



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

Etude Hydrologique du Bassin Versant de L'Oued Mikkès

Présenté par:

Majda EL HAMDANI

Encadré par:

- Lahcen BENAABIDATE, FST - Fès
- Nour Eddine LAFTOUHI, FSSM - Marrakech

Soutenu Le 20 Juin 2013 devant le jury composé de:

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

Stage effectué à : Faculté des Sciences Semlalia Marrakech (FSSM) Laboratoire : GEOHYD



Remerciement

Je remercie avant tout DIEU de m'avoir aidé...

Ensuite je tiens à remercier tous ceux qui m'ont apporté concours dans la poursuite de mon travail de projet de fin d'étude.

Mes remerciements vont à :

Mr. Lahcen. BENABIDATE et Mr. Nour-Eddine LAFTOUHI

Pour avoir montré un grand intérêt à ce travail, aussi pour les conseils scientifiques très enrichissants, et pour leurs précieux encadrements durant la réalisation de ce projet, et pour l'ensemble des connaissances qui m'ont fourni tout au long de ma formation.

Je tiens à remercier aussi Mlle. Fatima FNIGUIRE, doctorante à la FSSM (Laboratoire GEOHYD, pour son aide et son temps qu'elle a consacré pour la réalisation des cartes

Aussi mes sincères remerciements, pour les enseignants de département d'Environnement.

Ma famille

Pour leurs encouragements et leur soutien moral, ce travail n'aurait jamais été achevé sans leurs soutiens illimité et leurs aides.

Mes amis

Avec qui nous avons partagé les moments de joie de tristesse tout au long de notre formation.

Et enfin, je remercie toute personne ayant contribué, de près ou de loin à l'élaboration de ce modeste travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Mes parents

Mon mari

Et ma famille.

Résumé

Cette étude a porté sur le bassin versant de l'Oued Mikkès, situé au centre nord du Maroc. Elle concerne la géologie, la climatologie, les caractéristiques physiques et l'hydrologie du bassin.

Le bassin versant de Mikkès constitue une entité morphologique bien individualisé au sein de la plaine de Saiss et le Causse Moyen Atlasique, il s'étend sur une superficie de 1401 Km², son altitude est comprise entre 187 m à son exutoire et 2092 m dans la partie amont.

Sur le plan climatique et hydrologique, l'étude statistique des séries hydroclimatiques provenant des stations météorologiques a permis, d'une part, la caractérisation d'un climat fluctuant autour du semi-aride avec la succession de cycles humides et secs durant la période d'observation (1968-2009) et d'autres part, une grande variabilité des ressources en eaux.

L'exploitation des données dérivées du modèle numérique du terrain (MNT) et des cartes Raster disponibles sur la zone d'étude et leur intégration dans un SIG, ont permis d'en réaliser les différents cartes présentées dans ce travail et d'en déduire les caractéristiques physiques du bassin de Mikkès.

L'étude hydrologique basée sur les relations pluies-débits a permis de mettre en évidence la forte sensibilité des ressources eaux aux aléas climatiques et au contexte géologique, ainsi de distinguer le régime hydrique du bassin.

L'analyse fréquentielle des débits de Mikkès a permis, d'une part, d'ajuster l'écoulement de surface aux différentes lois statistiques, et d'autre part, de distinguer la période de retour des crues maximales et des étiages ainsi que leurs valeurs de débits.

Mots clés: Oued Mikkès (Maroc), climatologie, géologie, pluie-débit, analyse fréquentielle.

Sommaire

Sommaire	1
Liste des figures	4
Liste des tableaux	5
INTRODUCTION GENERALE	6
CHAPITRE 1. GENERALITES SUR LE BASSIN VERSANT DE MIKKE	
1. Introduction	7
2. Situation	8
2.1. Situation administrative	8
2.2. Situation géographique	8
3. Activités agro-économiques.....	8
3.1. Utilisation des terres	8
3.2. Statut juridique des terres	8
3.3. Taille des exploitations.....	8
3.4. Cultures pratiquées	8
3.5. Activités agro-industrielles.....	9
3.6. Population	9
CHAPITRE 2. CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DU BASSIN VERSANT DE MIKKE	
1. Introduction	10
2. Propriétés géométriques du bassin versant.....	10
2.1. Indice de forme	10
2.2. Hypsométrie.....	10
2.2.1. Carte hypsométrique	11
2.2.2. Courbe hypsométrique	13
2.2.3. Altitudes caractéristiques	14
2.3. Temps de concentration	14
2.4. Rectangle équivalent.....	14
2.5. Pente	15
2.5.1. Carte des pentes	15
2.5.2. La pente moyenne du bassin versant.....	16
2.5.3. Indice de pente global.....	16
3. Réseau hydrographique	18
3.1. Densité de drainage	18
4. Couvert végétal	20
4.1. Causse Moyen Atlasique	20
4.2. Saiss.....	20
4.3. Prérif – Rides prérfaines.....	20
5. Conclusion	22
CHAPITRE 3. CONTEXTE GEOLOGIQUE DU BASSIN VERSANT DE MIKKE	
1. Introduction	23

Etude hydrologique du bassin versant de l'Oued Mikkès

2. Cadre géologique général	23
2.1. Rif externe	23
2.1.1. Préfif.....	23
2.1.2. Sillon sud rifain	25
2.1.3. Rides sud rifaines	25
2.2. Causse Moyen Atlasique	26
3. Lithostratigraphie	26
3.1. Paléozoïque	27
3.2. Trias.....	27
3.3. Jurassique.....	27
3.4. Crétacé supérieur	28
3.5. Eocène.....	28
3.6. Oligocène	30
3.7. Miocène	30
3.8. Pliocène.....	30
3.9. Quaternaire	31
4. Conclusion	33

CHAPITRE 4. CLIMATOLOGIE DU BASSIN VERSANT DE L'OUED MIKES

1. Introduction	34
2. Etude des précipitations	34
2.1. Variations saisonnières de la pluviométrie	35
2.2. Variations interannuelles de la pluie.....	36
2.3. Estimation de la lame d'eau moyenne.....	37
2.4. Carte d'isohyète	38
3. Etude des températures.....	41
3.1. Variations saisonnières de la température	41
3.2. Variations interannuelles de la température	42
4. Evapotranspiration et bilan hydrologique	43
4.1. Aridité.....	43
4.1.1. Indice d'aridité de Martonne	43
4.1.2. Indice de Gaussen	45
4.2. Evapotranspiration.....	46
4.2.1. L'évapotranspiration potentielle (ETP)	46
4.2.2. Evapotranspiration réelle (ETR)	48
4.3. Méthode du bilan de Thornthwaite	49
5. Conclusion	50

CHAPITRE 5. CARACTERISTIQUES HYDROLOGIQUES DU BASSIN VERSANT

1. Introduction	51
2. Analyse des débits.....	51
2.1. Débits mensuels	51

Etude hydrologique du bassin versant de l'Oued Mikkès

2.1.1. Coefficient mensuel du débit	52
2.2. Débits annuels.....	52
2.2.1. Coefficient d'hydraulicité	54
3. Etude de situations hydrologiques particulières : les crues et les étiages.....	54
3.1. Les crues.....	54
3.1.1. Analyse fréquentielle des crues maximales annuelles.....	54
3.1.1.1. Vérification des hypothèses	55
a. Test d'homogénéité de Mann Whitney	55
b. Test d'indépendance de Wald Wolfowitz à 5%.....	56
c. Test de stationnarité (Kendall)	56
3.1.1.2. Les statistiques de base.....	57
a. Résultats des statistiques de base.....	57
b. Histogramme de fréquence	57
b. courbes chronologiques des sommes cumulatives.....	58
c. Résultats et interprétation des ajustements aux lois statistiques.....	58
C.1. Ajustement à la loi de Gumbel (méthode de vraisemblance).....	59
C.2. Ajustement à la loi de Jenkinson GEV (Méthode des moments pondérés)	60
C.3. Ajustement à la loi Gamma (ou Pearson)	61
C.4. Ajustement à la loi de Log-Pearson III (méthode des moments)	62
C.4. Résultats de comparaison des ajustements aux lois statistiques	63
C.5. Quantiles estimés pour différentes périodes de retour	64
3.2. Les étiages	65
3.2.1. Analyse fréquentielle des étiages	66
3.2.1.1. Test des hypothèses.....	66
a. Test d'indépendance de Wald Wolfowitz à 5%.....	66
b. Test de stationnarité (Kendall).....	66
3.2.1.2. Les statistiques de base.....	66
a. Résultats des statistiques de base.....	66
b. Histogrammes de fréquences	67
c. Courbes chronologiques des sommes cumulatives.....	67
d. Ajustement aux lois statistiques	68
d.1. Loi de GEV (méthode des moments pondérés)	68
d.2. Loi de Gumbel	69
d.3. Estimation des quantiles des débits d'étiage.....	70
4. Conclusion	71
CONCLUSION GENERALE	72
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	73
ANNEXES	76

Liste des figures

Figure 1: Carte de la situation de la zone de bassin de Mikkès (d'après Cirak, 1987 ; modifiée)	7
Figure 2: Histogramme des fréquences d'altitudes	11
Figure 3: Hypsométrie du bassin versant de l'Oued Mikkès	12
Figure 4 : Courbe hypsométrique du bassin versant de Mikkès	13
Figure 5 : Carte de pente du bassin versant de Mikkès	17
Figure 6 : Réseau hydrographique extrait à partir du MNT de bassin versant de Mikkès	19
Figure 7 : Carte d'occupation du sol du bassin versant de Mikkès	21
Figure 8 : Carte géologique du bassin versant de Mikkès	24
Figure 9 : Carte géologique de la plaine Fès-Meknès (extraite de la carte géologique du Maroc 1/500 000)	26
Figure 10 : Chronostratigraphie des dépôts du bassin de Sais (Ait Brahim, 1991 et Essahlaoui, 2000 modifié) ..	29
Figure 11 : Pluies moyennes mensuelles (1968-2009)	35
Figure 12 : Pluies interannuelles des huit stations d'étude (1968-2009)	36
Figure 13 : Variations Spatiotemporelle du coefficient pluviométrique dans les deux stations.....	37
Figure 14 : Carte de polygones de Thiessen du bassin versant de Mikkès	39
Figure 15 : Carte d'isohyète du bassin de Mikkès (1968-2009)	40
Figure 16 : Températures moyennes mensuelles (1968-2009).....	41
Figure 17 : Températures moyennes annuelles (1968-2009)	42
Figure 18 : Evolution annuelle de l'indice d'aridité sur le bassin de Mikkès (1968-2009)	43
Figure 19 : Diagramme ombrothermique de la station d'Ifrane (1968-2009)	45
Figure 20 : Diagramme ombrothermique de la station d'El Hajra (1968-2009)	46
Figure 21 : Evolution de l'ETP mensuelle (1968-2009).....	47
Figure 22 : Débits moyens mensuels de l'Oued Mikkès (1959-2006)	51
Figure 23 : Variations du coefficient mensuel des débits au niveau de l'Oued Mikkès	52
Figure 24 : Tendances à la baisse des débits moyens annuels à la station d'El Hajra pour la période 1959-2006	53
Figure 25 : Relation pluie-débit sur les deux stations Ifrane et El Hajra (1968-2006).....	53
Figure 26 : Histogramme de fréquence des débits maximum annuels pour Mikkès	57
Figure 27 : Courbes chronologiques des sommes cumulatives pour Mikkès	58
Figure 28 : Ajustement graphique de la série des débits maximums annuels à la loi de Gumbel pour Mikkès ...	60
Figure 29 : Ajustement graphique de la série des débits maximums annuels à la loi de GEV pour Mikkès	61
Figure 30 : Ajustement graphique de la série des débits maximums annuels à la loi de Gamma pour Mikkès ...	62
Figure 31 : graphique de la série des débits maximums annuels à la loi de Log-Pearson type III pour Mikkès....	63
Figure 32 : Résultats de comparaison des ajustements aux différentes lois des débits maximums annuels pour Mikkès	64
Figure 33 : Temps de retour correspondant aux débits maximums annuels de Mikkès	65
Figure 34 : Histogrammes de fréquence des débits minimums annuels au niveau de la série de Mikkès	67
Figure 35 : Courbe chronologique des sommes cumulatives pour les débits minimums de Mikkès	68
Figure 36 : Ajustement graphique de la série des débits minimums à la loi de GEV pour Mikkès	69
Figure 37 : Ajustement graphique de la série des débits minimums à la loi de Gumbel pour Mikkès	69
Figure 38 : Temps de retour correspondant aux débits minimums annuels de Mikkès	70

Liste des tableaux

Tableau 1: Répartition de la surface totale par tranches d'altitudes.....	11
Tableau 2 : La surface cumulée en % par rapport aux altitudes	13
Tableau 3: Classes de pentes (d'après Baize, 1995).....	15
Tableau 4 : Classification ORSTOM du relief à partir de l'indice de pente globale	16
Tableau 5 : Fiche morphométrique du bassin versant de Mikkès	22
Tableau 6 : Coordonnées et données moyennes des stations météorologiques	34
Tableau 7 : Pluies moyennes mensuelles (1968-2009)	36
Tableau 8 : Variation pluviométriques annuelles (1968-2009)	36
Tableau 9 : Lamme d'eau tombée sur le bassin de Mikkès par la méthode de Thiessen (1968-2009).....	38
Tableau 10 : Variation de températures moyennes annuelles sur la période de 1968-2009	42
Tableau 11 : Les étages climatiques selon les indices d'aridité	43
Tableau 12 : Calcul d'indice d'aridité (1968-2009).....	44
Tableau 13 : Calcul de l'ETP par la formule de Thornthwaite	47
Tableau 14 : Résultats des calculs de l'ETR par la méthode de Turc (1968-2009)	48
Tableau 15 : Résultats des calculs de l'ETR par la méthode de Coutagne (1968-2009).....	48
Tableau 16 : Résultats des calculs d'ETR par le bilan hydrique de Thornthwaite (1968-2009)	49
Tableau 17 : Résultat du test de Wald Wolfowitz sur les données issues des débits d'Oued Mikkès	56
Tableau 18 : Résultat du test de Kendall sur les données issues des débits d'Oued Mikkès.....	56
Tableau 19 : Statistiques descriptives de débits de Mikkès	57
Tableau 20 : Résultat de l'ajustement à la loi de Gumbel (Maximum de vraisemblance) pour Mikkès	59
Tableau 21 : Résultats et les paramètres du loi de l'ajustement à la GEV pour Mikkès	61
Tableau 22 : Résultats et paramètres de l'ajustement à la loi de Gamma pour Mikkès.....	62
Tableau 23 : Résultats et paramètres de l'ajustement à la loi de Log-Pearson type III pour Mikkès	63
Tableau 24 : Résultats d'ajustement graphique de la série des débits maximums annuels de Mikkès	65
Tableau 25 : Résultat du test de Wald Wolfowitz sur les données des débits minimums de Mikkès	66
Tableau 26 : Résultat du test de Kendall sur les données des débits minimums de Mikkès	66
Tableau 27 : Résultats des statistiques de base pour la série des débits minimums de Mikkès.	67
Tableau 28 : Résultat de l'ajustement à la loi de GEV pour Mikkès.....	68
Tableau 29 : Résultat de l'ajustement à la loi de Gumbel pour Mikkès.....	69
Tableau 30 : Résultats des débits d'étiage estimés pour les différents périodes de retour pour Mikkès	70

INTRODUCTION GENERALE

Les eaux de surfaces et les eaux souterraines présentent des relations et une interdépendance hydrologiques si étroites qu'en fait toutes les deux constituent une ressource unique et que tout prélèvement sur les unes s'effectue au détriment des autres (Castany, 1965).

Les précipitations permettent la constitution d'un stock d'eau qui va être soumis à plusieurs processus de « vidange » et particulièrement les processus d'évapotranspiration, de ruissellement de surface et d'infiltration (Chaponnière, 2005). Le ruissellement est le facteur essentiel de la prévision à court terme des débits consécutifs à une averse, donc des crues. Or, les facteurs qui le conditionnent sont : la répartition de la précipitation dans l'espace et dans le temps (intensité), la morphologie de la surface du sol (pente, végétation) et l'hydrogéologie.

La zone d'étude choisie est le bassin versant de l'Oued Mikkès. Ce bassin traverse trois ensembles structuraux différents : le Prérif-Rides pré-rifaines au Nord, le Sillon sud rifain au centre et le Causse Moyen Atlasique au Sud.

Cette étude a pour objectif l'étude du comportement hydrologique du bassin versant de Mikkès, afin de comprendre la relation pluie-débit dans la région. Elle comporte les chapitres suivants :

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

CHAPITRE 1. GENERALITES SUR LE BASSIN VERSANT DE MIKKESES

1. Introduction

Le bassin versant de l'Oued Mikkès couvre une superficie de 1401 km². Il est caractérisé par trois zones distinctes, la zone atlasique au Sud, la zone du Saïss au centre et la zone préifaine au Nord (Fig. 1)

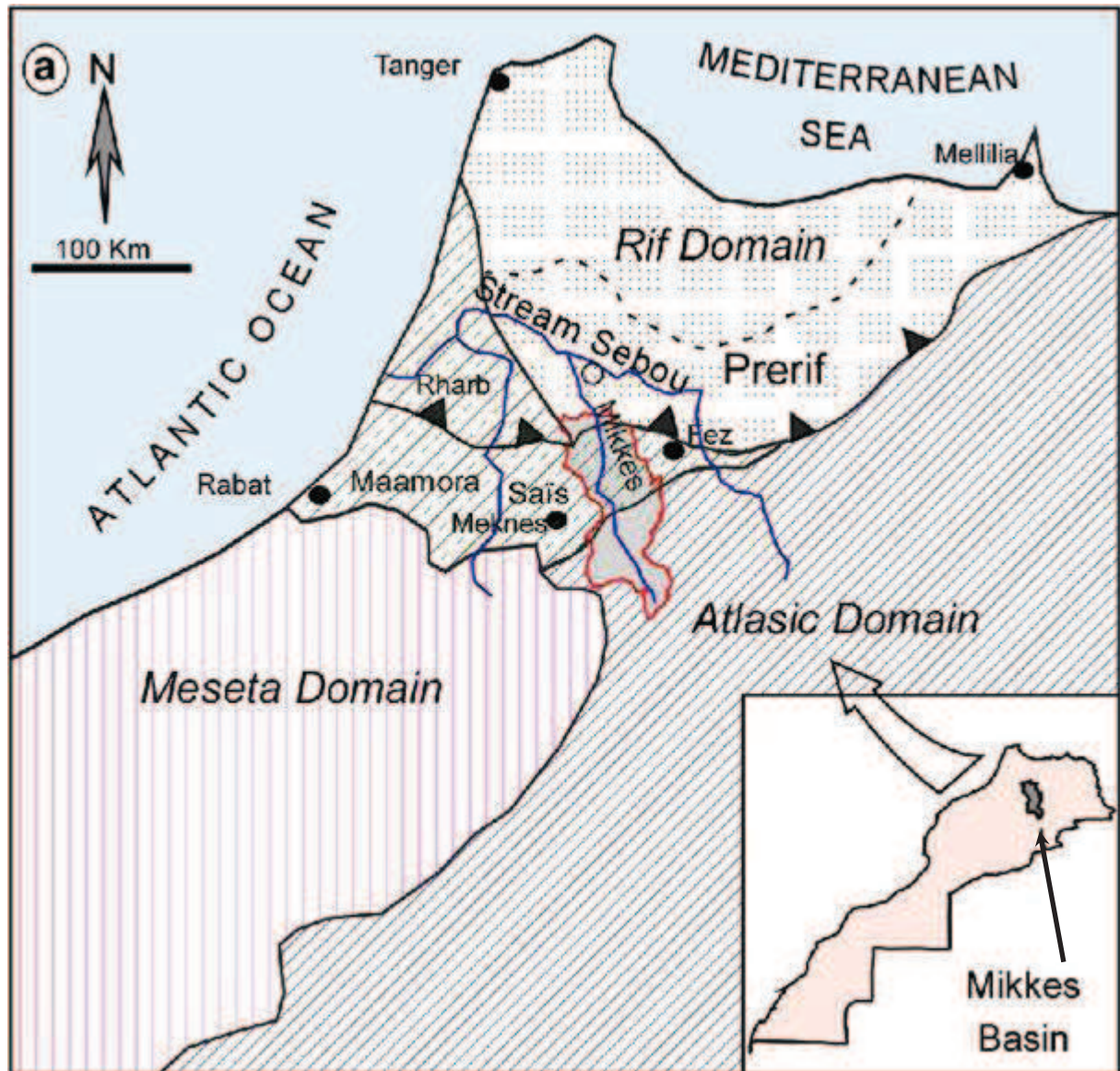


Figure 1: Carte de la situation de la zone de bassin de Mikkès (Cirac, 1987 ; modifiée)

Le bassin versant est situé entre les coordonnées Lambert suivantes :

$$X_1 = 490\,000 \text{ m}$$

$$Y_1 = 310\,000 \text{ m}$$

$$X_2 = 536\,000 \text{ m}$$

$$Y_2 = 392\,000 \text{ m}$$

2. Situation

2.1. Situation administrative

Le bassin versant de Mikkès chevauche sur le territoire de la Wilaya de Meknès et la Wilaya de Fès. Il se répartit d'une manière approximative comme suit :

- Wilaya de Meknès : 94033 ha, soit 58.7%.
- Wilaya de Fès : 12042 ha, soit 7.5%.
- Province d'Ifrane : 54137 ha, soit 33.8%.

2.2. Situation géographique

Le bassin versant de Mikkès est constitué de trois zones naturelles principales : la première zone relève du premier contrefort du Moyen Atlas et se situe au Sud du bassin versant à sa partie haute. La seconde zone est située dans la plaine du Sais et correspond à sa partie centrale. La troisième zone, située au Nord du bassin, est constituée d'une partie du Prérif et des Rides pré-rifaines (Fig. 1).

Cependant l'orographie est très variée d'une région à une autre. Au Moyen Atlas, le relief est mamelonné plus au moins accidenté avec une altitude allant de 800 m à 1700 m ; mais presque l'ensemble de cette zone de Sais, cantonnée au centre du bassin, est caractérisée par une altitude variant de 300 m à 800 m, dont le relief est plus ou moins doux. Quant à la troisième zone, située au Nord du bassin elle est également constituée par un relief accidenté avec une altitude allant de 200 m au niveau de la digue du barrage Sidi Echahed à 1000 m au Jbel Kannoufa du côté de Zerhoun.

3. Activités agro-économiques

En absence des données sur l'ensemble de bassin versant, on se limitera dans cette étude sommaire à une estimation de l'importance des activités agro-économiques dans la partie du bassin versant de la Wilaya de Meknès qui représente près de 60% de la surface totale du bassin versant.

3.1. Utilisation des terres

Globalement, la surface agricole utile (SAU) représente près de 70% de la surface totale. La superficie irriguée est estimée à 8% de la SAU contre 92% pour la superficie en labour. Les forêts et les parcours s'étendent respectivement sur près de 14% et 12%. Les terrains incultes ne représentent qu'une très faible part soit 4%.

3.2. Statut juridique des terres

Le statut juridique des terres est dominé essentiellement par le Melk, domaine privé de l'état et le collectif qui représentent respectivement environ 60%, 15% et 12%. Le reste est formé par le statut Habous, Guich et le domaine des sociétés étatiques.

3.3. Taille des exploitations

Globalement, on peut estimer que la taille des exploitations est dominé par la tranche de moins de 5 ha qui représente environ 60 à 65% du nombre total des exploitations mais avec seulement 3 à 5% de la SAU.

3.4. Cultures pratiquées

L'agriculture constitue la plus grande richesse de la région. Les principales cultures pratiquées sont respectivement les céréales (avec une importance pour le blé tendre), les légumineuses, le tournesol,

le maraichage et les cultures fourragères. Les arbres fruitiers occupent une part non négligeable, il s'agit principalement de l'olivier et de vignes.

3.5. Activités agro-industrielles

La zone étudiée comprend un nombre important d'unités agro-industrielles ; minoteries, conserveries, huileries, caves, unités de collecte et de traitement du lait, unités de stockage des céréales et entrepôts frigorifiques.

L'importance et la diversité des activités agro-économiques montrent l'intérêt de l'agriculture dans la production industrielle locale et le développement économique en général de cette région.

3.6. Population

Les habitants de la région de Mikkès sont très dispersés surtout dans les zones éparses et regroupés en agglomérations en cinq provinces :

- Mekkès regroupé en communes de M'haya, Oued Jdida, N'zalat Beni Ammar et Sidi Abdallah Al Khayat.
- El Hajeb, regroupé en communes d'Ain Taoujdate, Sebaa Aioun, Aint Boubidmane, Ait Harz Allah, Bittit, Laqsir, Ait Naamane et Iqaddar.
- Ifrane, regroupé en communes de Ben Smim, Dayat Aoua et Tizguit.
- Sefrou, regroupé en communes d'Ain Cheggag et Ait Sebaa Lajrouf.
- Moulay Yacoub, regroupé en communes d'Ain Chkef, Mikkès et Sebaa Rouadi.

La population générale de la région d'étude avoisinait 304404 d'habitants en 2004. La grande province d'El Hajeb domine par le nombre important de sa population (129918 habitants). Le taux d'accroissement moyen de la population enregistré entre 1994 et 2004 est de 1.4% par an.

CHAPITRE 2. CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DU BASSIN VERSANT DE MIKES

1. Introduction

Le bassin versant ou bassin fluvial est l'ensemble de la zone géographique continentale constituant le bassin hydrographique d'un cours d'eau et correspondant à la totalité de l'aire de capture et de drainage des précipitations (Ramade, 1993). Les eaux souterraines qui alimentent le cours d'eau durant les périodes d'étiages font partie intégrante du bassin versant.

La délimitation du bassin versant et le calcul de ses propriétés physiques (son aire et son périmètre) ainsi que le réseau hydrographique, l'orientation des pentes et les tranches d'altitudes sont extraits d'un module numérique de terrain (MNT).

2. Propriétés géométriques du bassin versant

Le bassin versant de Mikkès se situe dans le centre nord du Maroc. Il est délimité par le Rif au Nord et par le domaine Méseto-Atlasique au Sud.

Il est reconnu que le relief joue un rôle fondamental dans les processus de ruissellement. L'utilisation d'indicateurs géomorphométriques du bassin versant de Mikkès (forme, hypsométrie, pente, hiérarchisation du réseau hydrographique, surface drainée, etc...) permettra de comprendre l'architecture de ce bassin et d'évaluer le rôle de sa morphologie dans les réponses hydrologiques.

Outre les conditions climatiques qui gouvernent le fonctionnement du bassin versant, ses caractéristiques physiques influencent le volume (en terme de bilan) et la répartition temporelle (en terme d'hydrogramme) des écoulements (Roche, 1963). Par les caractéristiques physiques il faut entendre la topographie, la géologie, la nature et l'occupation du sol.

2.1. Indice de forme

Cet indice donne une idée sur la forme du bassin versant, Il est proche de 1 pour un bassin versant de forme quasiment circulaire et supérieur à 1 lorsque le bassin est de forme allongée. Il est défini, comme le rapport du périmètre du bassin au périmètre du cercle ayant la même surface, par la formule mathématique suivante :

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

Avec K_c : Indice de compacité de Gravelius.
A : surface du bassin versant (Km²)
P : périmètre du bassin (Km)

La valeur de l'indice de compacité est de : $K_c = 1,94$

D'après ce résultat, on conclut que le bassin versant de Mikkès a une forme allongée, ceci favorise, pour une même pluie, de faibles débits de pointe de crue à cause du retard de l'acheminement de l'eau à l'exutoire.

2.2. Hypsométrie

Vu que la plupart des facteurs météorologiques et hydrologiques sont en fonction de l'altitude, il est intéressant d'étudier l'hypsométrie du bassin versant par tranches d'altitudes.

2.2.1. Carte hypsométrique

La carte de classification des altitudes (Fig. 3) est obtenue grâce à la méthode de classification par les écarts-types, supervisée par la connaissance de terrain.

Cette carte a été réalisée après visualisation de l'histogramme des fréquences relatives, qui est un graphique sur lequel les valeurs des altitudes sont réparties en intervalles sur l'axe des abscisses ; et en ordonnées, est portée la surface, en % de la surface totale comprise entre deux altitudes successives (Tab. 1 et Fig. 2 et 3). L'analyse de cette cartographie a fait ressortir les grands ensembles orographiques de la région.

