régie 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, en plus de la GEV et celle de Gumbel.

Par opposition, les étiages très influencés par les prélèvements et les rejets, on fait apparaître des tarissements marqués du cours d'eau principalement en été. Leur ajustement est adéquat aux lois, comme celle de GEV et Gumbel et ainsi que pour les périodes de retour plus importantes au niveau de la station Had Kourt.



Conclusion Générale

Le bassin versant du bas Ouergha est étendue sur une superficie de 1176,56 Km² et un périmètre de 278,61 Km.

Les caractéristiques physiques du bassin versant à la forme croissant et que sa longueur est plus grande que sa largeur. L'hypsométrie est caractérisée par des altitudes qui décroissent du Nord vers Ouest. D'après la courbe hypsométrie, les altitudes moyennes occupent la majorité de la surface du bassin. Le relief est assez-fort suivant l'indice de la pente globale.

Les précipitations recueillies dans les stations montrent :

- Une diminution des précipitations moyennes annuelles en allant de l'amont vers l'aval.
- Les valeurs moyennes mensuelles maximales sont enregistrées au mois de Décembre et que les valeurs minimales sont enregistrées au mois de Juillet.

Les températures moyennes mensuelles maximales sont enregistrées au mois d'Aout (30,1°C) et les valeurs minimales sont enregistrées au mois de Janvier (11°C). Ces variations de températures sont en relation avec les caractéristiques climatiques et les facteurs géographiques.

La combinaison entre la précipitation et la température, par des différentes méthodes a montré que le bassin est sous un climat Saharien. La valeur moyenne de l'évapotranspiration réelle est de 407 mm/an, signifiant ainsi l'existence d'un surplus, par référence aux précipitations annuelles.

Le régime hydrologique peut être considéré comme un régime typique méditerranéen, caractérisé par l'abondance pluviale à très forts débits hivernaux, donc des fortes crues, d'une part et d'autre part par une saison sèche fortement prononcée, donc les étiages. Le module annuel, ainsi que les différents coefficients, mettent en évidence des fluctuations hydroclimatique. Le bilan hydrologique a mis en évidence l'importance des volumes acheminés en amont qu'en aval, ce qui renseigne sur la nature lithologique. La répartition fréquentielle des crues est régie par des dissymétriques basées sur les méthodes des moments et de maximums de vraisemblance en l'occurrence les lois Log Pearson III, GEV, Gumbel et Gamma. La distribution des débits d'étiage n'est pas régie par une loi prédéterminée, les étiages sont adéquats aux lois de GEV et Gumbel.



REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUES

Beaudet G., 1969 : Le plateau central marocain et ses bordures, étude géomorphologique. Thèse D. Lettres, Univ Paris 478p.

Bouabdelli A., 1989 : Tectonique et sédimentation dans les bassins orogéniques : les sillons ciséens d'Azrou-Khenfra (Est du Massif hercynien central). Thèse-es-sciences, Strasbourg, 275p.

Boukrinm S., 2000, Etude d'impact du changement sur les ressources en eau du bassin versant de l'Ouergha (Rif-Maroc), 98p.

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.

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

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

Za-ari A. B., 2012 : Etude du régime hydrologique dans le bassin versant de l'oued de Beht en amont du barrage Elkansera, 80p.

Mesrar H., 2010 : Application des directives du PAP/CAR et des outils SIG pour l'évaluation de l'érosion hydrique et la définition des facteurs causaux dans la partie aval du bassin versant de l'Oued Amzaz, 115p.

Marghich A., 1989 : Contribution à l'étude sédimentologique, minéralogique et géochimique des alluvions actuelles de l'oued Beht (Maroc central). Thèse de 3ème cycle, Econe Normale Supérieure, Fès. 256p.

Mariém Mint C., 2011 : Contribution à l'étude hydroclimatique du bassin versant de l'oued Beht, Maroc Septentrional, 51p.

Naoura J., 2012 : Caractérisation Hydrologiques et Qualitativement des Eaux de Surfaces du bassin versant du haut INAOUENE. Thèse doct.3ème cycle, FST FES, 281p.

Oumechtaq I., 2011 : Etude hydrologique et hydrogéologique et implantation d'une application SIG pour le bassin versant Ziz-Rhéris, 112p.

Pique A., 1994 : Géologie du Maroc. Les domaines régionaux et leur évolution structurale. Edit. Pumag, 284p.



Hydrologie de Surface et Qualité des Eaux

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

Sauvage C. ; 1960 : Le quotient pluviométrique d'emberger, son utilisation et la présentation géographique de ses variations au Maroc. Ann. Serv. Phys. Globe météor. I.S.C.

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: Djeinaba Sall

Année Universitaire : 2012/2013

Titre: Étude du régime hydrologique du bassin versant de bas Ouergha, Maroc septentrional

Résumé

Le bassin versant Ouergha au passage entre le Rif et le moyen atlas s'étale sur 7300 Km, occupant 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 278,61 Km et cumulant une superficie de 1175,56 Km², soit 4,03% de la surface du bassin versant de Sebou. Le bassin reçoit une pluie moyenne annuelle de 593,30 mm, un volume de $697,46 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ et une température moyenne annuelle de 18,42°C. L'évapotranspiration réelle dans cette étude est de 399,73 mm/an.

Sur le plan de l'étude hydrologique du bassin Ouergha a montré un régime typique méditerranéen, caractérisé par l'abondance pluviale à très forts débits hivernaux, donc d'une part par des fortes crues, et d'autre part, par une saison sèche fortement prononcée, donc les étiages. Le module annuel ainsi que les différents coefficients, mettent en évidence des fluctuations hydroclimatiques, en relation avec un climat semi aride conclu par la synthèse climatologique.

La répartition fréquentielle des crues est régit par des lois dissymétriques basées sur des méthodes des moments et de maximum de vraisemblance en l'occurrence avec des lois de Log-Pearson, Gamma, GEV et Gumbel. Mais celle des étiages est adéquatement aux lois de GEV et Gumbel.

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