Tableau 1: Répartition de la surface totale par tranches d'altitudes

Tranches d'altitudes (m)	Surface (Km ²)	% de la surface
187 - 200	1	0,07
200 - 400	189	13,52
400 - 600	278	19,89
600 - 800	283	20,24
800 - 1000	112	8,01
1000 - 1200	98	7,01
1200 - 1400	146	10,44
1400 - 1600	120	8,58
1600 - 1800	151	10,80
1800 - 2000	20	1,43
2000 - 2092	0	0
Total	1401	100,00

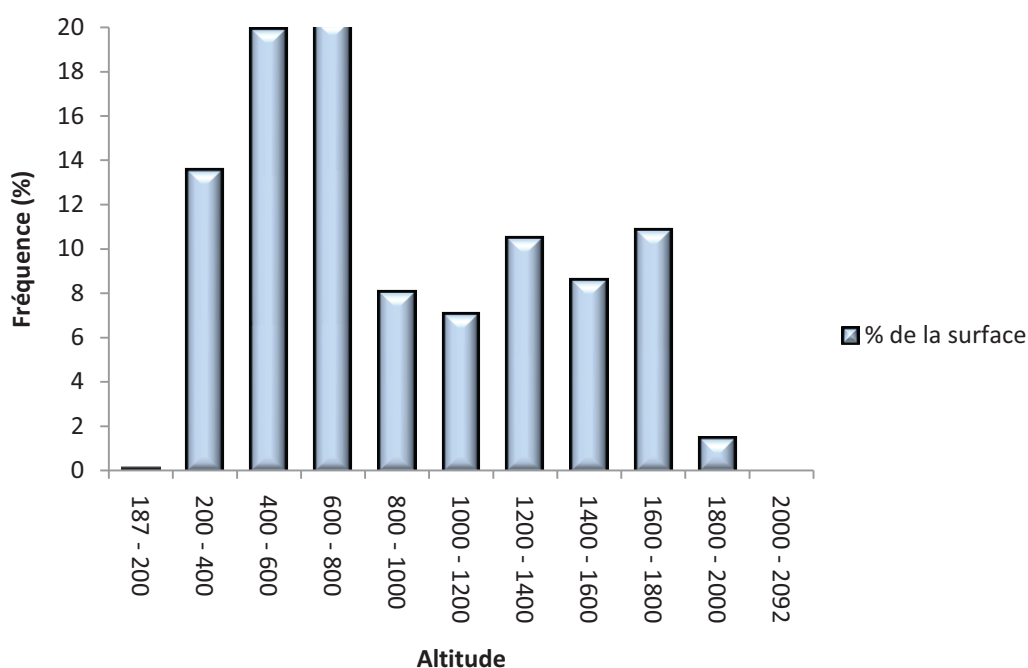
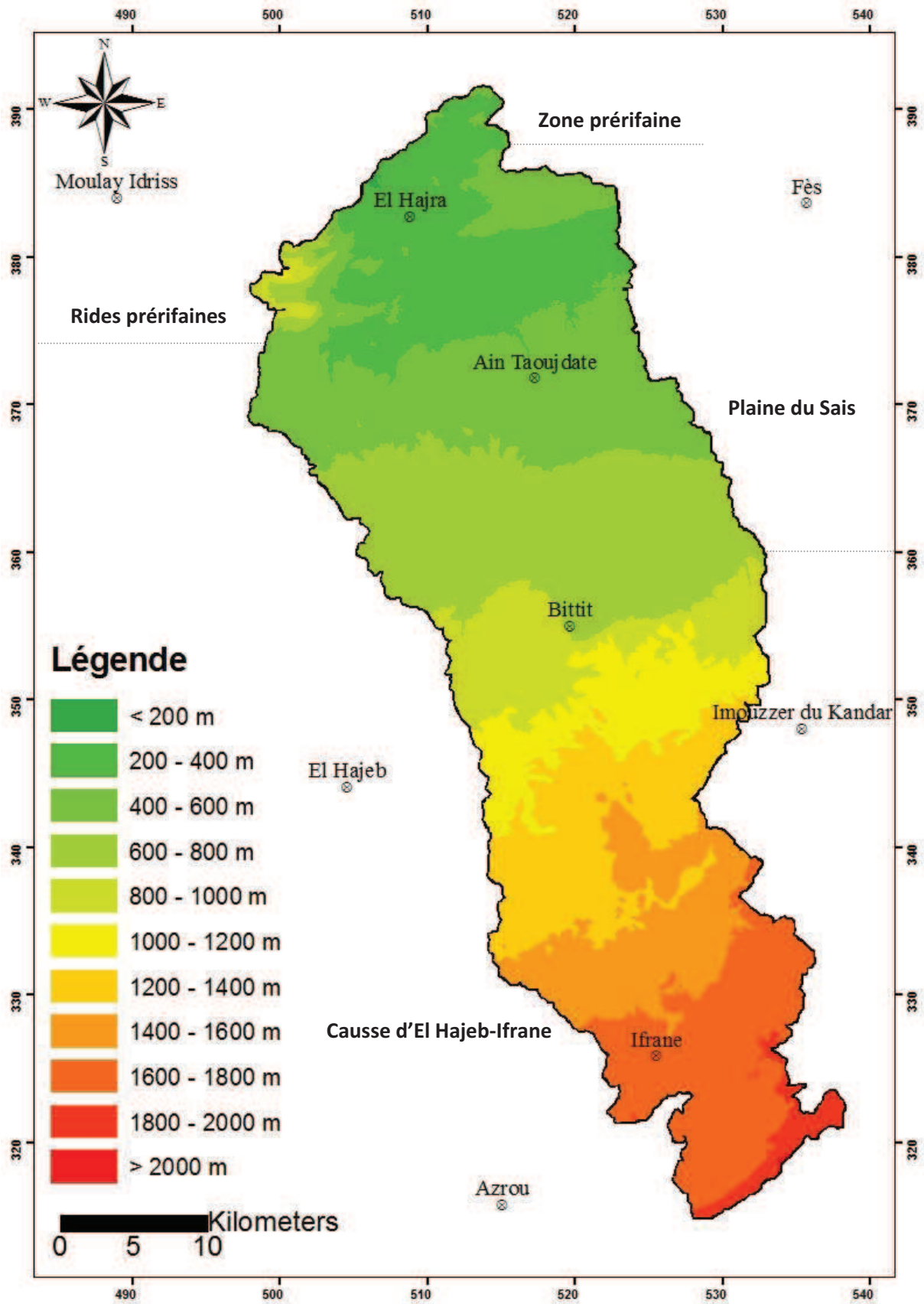


Figure 2: Histogramme des fréquences d'altitudes



. Figure 3: Hypsométrie du bassin versant de l'Oued Mikkès

2.2.2. Courbe hypsométrique

La courbe hypsométrique (relation surface-altitude) d'un bassin versant a été introduite en 1947 par Langbein, et a été développée par Strahler (1952). L'analyse Hypsométrique, selon la méthode de Strahler (1952), a été mise en œuvre pour évaluer la dissection et l'évolution du relief. La courbe hypsométrique est réalisée à partir de la classification des hauteurs d'altitudes sur le MNT (Aster GDEM Worldwide Elevation Data) par ArcGIS, en calculant l'aire de chaque tranche d'altitude du bassin versant (Tab. 2 et Fig. 4)

Tableau 2 : La surface cumulée en % par rapport aux altitudes

Altitudes (m)	% de la surface	% de la S. cumulée
200	0,07	100,00
400	13,52	99,92
600	19,89	86,40
800	20,24	66,51
1000	8,01	46,27
1200	7,01	38,26
1400	10,44	31,25
1600	8,58	20,81
1800	10,80	12,23
2000	1,43	1,43
2092	0,00	0,00

La forme de cette courbe de distribution « aire-altitude » est également reflétée par la courbe hypsométrique. Ainsi, le pic de la courbe aire-altitude correspond aux faibles altitudes.

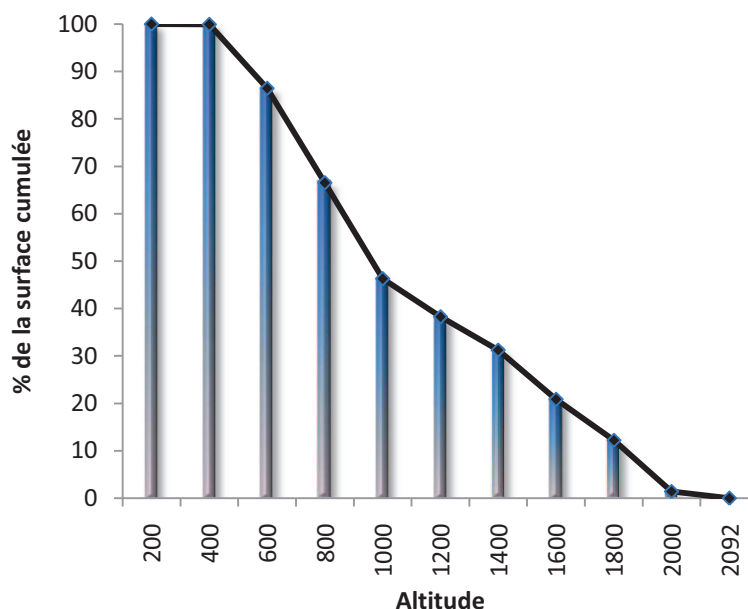


Figure 4 : Courbe hypsométrique du bassin versant de Mikkès

La courbe hypsométrique montre un relief avec une pente assez importante dans la zone où l'altitude est supérieure à 1200 m. On constate, par ailleurs, une importante fréquence de tranches d'altitudes comprises entre 800 et 2092 m, traduite sur le terrain par le Causse Moyen Atlasique.

2.2.3. Altitudes caractéristiques

La courbe hypsométrique permet de déterminer les altitudes caractéristiques suivantes :

- Altitude moyenne : la valeur de l'altitude moyenne du bassin versant peut être calculée par la

formule suivante :

$$H_{moy} = \frac{\sum A_i \cdot H_i}{A_t}$$

Avec :

H_i : l'altitude moyenne entre deux courbes de niveau en m

A_i : l'aire comprise entre deux courbes de niveau en Km^2

A_t : surface totale du bassin en Km^2 ,

Ce qui nous permet d'avoir une **$H_{moy} = 904.4 m$** .

- Altitude la plus fréquente (l'altitude caractéristique) : c'est le maximum de la courbe des fréquences altimétriques ou c'est aussi de la plus grande surface élémentaire comprise entre deux courbes de niveau successives, soit **600 à 800 m** pour le bassin de l'Oued Mikkès.

- Altitude de fréquence $\frac{1}{2}$ (l'altitude médiane) : c'est l'altitude correspondante au point d'ordonnée 50% de la courbe hypsométrique. Elle est de **970 m**.

- Dénivelée utile (D) : sur la courbe hypsométrique tracée, on prend la distance verticale en m, qui sépare les altitudes ayant 5% et 95% de surface totale du bassin versant, la dénivelée utile est donc égale à $D = H_{5\%} - H_{95\%} = 1900 - 500 = 1400 m$.

2.3. Temps de concentration

C'est le temps que met une particule d'eau provenant de la partie du bassin la plus éloignée pour parvenir à l'exutoire, pour son calcul, nous faisons appel à la formule de Giandotti :

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

T_c : Temps de concentration (heure)

A : Superficie du bassin (Km^2)

L : Longueur du plus thalweg (Km)

H_{moy} : Altitude moyenne (m)

On obtient :

$$T_c = 9 \text{ h } 40 \text{ mn.}$$

2.4. Rectangle équivalent

La notion du rectangle équivalent est introduite, pour la première fois, par Mr. Roche en 1963, son intérêt est de comparer l'influence des caractéristiques des bassins versants sur l'écoulement. La notion du rectangle équivalent assimile le bassin versant à un rectangle ayant le même périmètre et la même superficie.

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

Avec :

K_G : indice de compacité de Gravelius

S : superficie de bassin versant (Km)

L : longueur du rectangle équivalent (Km)

l : largeur du rectangle équivalent (Km)

On obtient : **L = 117.8 Km et l = 11.9 Km.**

2.5. Pente

La pente est une caractéristique importante qui renseigne sur la topographie du bassin. Elle est considérée comme une variable indépendante. Elle donne une bonne indication sur le temps de parcours du ruissellement direct et influence directement sur le débit de pointe lors d'une averse. Selon Stewart (1974), la pente des bassins versants est naturellement un paramètre clé dans le ruissellement.

2.5.1. Carte des pentes

La carte des pentes est un fichier raster géoréférencé indiquant pour chaque pixel la pente en degrés ou en pourcentage. La pente est représentée en % (Fig. 5). Après avoir généré le calcul des pentes (avec la fonction surface analysis - slope à l'aide de l'Arcmap), on a procédé à leur classification.

Les classes de pente très faibles, faibles à modérées et modérées sont les plus dominantes dans la région d'étude et plus particulièrement dans la plaine du Saiss (80%). La pente moyenne des cours d'eau est généralement comprise entre 2 et 3% dans le plateau de Meknès et dans la partie Sud du Saiss. Elle est, par contre, beaucoup plus faible dans la partie basse du Saiss et elle ne dépasse pas 0.5%. En effet, la topographie des terrains du Saiss est presque plane favorisant des potentialités agricoles importantes. Cependant, la vitesse et la violence des écoulements sont surtout régies par les pentes les plus fortes des affluents et des versants. Généralement, les pentes modérées à fortes et fortes se répartissent sur 19% de la superficie du bassin se situent dans la nappe pré-rifaine (nappe de charriage), les Rides pré-rifaines, et dans la moitié Sud du bassin dans le Causse Moyen Atlasique. Alors que les pentes très fortes n'atteignent que 1% de la superficie totale de la zone d'étude et elles caractérisent surtout les Rides de Jbel Kannoufa et l'extrémité amont du bassin. Les différents pourcentages pour ces classes sont représentés par le Tableau 3. Ces différences dans les valeurs des pentes favorisent le ruissellement par rapport à l'infiltration et l'évaporation dans le Pré-rif, grâce à d'importantes vitesses des écoulements.

Tableau 3: Classes de pentes (Baize, 1995)

Pentes	% de pentes	Classes de pentes
0 - 2	31	Très faible à faible
2 - 5	24	Faible à modérée
5 - 10	25	Modérée
10 - 15	10	Modérée à forte
15 - 30	9	Forte
> 50	1	Très forte

2.5.2. La pente moyenne du bassin versant

Le calcul de la pente moyenne du bassin versant, donne un renseignement sur la topographie du bassin versant. En pratique on a besoin de la longueur L du rectangle équivalent et la différence entre les hauteurs extrêmes ΔH .

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

Avec :

P_{moy} : la pente moyenne du bassin versant en m/Km

ΔH : L'altitude moyenne en (m)

L : la longueur du rectangle équivalent en (Km)

La pente moyenne du bassin versant est **16.2 m/Km**

2.5.3. Indice de pente global

L'indice de pente global I_g permet de déterminer l'importance du relief sur le bassin. Il est défini comme étant le rapport entre la dénivellation 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

La valeur de la pente globale, pour le bassin versant de Mikkès est **11.9 m/Km** soit **0.1%**

Selon la classification du relief donné par l'ORSTOM, la valeur de l'indice de pente global du bassin versant de l'Oued Mikkès montre que le relief est fort. (Tab. 4).

Tableau 4 : Classification ORSTOM du relief à partir de l'indice de pente globale

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	$I_g > 0,5$

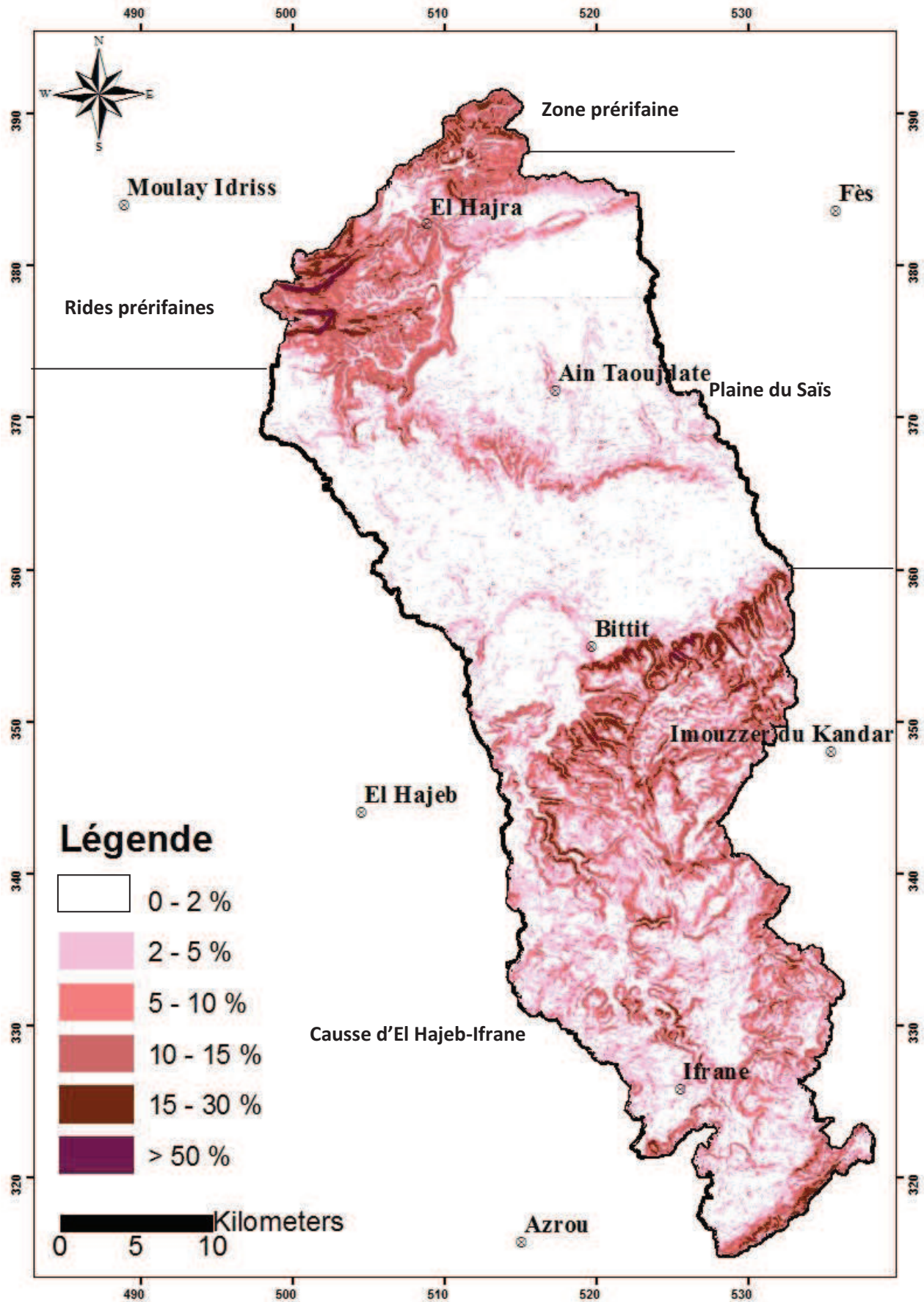


Figure 5 : Carte de pente du bassin versant de Mikkès

3. Réseau hydrographique

Le bassin hydrographique, ou bassin versant est l'élément essentiel dans toute étude hydrologique associée à la topographie d'une région donnée. Il se définit comme une portion de la surface terrestre à l'intérieur de laquelle les pentes topographiques amènent tout le ruissellement qui s'y produit vers un seul et même exutoire. L'exutoire d'un bassin est le point le plus en aval du réseau hydrographique par lequel passent toutes les eaux drainées par le bassin. Dans un bassin versant, la topographie, ou l'ensemble de pentes définit la trajectoire des écoulements et l'organisation du drainage ou réseau hydrographique, celui-ci dépend de l'alimentation en eau. A cet effet, l'ensemble des cours d'eau, permanents ou temporaires, qui participent à l'écoulement linéaire de la surface topographique représente le réseau hydrographique qui est une des caractéristiques les plus importantes du bassin versant et peut prendre une multitude de formes. La diversité du réseau hydrographique d'un bassin versant est due à quatre facteurs principaux : la pente du terrain, la géologie, le climat et la présence humaine (Xiaomin Che et al., 2004)

Dans ce chapitre, on s'intéresse à l'extraction du réseau hydrographique à partir du modèle numérique de terrain MNT en utilisant l'extension « Spatial analyst tools - Hydrology for ArcGIS 9.3 ».

L'extraction du réseau hydrographique pratiqué dans cette étude se base sur le suivi du ruissellement de l'eau. C'est une méthode hydrologique qui s'appuie sur la détermination des directions d'écoulement de l'eau en chacun des pixels à partir des valeurs altimétriques du MNT, par simulation de l'écoulement de l'eau en surface, sachant que l'eau emprunte le chemin défini par la ligne de plus grande pente (Demargne, 2001)

Le bassin versant de Mikkès prend sa nomenclature de son parcours principal Oued Mikkès, qui prend son origine dans la région d'Ifrane, où l'infiltration d'une grande partie de ses eaux alimente les sources de débordement du complexe Ribaa-Bittit. En plaine, l'oued reçoit l'apport des affluents mineurs, alimentés par des sources localisées ou par des émergences diffuses des nappes du bassin de Saiss.

3.1. Densité de drainage

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

$$D_d = \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{A}$$

Avec D_d : Densité de drainage.
 L_i : La longueur totale du réseau hydrographique (Km)
 A : La superficie du bassin versant (Km²).

La valeur de la densité de drainage est de **0.1 Km⁻¹**.

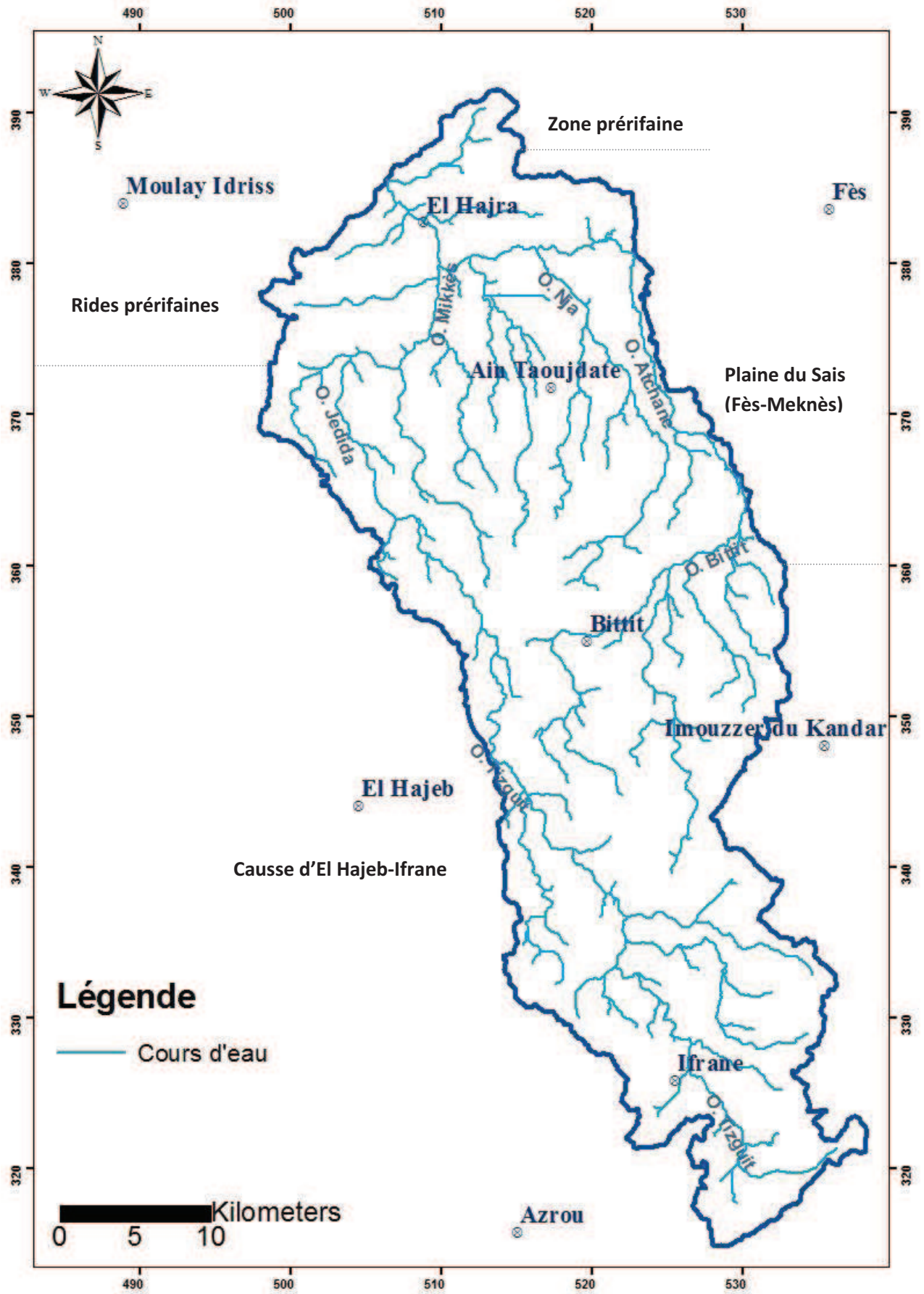


Figure 6 : Réseau hydrographique extrait à partir du MNT de bassin versant de Mikkès

4. Couvert végétal

Le couvert végétal est une caractéristique physique qui influence fortement sur le comportement hydrologique d'un bassin versant. Ainsi, une zone rocheuse avec peu de végétation, ou une surface agricole cultivée, ne réagissent pas de la même manière qu'une zone forestière face à une période de précipitations. La végétation est un facteur d'interception de la pluie, qui diminue la pluie nette, faisant obstacle au ruissellement et protégeant les sols (Snelder et Brayon, 1995 ; Morgan et al.), favorise l'infiltration, diminue le rendement en eau du bassin. La présence de végétation telle que la forêt a donc tendance à atténuer les pics de crues (pour les crues non extrêmes) et également réduire les débits d'étiage.

La végétation du bassin versant de Mikkès à son amont est répartie en trois grandes zones territoriales (Fig. 7) :

4.1. Causse Moyen Atlasique

Une première zone, à couvert végétal naturel consistant et permanent, couvre la partie sud du bassin. Elle s'étend sur une superficie d'environ 79989 ha. Elle est constituée en majorité par des terrains occupés par une végétation forestière à base de chêne vert, chêne zen, genévrier oxycèdre, cèdre et pin maritime. Elle est localisée sur l'ensemble des expositions. Néanmoins, les expositions sud et sud est sont les plus dégradées par rapport à celles de l'exposition nord et du nord est. Ezzahiri et Belghazi (2000) indiquent qu'en cédraie basse, le chêne vert à basse altitude de 1200 à 1600 m, joue un rôle positif sur la réduction de l'évapotranspiration. Les parties non couvertes par la forêt sont constituées de parcours ou de culture.

4.2. Saïss

Cette partie s'étend sur une superficie approximative de 60666 ha. La plaine du Saïss zone dont le sol est très riche, font d'elle l'une des plus importantes régions agricoles du pays. La production végétale constitue la composante principale du secteur agricole dans la plaine de Fès-Meknès. Les performances du secteur des productions végétales ont un effet direct sur le taux de couverture des besoins alimentaires, notamment en produits de base : Céréales 50%, Arboriculture 16%, Maraichage 11%, Légumineuse 7.8%, Fourrages 6.7%, Oléagineuses 2%, Cultures industrielles 0.5% et Jachère 6%.

4.3. Prérif – Rides pré-rifaines

La troisième zone s'étend sur une superficie d'environ 19558,49 ha du total du bassin. Lorsque la végétation naturelle subsiste, elle constitue presque uniquement par une strate herbacée ; ou elle est presque absente sur les pentes fortes. Enfin, il faut se rendre à l'évidence de l'absence d'espèces arborées ou arbustives sur l'ensemble de toutes les marnes.

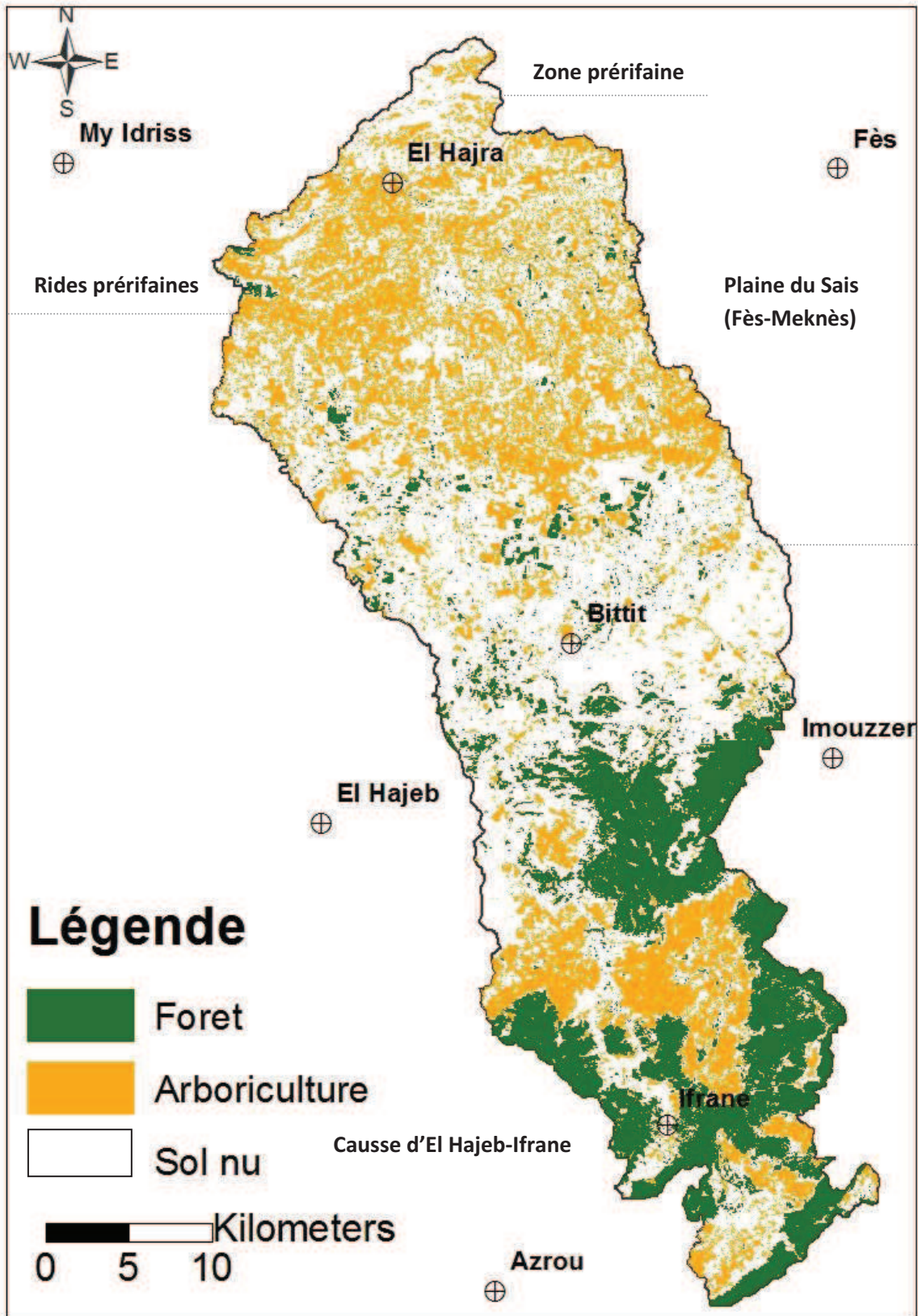


Figure 7 : Carte d'occupation du sol du bassin versant de Mikkès

5. Conclusion

Les principaux indices géomorphologiques pour le bassin versant de Mikkès définies sont récapitulés dans le tableau 5. Cette liste est loin d'être exhaustive, mais elle suffisamment vaste pour englober de nombreuses particularités du bassin versant susceptibles d'être liées au comportement hydrologiques du bassin.

Tableau 5 : Fiche morphométrique du bassin versant de Mikkès

N° d'ordre	Caractéristiques	Valeur
1	Superficie (Km ²)	1401
2	Périmètre (Km)	260
3	Indice de compacité	1,94
4	Altitude maximale (m)	2092
5	Altitude minimale (m)	187
6	Altitude moyenne (m)	904,4
7	Altitude médiane (m)	970
8	Altitude caractéristique (m)	Entre 600 et 800
9	Dénivelée utile (m)	1400
10	Temps de concentration (heures)	9,40
11	Longueur du rectangle équivalent (Km)	117,8
12	Largeur du rectangle équivalent (Km)	11,9
13	Pente moyenne du bassin versant (m/Km)	16,2
14	Indice de pente global (m/Km)	11,9
15	Densité de drainage (Km ⁻¹)	0,1

CHAPITRE 3. CONTEXTE GEOLOGIQUE DU BASSIN VERSANT DE MIKKES

1. Introduction

La connaissance de la géologie d'un bassin versant s'avère importante pour cerner l'influence de ses caractéristiques physiographiques sur ses ressources en eau. En effet ; la géologie influe non seulement sur l'écoulement de l'eau souterraine mais également sur le ruissellement de surface.

2. Cadre géologique général

Le bassin versant de l'Oued Mikkès recouvre deux domaines structuraux différents ; le Rif externe au Nord et le Causse moyen atlasique au Sud.

La carte géologique de Mikkès a été établie par l'utilisation d'une base de données spatiale à l'aide du logiciel ArcGIS 9.3. Cette base est composée d'un document cartographique digitalisé directement sur l'écran de l'ordinateur à partir d'un document préalablement scanné. Il s'agit des documents suivants :

- Le module numérique de terrain pour limiter le bassin versant de Mikkès,
- Fond géologique : la Carte Géologique du Maroc au 1/ 1 000 000.

Ce fond géologique comprend les limites des formations géologiques et la fracturation qui les affecte (Fig. 8)

2.1. Rif externe

Par cette appellation, il s'agit simplement, et selon les affinités géologiques, de réunir le Prérif, le Sillon sud rifain et les Rides sud rifaines (ou pré-rifaines, selon les auteurs)

2.1.1. Prérif

La partie septentrionale du secteur d'étude est à rattacher à la limite sud du domaine rifain. Il s'agit d'une région à collines au relief mou, à dominante argilo-marneuse et soulignée localement par des écaillés à éléments jurassiques et crétacés (ligne des sofs). L'ensemble de ces éléments d'âge mésozoïque sont identifiables dans les nappes à matériel cénozoïque (Miocène inférieur et moyen : nappe d'Ouezzane). Celles-ci reposent sur le complexe pré-rifain appelé aussi l'olistostrome d'avant fosse d'âge miocène supérieur. Enfin, l'achèvement du comblement de l'avant fosse, se fait par la sédimentation transgressive du « Miocène post-nappe » (Tortonien supérieur-messinien) et par les dépôts du Pliocène et du Quaternaire (Cirac, 1987).

En outre, il faut souligner que les plissements tardifs ont non seulement permis de donner les structures synclinales néogènes pré et mésorifaines (Taounate notamment), mais en plus ces mêmes mouvement ont provoqué la surrection d'anticlinaux à cœur jurassico-crétacé des Rides pré-rifaines (telles les Rides du Dehar en Sour, du Nesslerani, du Tekerma et du Kannoufa à l'Ouest et les Rides du Tghat et du Zalagh à l'Est) (Ait Brahim, 1983).

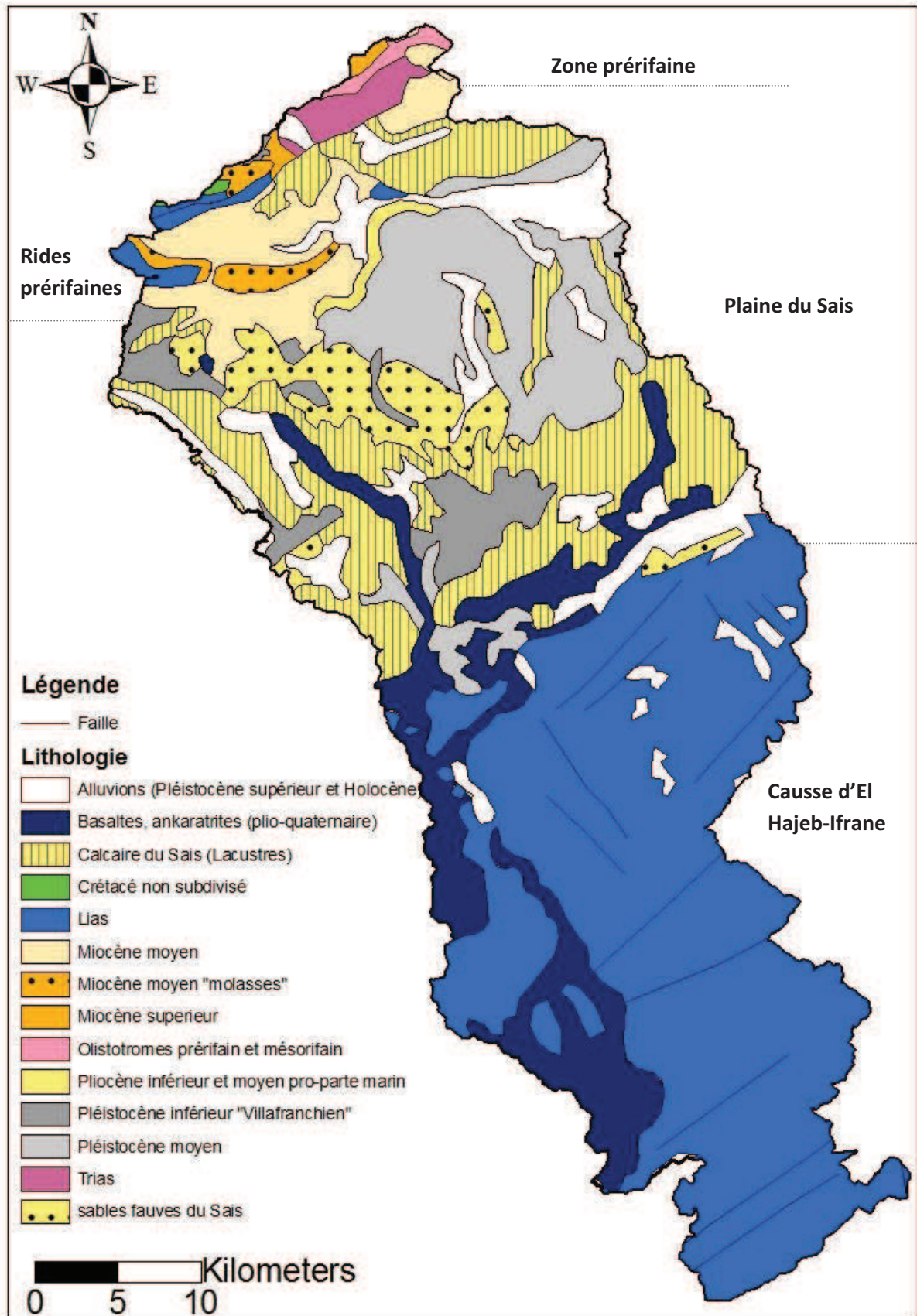


Figure 8 : Carte géologique du bassin versant de Mikkès

2.1.2. Sillon sud rifain

Le Sillon sud rifain connu sous le nom du couloir sud-rifain, correspond à une dépression allongée selon une direction sensiblement Est-Oued.

Le bassin du Saiss fait partie du Sillon sud-rifain, il s'ouvre entre la cordillère du Rif au Nord, la Meseta marocaine et le Moyen Atlas au Sud. Il forme l'avant pays du domaine pré-rifain.

Un accident topographiquement franc (Fassi, 1999), d'orientation globale Est-Ouest, appelé flexure d'Ain Taoujdate, subdivise le bassin en deux parties ; le plateau de Meknès à l'Ouest et la plaine du Saiss à l'Est (Fig. 8)

✓ Le plateau de Meknès à l'Ouest

L'altitude du plateau de Meknès, décroît d'une manière générale du Sud vers le Nord. Elle passe de 1000 m (à El Hajeb) à 550 m (à Meknès). Dans sa partie septentrionale, le plateau se redresse brutalement au niveau des Rides pré-rifaines (Jbel Kannoufa). Au Sud et à partir du Causse (El Hajeb – Ifrane), les vallées sont peu profondes et parfois le ruissellement des eaux superficielles y devient plus lent (pente trop faible) à stagnant (pente nulle), c'est le cas de Dayet Kachtam.

✓ Le Saiss du Fès ou plaine de Fès à l'Est

La plaine du Saiss a aussi une altitude décroissante du Sud vers le Nord. Elle passe de 700 m au Sud à 400 m dans la région de Fès. La pente des cours d'eau est nettement plus faible que sur le plateau de Meknès. Cette pente faible peut causer par endroit la stagnation de l'eau (région de Douyet).

Globalement, le Sillon sud rifain correspond à l'avant fosse rifaine, recevant dès le Miocène les nappes de glissement « olistostrome ». Ensuite, l'essentiel du comblement est assuré par la sédimentation post-nappe torto-messinienne. Le Plio-quatenaire est dominé par les dépôts continentaux notamment les sables fauves et les calcaires lacustres.

2.1.3. Rides sud rifaines

Les Rides Pré-rifaines (Daguin, 1927) Sud-rifaines (Faugères, 1978) ont longtemps été interprétées comme des écaillles de matériel mésozoïque de l'avant pays rifain, déversées vers le Sud et l'Ouest. Ces écaillles résultent d'une phase de compression contemporaine de la mise en place de la nappe pré-rifaine (Daguin, 1927, Lévy & Tilloy, 1952). Plus récemment, une interprétation différente a été proposée par Faugères (1978). Pour cet auteur, les Rides Pré-rifaines constitueraient une zone comprimée limitée par deux systèmes décrochant, l'un à l'Ouest et l'autre au Sud ; la phase tectonique qui aurait structuré les Rides Pré-rifaines serait postérieure aux phases majeurs du Rif ; responsables de la mise en place des nappes, soit par compression (Andrieux, 1971), soit par glissement (Vidal, 1971). Dans l'évolution structurale de cet élément para-autochtone, Faugères (1981) distingue trois étapes : une étape triasico-jurassique de distension, une jurassique-miocène moyenne caractérisée par une relative stabilité et une émergence du domaine, et une étape miocène supérieur-Pliocène où la compression domine.

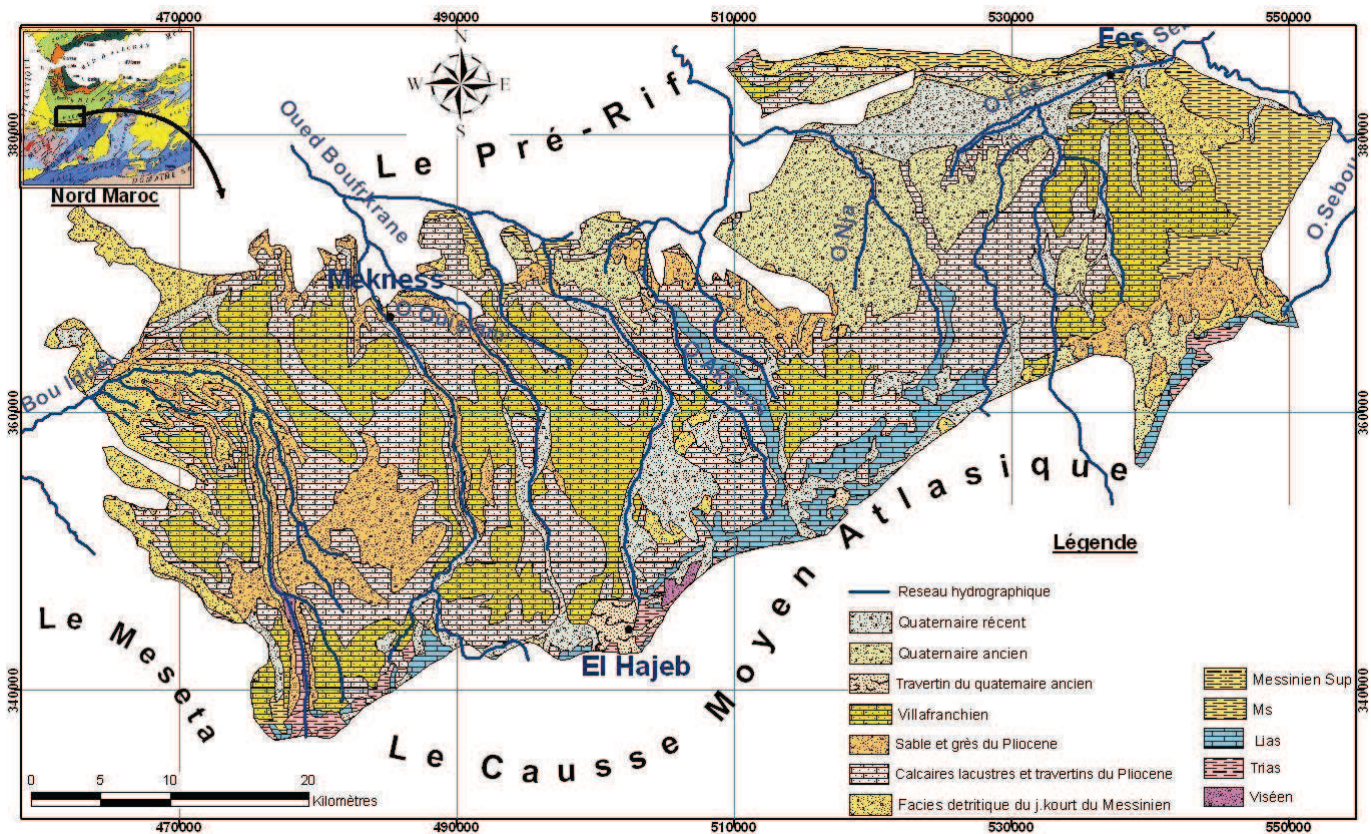
Etude hydrologique du bassin versant de l'Oued Mikkès

2.2. Causse Moyen Atlasique

La partie méridionale du secteur étudiée est rattachée au Causse moyen atlasique. Ce secteur est limité à l'ouest par les terrains paléozoïques de la meseta marocaine, et au Nord, par les assises tertiaires et quaternaires du Couloir sud rifain.

L'accident nord moyen atlasique sépare le Causse moyen atlasique tabulaire et le Moyen Atlas plissé. La ligne d'accident du Tizi-N'Tretten traverse le moyen atlas tabulaire selon une direction NE-SW.

Le causse d'El Hajeb-Ifrane, faisant partie du bassin versant de Mikkès, est constitué de dolomies et de calcaires d'âge liasique. Il montre une baisse progressive d'altitude du sud vers le nord depuis le Causse d'Ifrane jusqu'à celui d'El Hajeb. Cette zone du secteur d'étude est caractérisée par les irrégularités topographiques qui sont en relation avec le creusement de larges vallées fluviales. En outre, cette zone est surtout caractérisée par un paysage où dominent les dolines d'origine karstique ainsi que les volcans quaternaires (Martin, 1981).



3. Lithostratigraphie

La nature, la structure et la texture de la lithologie conditionnent le ruissellement et/ou l'infiltration.

L'Oued Mikkès traverse plusieurs formations géologiques qui appartiennent aux domaines structuraux cités ci-dessus (Fig. 8, 9)

3.1. Paléozoïque

Généralement le Moyen Atlas tabulaire est formé en sa majeure partie par un socle paléozoïque (Texier et al., 1985 ; Herbig , 1988). Les formations schisteuses d'âge paléozoïque affleurent à l'Ouest du bassin versant de Mikkès et ponctuellement au nord-est de la ville d'El Hajeb (Fig. 8, 10)

Dans le Saiss, le Paléozoïque est représenté par des faciès monotones de schistes fins et de quartzites à intercalations de bancs gréseux (Fig. 10)

Dans le bassin des Rides pré-rifaines, les formations paléozoïques sont localement magmatiques et affleurent généralement dans la partie sud-ouest (zone de recharge probable) et subissent un enfouissement vers le nord-est (Zarhloue, 2004).

3.2. Trias

Les formations du trias affleurent à la fois au Nord et au Sud du secteur d'étude.

Au nord, elles apparaissent au front de la nappe pré-rifaine où elles soulignent les plans de chevauchement causés par la tectonique alpine. Ces affleurements qui s'étendent de l'est vers l'Ouest de plusieurs kilomètres apparaissent au nord du bassin versant de Mikkès au voisinage du site du barrage de Sidi Echahed.

Dans le Sillon sud rifain, les argiles rouges à évaporites ont été touchées par des forages profonds. Elles présentent une nette affinité avec celles rencontrées à la limite Meseta-Moyen Atlas ou les formations triasiques reposent en discordance sur le socle hercynien.

Au Sud, sur la bordure sud-ouest du Causse d'El Hajeb-Ifrane, le Trias est caractérisé par sa trilogie classique à savoir ; les argiles rouges inférieures, les basaltes altérés et les argiles rouges supérieures (Herbig, 1988) (Fig.9)

Les argiles du Trias caractérisant la partie nord du bassin de Mikkès sont des roches imperméables. Lorsqu'elles effleurent au niveau du sol, du fait de leur instabilité, elles se traduisent par des variations de volume et un fluage dans les terrains en pente.

3.3. Jurassique

Dans le bassin versant de Mikkès, les formations jurassiques affleurent au Nord dans les Rides pré-rifaines ou elles constituent des mégastructures plissées et faillées (comme par exemple les Jbels Zerhoun, Kannoufa, Dhar Nssour et le Tselfat). Au sud, les formations jurassiques coiffent la structure tabulaire du Causse d'El Hajeb-Ifrane. (Fig. 8, 9, 10)

Enfin, dans le Sillon Sud rifain, les formations jurassiques sont connues soit directement par le biais de forages profonds, soit indirectement par la prospection géophysique (Essahlaoui, 2000 ; Chalouan et al., 2006)

Au dessus du Trias, le Lias constitue la formation de base du Saiss. Dans sa forme dolomitique, il est le matériel essentiel des reliefs dominant le Moyen Atlas et les Rides pré-rifaines. Au Nord, dans le Rif, il constitue le matériel principal du substratum qui apparaît le long des fronts d'écaillés tectoniques. Globalement, le Lias constitue le réservoir profond et principal en eau souterraine du secteur d'étude.

Au niveau des Rides prérfaines, le Jurassique est localement complet ; il peut être même suivi du Sinemurien-Carixien jusqu'au Bajocien. A la base, il est dolomitique puis il devient calcaire et marno-calcaire. Il se termine enfin par des formations calcaro-détritiques à détritiques.

Au niveau du Causse d'El Hajeb-Ifrane, les couches du Lias inférieur et moyen occupent la quasi-totalité des affleurements géologiques et ne sont voilés que par le recouvrement basaltique et par les formations sédimentaires quaternaires. Du point de vue faciès, le Lias est représenté par des roches carbonatées, principalement des dolomies, des calcaires et des calcaires dolomitiques (Fig. 8, 9, 10)

Par ailleurs, si le Lias du Moyen Atlas est caractérisé presque partout où il a été étudié par une certaine monotonie, il faut souligner, en revanche, que le Jurassique des Rides prérfaines est partout parcouru par des passages latéraux de faciès et ce, parfois sur à peine quelques centaines de mètres de longueur. Tout ceci, traduit la complexité paléogéographique – et donc du réservoir profond – au moment de l'ouverture océanique relative à la Thétis de reconquête.

La série liasique du bassin de Mikkès est formée de roches perméables et karstiques qui jouent un grand rôle hydrogéologique.

3.4. Crétacé supérieur

La série complète du Crétacé apparaît uniquement au niveau des Rides prérfaines et, notamment au Sud de Beni Ammar. Elle repose sur le Jurassique par l'intermédiaire d'un conglomérat cénomanien à éléments essentiellement jurassiques. Ces conglomérats sont surmontés par des calcaires du Turonien suivis par des marnes à intercalations calcaires du Sénonien (Fig. 8)

Dans le Prérf externe, le Crétacé marneux de teinte verdâtre est soit figé en compagnie du Trias au front des écailles tectoniques, soit, plus au nord, dans les nappes externes, constituant l'essentiel de leurs éléments gravitaires.

Les marno-calcaires du Crétacé supérieur sont considérées comme des formations semi-imperméables. Mais plus perméables et donc jouent à la faveur du ruissellement.

3.5. Eocène

Dans le bassin étudié, l'Eocène n'apparaît que dans le domaine prérfain où il est représenté par des formations marno-calcaires, le plus souvent engagées à côté des formations du Crétacé supérieur dans le chevauchement de la nappe de charriage prérfaine (Ziadi, 1984). A proximité de ces fronts de chevauchements, les formations de l'Eocène sont le plus souvent très déformées.

Les marno-calcaires de l'Eocène sont considérées comme des formations semi-imperméables. Mais plus perméables et donc favorisant le ruissellement.

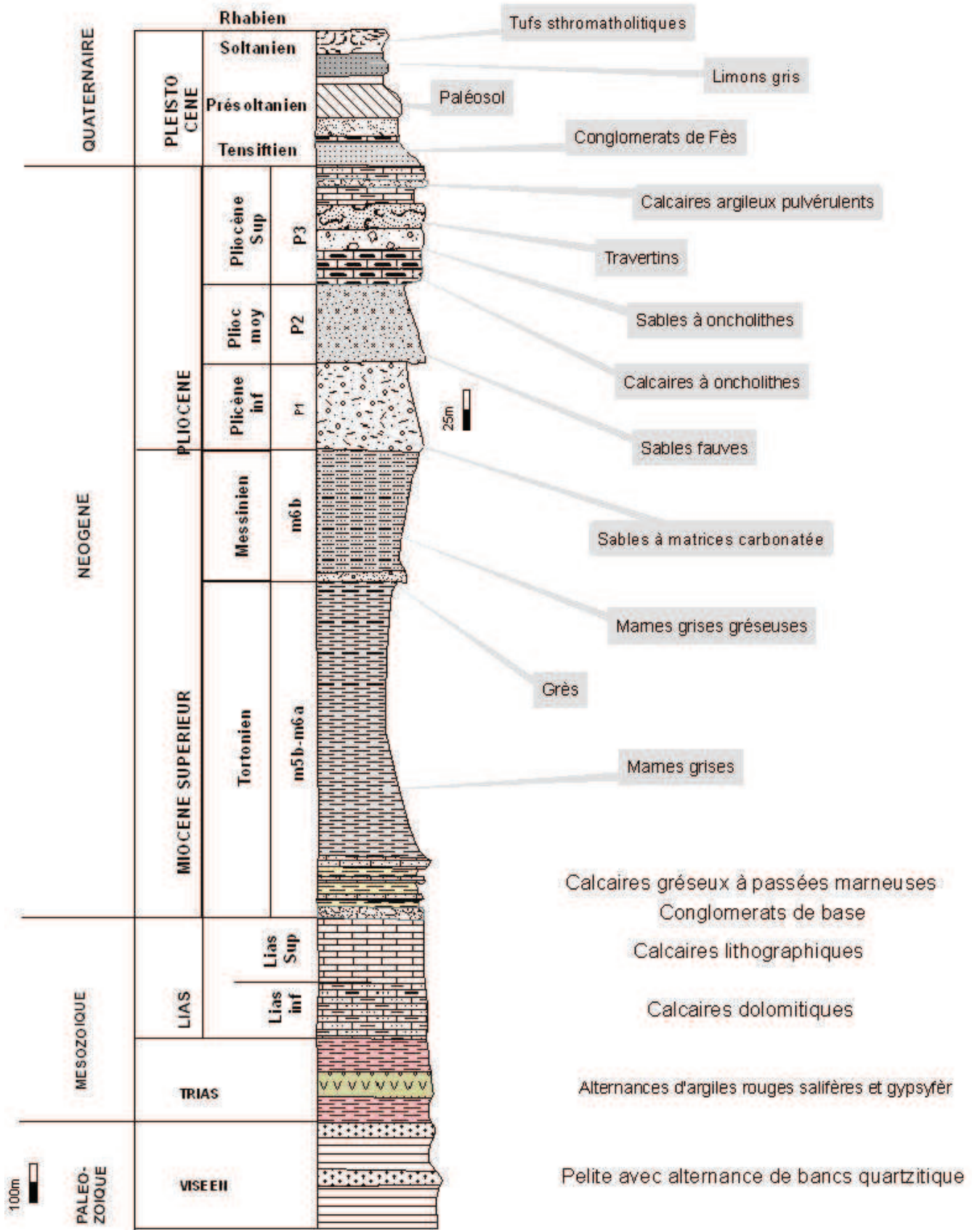


Figure 10 : Chronostratigraphie des dépôts du bassin de Sais (Ait Brahim, 1991 et Essahlaoui, 2000 modifié)

3.6. Oligocène

Les formations de l'Oligocène sont absentes dans le bassin de Fès-Meknès et dans le Causse d'El Hajeb-Ifrane. Elles n'apparaissent que dans les Rides prérfaines ou elles sont présentées par des marnes à passées gréso-calcaires. Ces formations à caractère flyschoides sont attribuées à l'Oligocène inférieur par Bruderer et al. (1955).

Le grès est une roche détritique, issue de l'agrégation et la cimentation (ou diagenèse) de grains de sable. Il peut s'agir d'une roche cohérente et dure. Ces grains sont souvent composés de silice (et parfois même de grains de feldspath et de micas noirs), mais ils peuvent avoir d'autres compositions.

Les grès et les calcaires de l'Oligocène répartis au Nord du bassin de Mikkès, sont des formations perméables.

3.7. Miocène

Dans le domaine prérfain, l'Oligocène est surmonté en concordance par les dépôts de Miocène. A Bled des Ouled Aissa, le début de Miocène est marqué d'une molasse blanche à microfaune burdigalienne surmontée par des marnes et des marno-calcaires à intercalations calcaires et grès. Cet ensemble est coiffé à Nzalat Beni Ammar par une formation essentiellement marneuse. Les marno-calcaires sont blanchâtres ou grisâtres contenant des tâches d'oxydes de fer. Les blancs gréseux de teinte jaune, sont friables. Le gypse, la calcite en cristaux, apparaissent dans la partie supérieure des marnes.

A Sidi Echahed, le Miocène recouvre les terrains charriés formant des cuvettes synclinales. On y rencontre des faciès à caractère peu profond. Dans cet endroit le Miocène supérieur débute par des marnes bleues du Tortonien, reposant directement sur les terrains charriés. Ces marnes sont surmontées par des grès coquillers grossiers, roux et ferrugineux du Messénien.

Dans le bassin de Sais, le Néogène est caractérisé à sa base par les marnes du Tortonien. Ces marnes d'épaisseur variant de quelques mètres au sud du bassin à plusieurs centaines de mètres à sa limite Nord au contact des Rides prérfaines, sont généralement de couleur bleue. La couleur bleue de cette formation est due à la présence de pyrite à laquelle est souvent associé le gypse. En revanche, les affleurements marneux du Messinien sont généralement gris. A la différence du Tortonien, ils sont localement sableux et présentent parfois des intercalations gréseuses.

De point de vue perméabilité, les marnes du Miocène sont tendres et imperméables.

3.8. Pliocène

Dans le bassin de Sais, au dessus des marnes du Miocène, se sont déposés des sables à matrice carbonatée datés du Pliocène inférieur (Wernli, 1988). A l'Ouest de ce bassin, ces sables peuvent atteindre une épaisseur de 50 80 m (Ait Brahim, 1991). L'étude pétrographique a montré que ces sables contiennent une forte proportion des éléments quartzeux appartenant à la classe des sables très à matrice micritique (Cirac, 1987). Leur épaisseur diminue en allant l'Est ou ils disparaissent dans les environs de la ville de Fès.

Le Pliocène moyen est caractérisé par une formation sableuse de couleur très variable (jaune, brun, ocre, rouge et gris) et d'une trentaine d'épaisseur. Elle constitue les sables fauves affleurant dans les parties les plus orientales du bassin de Sais à Ain Taoujdate et au Sud du Plateau de Meknès. Ces

sables contiennent des grains de quartz à matrice argilo-ferrugineuse (Taltasse, 1953 ; Cirac, 1987). Leur puissance diminue vers l'Est ou ils disparaissent dans les environs de Fès.

Dans le bassin de Mikkès, les formations du Pliocène supérieur sont constitués de bas en haut par :

- Des sables et des calcaires à pseudo-oides, d'une épaisseur de 2 m. Ils sont constitués de grains de quartz à patine ferrugineuse et quelques bioclastes avec un pourcentage plus important d'encroustement algair : pseudooïdes, manchons et autres types stromatolitiques (Cirac, 1987 in Ait Brahim, 1991)
- Des calcaires et des calcilutites, de couleur blanchâtre à grisâtre, d'une épaisseur moyenne d'environ de 30 m, pouvant atteindre par endroit 80 à 100 m.

Les affleurements des sables fauves sont peu abondants dans le bassin de Mikkès. Les meilleurs se trouvent près de la ville de Meknès ou se concentrent les carrières d'exploitation de ces sables.

Les sables fauves du Pliocène sont considérés parmi les formations perméables qui caractérisent le bassin versant de Mikkès.

Les affleurements de calcaires, tout en montrant l'existence de calcaires durs et de calcaires crayeux, les géologues ont souligné la complexité des dépôts calcaires à l'échelle de l'ensemble du bassin lacustre du Sais. On peut distinguer en effet :

- Des calcaires durs, Ils prédominent et se présentent sous trois principaux faciès : calcaires à grains fins très compacts, calcaires détritiques à algues et calcaires à pseudoolithes.
- Des calcaires crayeux ou tufs ou encore formations travertineuses. Il s'agit de calcaires riches en argiles, peu consolidés ou tout à fait pulvérulents selon les endroits.

Les calcaires lacustres du Pliocène caractérisant le centre du bassin de Mikkès sont des formations perméables.

3.9. Quaternaire

Dans le Sais et dans le Prérif, les formations du Quaternaire correspondent à un complexe fluvatile daté du Quaternaire moyen et supérieur (Ahmamou, 1987). En revanche, dans le Causse d'El Hajeb-Ifrane, l'ère quaternaire est marquée par plusieurs épisodes volcaniques ayant émis plusieurs m³ de basalte de nature alcaline. Les nombreux pointements volcaniques sont répartis le long d'une ceinture orientée NW-SE. Les affleurements basaltiques se présentent comme des recouvrements de plateaux et de versants carbonates, de comblement de fonds de vallées ou en recouvrement des formations détritiques du Sais (Dekayir & El-Maataoui, 2001)

Les basaltes de bassin de Mikkès issus de Jbel Outgui (1431 m), grand volcan éteint dominant le Causse d'El Hajeb sont d'âge Quaternaire post Villafranchien. Les coulées de lave ont traversé en cascades le bord du Causse et se sont épanchées fort loin dans la plaine (une trentaine de Km à partie du cratère). Les coulées se sont étalées sur 2 à 4 Km de largeur en suivant le pied du Causse (Amraoui, 2005).

D'une part les basaltes de Mikkès de la région d'Ifrane (Jbel Outgui) constituent un toit relativement imperméable, en comparaison avec les calcaires et les dolomies du Lias.

Etude hydrologique du bassin versant de l'Oued Mikkès

Généralement, les basaltes caractérisant le bassin de Mikkès sont considérés comme des roches semi-perméables.

Les travertins du Quaternaire sont des sédiments carbonatés continentaux présentent généralement des bancs compacts et épais de calcite et montrent à leurs base des lits de conglomérats. Ils sont considérés comme des formations perméables. Les tufs travertineux de Fès sont intercalés dans des dépôts quaternaires composés de marnes verdâtres à gypse et d'éboulis de pente, eux-mêmes recouvrant des conglomérats du Pliocène. Les analyses radiochronologiques indiquent des périodes anciennes voisines ou supérieurs à 350 000ans (Rousseau et al., 2006)

Les alluvions du Quaternaire montrent généralement entre leurs "grains" ou "particules" des espaces vides qui vont permettre la circulation et l'accumulation des eaux. Ces dernières s'infiltrent depuis :

- La surface (pluies, rivière, canal . . .)
- Le lit d'un cours d'eau
- La surface d'une terrasse alluviale

Les eaux de surface une fois infiltrées dans le sous sol perméable forment une nappe alluviale. Elles peuvent constituer une ressource en eau pour les activités humaines.

Les limons du Quaternaire proviennent soit de la décarbonatation de la roche mère calcaire dans ce cas l'enrichissement en argiles est progressif de la surface du sol jusqu'à la roche, soit d'apports éoliens fréquents sur les plateaux.

Les cailloutis du Quaternaire sont des accumulations de cailloux transportés par des glaciers et qui par cimentation, peut donner un conglomérat (Billaux, 1970)

Les éboulis de pentes de Quaternaire, dont les épaisseurs augmentent en allant vers les parties basses, sont de nature extrêmement variée. Ils sont composés de couches de terrain existantes qui affleurent ou de celles qui ont existé en amont des pentes.

Dans leur ensemble, les formations du quaternaire du bassin de Mikkès citées ci-dessus sont considérées comme des formations semi-perméables du fait d'une lithologie à dominance argileuse.

4. Conclusion

L'étude litho-stratigraphique de ce secteur a permis l'identification de formations d'âge et de nature lithologique variés. Elles ont été différenciées :

- ❖ Un socle paléozoïque détritique au Sud et localement magmatique au Nord.
- ❖ Un Trias partout typique par sa trilogie détritique, conglomératique et évaporitique.
- ❖ Un Jurassique soit uniquement liasique calcaro-dolomitique au Sud soit relativement complet et allant jusqu'au Bajocien avec des faciès dolomitiques, puis marno-calcaires et enfin relativement détritiques dans les Rides Sud-rifaines.
- ❖ Un Crétacé supérieur marno-calcaire carbonaté uniquement dans les Rides et sud rifaines et précisément au sud de Beni Ammar.
- ❖ Un Eocène marno-calcaire uniquement dans le Prérif.
- ❖ Un Oligocène marneux à passées grésocalcaires «flyschoides» dans les Rides pré-rifaines.
- ❖ Un Miocène à sédimentation essentiellement marneuse et à puissance très variable du sud du secteur d'étude.
- ❖ Enfin, un Plio-quatenaire dans le Nord et le centre du bassin est représenté par des sables, des grès, des calcaires lacustres, des conglomérats et un complexe fluviatile. Tandis qu'au Sud du bassin, le quaternaire est représenté essentiellement par des basaltes et des cailloutis.

CHAPITRE 4. CLIMATOLOGIE DU BASSIN VERSANT DE L'OUED MIKKÈS

1. Introduction

Plus encore que les facteurs morphologiques et biogéographiques, les conditions climatiques du bassin versant jouent un rôle capital dans le comportement hydrologique des cours d'eau (Roche, 1963 ; Cosandy & Robinson, 2000...)

Le climat intervient à la fois sur la transformation des roches en sols et sur l'exportation des particules des sols. Aux échelles du temps qui nous intéressent (une année), l'action du climat sur le bilan hydrologique est prédominante, vu le type du climat. Cette influence, essentiellement dynamique, se conçoit aisément puisque les paramètres climatiques tels que l'intensité des précipitations et l'évapotranspiration (elle-même dépendante des températures) sont des facteurs primordiaux de l'importance de l'écoulement spécifique.

Le climat est l'un des facteurs les plus importants qui ont une influence sur le cycle hydrologique et hydrogéologique. L'étude de ce dernier est fondée sur la combinaison de trois paramètres :

- Les précipitations ;
- La température ;
- L'évapotranspiration ;

Les données climatiques disponibles concernent les stations suivantes : Fès, Moulay Idriss, El Hajra-Mikkès, Ain Taoujdate, Bittit, El Hajeb, Imouzzer du Kandar, Ifrane et Azrou. Les situations géographiques de ces stations sont présentées sur le tableau ci-dessous:

Tableau 6 : Coordonnées et données moyennes des stations météorologiques

Stations	Altitudes (m)	X (Km)	Y (Km)	Pluie moyenne (1968-2009)	Température moyenne (1968-2009)
Ifrane	1635	525,5	325,9	965	12
Azrou	1508	515,077	315,836	722	-
Imouzzer	1348	535,404	348,073	608	-
El Hajeb	1050	504,596	344,103	575	-
Bittit	760	519,66	355	504	-
Fès	579	535,722	383,646	-	16,6
Moulay Idriss	550	489	384	599	17,6
Ain Taoujdate	465	517,3	371,8	448	-
El Hajra	215	508,86	382,76	365	18,2

2. Etude des précipitations

Le terme précipitation englobe toutes les eaux météoriques, mesurées dans leur hauteur de la lame d'eau et recueillies par le pluviomètre, quelque soit la nature de cette eau, pluie, neige, grêle, ou autres formes de condensation. On s'intéresse dans cette étude uniquement aux précipitations

liquides (pluies), qui constituent le facteur principal dans le comportement hydrologique de la région. Elles sont relativement peu importantes, variables et irrégulières d'une année à une autre.

2.1. Variations saisonnières de la pluviométrie

Pour les 9 stations, l'évolution des pluies moyennes mensuelles est similaire, mais avec des hauteurs pluies plus importantes au niveau des stations du Causse que celles de la plaine de Sais (gradient alto-pluviométrique). Les irrégularités mensuelles et saisonnières montrent aussi un régime pluviométrique extrêmement variable d'un mois à l'autre, avec une période sèche qui correspond à la saison d'été (juin, juillet, août), caractérisée par un déficit pluviométrique et une autre humide qui correspond aux autres mois de l'année, le rythme saisonnier du bassin est uni-modal (Fig. 14)

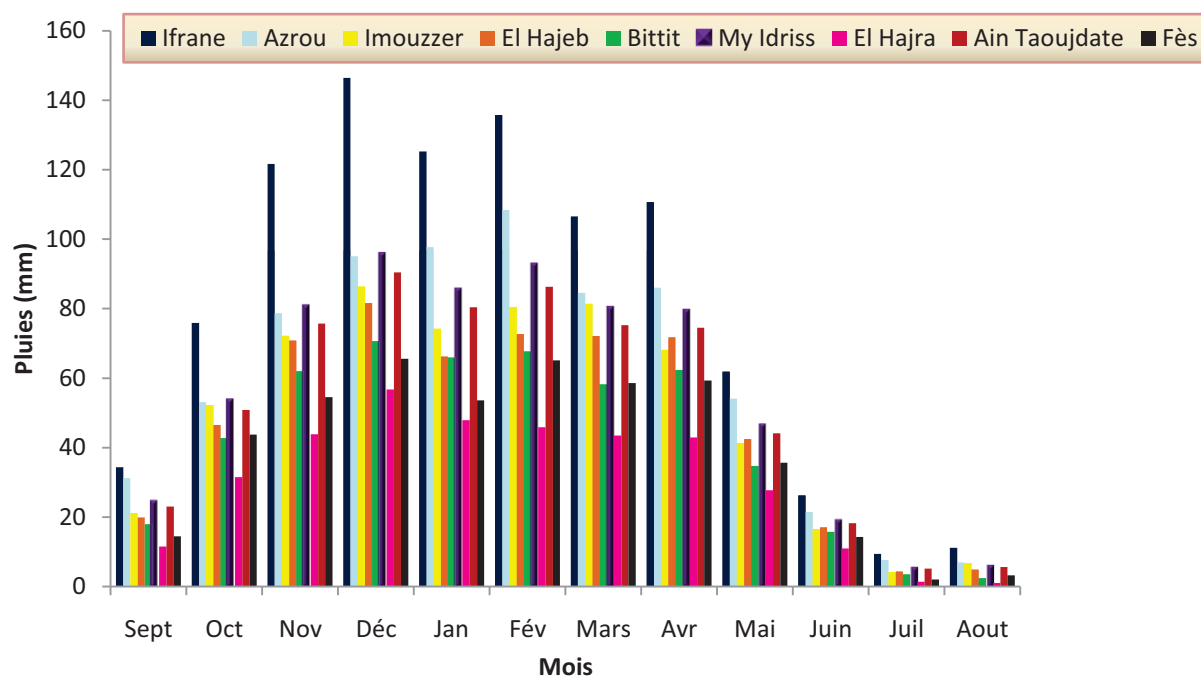


Figure 11 : Pluies moyennes mensuelles (1968-2009)

La période humide dure du mois d'octobre au mois de mai, alors que la période sèche s'étale du mois de juin au mois de septembre. Le mois de décembre est en général le plus arrosé, alors que les mois de juillet et août sont les plus secs. Ces deux mois peuvent cependant connaître des averses orageuses très concentrées et brutales pouvant déclencher un écoulement même dans les vallées sèches. Le tableau 7 regroupe les données moyennes de pluies au niveau des 9 stations pour la période 1968-2009 :

Etude hydrologique du bassin versant de l'Oued Mikkès

Tableau 7 : Pluies moyennes mensuelles (1968-2009)

station	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
Ifrane	34	76	122	147	125	136	107	111	62	26	9	11
Azrou	31	53	79	95	98	108	85	86	54	21	8	7
Imouzzer	21	52	72	86	74	80	81	68	41	17	4	7
El Hajeb	20	47	71	82	66	73	72	72	42	17	4	5
Bittit	18	43	62	71	66	68	58	62	35	16	4	2
My Idriss	25	54	81	96	86	93	81	80	47	19	6	6
El Hajra	11	32	44	57	48	46	43	43	28	11	1	1
Ain Taoujdate	23	51	76	90	80	86	75	75	44	18	5	6
Fès	14	44	55	66	54	65	59	59	36	14	2	3

2.2. Variations interannuelles de la pluie

Les 42 années de suivi de la pluviométrie au niveau des stations montrent que le régime pluriannuel est irrégulier, avec un coefficient de variation de 28.6 à 34. %. Le tableau 7 récapitule ces données :

Tableau 8 : Variation pluviométriques annuelles (1968-2009)

Stations	Ifrane	Azrou	Imouzzer	El Hajeb	Bittit	My Idriss	Ain Taoujdate	El Hajra
Pluie moyenne annuelle	965	722	608	575	504	599	448	365
Ecart type	288	217	186,4	195,3	161,7	171,3	132,0	124,4
Coefficient de variation %	29,8	30,0	30,7	34,0	32,1	28,6	29,5	34,1

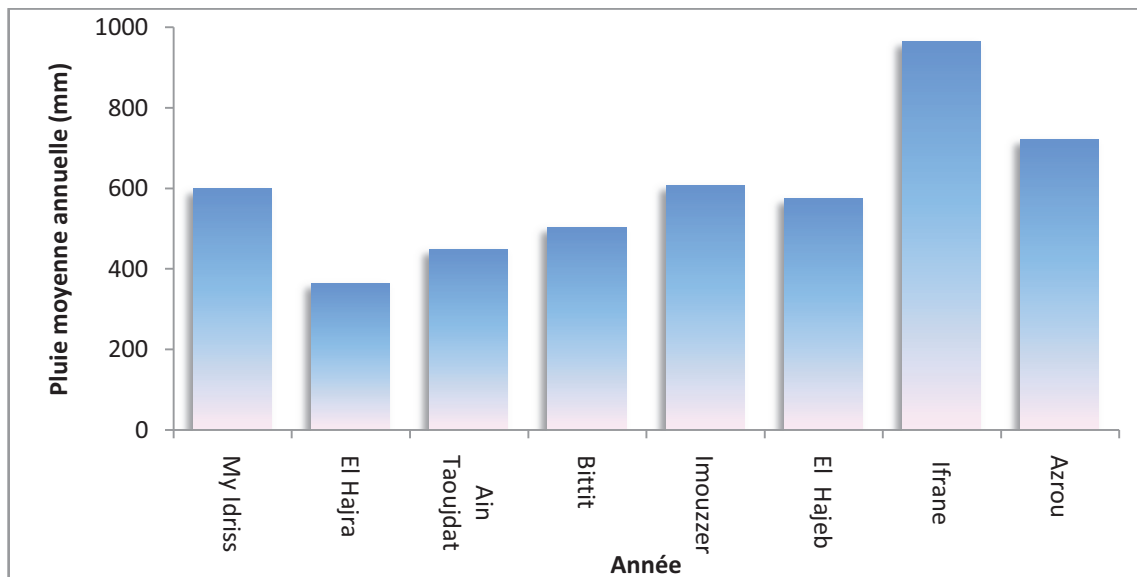


Figure 12 : Pluies interannuelles des huit stations d'étude (1968-2009)

Une comparaison des résultats des stations climatiques localisées dans trois secteurs différents (de point de vue géographique) montre que la pluviosité interannuelle diminue au fur et à mesure qu'on s'éloigne du Causse vers le Nord du bassin c'est-à-dire vers le Prérif. Mais au niveau des Rides pré-rifaines où se situe la station de Moulay Idriss les hauteurs de pluies sont importantes.

Pour déterminer les années excédentaires et les années déficitaires, nous allons utiliser le coefficient pluviométrique (H) qui est un paramètre climatique très important, défini comme étant le rapport

de la pluviométrie d'une année à la pluviométrie moyenne pour une période de N années au niveau d'une station donnée.

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

Avec :

H : coefficient pluviométrique

P_i : pluviométrie d'une année donnée

P : pluviométrie moyenne pour une période de N années

Si $H > 1$: Année excédentaire

$H < 1$: Année déficitaire

L'analyse du coefficient pluviométrique, des deux stations du bassin versant de Mikkès (Ifrane et El Hajra), pour la période 1968-2009, a mis en évidence que les deux stations sont très humide, caractérisées par des années dont la plus part sont excédentaires.

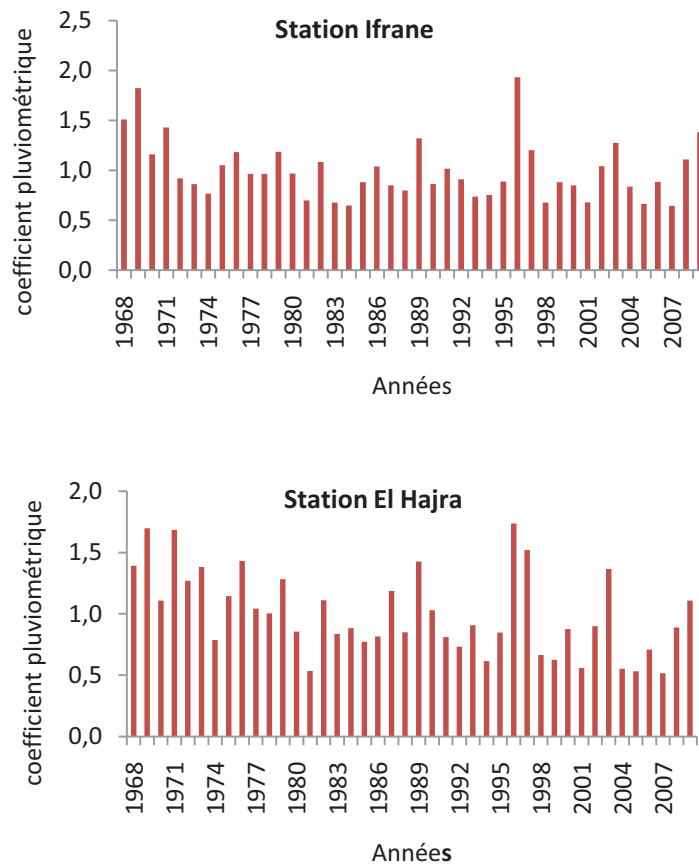


Figure 13 : Variations Spatiotemporelle du coefficient pluviométrique dans les deux stations

2.3. Estimation de la lame d'eau moyenne

L'estimation de la lame d'eau moyenne du bassin de Mikkès est basée sur la méthode des polygones de Thiessen. Cette méthode affecte une aire d'influence pour chacune des stations pluviométriques. Cette méthode tient compte de la distribution non uniforme des pluviomètres en introduisant un facteur de pondération pour chaque station. Elle permet aussi d'utiliser les données des stations pluviométriques sises en bordures de la zone considérée (station d'Azrou, d'Imouzzer, d'El Hajeb et de Moulay Idriss). Cependant la topographie et ses effets sont ignorés lors du calcul de la lame d'eau moyenne.

$$P_{moy} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (P_i \times S_i)}{S_t}$$

Avec :

- ✓ Pi : Précipitation moyenne annuelle dans chaque station
- ✓ n : nombre de stations
- ✓ Si : surface du polygone (Km²)
- ✓ St : surface totale du bassin versant (Km²)

Tableau 9 : lame d'eau tombée sur le bassin de Mikkès par la méthode de Thiessen (1968-2009)

Stations	Pluie moyenne annuelle (mm)	surface(Km ²)	Pi * Si
El Hajeb	570	32	18240
Imouzzer du Kandar	605	103	62315
El Hajra	365	239	87235
Bittit	504	371	186984
Ifrane	965	315	303975
Ain Taoujdate	448	340	152320
Moulay Idriss	599	1	599
Total	4056	1401	811668

La lame d'eau moyenne tombée sur le bassin par la méthode de Thiessen est d'environ **579,3 mm**

2.4. Carte d'isohyète

Les données pluviométriques provenant des stations situées dans le bassin ainsi que en dehors du bassin, ont permis de tracer la carte des isohyètes (à l'aide d'ArcGIS par interpolation des données par Kriging). L'examen de cette carte montre que la moyenne des précipitations calculée pour la période (1968-2009) varie entre 365 mm et 965 mm, ce qui montre le caractère hétérogène de la répartition des pluies dans le bassin. On peut distinguer deux zones : la partie Nord qui montre une diminution des précipitations (365 mm à la station d'El Hajra). La zone Sud montre une pluviométrie croissante (965 mm à Ifrane), ce qui est en accord avec l'élévation topographique.

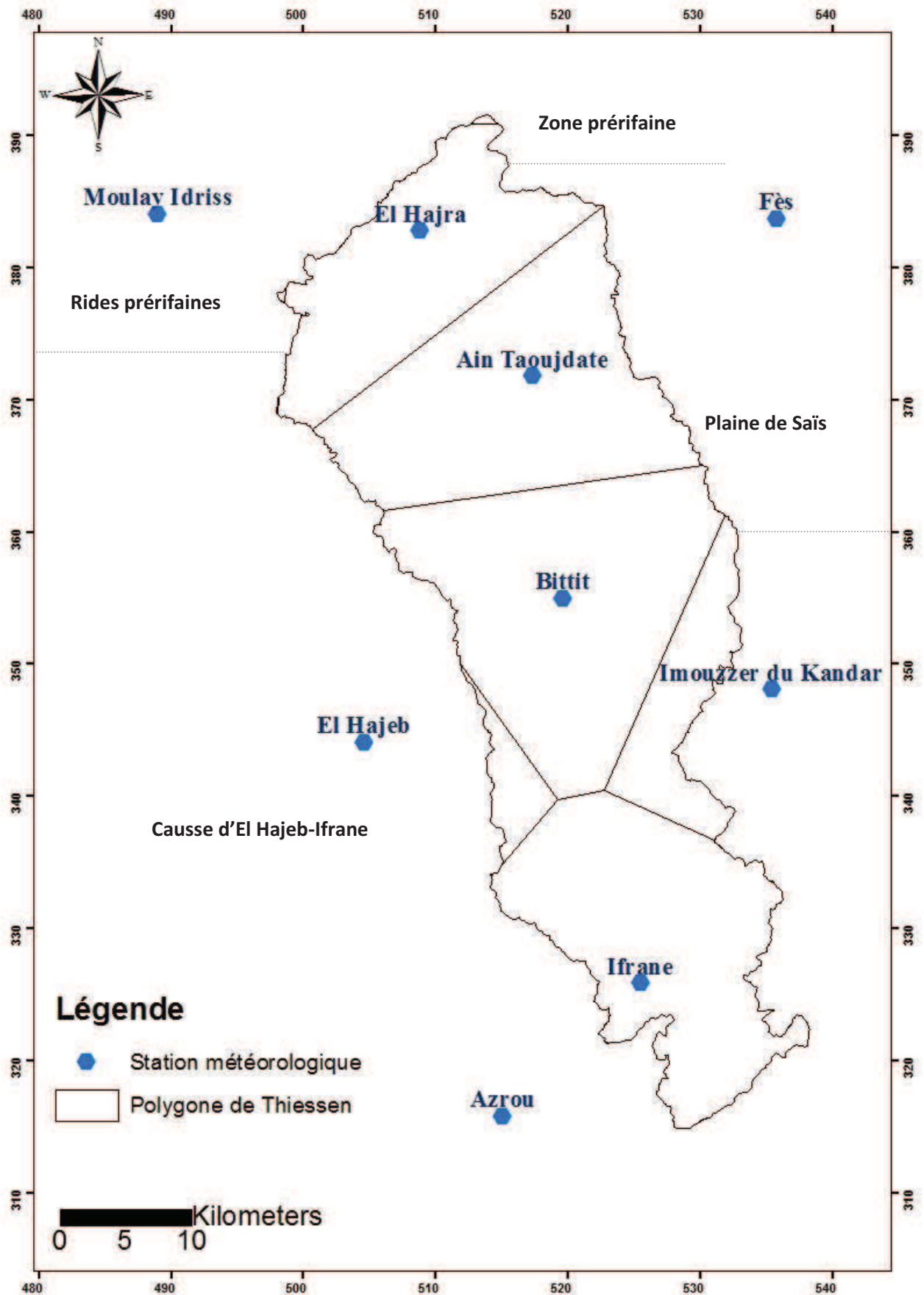


Figure 14 : Carte de polygones de Thiessen du bassin versant de Mikkès

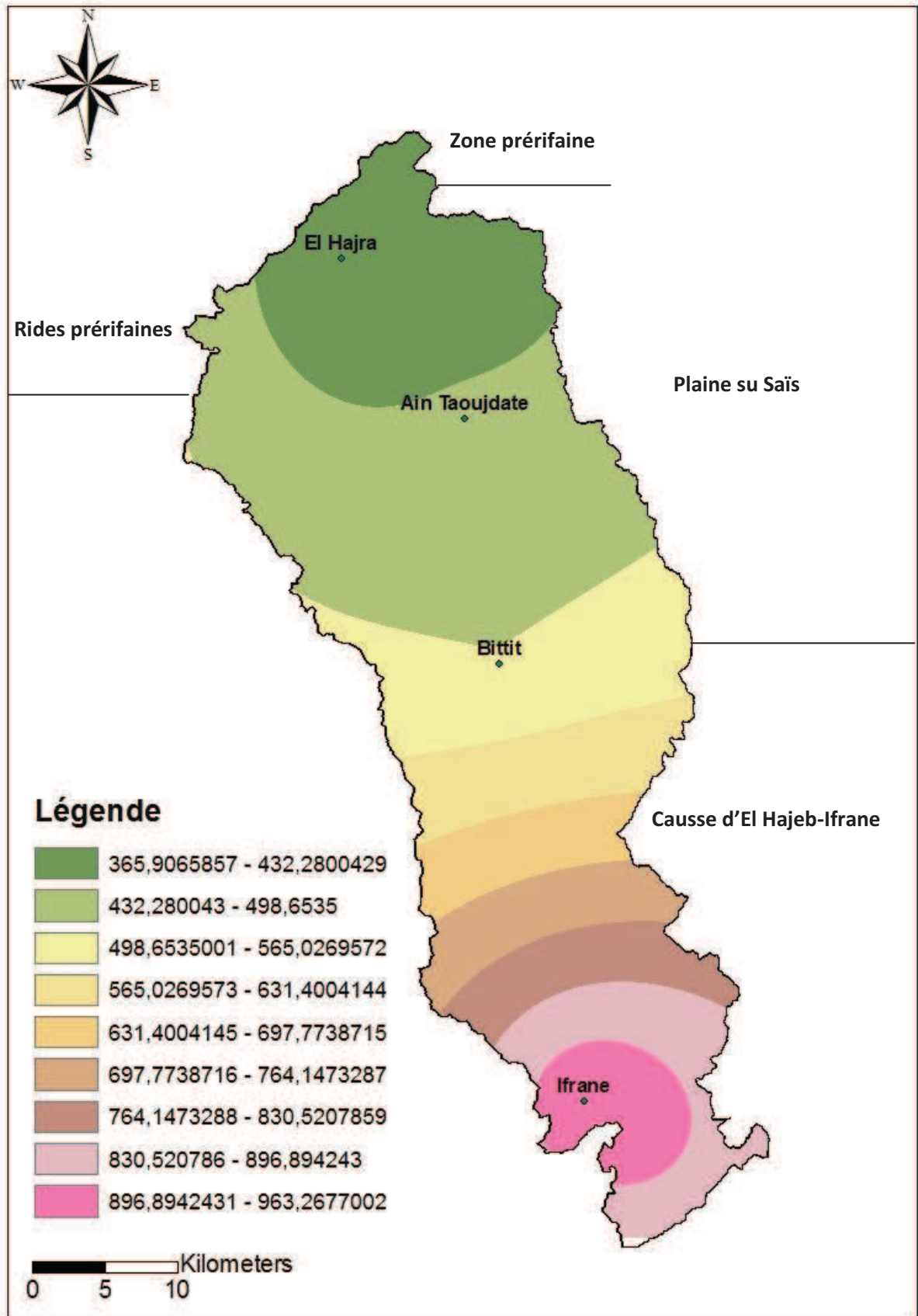


Figure 15 : Carte d'isohyète du bassin de Mikkès (1968-2009)

3. Etude des températures

La température est un élément fondamental du climat. Elle est liée à la radiation solaire. Sa variation influe sur la transformation des eaux en vapeur, que ce soit à la surface ou dans le sous sol. De ce fait, elle influe le degré de l'évapotranspiration et par conséquent elle agit sur le taux de salinité des eaux. La température contrôle l'intensité de certains facteurs du cycle de l'eau notamment, l'évaporation et la transpiration des végétaux et elle dépend de deux types causes :

- ❖ Intrinsèques: latitude, relief, sol
- ❖ Extrinsèques : masse d'aire, nébulosité, saison

3.1. Variations saisonnières de la température

La variation des températures moyennes mensuelles des quatre stations (Ifrane, El Hajra, My Idriss et Fès) durant la même période 1968-2009 est représentée sur la figure 16. L'évolution de la température est similaire d'une station à l'autre. Mais avec des températures plus faibles observées dans la station d'Ifrane et ceci pour tous les mois, suivies par la station de Fès, de My Idriss et d'El Hajra. On peut dire que les températures mensuelles suivent le même schéma et subissent l'effet de l'altitude.

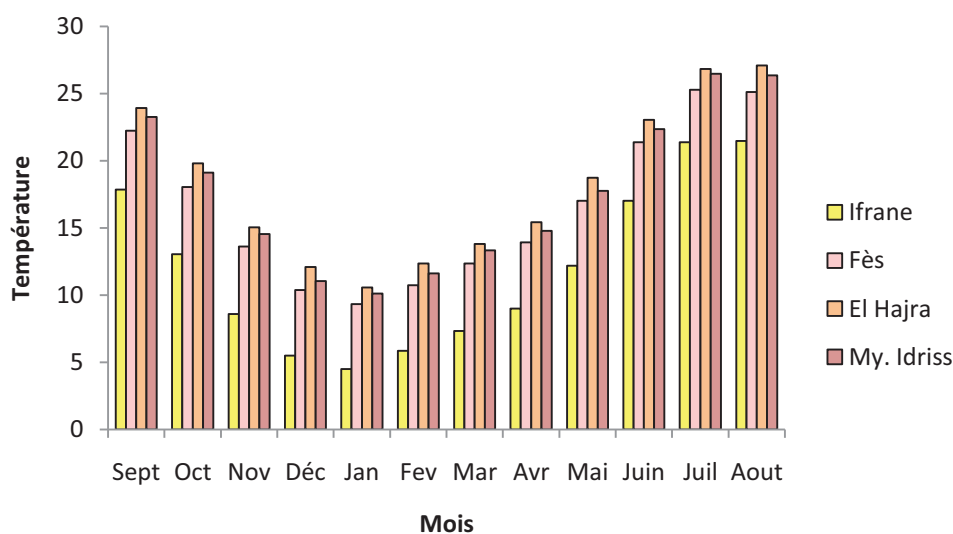


Figure 16 : Températures moyennes mensuelles (1968-2009)

A Ifrane, la température moyenne mensuelle se situe entre un maximum de 21,5°C en août et un minimum de 4,5°C en janvier. A Fès, la température moyenne mensuelle varie de 25,3°C en juillet à 9,3°C en janvier. A My Idriss, elle varie de 26,5°C en juillet à 10,1°C en janvier. A El Hajra, la température moyenne mensuelle fluctue entre un minimum de 10,6°C en janvier et un maximum de 27,1°C au mois d'août.

La saison chaude s'étend donc de mai à octobre, mois pendant lesquels les températures mensuelles sont supérieures à la moyenne annuelle, alors que la saison froide correspond à la période

novembre-avril. Le maximum de température est atteint en juillet et août avec une moyenne de 25°C, alors que le minimum d'environ 8,6°C se situe en janvier.

3.2. Variations interannuelles de la température

La variabilité interannuelle des températures apparait nettement avec un coefficient de variation variant entre les quatre stations de 4.2 à 10.8%. Les valeurs extrêmes sont comprises entre 9.3 et 14.8°C au niveau de la station d'Ifrane et dont la température moyenne annuelle est de 12°C. Elle varie entre 15.3 et 18.2°C pour la station de Fès dont la moyenne annuelle est de 16.6°C. Ces valeurs sont entre 16.1 et 19.7°C à la station de My Idriss dont la température moyenne annuelle est de 17.6°C. Alors que dans la station d'El Hajra les valeurs vont de 16.8 à 20°C et la valeur moyenne annuelle est d'environ 18.2°C.

Tableau 10 : Variation de températures moyennes annuelles sur la période de 1968-2009

Stations	Ifrane	Fès	My Idriss	El Hajra
Températures moyennes annuelles	12	16.6	17.6	18.2
Ecart type	1.3	0.7	0.8	0.9
Coefficient de variation %	10.8	4.2	4.5	4.9

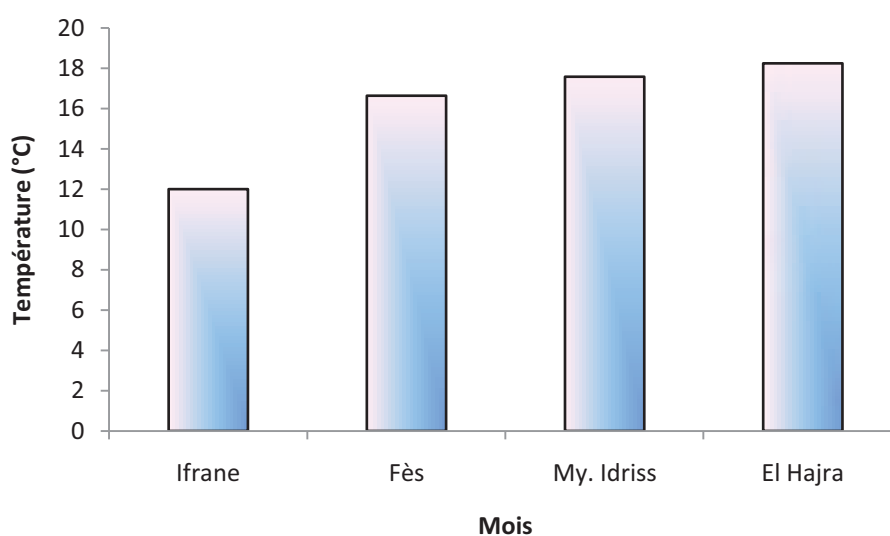


Figure 17 : Températures moyennes annuelles (1968-2009)

L'augmentation de la température pourrait être le résultat des changements climatiques observés au Maroc (Alibou, 2002). La température moyenne annuelle au niveau de la station d'El Hajra, durant la période 1968-2009, est de 18.2 et elle est de 12 à Ifrane. Il est bien évident que la différence entre la température enregistrée au niveau du Saïs et celle observée dans le Causse est grande ; elle est de 6.2°C et elle ne peut être expliquée que par l'influence de l'altitude sur la répartition spatial des sécheresses intra-annuelles.

4. Evapotranspiration et bilan hydrologique

La tendance du climat marocain et du Mikkès en particulier est à l'assèchement. Elle est certainement accompagnée d'une réduction du contenu en eau du sol et donc d'un déficit dans les ressources hydriques (Mokssit, 2009).

Etant donné que les résultats des études des évolutions et tendances des paramètres température et vue précipitation et vu les caractéristiques délicates du climat du Mikkès, il est important de voir l'évolution des climats des stations du Mikkès sous l'angle de l'orientation de l'aridité et de l'évapotranspiration.

4.1. Aridité

L'aridité est un phénomène climatique impliquant une pluviométrie faible. Dans les régions dites arides. Les précipitations sont inférieures à l'évapotranspiration potentielle. Il existe une multitude d'indices et de formules d'aridité dont certains sont basées sur des critères climatologiques, d'autres biogéographiques.

4.1.1. Indice d'aridité de Martonne

L'indice le plus utilisé pour évaluer l'aridité est celui De Martonne (1942). Il est fonction de la hauteur annuelle des précipitations P (mm) et de la température moyenne annuelle T (°C) :

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

Tableau 11 : Les étages climatiques selon les indices d'aridité

Indice d'aridité	Climat
IA < 5	Milieu hyper-aride
5 < IA < 10	Milieu aride
10 < IA < 20	Milieu semi-aride
20 < IA < 30	Milieu tempéré
IA > 30	Milieu humide

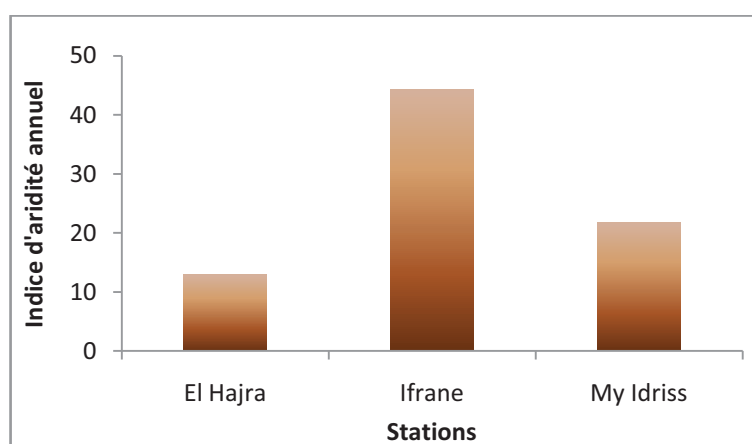


Figure 18 : Evolution annuelle de l'indice d'aridité sur le bassin de Mikkès (1968-2009)

Etude hydrologique du bassin versant de l'Oued Mikkès

Tableau 12 : Calcul d'indice d'aridité (1968-2009)

Années	El Hajra			Ifrane			Moulay Idriss		
	P (mm)	T °C	IA	P (mm)	T °C	IA	P (mm)	T °C	IA
1968	508	18,3	17,9	1456	11,3	68,2	721	17,6	26,2
1969	619	17,8	22,3	1760	11,1	83,2	878	17,0	32,5
1970	405	18,6	14,2	1120	11,2	52,9	564	17,8	20,3
1971	615	17,1	22,7	1379	9,9	69,2	764	16,3	29,0
1972	464	16,8	17,3	887	10,0	44,4	583	16,1	22,4
1973	505	18,0	18,0	832	10,7	40,1	585	17,3	21,5
1974	287	17,9	10,3	740	11,0	35,3	487	17,2	17,9
1975	418	17,7	15,1	1014	10,7	49,1	641	17,0	23,8
1976	523	17,5	19,0	1143	10,4	56,0	459	16,8	17,2
1977	381	18,0	13,6	932	11,0	44,4	434	17,3	15,9
1978	367	18,6	12,8	932	11,1	44,2	700	17,8	25,2
1979	469	18,4	16,5	1144	11,2	54,0	938	17,6	33,9
1980	312	18,6	10,9	934	11,4	43,7	540	17,9	19,4
1981	195	18,5	6,8	674	11,6	31,2	393	17,6	14,3
1982	405	18,0	14,5	1045	11,8	47,8	746	16,7	28,0
1983	306	18,5	10,7	653	12,1	29,6	353	17,6	12,8
1984	323	17,4	11,8	624	11,8	28,6	488	16,8	18,2
1985	281	18,3	9,9	851	11,7	39,2	519	18,0	18,5
1986	297	18,3	10,5	1002	12,1	45,4	706	17,3	25,8
1987	433	19,2	14,8	821	12,3	36,8	669	18,1	23,8
1988	310	17,5	11,3	772	12,3	34,6	520	17,8	18,7
1989	521	17,9	18,7	1274	12,0	57,8	730	18,3	25,8
1990	376	17,5	13,7	831	12,2	37,4	651	18,0	23,3
1991	296	17,0	10,9	980	11,3	46,0	565	17,1	20,8
1992	268	17,4	9,8	878	11,2	41,5	482	17,2	17,7
1993	331	17,0	12,3	711	11,7	32,8	564	16,7	21,1
1994	225	17,5	8,2	728	12,8	31,9	437	18,2	15,5
1995	309	18,9	10,7	856	12,4	38,2	529	18,8	18,4
1996	633	20,0	21,1	1865	11,7	85,9	1143	18,0	40,9
1997	555	19,2	19,0	1161	12,3	52,0	813	19,7	27,4
1998	242	20,0	8,1	652	12,6	28,9	442	19,0	15,2
1999	228	19,4	7,8	852	12,6	37,7	422	18,8	14,7
2000	320	20,0	10,7	819	13,2	35,3	422	18,9	14,6
2001	204	19,7	6,8	655	13,2	28,2	320	18,9	11,1
2002	328	19,6	11,1	1006	13,5	42,9	687	18,5	24,1
2003	499	19,9	16,6	1233	9,3	64,0	799	17,4	29,2
2004	202	17,6	7,3	808	14,4	33,1	613	16,9	22,8
2005	194	18,0	6,9	641	14,8	25,9	405	17,3	14,8
2006	259	17,8	9,3	854	14,6	34,8	659	17,0	24,4
2007	189	17,7	6,8	623	12,9	27,3	386	16,9	14,4
2008	324	17,0	12,0	1070	13,9	44,8	675	16,3	25,7
2009	404	17,7	14,6	1335	14,5	54,4	712	17,0	26,4
IA moyen annuel			12,9			44,2			21,7

L'indice d'aridité au niveau du bassin de Mikkès est calculé dans les trois stations :

- ✓ L'indice d'aridité au niveau d'El Hajra est d'environ de 12.9 ($10 < IA < 20$), d'après la classification de Martonne cette région correspond à un climat semi-aride.
- ✓ L'indice d'aridité au niveau de la station de My Idriss est de l'ordre de 21.7 ($20 < IA < 30$), cette région correspond à un climat tempéré.
- ✓ L'indice d'aridité au niveau de la station d'Ifrane est de 44.2, d'après la classification De Martonne, cette partie du bassin est classifiée du climat humide.

4.1.2. Indice de Gaussen

En combinant les valeurs mensuelles des précipitations exprimées en millimètres (P) et des températures (2T) exprimées en degrés centigrades (T), le botaniste H. Gaussen a défini le mois biologiquement sec par le rapport $P < 2T$ (Bagnouls et Gaussen, 1957). Il est primordial de connaître s'il y a une différence de sécheresse entre le secteur du Causse Moyen Atlasique et celui de la plaine de Saïs. Le diagramme ombrothermique dans le Causse pour la période de 1968-2009 est représenté sur la Figure 19. Celui de la plaine du Saïs est représenté sur la Figure 20.

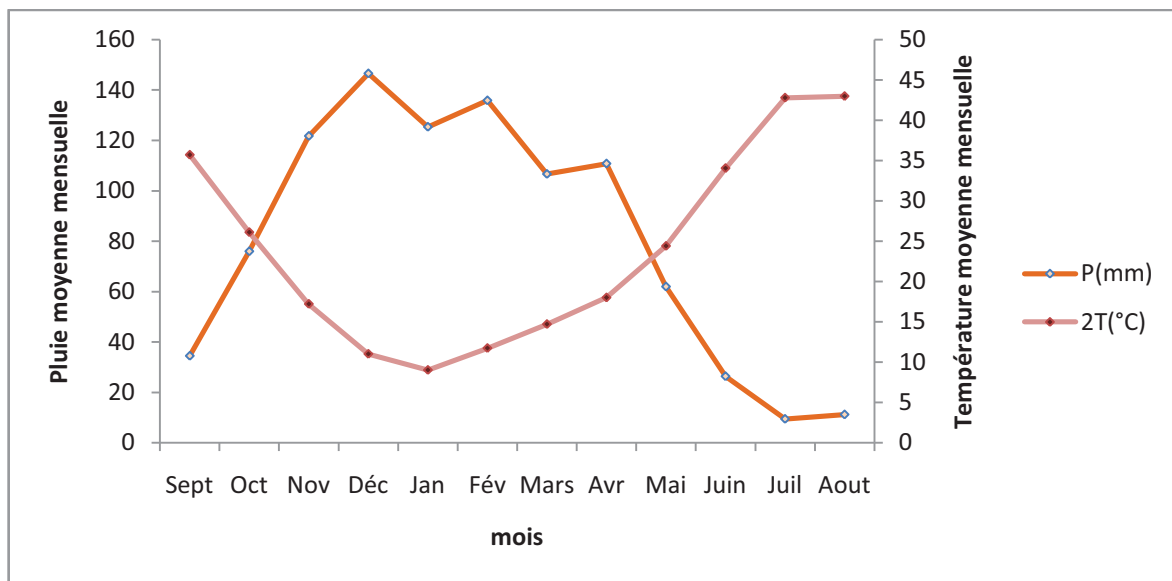


Figure 19 : Diagramme ombrothermique de la station d'Ifrane (1968-2009)

Pour le Causse, représenté par la station d'Ifrane, la période humide débute en octobre et finit en mai (nombre de mois humide est 8), alors que la saison sèche commence en juin et retermine en septembre (nombre de mois sec est 4).

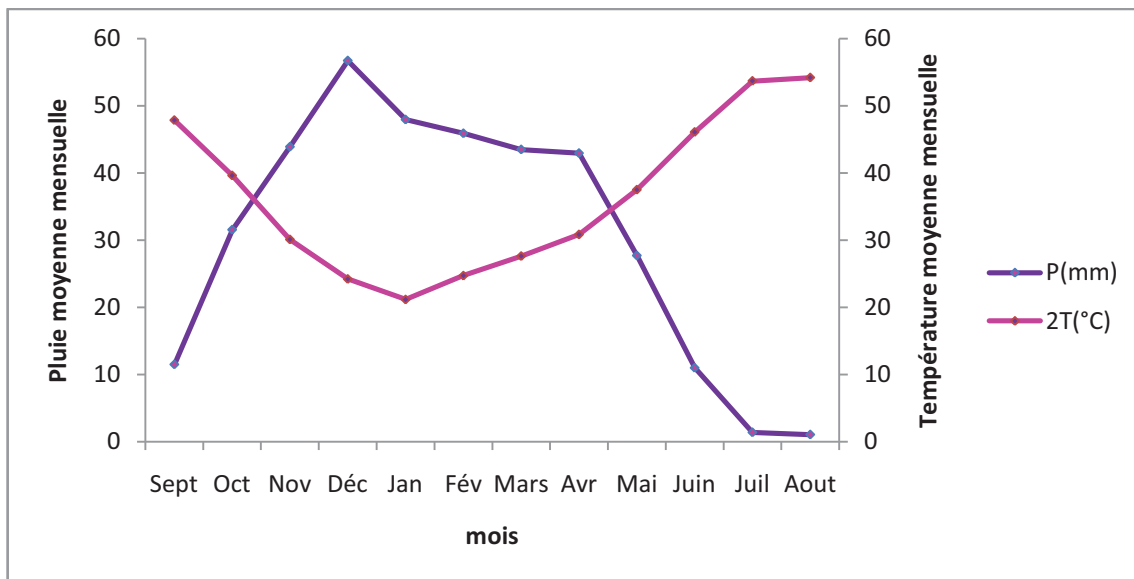


Figure 20 : Diagramme ombrothermique de la station d'El Hajra (1968-2009)

Pour la plaine de Saiss, représentée par la station d'El Hajra, la saison humide commence en novembre et finit en avril avec un nombre de mois humide de 6 mois, alors que la saison sèche débute en mai et finit en octobre (nombre de mois sec est de 6 mois).

En comparant les diagrammes ombrothermiques à la station d'Ifrane et celui d'El Hajra, on constate que le nombre de mois sec est de 4 mois dans le Causse et il est de 6 mois dans la plaine du Saiss. De ce fait, la sécheresse s'étale et varie dans le temps et l'espace dans le bassin de Mikkès.

4.2. Evapotranspiration

L'évapotranspiration est l'effet combiné de l'évaporation et de la transpiration. L'évaporation est le passage de l'eau sous forme liquide sur une surface ou celle-ci dans l'air, transformée en vapeur d'eau. La transpiration est le mouvement de l'eau passant dans les plantes vers l'atmosphère. Pour une culture, l'évapotranspiration est l'eau perdue dans l'air à la fois de la surface du sol et de celle de la culture. On distingue généralement l'évapotranspiration potentielle (ETP) et l'évapotranspiration réelle (ETR)

4.2.1. L'évapotranspiration potentielle (ETP)

L'ETP représente l'évaporation et la transpiration qui se produiraient si l'approvisionnement en eau était suffisant pour compenser les pertes hydriques et répondraient aux besoins de la végétation.

L'ETP, en un point donné, est étroitement liée à la température. Pour cette raison, plusieurs auteurs ont établi des formules empiriques pour l'évaluation de l'ETP.

La formule de Thornthwaite, déjà ancienne (1948), est donnée par la formule suivante :

$$ETP = 16. \left(10 \times \frac{Tm}{I}\right)^a$$

Etude hydrologique du bassin versant de l'Oued Mikkès

Où :

ETP : l'évapotranspiration mensuelle en mm

T_m : la température moyenne en °C pour le mois considéré

I : l'indice annuel égal à la somme des 12 indices mensuels (i)

$$\text{Avec } i = \left(\frac{T_m}{5} \right)^{1,514}$$

$$\text{Et } a = \frac{1.6}{100} I + 0.5$$

Le tableau suivant résume le calcul de l'ETP mensuel des quatre stations de Mikkès :

Tableau 13 : Calcul de l'ETP par la formule de Thornthwaite

Stations	Sept	Oct.	Nov.	Déc.	Jan	Fév.	Mar	Avar	Mai	Juin	Juil.	Aout	Total
Ifrane	89,2	51,4	24,7	12,9	10,4	15,8	27,2	40,2	68,6	106,4	143,5	134,6	724,9
Fès	101,4	62,1	31,5	18,7	16	21,8	36,6	50,1	81	120,7	160,4	147,6	847,9
El Hajra	123,2	76,1	38	24,1	19,8	28	44,5	61,2	99,6	145,7	191,8	182,5	1034,5
My Idriss	106	76,3	32,3	18,3	16,4	22,5	37,6	51,3	82,1	125,2	169,4	156,9	894,3

Les valeurs minimales de l'ETP sont enregistrées au mois de janvier et les valeurs maximales sont atteintes aux mois de juillet et août.

Les valeurs de l'ETP sont proportionnelles aux valeurs de températures et par conséquent sont très liées aux altitudes. En allant d'Ifrane (total de l'ETP est de 724.9 mm) vers El Hajra (total de l'ETP est 1034.5 mm), l'altitude devient plus faible et l'évapotranspiration devient importante.

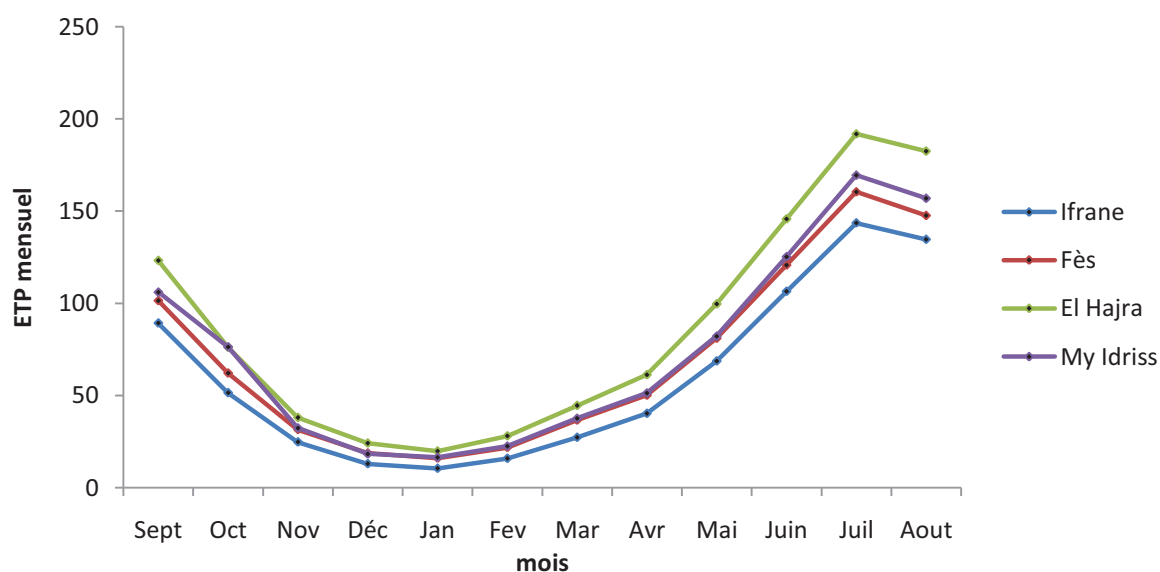


Figure 21 : Evolution de l'ETP mensuelle (1968-2009)

4.2.2. Evapotranspiration réelle (ETR)

L'ETR désigne la quantité d'eau effectivement évaporée au-dessus de la surface étudiée. Plusieurs formules basées sur la température et la précipitation sont utilisées pour le calcul de l'ETR. Pour le bassin de Mikkès, les formules choisies seront celles de Turc (1961) (à l'échelle annuelle) et Thornthwaite (à l'échelle mensuelle ; le bilan hydrique de Thornthwaite)

Formule de Turc

La formule de Turc pour le calcul de l'ETR est la suivante :

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

Avec :

ETR : évapotranspiration réelle annuelle (mm)

P : hauteur de précipitation annuelle (mm)

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

Où T est la température moyenne annuelle (°C)

Le tableau 14 présente les valeurs de l'ETR par la méthode de Turc :

Tableau 14 : Résultats des calculs de l'ETR par la méthode de Turc (1968-2009)

Stations	Ifrane	My. Idriss	El Hajra
T (°C)	12,0	17,6	18,2
P (mm)	965	599	365
L	686,4	1012,6	1056,4
ETR (mm)	569,0	535,8	361,5

Formule de Coutagne

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

$$ETR = D = P - mP^2$$

Avec : D : déficit d'écoulement (en mètre)

P : pluie annuelle (en mètre)

$$m : \text{coefficient régional } m = \frac{1}{0,8+0,14 \times T}$$

Tableau 15 : Résultats des calculs de l'ETR par la méthode de Coutagne (1968-2009)

Stations	Ifrane	My. Idriss	El Hajra
Température moyenne annuelle (°C)	12,0	17,6	18,2
Pluie moyenne annuelle (m)	0,965	0,599	0,365
m	0,40	0,30	0,30
ETR (mm)	592	491	325

4.3. Méthode du bilan de Thornthwaite

C'est une méthode du bilan hydrique du sol, dans laquelle on estime la réserve en eau facilement utilisable exprimée en millimètre de hauteur d'eau.

Les sols du Maroc en générale et du Mikkès en particulier exigent des valeurs de RFU moyennes ($40 < \text{RFU} < 60 \text{ mm}$) à élevées ($\text{RFU} > 80 \text{ mm}$) vu les périodes assez longues de sécheresse qui les affectent. Il faut que les sols puissent emmagasiner assez d'eau pour lutter contre la sécheresse de l'été.

On admet que la hauteur d'eau stockée dans le sol du Mikkès qui est reprise par l'évapotranspiration est de 50 mm au maximum.

Le calcul de l'ETR par cette méthode dépend de la RFU. Lorsque la quantité des précipitations et la RFU ne sont pas suffisantes pour alimenter la demande de l'ETP, l'ETR se limitera à la quantité disponible (pluie + RFU) c'est-à-dire :

$$\text{Si } (P + \text{RFU}) > \text{ETP} \longrightarrow \text{ETR} = \text{ETP}$$

$$\text{Si } (P + \text{RFU}) < \text{ETP} \longrightarrow \text{ETR} = P + \text{RFU}$$

Lorsque la réserve facilement utilisable atteint son maximum et que l'ETR est égale à l'ETP, le surplus des précipitations alimentera l'infiltration et / ou le ruissellement.

Le tableau suivant résume les résultats obtenus par cette méthode :

Tableau 16 : Résultats des calculs d'ETR par le bilan hydrique de Thornthwaite (1968-2009)

1968-2009	Ifrane	My Idriss	El Hajra
P (mm)	965	599	365
ETP (mm)	724.9	894.3	1034.5
ETR	374.6	365	329.8
DH (ETP – ETR)	323.3	529.3	703.9
SH (P – ETR)	616.8	235.9	35.1

L'ETR est relativement stable aussi bien à El Hajra (329.8 mm) qu'à Ifrane (374.6 mm). Par conséquent le déficit Hydrique (DH) est disproportionné entre les deux stations ; il est deux fois plus important à El Hajra qu'à Ifrane 703.9 contre 323.3 mm. Il correspond au manque d'eau nécessaire pour satisfaire l'évapotranspiration potentielle. C'est-à-dire les besoins en eau des plantes. La confrontation de l'ETR et des précipitations renseigne sur le surplus hydrologique (SH) alimentant l'écoulement sous toutes ses formes. Le SH est très faible à El Hajra ; il est de 35.1 mm. Alors qu'à Ifrane, il présente une quantité considérable de 616.8 mm. C'est-à-dire que l'Oued Mikkès est principalement alimenté par le Causse Moyen Atlasique qui est bien arrosé.

Le temps bref de la reconstitution de la réserve du sol à Ifrane s'explique par l'abondance des précipitations qui permettent une longue phase de saturation qui dure 8 mois contre seulement 6 mois à El Hajra, moins arrosée qu'à Ifrane.

La méthode du bilan hydrique de Thornthwaite est certainement la plus fiable que celles de Turc ou de Coutagne puisqu'on travaille à une échelle mensuelle, permettant de tenir compte de la répartition des pluies et des températures au cours de l'année.

5. Conclusion

Les précipitations moyennes annuelles sur le bassin de Mikkès ; durant la période de 1968-2009 ; sont de l'ordre 579.3 mm, l'analyse des précipitations mensuelles a montré que l'hiver est la saison la plus pluvieuse alors que l'été est la plus sèche. La précipitation moyenne mensuelle est de 52 mm. L'analyse des températures a montré que le mois de janvier est le plus froid (8.6 °C) alors que août est le plus chaud (25 °C), la température moyenne annuelle est de 16.1°C.

La combinaison entre la température et la précipitation, par le calcul du degré d'aridité, a montré que le bassin de Mikkès est sous un climat semi-aride à El Hajra, tempéré à My Idriss et humide à Ifrane.

Le calcul de l'évapotranspiration réelle par les méthodes de Turc, Coutagne et Thornthwaite a donné une valeur moyenne de 438.2 mm. Cette valeur reste toutefois inférieure à la précipitation moyenne annuelle qui est de 579.3 mm. Ainsi il en résulte un surplus qui va contribuer à l'alimentation des nappes souterraines et / ou à l'alimentation du ruissellement superficiel.

Dans le Causse les hauteurs pluviométriques relativement élevées et les évapotranspirations potentielles relativement faibles témoignent de l'importance et du rôle de l'altitude et de l'exposition du bassin vis-à-vis des courants aériens humides. Les différences d'altitudes et d'expositions sont en grande partie à l'origine de ce contraste pluviométrique dans le bassin de Mikkès, et induisant un second contraste dans les écoulements dans ses différents secteurs.

CHAPITRE 5. CARACTERISTIQUES HYDROLOGIQUES DU BASSIN VERSANT

1. Introduction

Une réserve d'eau de surface peut mettre quelques jours ou quelques mois pour se remplir et / ou se vider. Pour une réserve souterraine, ces durées s'expriment en années, avec au plus quelques « sous-fluctuations » saisonnières (Bahir & Mennani, 2002).

L'Oued Mikkès, prend son origine dans la région d'Ifrane. En plaine, l'oued reçoit l'apport des affluents mineurs, alimentés par des ressources localisées ou par des émergences diffuses des nappes du bassin. Le réseau hydrographique du bassin de l'oued Mikkès est canalisé essentiellement par quatre affluents : Oued N'ja et Oued Atchane (affluents rive droite), Oued Tizguit et Oued Akkous (affluents rive gauche). Les premiers drainent la plaine du Sais et les seconds le plateau de Meknès et le Causse. La direction de l'écoulement est généralement SSE-NNW, à l'exception de l'Oued N'ja qui s'écoule de l'Est en Ouest.

2. Analyse des débits

Afin de connaître le régime des oueds drainant le secteur étudié, la station hydrométrique d'El Hajra a servi pour le suivi des débits avant la construction du barrage de Sidi Echahed. Cette station est en opération depuis 1968 et son altitude est de 215 m.

2.1. Débits mensuels

L'étude des débits mensuels de l'Oued Mikkès est très utile pour connaître le régime de la rivière. La figure suivante représente les débits moyens mensuels calculés pour une période de 39 ans (débits manquants concernant les années : 1996, 1997, 1999, 2000, 2001, 2002) et montre qu'il y a un seul mode de précipitation d'origine pluvial.

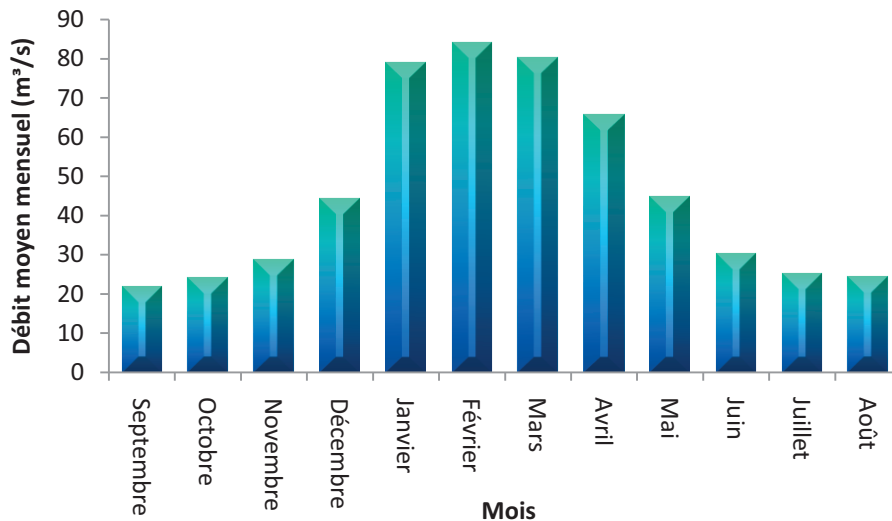


Figure 22 : Débits moyens mensuels de l'Oued Mikkès (1959-2006)

Les débits mensuels de l'Oued Mikkès sont généralement variables. Ils commencent à augmenter à partir du mois de décembre pour atteindre le maximum au mois de février (hiver) avec une valeur moyenne de 83.1 m³/s. Pendant les mois de l'hiver, les cours d'eau recueillent les précipitations importantes et engendrent une augmentation du débit. Cependant, au cours des mois d'été, une diminution du débit (période d'étiage) qui se poursuit pour atteindre son minimum au mois de septembre avec une moyenne de 23.1 m³/s. Les débits mensuels durant les périodes sèches de

l'année (juillet, août et septembre) sont des écoulements d'étiage ; ils caractérisent la pérennité hydraulique du bassin de Mikkès.

2.1.1. Coefficient mensuel du débit

Les coefficients mensuels des débits mettent en évidence la variabilité des écoulements, qui se manifestent par des périodes de hautes et basses eaux. Le coefficient mensuel des débits est le rapport des débits moyens mensuels sur le débit moyen interannuel.

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

C : Coefficient mensuel des débits

Q_m : Débit moyen mensuel

Q_{mi} : Débit moyen interannuel

D'après les coefficients mensuels des débits, la période des hautes eaux ($C > 1$) pour Oued Mikkès, correspond à une période qui s'étale de janvier jusqu'au avril. Elle en résulte des crues violentes qui caractérisent le mois de février. La période des basses eaux ($C < 1$) correspond à la période la plus longue qui s'étale du mois de mai jusqu'au décembre. Elle en résulte des étiages.

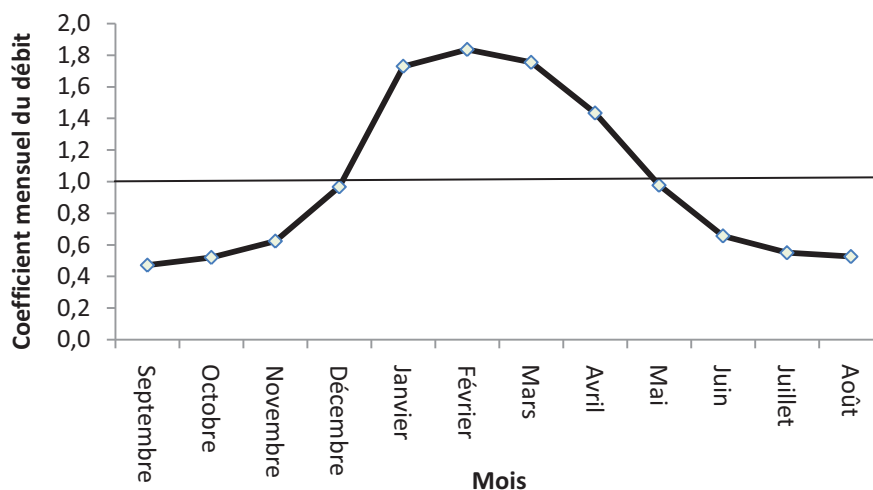


Figure 23 : Variations du coefficient mensuel des débits au niveau de l'Oued Mikkès

2.2. Débits annuels

Le débit moyen annuel peut être calculé à partir de la moyenne arithmétique des débits moyens mensuels. Selon Réménieras (1976), cette moyenne doit être pondérée en tenant compte du nombre de jours de chaque mois.

Le régime de l'Oued Mikkès correspond généralement à un écoulement faible. Ses débits présentent une variation temporelle, qui globalement, tend vers la baisse. Pour établir la tendance d'évolution du débit de Mikkès sur la période 1959-2006, on a simplement réalisé dans un premier temps une régression linéaire sur les débits annuels.

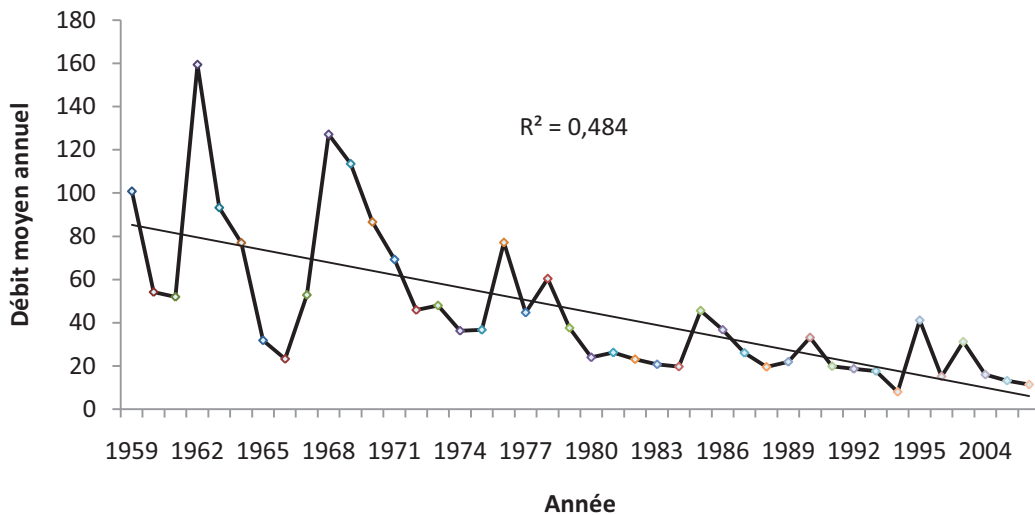


Figure 24 : Tendance à la baisse des débits moyens annuels à la station d'El Hajra pour la période 1959-2006

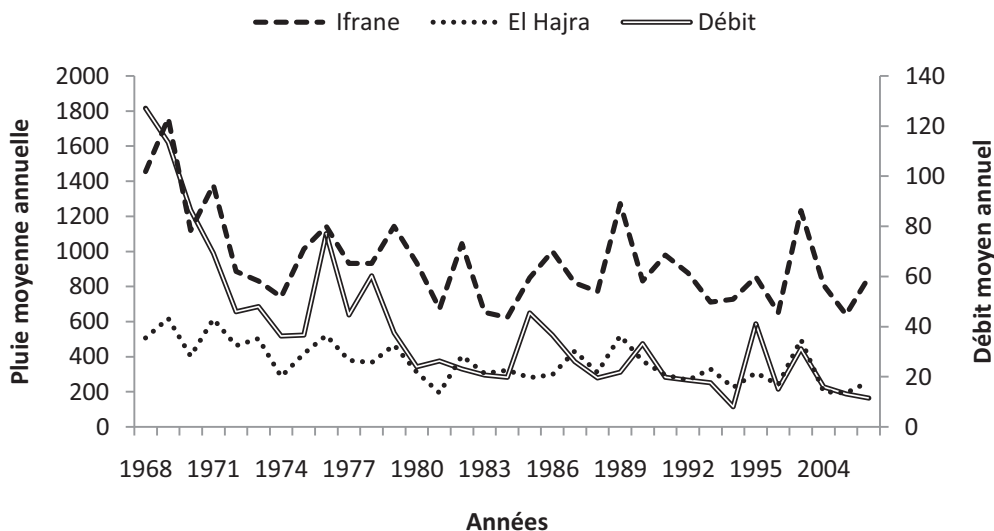


Figure 25 : Relation pluie-débit sur les deux stations Ifrane et El Hajra (1968-2006)

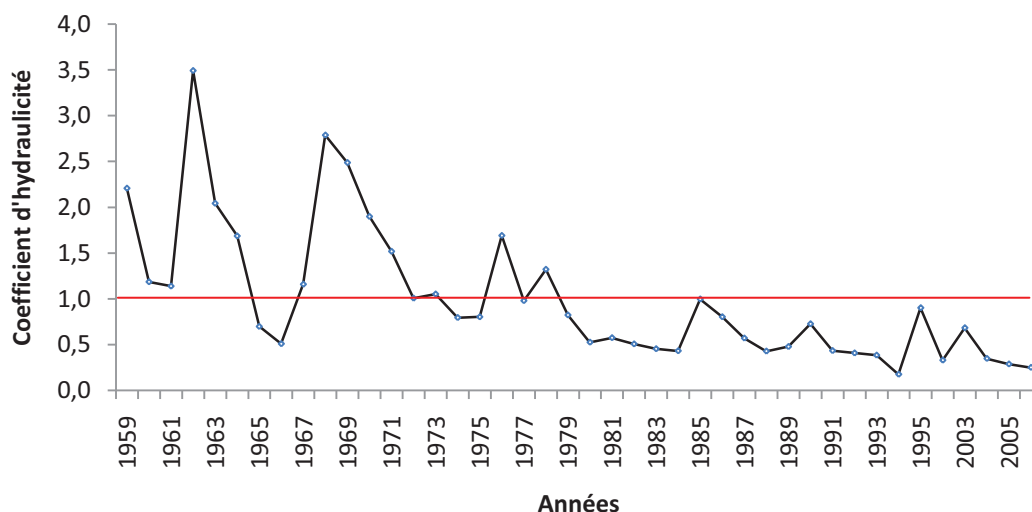
La figure 25 montre l'influence de la pluviométrie moyenne annuelle sur les débits moyens annuels du cours d'eau. La plupart des études sur la variabilité du climat décrivent la variabilité des pluies ou des écoulements, avec un lien entre les deux.

Généralement l'évolution des débits épouse celle des pluies enregistrées au bassin (stations d'Ifrane et d'El Hajra) avant les années 80. Alors qu'après les années 80, elle se démarque. Les années 1989, 1995, 1999 sont des années pluvieuses dans le bassin de Mikkès dont elles sont suivies par un pic du débit de l'oued (influence de la pluviométrie sur l'écoulement).

Les pluies (El Hajra) et les débits ne sont pas bien liés et l'écoulement proviendrait donc de la pluie et d'autres ressources (des nappes). Ainsi la faiblesse du coefficient de corrélation ($R = 0.56$) peut s'expliquer par le fait que la lithologie perméable du bassin (surtout au Causse d'El Hajeb-Ifrane) provoque l'infiltration d'une partie des eaux de précipitation ce qui est responsable de la réduction du débit annuel d'écoulements.

2.2.1. Coefficient d'hydraulicité

Pour un cours d'eau, le coefficient d'hydraulicité c'est le débit d'une année donnée sur le débit moyen interannuel (calculée sur plusieurs années). Pour un coefficient ($C.H > 1$) c'est une année humide à écoulement important, dans le cas contraire c'est une année à faible hydraulicité, c'est à dire de faibles débits du cours d'eau ou du bassin versant.



Avant les années 80, les valeurs d'hydraulicité sont supérieures à 1 à l'exception de quelques années, alors qu'après 1980 l'hydraulicité devient inférieure à 1. Généralement, les années de 1980 à 2006 présentent un faible écoulement d'après leurs valeurs, ce qui confirme que ces années étaient sèches.

3. Etude de situations hydrologiques particulières : les crues et les étiages

Les crues et les étiages constituent des situations qui ne peuvent être cernées que dans leur succession chronologique, allant de quelques heures à plusieurs jours.

Dans la présente étude des crues, on s'intéresse à leurs caractères généraux tels que leur puissance, leur fréquence et classification.

L'étude des étiages, phénomènes moins brutaux dans leur apparition, permet de mettre en valeur la forte décroissance des débits en phase de tarissement et surtout de préciser les restitutions des nappes aquifères à l'écoulement fluvial. Ils seront envisagés du point de vue de leur genèse et de leur évolution dans le temps.

3.1. Les crues

Selon F. Frécaut (1971), il convient de distinguer crues et hautes eaux ; les hautes eaux moyennes représentent une situation saisonnière durable. Les crues au contraire, constituent avec les étiages une situation extrême dans le comportement des cours d'eau. 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 (03 à 05 fois le module).

3.1.1. Analyse fréquentielle des crues maximales annuelles

Les caractères hydroclimatologiques tels que les précipitations, les crues et les étiages d'une région montrent des variations à priori purement aléatoires bien qu'en fait elles soient centrées sur des moyennes dépendantes des conditions physiographiques, climatologiques et géographiques. Il est donc indispensable d'introduire en hydrologie, la statistique comme méthode procédant par analyse

et synthèse, permettant de lier les paramètres statistiques des distributions aux caractéristiques naturelles étudiées, en leur donnant une signification physique. L'estimation des événements extrêmes représente l'une des problématiques les plus importantes des sciences hydrologiques. Notons toutefois que l'événement extrême qui a fait l'objet du plus d'intérêt et qui a suscité de nombreuses études dans plusieurs perspectives, est le débit de crue. Ce phénomène naturel, est particulièrement crucial en raison des catastrophes qu'il peut occasionner comme les inondations. Pour l'estimation de débits de crues ou d'étiage, on se doit de connaître la probabilité qu'un débit dépasse ou égale une valeur préalablement définie ou encore le débit associé à une probabilité au dépassement donnée. Pour résoudre ce problème on a recours aux méthodes d'ajustement à des distributions statistiques et des méthodes d'estimation des paramètres.

3.1.1.1. Vérification des hypothèses

Les débits maximums annuels de l'Oued Mikkès doivent respecter certaines hypothèses de base afin que l'analyse de fréquence soit théoriquement acceptable ; bien que parfois, les données ne représentent pas des lacunes de mesures, Il est important de contrôler leur fiabilité, du fait que les mesures de débits disponibles peuvent être affectées par certaines erreurs de différentes origines.

Ces hypothèses sont :

- ✓ L'homogénéité de l'échantillon, c'est à dire que toutes les observations proviennent de la même population statistique et que les caractères du phénomène étudié ne varient pas dans le temps en raison d'une intervention humaine ou des conditions particulières telles que les variations climatiques importants.
- ✓ L'indépendance des observations de l'échantillon (ordonné de manière chronologique), 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 autocorrélées, 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 données est dite stationnaire, si en dépit des fluctuations aléatoires dans les valeurs classées chronologiquement, on ne retrouve pas de variations significatives dans le temps. Dans les séries hydrologiques, ces variations temporelles peuvent être associées à la construction d'un ouvrage hydraulique ou au déplacement de la station hydrométrique, ce qui peut entraîner une discontinuité marquée dans la série (saut de la moyenne, ...etc.) la non stationnarité d'une série peut-être aussi associé à un changement dans l'utilisation du sol d'un bassin versant (déforestation, urbanisation, ...etc.), ce qui se traduit par une augmentation ou une diminution graduelle des valeurs de débits minimums annuels d'une série.

a. Test d'homogénéité de Mann Whitney

Ce test permet de vérifier l'hypothèse d'homogénéité en comparant deux échantillons. La méthode consiste à diviser la série d'observation en deux groupes afin de les comparer sur la base des classements relatifs des valeurs prises par la variable les 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 de populations différentes.

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

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

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

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.

Quand aux données d'Oued Mikkès où la taille de l'échantillon est supérieure à 20, les valeurs sont lues sur la table de la loi normale centrée réduite.

b. Test d'indépendance de Wald Wolfowitz à 5%

C'est un test d'auto_corrélation vérifiant l'indépendance de deux échantillons subdivisés à partir de l'échantillon global. Ce test, est connu également comme test de l'aléa, utilisée pour tester l'hypothèse selon laquelle une série de nombres est aléatoire. La procédure consiste à ranger les valeurs de chaque groupe par ordre croissant tout en attribuant un code propre pour les valeurs de chaque ordre. On considère que si l'hypothèse H0 d'indépendance est vérifiée, l'ordre d'apparition des valeurs issues de deux groupes sera dû au hasard. La statistique de test est asymptotiquement distribuée normalement, donc le programme (HYFRAN) peut calculer la plus grande valeur statistique du test (U) et l'acceptation de (H0) 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% : $U_{2.5\%} = 1.96$

La valeur critique au niveau 1% : $U_{0.5\%} = 2.58$

Si $p \leq \alpha$, on rejette H0

Si $p > \alpha$, on garde H0

Tableau 17 : Résultat du test de Wald Wolfowitz sur les données issues des débits d'Oued Mikkès

	U calculé	$U_{2,5\%}$	P	α
Oued Mikkès	3.34	1.96	0.000854	5%

On doit rejeter l'hypothèse H0 puisque U n'est pas comprise entre les valeurs critiques.

c. Test de stationnarité (Kendall)

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 Kendall. Ainsi, deux hypothèses H0 et H1 sont formulés :

H0 : Les observations de l'échantillon sont constantes (stationnarité)

H1 : Les observations de l'échantillon ne sont pas constantes.

Tableau 18 : Résultat du test de Kendall sur les données issues des débits d'Oued Mikkès

	K calculé	$U_{2,5\%}$	P	α
Oued Mikkès	5.00	1.96	5.8	5%

Le K calculé n'est pas compris entre les valeurs critiques et $p > \alpha$ nous devons donc rejeter l'hypothèse H_0 .

3.1.1.2. Les statistiques de base

a. Résultats des statistiques de base

Tableau 19 : Statistiques descriptives de débits de Mikkès

Statistique	
Nombre de données	19
Débit minimal	11.4
Débit maximal	159
Débit moyen	62.8
Ecart type	43.5
Débit médian	52.9
Coefficient de variation	0.692
Coefficient d'asymétrie	0.672
Coefficient d'aplatissement	2.17

Les coefficients d'asymétrie et d'aplatissement indiquent que la distribution est légèrement asymétrique et plus aplatie qu'une distribution normale.

b. Histogramme de fréquence

L'histogramme de fréquence est plus élevé à gauche pour les observations de Mikkès, cette allure confirme l'asymétrie gauche de la distribution, déjà mise en évidence par le coefficient d'asymétrie. La classe des faibles débits [25 – 50] est la plus fréquente sur la série d'observation, celle des forts débits [125 -150] est moins importante au niveau de la série.

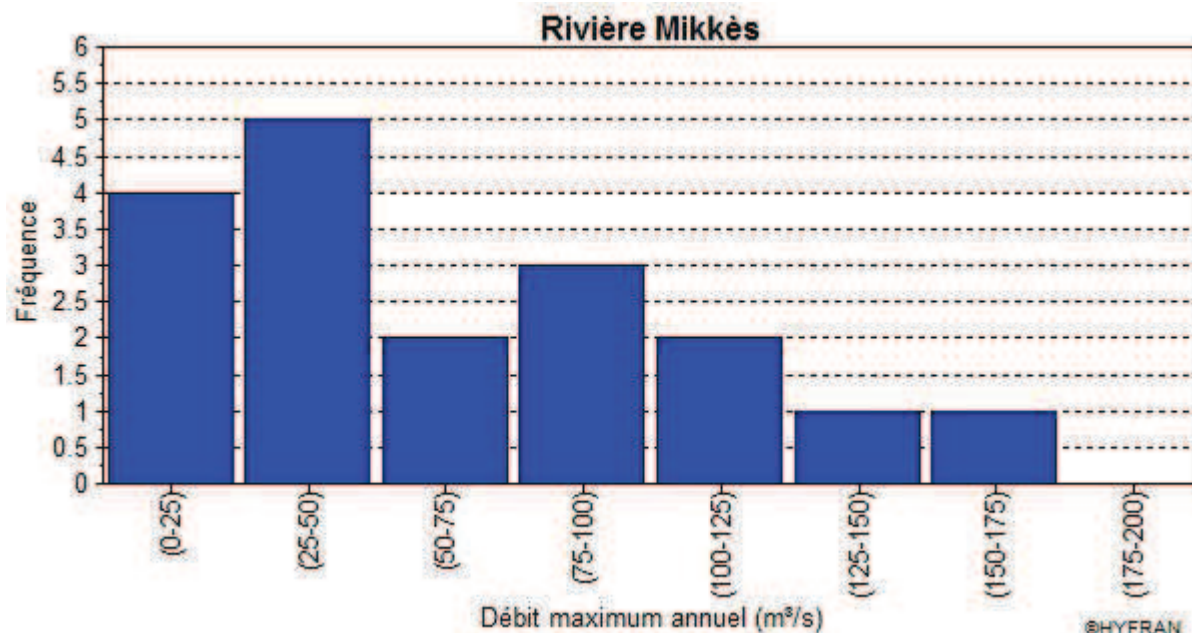


Figure 26 : Histogramme de fréquence des débits maximum annuels pour Mikkès

b. courbes chronologiques des sommes cumulatives

Cette méthode permet de :

- ✓ détecter les changements survenant dans le niveau moyen de la série
- ✓ déterminer la date d'apparition de ces changements
- ✓ déterminer la valeur moyenne d'intervalles homogènes

Les courbes chronologiques des sommes cumulatives pour les observations d'Oued Mikkès; obtenues par le logiciel HYFRAN; sont représentées dans la figure 27. Généralement la valeur de référence représente la moyenne de la série.

On distingue ainsi des périodes où la série est au-dessus ou au-dessous de la moyenne : si des valeurs successives de la série sont égales à la moyenne, la courbe des sommes cumulées sera horizontale, si elles sont supérieures la pente sera positive (et inversement), (Ibanez et al. 1993).

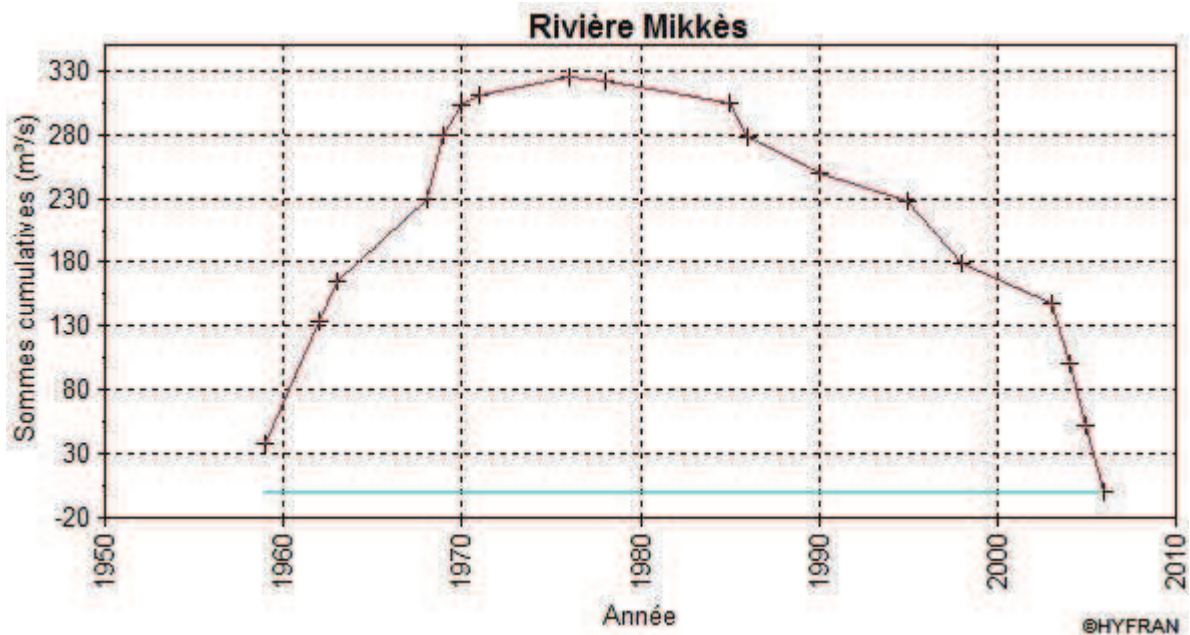


Figure 27 : Courbes chronologiques des sommes cumulatives pour Mikkès

Les résultats obtenus dans la série montrent une seule tendance positive ou les valeurs des débits sont supérieures à la moyenne.

c. Résultats et interprétation des ajustements aux lois statistiques

La série des débits maximums annuels a été utilisée pour l'analyse fréquentielle. Des lois statistiques, caractéristiques pour l'étude des événements extrêmes, ont été utilisées pour leurs ajustements. Il n'existe pas de règles théoriques 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 adaptées à la loi Gamma, Gumbel, Jenkinson (GEV). Cependant, il existe des tests d'ajustements pour juger la qualité de l'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 3 paramètres (ou plus) décrira correctement l'échantillon des observations (bon ajustement) mais en extrapolation les incertitudes seront grandes ;
- ✓ une loi à 2 paramètres décrira parfois moins bien les fréquences observées par contre en extrapolation les incertitudes seront moins grandes que pour une loi à $k > 2$ paramètres.

Ainsi le choix peut être guidé par l'usage que l'on veut faire des lois théoriques (descriptif ou extrapolation).

Etude hydrologique du bassin versant de l'Oued Mikkès

Par considération de ce qui est évoqué, seules les lois qui étaient réellement représentatives de l'échantillon, ont été retenues pour chaque station donnée, aux intervalles de confiance à 95%.

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

La distribution statistique de Gumbel est une loi double exponentielle, elle dépend de 2 paramètres : α (paramètre de position) et β (paramètre de dispersion).

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 : $f_u(U) = e^{-U}e^{-e^{-U}}$ (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 : $F_u(U) = e^{-e^{-U}}$ (3)

Et pour une variable x : $F_x(X) = e^{-e^{-\frac{1}{\beta}(x-\alpha)}}$ (4)

On a obtenu les résultats suivants :

Tableau 20 : Résultat de l'ajustement à la loi de Gumbel (Maximum de vraisemblance) pour Mikkès

Oued	Paramètres		Résultat statistique (X^2)	Probabilité critique (P)	Résultats		
	α	β			Degré de liberté	Nombre de classe	Nombre d'observation
Mikkès	34.4619	42.3411	1.33	0.7212	3	6	18

Hypothèse :

- H0 : L'échantillon provient d'une loi de Gumbel
- H1 : L'échantillon ne provient pas d'une loi de Gumbel
 - Nous pouvons accepter H0 au niveau de signification de 5%.

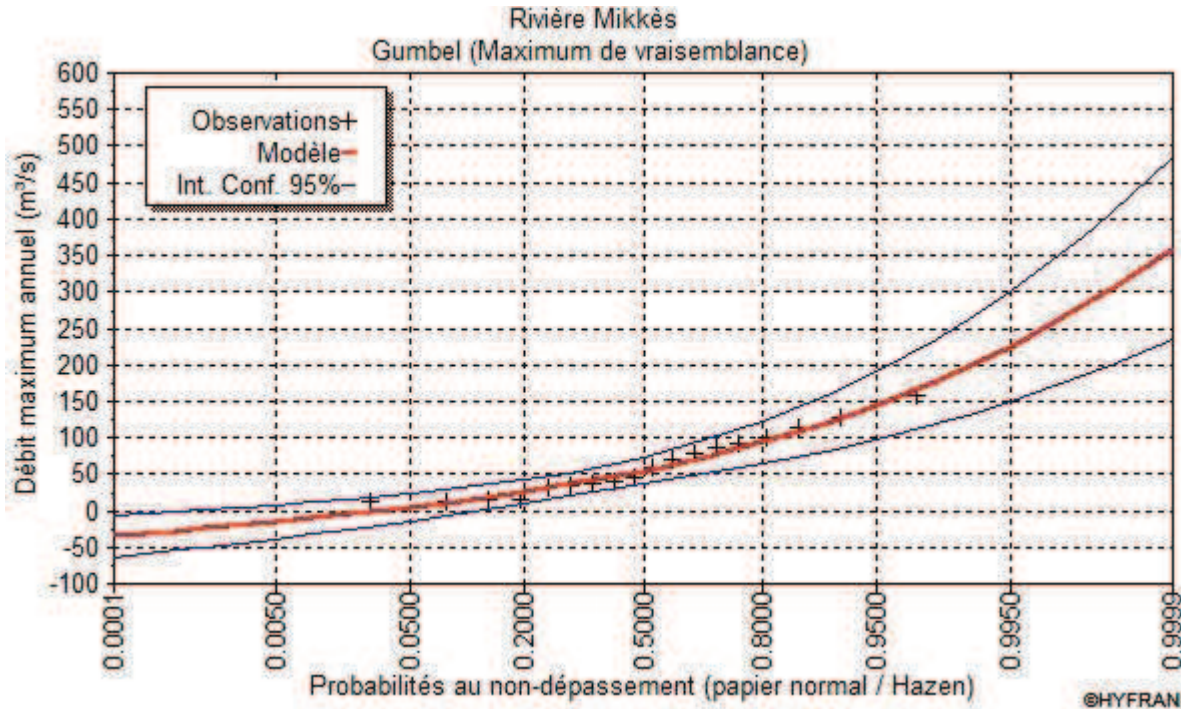


Figure 28 : Ajustement graphique de la série des débits maximums annuels à la loi de Gumbel pour Mikkès

C.2. Ajustement à la loi de Jenkinson GEV (Méthode des moments pondérés)

Connue aussi sous le nom de GEV (generalized extrem value distribution). C'est une loi à trois paramètres k , α et u .

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

α : l'échelle 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 3 types de lois :

- $k > 0$: 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 vers une loi de Gumbel de paramètre 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 $K = 0$: $F(x) = e^{-\left(-e^{-\frac{x-u}{\alpha}} \right)}$

Le quantile associé à la période de retour T est : $X_T = u - \frac{\alpha}{k} \left[1 - \left(-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right)^{-K} \right]$

Tableau 21 : Résultats et les paramètres de la loi de l'ajustement à la GEV pour Mikkès

Oued	Paramètres			Résultats			
	k	α	U	Résultat de la statistique (X^2)	Probabilité critique(P)	Nombre de classes	Degré de liberté
Mikkès	-0.0195876	35.4994	41.5994	1.33	0.5134	2	6

Hypothèse :

- H0 : L'échantillon provient d'une loi de GEV
- H1 : L'échantillon ne provient pas d'une loi de GEV
- Nous pouvons accepter H0 au niveau de signification de 5%.

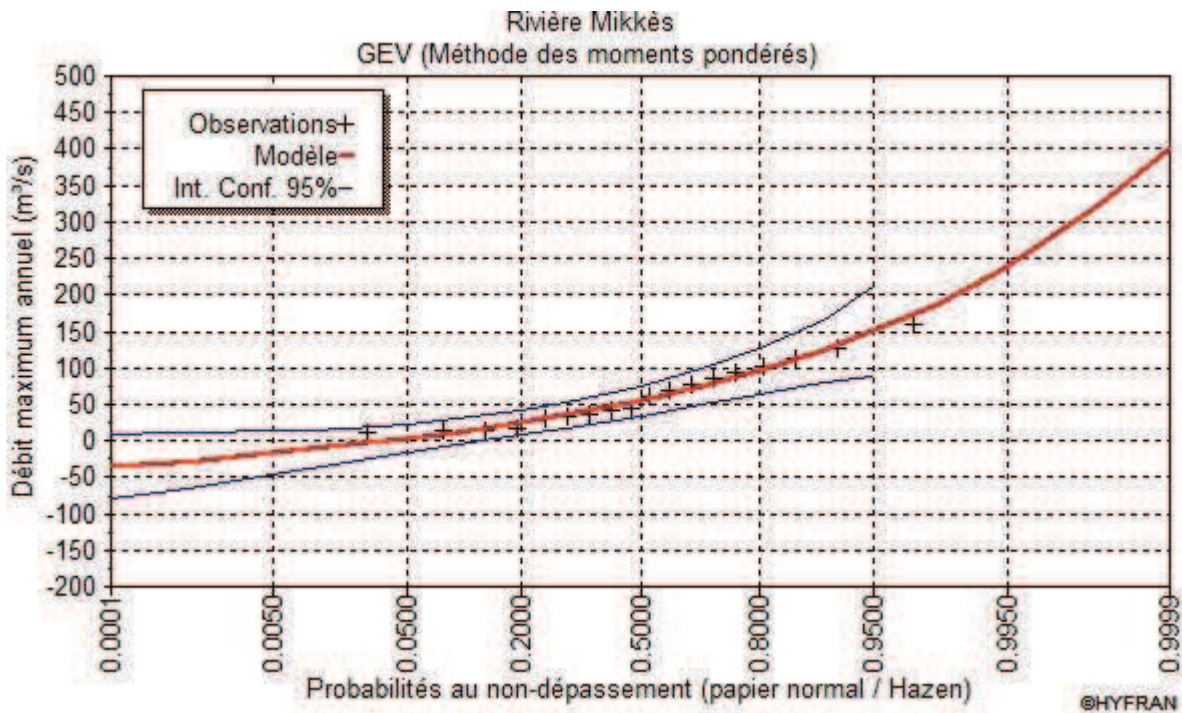


Figure 29 : Ajustement graphique de la série des débits maximums annuels à la loi de GEV pour Mikkès

C.3. Ajustement à la loi Gamma (ou Pearson)

Il s'agit d'une loi à deux ou trois paramètres. Cette distribution convient pour modéliser des variables qui sont bornées inférieurement et n'ont pas de limite supérieure. En hydrologie seule la forme à dissymétrie positive est utilisée. La fonction de densité de probabilité est exprimée par la formule suivante :

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

Avec :

$x > 0$

α : Paramètre de forme

λ : Paramètre d'intensité

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

Tableau 22 : Résultats et paramètres de l'ajustement à la loi de Gamma pour Mikkès

Paramètres			Résultats			
Oued	α	λ	Résultat de la statistique (χ^2)	Probabilité critique(P)	Nombre de classes	Degré de liberté
Mikkès	0.0332406	2.0872	1.33	0.7212	3	6

Hypothèse :

- H0 : L'échantillon provient d'une loi de Gamma
- H1 : L'échantillon ne provient pas d'une loi de Gamma
- Nous pouvons accepter H0 au niveau de signification de 5%.

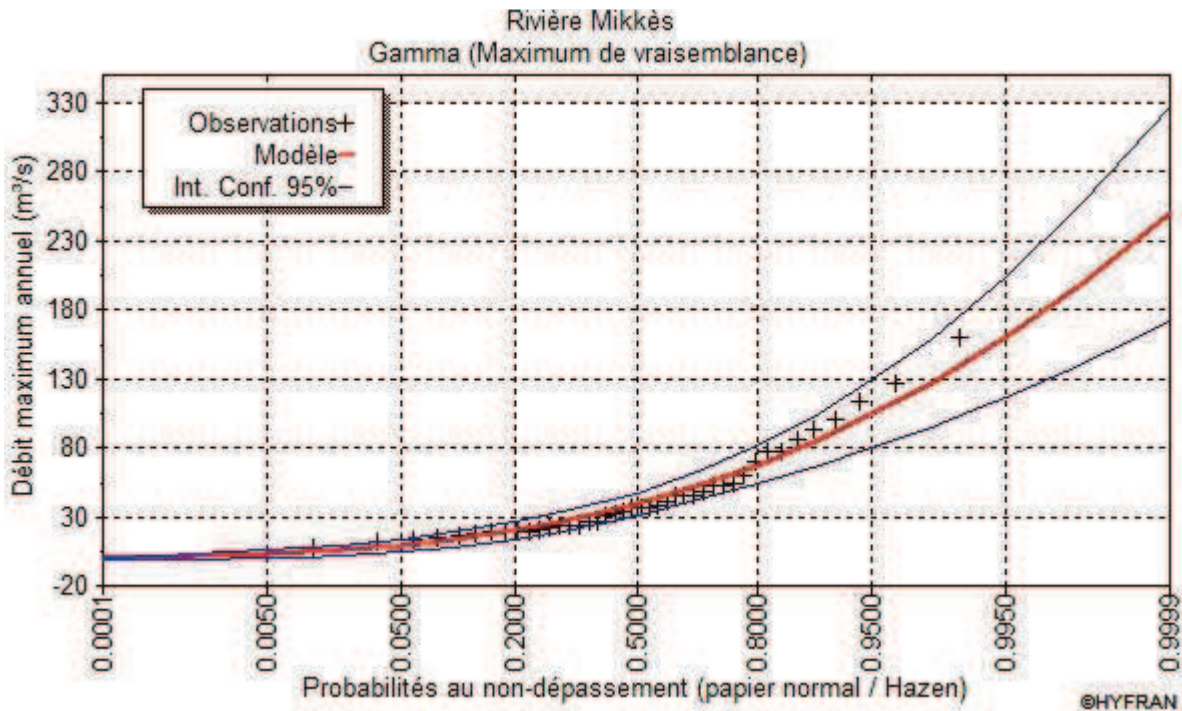


Figure 30 : Ajustement graphique de la série des débits maximums annuels à la loi de Gamma pour Mikkès

C.4. Ajustement à la loi de Log-Pearson III (méthode des moments)

C'est une loi à trois paramètres, sa fonction de densité de probabilité s'écrit :

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

Avec :

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

La fonction de répartition est :

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

Tableau 23 : Résultats et paramètres de l'ajustement à la loi de Log-Pearson type III pour Mikkès

Oued	Paramètres			Résultats			
	α	λ	m	Résultat de la statistique (X^2)	Probabilité critique(P)	Nombre de classes	Degré de liberté
Mikkès	-3.69357	2.33974	2.29024	0.67	0.7165	2	6

Hypothèse :

- H0 : L'échantillon provient d'une loi de Log-Pearson type III
- H1 : L'échantillon ne provient pas d'une loi de Log-Pearson type III
 - Nous pouvons accepter H0 au niveau de signification de 5%.

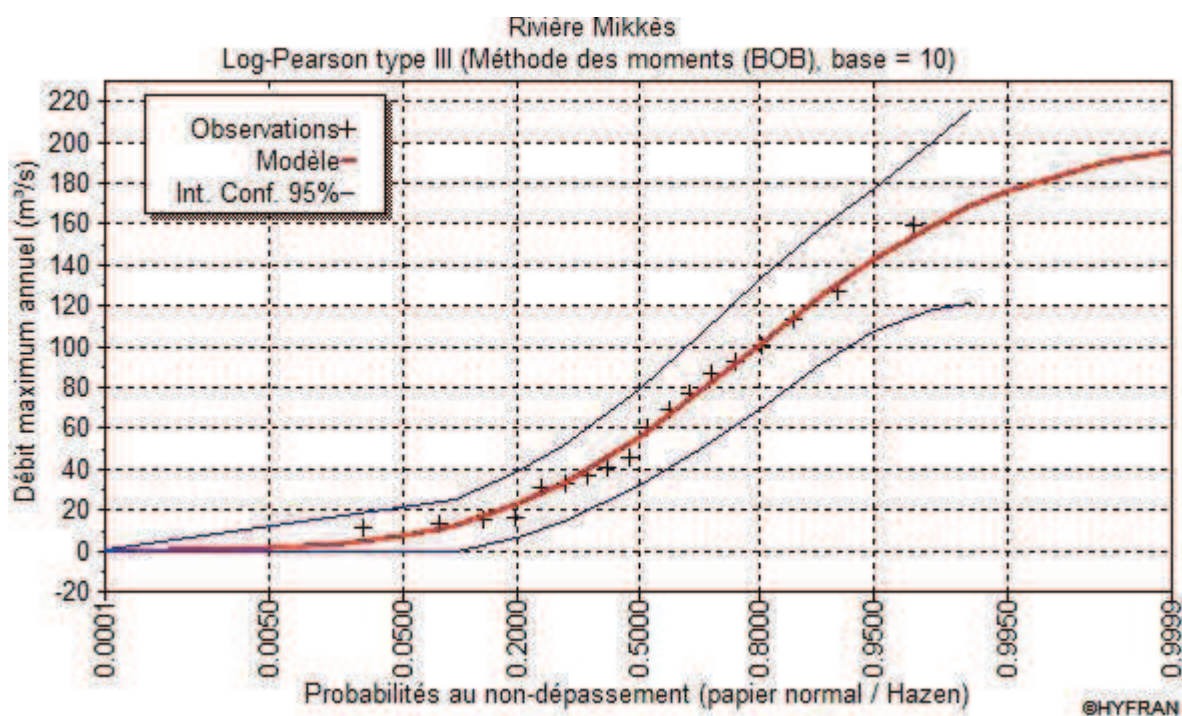


Figure 31 : graphique de la série des débits maximums annuels à la loi de Log-Pearson type III pour Mikkès

C.4. Résultats de comparaison des ajustements aux lois statistiques

Comme le but de l'analyse fréquentielle est d'estimer le risque associé aux événements hydrologiques extrêmes et donc d'extrapoler les quantiles, nous avons privilégié les lois qui ajustaient le mieux les observations extrêmes visuellement. Nous avons donc conclu que la loi Log-Pearson type III (Courbe en bleu clair dans la figure. 32) représente le meilleur compromis pour l'ajustement de la variable débit, particulièrement à des fins d'extrapolation.

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

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

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

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

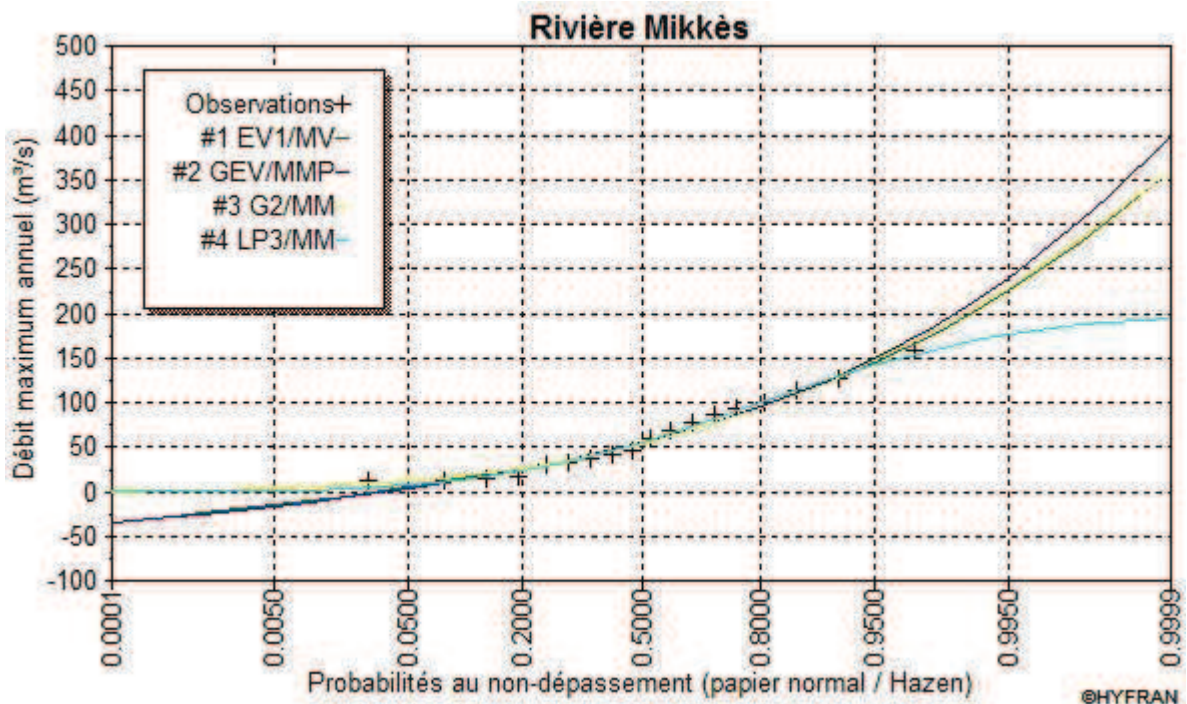


Figure 32 : Résultats de comparaison des ajustements aux différentes lois des débits maximums annuels pour Mikkès

C.5. Quantiles estimés pour différentes périodes de retour

La période de retour T d'un événement est la durée moyenne qui sépare deux crues supérieures ou égales à cet événement. Inversement, une crue de période de retour T est une crue qui, en moyenne, est égalée ou dépassée toutes les T 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 qu'elle survient une fois tous les 100ans, mais cette crue a 1% de chance d'arriver chaque année pendant 100ans.

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

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

La fréquence d'apparition est :

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

Donc

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

Les résultats des quantiles estimés pour différentes périodes de retour, au niveau d'Oued Mikkès, sont présentés respectivement dans le tableau 24.

Pour les faibles périodes de retour ($T \leq 20$ ans), les quantiles estimés par les différentes lois d'ajustement croissent rapidement, devenant faibles par la suite. Pour les grandes périodes de retour ($T \geq 2000$ ans), l'évolution est globalement constante. Aussi pour les faibles périodes de retour ($T \leq 10$), les quantiles estimés sont très proches, par contre au-delà ils s'écartent suivant la loi d'ajustement. A

ce niveau on signale que les quantiles estimés par la loi GEV sont les plus importantes par contre ceux estimés par la loi de Gumbel sont les plus faibles.

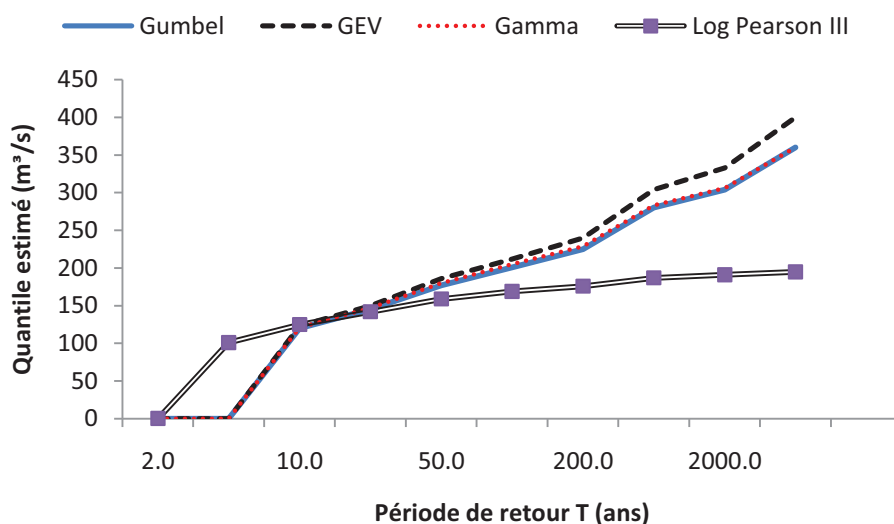


Figure 33 : Temps de retour correspondant aux débits maximums annuels de Mikkès

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 Pearson III
2.0	0.5000	55.0	54.7	53.1	55.5
5.0	0.8000	94.0	95.6	93.5	101
10.0	0.9000	120	123	121	125
20.0	0.9500	145	150	147	142
50.0	0.9800	177	186	180	159
100.0	0.9900	201	212	205	169
200.0	0.9950	225	240	229	176
1000.0	0.9990	280	304	283	187
2000.0	0.9995	304	333	306	191
10000.0	0.9999	360	400	360	195

Tableau 24 : Résultats d'ajustement graphique de la série des débits maximums annuels de Mikkès

3.2. Les étiages

Parmi les difficultés rencontrées par l'utilisateur dans la pratique de l'étude des étiages, on retrouve souvent, le choix de la variable d'étiage à retenir. Contrairement aux débits de crue qui peuvent être représenté par un débit maximal instantané (ou sur une courte période, journalière par exemple) ; La compréhension du phénomène d'étiage est beaucoup plus délicate, l'effet des multiples prélèvements, dérivations et rejets dont un nombre des fleuves font l'objet, mais surtout l'effet de la durée des périodes d'étiage influe considérablement sur le choix de la variable. Ce sont des interventions humaines qui sont généralement responsables des perturbations du débit d'étiage, très conséquentes en été et des difficultés de mesures inhérentes au phénomène lui-même. Les

jaugeages en période d'étiage nécessitent une grande précision et les résultats sont souvent entachés d'erreurs.

3.2.1. Analyse fréquentielle des étiages

L'adoption de la méthode du débit caractéristique d'étiage (DCE) comme base de l'estimation des débits d'étiage pour la détermination des fréquences annuelles, sera aussi utilisée pour l'analyse fréquentielle.

En effet, après avoir choisi un échantillon de débits minimums annuels, on doit respecter certaines hypothèses de bases (débit naturel, homogénéité, stationnarité, etc.), avant de procéder au choix de la distribution statistique qui s'ajuste le plus adéquatement à l'échantillon de débits minimums annuels. Pour ce faire nous exposons les résultats des plus importants tests:

3.2.1.1. Test des hypothèses

a. Test d'indépendance de Wald Wolfowitz à 5%

Les résultats sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau 25 : Résultat du test de Wald Wolfowitz sur les données des débits minimums de Mikkès

Oued	U calculé	$U_{2,5\%}$	p	α
Mikkès	2.62	1.96	0.00882	5%

Hypothèse :

- ✓ H0 : Les observations sont indépendantes
- ✓ H1 : Les observations sont dépendantes (auto_corrélation d'ordre 1)

U calculé n'est pas compris entre les valeurs critiques, nous devons jeter H0 au niveau de signification de 1%.

b. Test de stationnarité (Kendall)

Les résultats du test Kendall sur la stationnarité des données est représenté dans le tableau suivant :

Tableau 26 : Résultat du test de Kendall sur les données des débits minimums de Mikkès

Oued	U calculé	$U_{2,5\%}$	p	α
Mikkès	2.04	1.96	4.86	5%

Hypothèse :

- ✓ H0 : Il n'y a aucune tendance dans les observations
- ✓ H1 : Il y a une tendance dans les observations

Donc, nous devons rejeter H0 au niveau de la signification de 1%

3.2.1.2. Les statistiques de base

a. Résultats des statistiques de base

Les valeurs des indicateurs de dispersion (Variance Var, Ecart type σ et coefficient de variation CV) ne montrent pas des grandes variabilités dans la série d'observation. Les coefficients d'asymétrie et d'aplatissement indiquent que la distribution est légèrement asymétrique et plus aplatie qu'une distribution normale.

Tableau 27 : Résultats des statistiques de base pour la série des débits minimums de Mikkès.

Statistique	
Nombre de données	25
Débit minimal	8.03
Débit maximal	76.9
Débit moyen	32.7
Ecart type	16.1
Débit médian	26.1
Coefficient de variation	0.491
Coefficient d'asymétrie	0.974
Coefficient d'aplatissement	3.15

b. Histogrammes de fréquences

L'histogramme de fréquence est élevé à gauche pour les observations de Mikkès, cette allure confirme l'asymétrie gauche de la distribution, déjà mise en évidence par le coefficient d'asymétrie. La classe des faibles et moyens débits [10 – 20] et [20 – 30] sont les plus fréquentes sur la série d'observation, celle des forts débits [50 – 60] est moins importante au niveau de la série.

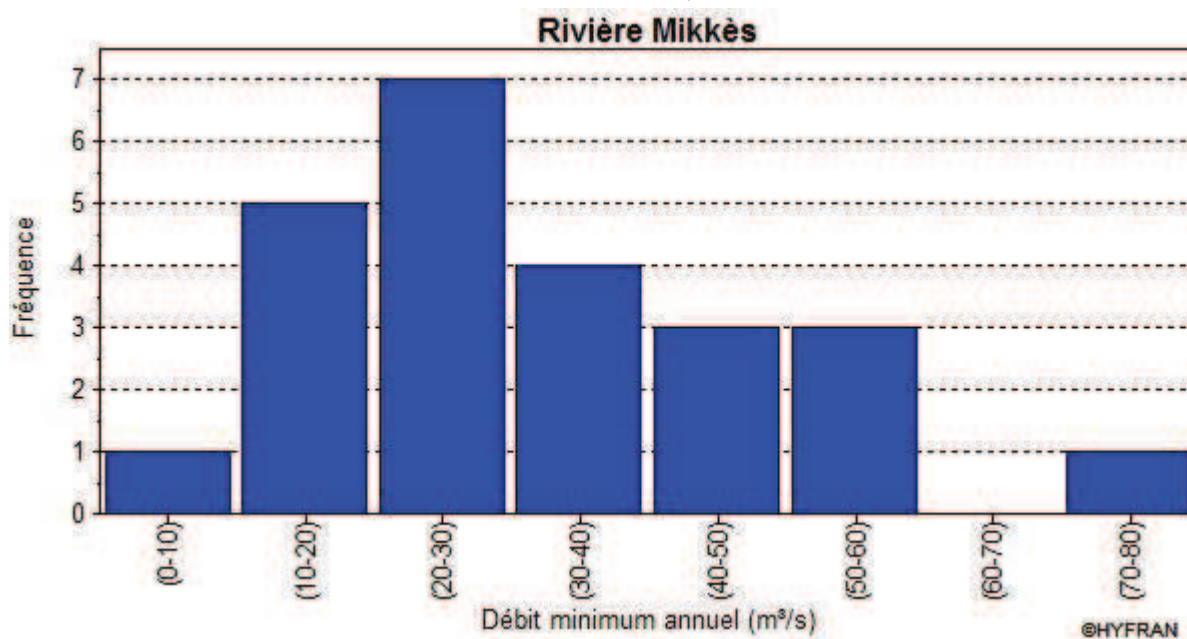


Figure 34 : Histogrammes de fréquence des débits minimums annuels au niveau de la série de Mikkès

c. Courbes chronologiques des sommes cumulatives

Les résultats obtenus dans la série montrent une seule tendance positive ou les valeurs des débits sont supérieures à la moyenne.

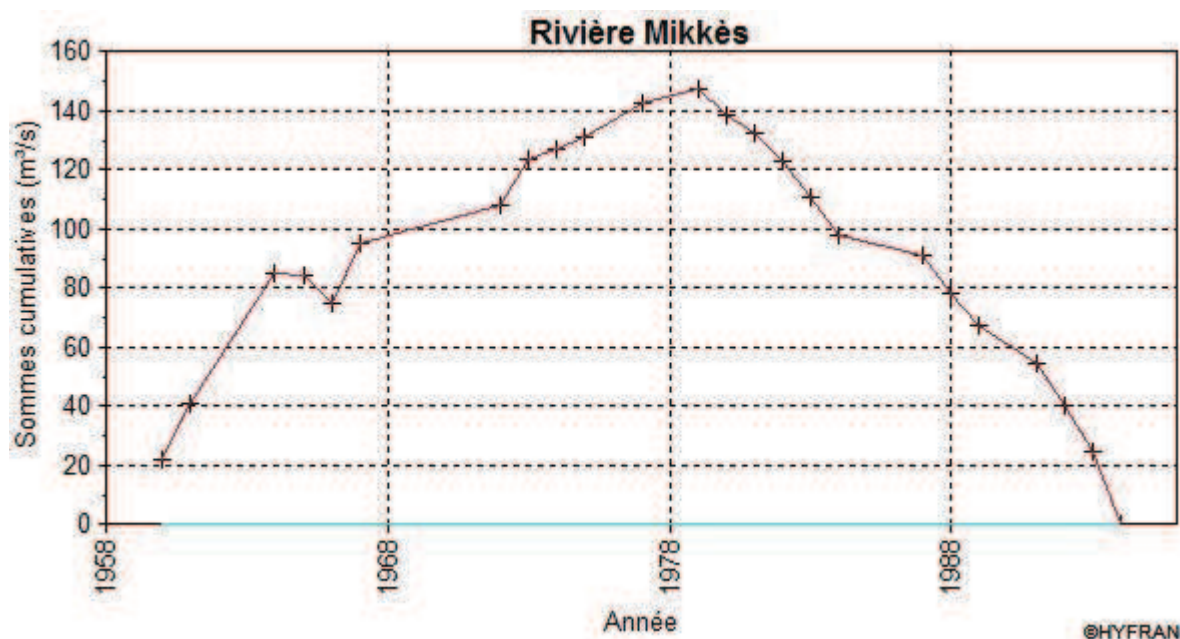


Figure 35 : Courbe chronologique des sommes cumulatives pour les débits minimums de Mikkès

d. Ajustement aux lois statistiques

Les séries des débits minimums mensuels ont été utilisées pour l'analyse fréquentielle, le choix de lois statistiques pour leurs ajustements est inspiré des résultats de comparaison des ajustements aux différentes lois, puisqu'il n'existe pas de règles théoriques pour justifier le choix d'une telle loi. Face à cette problématique du choix des lois statistiques pour l'ajustement, nous sommes renforcés à comparer plusieurs lois pour retenir les lois les plus adéquates.

d.1. Loi de GEV (méthode des moments pondérés)

Tableau 28 : Résultat de l'ajustement à la loi de GEV pour Mikkès

Oued	Les paramètres			Résultats			
	k	α	u	Résultat de la statistique (X^2)	Probabilité critique(P)	Nombre de classes	Degré de liberté
Mikkès	-0.0918094	11.6898	24.808	9.83	0.0200	3	7

Hypothèse :

- H0 : l'échantillon provient d'une loi de GEV
- H1 : l'échantillon ne provient pas d'une loi de GEV
- Nous devons rejeter H0 au niveau de signification de 5% mais on l'accepte au niveau de signification de 1%.

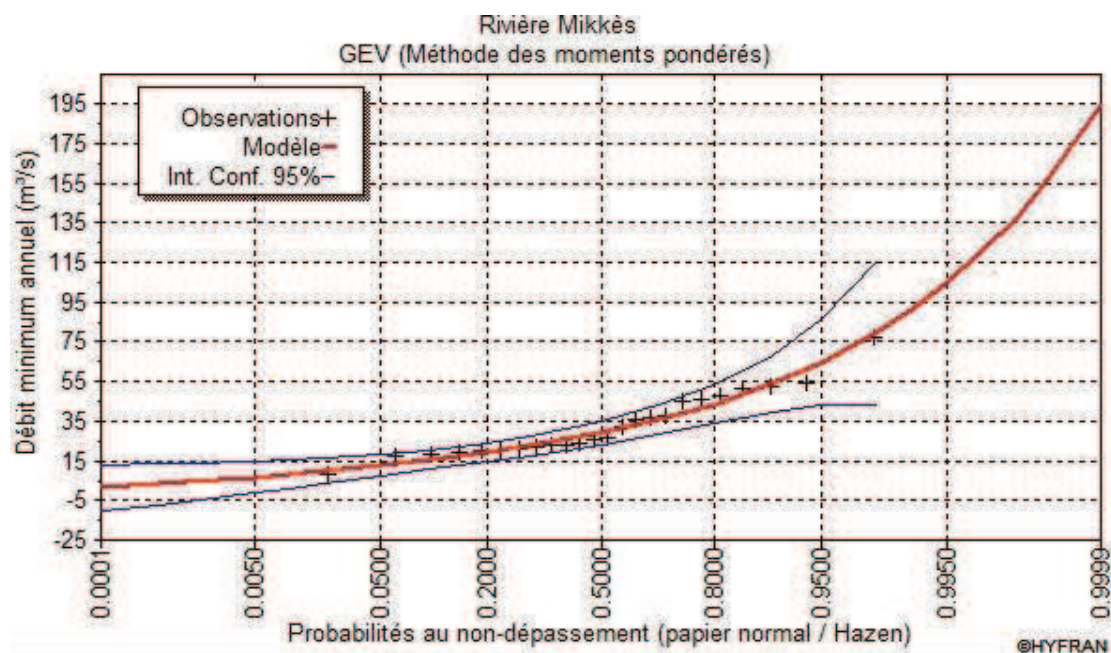


Figure 36 : Ajustement graphique de la série des débits minimums à la loi de GEV pour Mikkès

d.2. Loi de Gumbel

Tableau 29 : Résultat de l'ajustement à la loi de Gumbel pour Mikkès

Oued	Les paramètres		Résultats			
	α	u	Résultat de la statistique (X^2)	Probabilité critique (P)	Nombre de classes	Degré de liberté
Mikkès	12.3618	25.3892	8.08	0.0886	4	7

Hypothèse :

- H0 : l'échantillon provient d'une loi de Gumbel
- H1 : l'échantillon ne provient pas d'une loi de Gumbel
- Nous pouvons accepter H0 au niveau de signification de 5%.

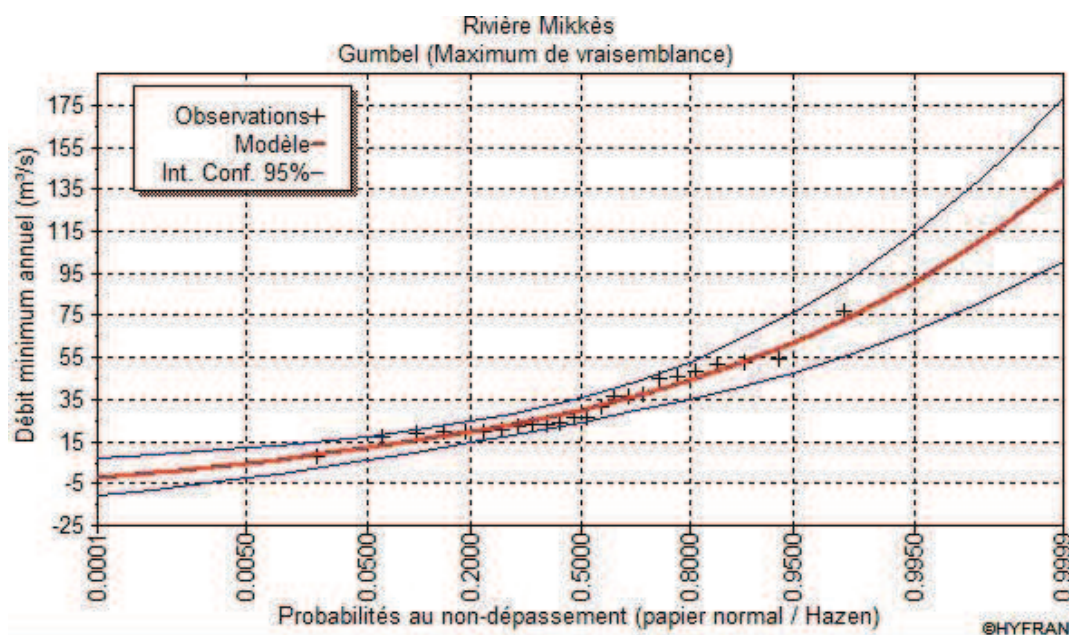


Figure 37 : Ajustement graphique de la série des débits minimums à la loi de Gumbel pour Mikkès

d.3. Estimation des quantiles des débits d'étiage

Pour déterminer les quantiles de débits QT pour une probabilité $P(X \leq QT) = 1 - 1/T$, on utilise la loi d'ajustement qui s'est avérée adéquate pour la série. Le tableau suivant montre les résultats des débits d'étiage estimés pour les différentes périodes de retour.

Tableau 30 : Résultats des débits d'étiage estimés pour les différents périodes de retour pour Mikkès

Période de retour T (ans)	Probabilité de non dépassement q	GEV	Gumbel
10000.0	0.0001	1.33	-2.06
2000.0	0.0005	3.17	0.316
1000.0	0.0010	4.11	1.50
200.0	0.0050	6.74	4.78
100.0	0.0100	8.15	6.51
50.0	0.0200	9.82	8.53
20.0	0.0500	12.6	11.8
10.0	0.1000	15.4	15.1
5.0	0.2000	19.4	19.5
3.3	0.3000	22.7	23.1
2.0	0.5000	29.2	29.9
1.5000	0.6667	35.8	36.5
1.2500	0.8000	43.6	43.9
1.1111	0.9000	54.0	53.2
1.0526	0.9500	64.7	62.1
1.0204	0.9800	79.7	73.6
1.0101	0.9900	91.7	82.3
1.0050	0.9950	105	90.9
1.0010	0.9990	138	111
1.0005	0.9995	153	119
1.0001	0.9999	194	139

Les étiages les plus sévères ont une période de retour qui ne dépasse pas deux ans, par contre les moins sévères ont une grande période de retour.

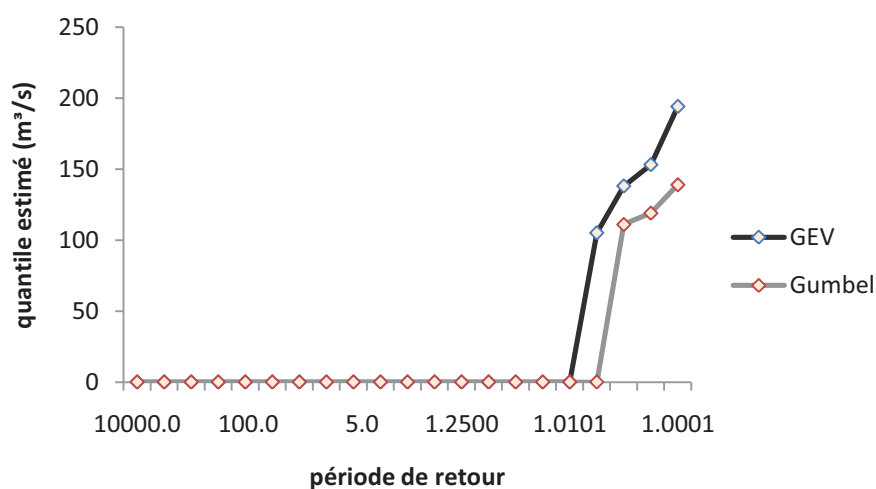


Figure 38 : Temps de retour correspondant aux débits minimums annuels de Mikkès

4. Conclusion

Le régime de l'Oued Mikkès est un régime simple soutenu par les eaux souterraines avec un écoulement généralement faible.

Le suivi des mesures des débits mensuels durant la période 1968-2006, montre que la période des hautes eaux se manifeste à partir du mois de décembre avec un débit maximal en février. La période des basses eaux, en été, se manifeste par un débit d'étiage qui est causé essentiellement par la faiblesse des pluies, des températures et les évapotranspirations sont fortes et maximales. En effet, ce cours d'eau est de type pluvio-évaporal. Les eaux infiltrées dans les calcaires du Lias réapparaissent sous forme de sources, ou alimentent latéralement des nappes phréatiques ou des oueds lors de la période d'étiage.

L'analyse fréquentielle permet d'estimer le risque associé aux événements hydrologiques extrêmes et d'extrapoler les périodes de retour de crues.

L'étude des formes extrêmes de l'écoulement, orientées 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, ont 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 important pour Oued Mikkès.

CONCLUSION GENERALE

Le bassin versant de l'oued Mikkès est étendue sur une superficie de 1401 Km² et un périmètre de 260 Km.

Le bassin de Mikkès est un bassin allongé, dont l'hypsométrie est caractérisée par des altitudes qui décroissent du Sud vers le Nord. D'après la courbe hypsométrie, les altitudes moyennes occupent la majorité de la surface du bassin. Le relief est fort suivant l'indice de la pente globale.

Ce bassin traverse trois ensembles structuraux différents : le Prérif-Rides prérfaines au Nord, le Sillon sud rifain au centre et le Causse Moyen Atlasique au Sud.

Les précipitations moyennes annuelles diminuent en allant de l'amont vers l'aval. La pluie présente une moyenne de 579.9 mm sur tout le bassin avec une température moyenne annuelle de 16.1 °C.

La combinaison entre la précipitation et la température, par des différentes méthodes a montré que le bassin est sous un climat semi-aride à humide. La valeur moyenne de l'évapotranspiration réelle est de 417.7 mm/an, signifiant ainsi l'existence d'un surplus, par référence aux précipitations annuelles.

Le régime hydrologique peut être considéré comme un régime pluvial, caractérisé par l'abondance pluviale à très forts débits hivernaux, donc des fortes crues d'une part, et d'autre part par une saison sèche fortement prononcée, donc les étiages.

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

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ahmamou, M., 1987, Etude sédimentologique des calcaires lacustres Saïssiens (Plio-Quaternaire) du bassin de Fès-Meknès (Maroc). Thèses 3^{ème} cycle, Aix Marseille III, 187p.
- Ait Brahim, L., 1983, Etude de la déformation du Néogène supérieur à l'actuel sur la bordure sud-rifaine dans le contexte du rapprochement des plaques Afrique-Europe. Thèse de 3^{ème} cycle, Rabat.
- Alibou, J., 2002, Impact des changements climatiques sur les ressources en eau et les zones humides du Maroc. Ecole Hassania des travaux publics (EHTP).
- Amraoui, F., 2005, Contribution à la connaissance des aquifères karstiques : cas du lias de la plaine du Sais et du Causse Moyen Atlasique tabulaire (Maroc). Thèse Doct. d'état. Univ. Hassan II ; Casablanca ? 249pp.
- Andrieux, J., 1971, La structure du Rif central. Etude des relations entre la tectonique de compression et les nappes de glissement dans un trançon de chaîne alpine. Thèse Sc. Paris. Notes et Mémoires Service géologique Maroc, 235 :150p.
- Bagnouls, F. & Gaussen, H., 1957. Les climats biologiques et leur classification. Annales de Géographie ;355 : 193-220.
- Bahir, M. & Mennani, A., 2002. Problématique de la gestion des eaux souterraines au Maroc. Estudiosn Geol., 58 : 103-108 (2002).
- Baize, D., Jabiol, B., 1995. Guide pour la description des sols. INRA, Paris, 375p.
- Belhassan, K., 2011. Comportement Hydrologique, Hydrogéologique et Hydrodynamique du Bassin Versant de L'Oued Mikkès en Amont de Barrage Sidi Echahed. Thèse pour l'obtention du Diplôme de Doctorat National, Fès.
- Belhassan, K., Hesan, M.A. & Essahlaoui, A., 2009. Intercations eaux de surface – souterraines : Bassin versant de l'Oued Mikkès (Maroc). Hydrol. Sci. J. 55(8), 1371-1384.
- Billaux, P., 1970. La région de Fès 7 septembre 1966. Chapitre IV. Cah. ORSTOM Ser. Pedol. Vole . 24. n° 13712 (361-363).
- Bruderer, W. Gousskov, N., Gubler, J., Jacquemont, P., Levy, RG., Tilloy, R., 1955. Carte géologique régulière du Maroc au 1 :100.000 éme. Feuille de Fès Ouest. Notes Mém. Serv. Géol. Maroc.
- Castany, G. (1965), Unités des eaux de surface et des eaux souterraines, principe fondamental de la mise en valeur des ressources hydrologiques, Hydrological Sciences Journal, 10 : 3, 22-30.
- Cerda, A., 1999. Parent material and vegetation affect soil erosion in eastern Spain. Soil Science Society of America Journal, 63, 362-368.
- Chalouan, A., Galindo-Zaldivar, J., Ail, M, Marin, C., Chablis, A., Guano, P., Bargach, K., Sans de Galena, C., Benmakhlouf, M., Ahmamou, M. & Gourari, L., 2006. Tectonic wedge escape in the southwestern front of the Rif Cordillera (Morocco). Geological Society, London, Special Publications. V. 262; p. 101-118.
- Chaponière, A., 2005. Fonctionnement hydrologique d'un bassin versant montagneux semi-aride Cas du bassin versant de Rehraya (Haut Atlas Marocain). Thèse, institut national agronomique paris-grignon. Centre d'études spatiales de la biosphère. 268p.

Cirac, P., 1987. Le bassin sud rifain occidental au Néogène supérieur. Evolution de la dynamique sédimentaire et de la paléogéographie au cours d'une phase de comblement. Thèses Doct. Etat, Univ. De Bordeaux I, France.

Cossard, C. & Robinson, M., 2000. Hydrologie continentale. Armand Colin.

Doguin, F., 1927. Contribution à l'étude de la région pré-rifaine (Maroc occidental). Notes Mém. Serv. Géol. Maroc, n° 1, 413p.

Dekayir, A. & El-Maataoui, M., 2001. Minéralogie et bilan de matière de l'altération supergène d'un basalte alcalin du Moyen Atlas marocain. Journal of African Earth Sciences, Vol. 32, No 4, pp. 619-633.

Demerge, C., 2001. La qualité des modèles numériques de terrain pour l'hydrologie. Application à la caractérisation des crues. Thèse. Université de Marne-la vallée. 275p.

Essahlaoui, A., 2000. Contribution à la reconnaissance des formations aquifères dans le bassin de Meknès-Fès (Maroc). Prospection géoélectrique, étude hydrogéologique et inventaire des ressources en eau. Thèse de Doct. Sci. Appl. Ecole Mohammadia d'Ingénieurs, Rabat, 258pp.

Essahlaoui, A. & El Ouali, A., 2002. Détermination de la structure géologique de la partie Sud de la plaine du Saïs (Bassin de Fès-Meknès, Maroc) par la méthode géoélectrique. Springer-Verlag 2002. DOI 10.1007/s10064-002-0178-x. Bull Eng Geol Env (2003) 62: 155-166.

Ezzahiri, M. & Belghazi, B., 2000. Synthèse de quelque résultat sur la régénération naturelle du cèdre de l'Atlas au Moyen Atlas (Maroc). Sécheresse vol. 11(2), 79-84.

Fassi, D., 1999. Les formations superficielles du Saïs de Fès et de Meknès. Notes et Mémoires du Service Géologique N°389. 527p.

Faugères, J.C., 1978. Les Rides sud-rifaines. Evolution sédimentaire et structurale d'un atlantico-mésogéen de la marge africaine. Thèse Doct. Etat. Univ. Bordeaux I, France.

Frécaut, F., (1971). La Moselle et son bassin. Contribution à l'hydrologie et la dynamique fluviales en milieu tempéré océanique. Thèse, doct, Brest, Reprod. Univ. Lille III. 840 p., 122 fig., 2 cartes.

Herbig, H.G., 1988. Synsedimentary tectonics in the Northern Middle Atlas (Morocco) during the late Cretaceous and tertiary in: V. Jacobshagen, Editors, The Atlas System of Morocco, Springer-Verlag, Berlin, pp. 321-337.

Jamal, N., 2011. Caractérisation Hydrologique et Qualitative des Eaux de Surface du Bassin Versant du Haut Inaouene. Thèse pour l'obtention du diplôme de Doctorat National. FST-Fès.

Jamal, N., 2011. Caractérisation Hydrologique et Qualitative des Eaux de Surface du Bassin Versant du Haut Inaouene. Thèse pour l'obtention du diplôme de Doctorat National. FST-Fès.

Levy, R.G & Tilloy R., 1952. Maroc septentrional (chaîne du Rif). Partie, livre guide des excursions A31.C31. Congrès géologique international, XIX session- Alger- 1952, série : Maroc, 8p.

Martin, J., 1981. Le Moyen Atlas central – étude géomorphologique. Notes et Mémoires du Service Géologique N°258 bis. 445p.

Martinez-Mena, M., Alvarez, Rogel, J., Albaladejo, J., Castillo, V.M., 1999. Influence of vegetal cover on sediment particle size distribution in natural rainfall in conditions in a semi-arid environment. Catena, 38, 175-190.

- Mokssit, MA., 2009. Rencontre international le changement climatique : enjeux et perspectives d'adaptation pour le Maroc. Rabat, 16 octobre 2009.
- Morgan, R.P.C., McIntyre K., Vickers, A.W., Quinton, J.N, Rickson R.J., 1997. A rainfall simulation study of soil erosion and on rangeland in Swaziland. *Soil Technology*, 11, 291-299.
- Ramade, F., 1976. Dictionnaire encyclopédique de l'écologie et des sciences de l'environnement, Ediscience international, 822p.
- Remenieras, G., 1976. L'hydrologie de l'ingénieur – Editions Eyrolles, Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France, 2ème édition, 456p.
- Richard, D. et Mathys, N., 1999. Historique, contexte technique et scientifique de BVRE de Draix. Caractéristiques, données disponibles et principaux résultats acquis au cours dix ans de suivi. Actes de colloque « les bassins versants expérimentaux de Draix, laboratoire d'étude de l'érosion en montagne », Draix, Le brusquet, Digne, 22-24 Octobre 1997. CEMAGREF, Grenoble, 11-28.
- Roche, M., 1963. Hydrologie de surface. Gauthier-villards et ORSTOM. Paris, France.
- Rousseau, L., Beauchamp, J., Bahain, J.J., Boulad, L., Deschamps, P., Flaguères, C., Ghaleb, B., Lartigot, A.S. & Pozzi, J.P. 2006. Premiers résultats d'une étude pluridisciplinaire menée sur des travertins quaternaires du Maroc *Quaternaire*, 17, (4), 2006, p. 343-350.
- Snelder, D.J., Brayan, R.B., 1995. The use of rainfall simulations to assess the influence of vegetation density on soil loss on degraded rangelands in the Baringo district (Kenya). *Cetana* 25, 105-116.
- Stewart, P., 1974. Cours de sylviculture. Institut national agronomique. Dpt foresterie. El-Harrach – Alger : 101p.
- Strahler, A.N., 1952. Hypsometric (area-altitude) analysis of ersional topography. *Geological Society of America Bulletin* 63, 1117-1142.
- Taltasse, P., 1953. Recherche géologique et hydrologique dans le bassin de Fès-Meknès. Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc N° 115,300p., 71fig., 40pl.
- Texier, J.P., Raynal, J.P & Lefevre, D., 1985. Nouvelles positions pour un cadre chronologique raisonné du quaternaire marocain. *C. R. Acad. Sc. Paris*, t, 301, Série II, n°3, pp ; 183-188.
- Vidal, J.C. 1971. Une interprétation nouvelle des nappes du préif central (Maroc) et ses conséquences sur la structure de leur substratum autochtone *C. R. Acad. Sci. Paris*, 272, sér. D, 24-27.
- Xiaomin, Che & Sequeira, Jean, 2004. Extraction du réseau hydrographique à partir du modèle numérique de terrain. Rapport du laboratoire L S I S (UMR-CNRS 6168).
- Zarhloule, Y., 2004. Le gradient géothermique profond du Maroc : détermination et cartographie. *Bulletin de l'institut scientifique, Rabat, Section Sciences de la terre*, 2004, n°26, p. 11-25.
- Ziadi, R., 1984. Contribution à l'étude des sources thermo-minérales du domaine préifain (à l'ouest du méridien de Fès). *Mém. DEA, Inst. Géodyn. Univ. Bordeaux III*, 76p-France.

ANNEXES

Pluies annuelles 1968-2009 (ABHS-Fès)

Année	Ifrane	Azrou	Imouzzer	El Hajeb	Bittit	My Idriss	Ain Taoujdat	El Hajra
1968	1456	1004	839	1039	705	721	600	508
1969	1760	1215	869	1082	852	878	732	619
1970	1120	773	665	570	542	564	470	405
1971	1379	952	797	803	668	764	637	615
1972	887	581	707	528	429	583	486	464
1973	832	610	713	543	403	585	488	505
1974	740	547	624	498	358	487	406	287
1975	1014	817	609	647	491	641	541	418
1976	1143	844	788	742	553	459	659	523
1977	932	731	682	548	451	434	472	381
1978	932	759	506	636	412	700	433	367
1979	1144	755	666	702	653	938	503	469
1980	934	692	679	583	522	540	381	312
1981	674	360	377	355	357	393	249	195
1982	1045	794	704	876	650	746	616	405
1983	653	456	320	342	294	353	316	306
1984	624	574	428	504	414	488	329	323
1985	851	605	364	560	411	519	352	281
1986	1002	1148	478	648	470	706	413	297
1987	821	578	574	506	532	669	469	433
1988	772	479	612	525	421	520	388	310
1989	1274	788	758	649	643	730	604	521
1990	831	633	492	421	477	651	516	376
1991	980	760	432	370	476	565	400	296
1992	878	599	727	622	432	482	325	268
1993	711	868	548	670	320	564	314	331
1994	728	525	446	382	325	437	272	225
1995	856	802	508	435	378	529	296	309
1996	1865	1396	1142	978	1031	1143	790	633
1997	1161	841	711	609	628	813	607	555
1998	652	494	399	342	264	442	325	242
1999	852	562	521	446	398	422	315	228
2000	819	675	501	429	430	422	425	320
2001	655	450	401	343	324	320	275	204
2002	1006	802	687	588	548	687	464	328
2003	1233	883	1067	914	799	799	444	499
2004	808	580	408	349	396	613	305	202
2005	641	476	392	336	410	405	324	194
2006	854	696	523	448	532	659	443	259
2007	623	462	381	327	395	386	336	189
2008	1070	838	655	561	705	675	574	324
2009	1335	942	817	700	665	712	524	404
Moyenne	965	722	608	575	504	599	448	365

Températures annuelles depuis 1961(ABHS-Fès)

Année	Ifrane	Fès	My. Idriss	El Hajra	T moy.
1961	12,1	17,2	18,1	18,9	16,6
1962	11,4	17,2	18,1	18,9	16,4
1963	11,6	16,7	17,6	18,4	16,1
1964	12,2	17,3	18,2	19,0	16,7
1965	11,1	16,5	17,4	18,1	15,8
1966	12,2	17,0	17,8	18,6	16,4
1967	11,3	16,5	17,4	18,2	15,8
1968	11,3	16,7	17,6	18,3	16,0
1969	11,1	16,2	17,0	17,8	15,5
1970	11,2	16,9	17,8	18,6	16,1
1971	9,9	15,5	16,3	17,1	14,7
1972	10,0	15,3	16,1	16,8	14,5
1973	10,7	16,4	17,3	18,0	15,6
1974	11,0	16,3	17,2	17,9	15,6
1975	10,7	16,1	17,0	17,7	15,4
1976	10,4	15,9	16,8	17,5	15,2
1977	11,0	16,4	17,3	18,0	15,7
1978	11,1	16,9	17,8	18,6	16,1
1979	11,2	16,8	17,6	18,4	16,0
1980	11,4	17,0	17,9	18,6	16,2
1981	11,6	16,7	17,6	18,5	16,1
1982	11,8	15,9	16,7	18,0	15,6
1983	12,1	16,7	17,6	18,5	16,2
1984	11,8	16,0	16,8	17,4	15,5
1985	11,7	17,1	18,0	18,3	16,3
1986	12,1	16,4	17,3	18,3	16,0
1987	12,3	17,2	18,1	19,2	16,7
1988	12,3	16,9	17,8	17,5	16,1
1989	12,0	17,4	18,3	17,9	16,4
1990	12,2	17,1	18,0	17,5	16,2
1991	11,3	16,3	17,1	17,0	15,4
1992	11,2	16,3	17,2	17,4	15,5
1993	11,7	15,9	16,7	17,0	15,3
1994	12,8	17,2	18,2	17,5	16,4
1995	12,4	17,8	18,8	18,9	17,0
1996	11,7	16,6	18,0	20,0	16,6
1997	12,3	17,4	19,7	19,2	17,1
1998	12,6	17,2	19,0	20,0	17,2
1999	12,6	16,9	18,8	19,4	16,9
2000	13,2	17,6	18,9	20,0	17,4
2001	13,2	17,6	18,9	19,7	17,4
2002	13,5	17,8	18,5	19,6	17,4
2003	9,3	18,2	17,4	19,9	16,2
2004	14,4	16,0	16,9	17,6	16,2
2005	14,8	16,4	17,3	18,0	16,6
2006	14,6	16,2	17,0	17,8	16,4
2007	12,9	16,0	16,9	17,7	15,9
2008	13,9	15,4	16,3	17,0	15,6
2009	14,5	16,1	17,0	17,7	16,3
Moyenne	12,0	16,6	17,6	18,2	16

Etude hydrologique du bassin versant de l'Oued Mikkès

Pluies moyennes mensuelles (ABHS-Fès)

station	Sept	Oct.	Nov.	Déc.	Jan	Fév.	Mars	Avar	Mai	Juin	Juil.	Aout
Ifrane	34	76	122	147	125	136	107	111	62	26	9	11
Azrou	31	53	79	95	98	108	85	86	54	21	8	7
Imouzzer	21	52	72	86	74	80	81	68	41	17	4	7
El Hajeb	20	47	71	82	66	73	72	72	42	17	4	5
Bittit	18	43	62	71	66	68	58	62	35	16	4	2
My Idriss	25	54	81	96	86	93	81	80	47	19	6	6
El Hajra	11	32	44	57	48	46	43	43	28	11	1	1
Ain Taoujdate	23	51	76	90	80	86	75	75	44	18	5	6
Fès	14	44	55	66	54	65	59	59	36	14	2	3
moyenne	23	51	76	90	80	86	75	75	44	18	5	6

Températures moyennes mensuelles (1968-2009) (ABHS-Fès)

	Sept	Oct.	Nov.	Déc.	Jan	Fév.	Mar	Avar	Mai	Juin	Juil.	Aout
Ifrane	17,8	13,0	8,6	5,5	4,5	5,9	7,3	9,0	12,2	17,0	21,4	21,5
Fès	22,2	18,1	13,6	10,4	9,3	10,7	12,4	13,9	17,0	21,4	25,3	25,1
El Hajra	23,9	19,8	15,0	12,1	10,6	12,4	13,8	15,4	18,7	23,0	26,8	27,1
My. Idriss	23,3	19,1	14,5	11,0	10,1	11,6	13,3	14,8	17,8	22,4	26,5	26,4

Etude hydrologique du bassin versant de l'Oued Mikkès

Année	Sept	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Module
1958/59											<u>12,9</u>	9,28	9,39
1959/60	12,6	14,2	20,7	108	275	<u>144</u>	<u>305</u>	144	69,6	58,1	<u>35,0</u>	20,3	100,69
1960/61	16,4	25,8	37,7	115	135	95,6	62,7	66,6	37,0	32,1	15,7	11,4	54,09
1961/62	11,6	18,6	42,7	50,9	42,3	28,4	214	103	51,9	30,5	15,2	10,8	51,93
1962/63	10,7	18,6	148	81,0	488	594	199	80,9	147	96,9	44,6	33,9	159,29
1963/64	27,5	27,0	31,3	264	83,8	98,9	132	293	65,2	41,9	30,0	23,9	93,16
1964/65	22,3	23,3	50,5	71,1	136	125	227	120	59,0	40,6	28,2	21,4	76,93
1965/66	22,6	33,2	40,7	39,5	55,2	68,4	42,7	30,9	19,9	14,3	8,92	8,63	31,84
1966/67	10,2	56,1	32,9	24,0	19,2	26,3	28,5	27,7	23,5	17,6	7,32	5,60	23,25
1967/68	7,14	17,5	25,3	29,4	33,9	89,8	177	123	70,4	34,3	16,6	12,7	52,86
1968/69	11,0	10,7	57,9	162	242	337	336	158	94,3	63,9	39,0	27,3	127,16
1969/70	27,1	33,3	46,4	115	663	121	135	95,0	46,7	31,8	21,3	18,5	113,47
1970/71	17,6	20,1	21,3	26,7	130	93,6	90,7	300	173	97,6	42,8	29,4	86,61
1971/72	26,2	24,5	49,2	52,8	89,3	120	189	100	88,3	45,4	28,5	20,8	69,26
1972/73	19,9	44,6	29,9	36,1	55,8	97,2	90,3	74,7	43,3	25,4	17,6	19,9	45,92
1973/74	25,2	28,2	27,7	45,9	26,1	42,5	56,4	121	98,7	31,4	35,4	37,4	47,99
1974/75	38,4	45,6	44,9	15,3	17,2	24,3	50,4	68,3	52,5	31,4	22,4	24,7	36,26
1975/76	24,8	25,3	20,9	22,9	15,6	45,1	36,6	61,1	96,3	34,8	27,3	29,6	36,63
1976/77	32,8	33,3	33,7	70,4	223	306	85,2	45,2	31,2	32,1	24,4	25,1	77,14
1977/78	24,8	25,7	21,9	28,4	32,0	72,9	80,2	76,7	77,6	33,8	33,8	30,7	44,70
1978/79	35,3	27,6	23,8	28,2	39,4	240	144	83,9	33,7	25,8	26,6	30,7	60,29
1979/80	37,9	54,6	64,9	36,0	33,2	26,5	46,0	29,1	37,0	27,1	27,1	30,5	37,55
1980/81	29,8	27,2	24,1	18,8	17,9	18,9	18,6	34,3	26,5	20,6	23,3	27,8	23,99
1981/82	27,3	23,3	21,3	29,1	32,0	29,1	24,4	44,4	30,3	18,8	17,4	17,8	26,23
1982/83	19,1	32,5	20,5	25,0	21,6	42,0	24,8	20,0	15,5	17,1	18,4	22,5	23,13
1983/84	19,1	19,0	16,9	31,8	14,5	12,0	17,1	16,3	41,5	18,0	18,3	23,1	20,73
1984/85	18,3	15,1	19,2	15,5	27,9	30,0	18,6	15,7	22,6	13,7	19,5	21,3	19,73
1985/86	23,0	17,8	22,8	13,3	47,0	178	92,2	61,3	34,8	24,4	19,3	23,6	45,49
1986/87	30,3	21,9	19,0	13,1	31,3	123	40,7	19,9	19,4	34,6	49,4	44,3	36,65
1987/88	37,5	30,1	16,7	19,2	30,6	27,3	34,4	16,6	20,3	26,2	26,1	27,4	26,05
1988/89	24,7	17,3	13,6	11,8	11,0	12,0	16,8	43,5	19,3	19,1	21,2	24,3	19,55
1989/90	10,3	28,4	16,5	43,4	38,8	19,2	14,2	15,7	23,5	10,7	17,5	22,2	21,82
1990/91	19,9	18,5	11,5	30,0	7,56	25,6	110	56,4	24,9	27,2	33,2	31,8	33,16
1991/92	22,4	7,41	11,2	11,1	11,9	11,5	9,74	37,0	21,3	28,4	26,2	39,3	19,81
1992/93	34,5	15,5	13,1	7,16	8,39	8,13	8,90	11,8	17,1	28,8	33,5	36,1	18,63
1993/94	16,9	8,03	17,5	6,17	8,84	32,9	34,7	11,0	6,21	20,5	26,7	22,4	17,54
1994/95	20,1	11,1	5,83	8,20	4,68	6,57	6,21	10,8	11,9	2,45	5,08	3,39	8,03
1995/96	9,88	0,313	3,18	9,54	108	62,1	85,9	22,8	16,7	22,0	75,6	76,1	41,15
1996/97													
1997/98													
1998/99	19,4	35,5	19,9	10,9	6,01	4,68	6,32	14,2	14,4	15,9	16,7	15,9	15,05
1999/00													
2000/01													
2001/02													
2002/03													
2003/04	14,7	9,55	15,0	90,7	13,5	23,6	28,0	51,3	53,7	28,5	25,7	18,7	31,19
2004/05	21,8	31,2	18,9	18,2	11,8	12,6	12,1	12,2	11,7	13,2	13,4	13,3	15,90
2005/06	13,9	11,6	8,06	9,70	12,5	28,6	20,5	8,72	9,75	12,8	11,8	10,8	13,13
2006/07	9,16	8,55	8,29	7,74	13,3	14,1	10,7	20,7	13,9	8,84	8,76	13,4	11,44
2007/08													

Débits mensuels (1958-2007) (ABHS-Fès)



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

Nom et prénom: El HAMDANI Majda

Année Universitaire : 2012/2013

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

Résumé

Cette étude a porté sur le bassin versant de l'Oued Mikkès, situé au centre nord du Maroc. Elle concerne la géologie, la climatologie, les caractéristiques physiques du bassin et l'hydrologie.

Le bassin versant de Mikkès constitue une entité morphologique bien individualisé au sein de la plaine de Sais et le Causse Moyen Atlasique, il s'étend sur une superficie de 1401 Km², son altitude est comprise entre 187 m à son exutoire et 2092 m dans la partie amont.

Sur le plan climatique et hydrologique, l'étude statistique des séries hydroclimatiques provenant des stations météorologiques a permis, d'une part, la caractérisation d'un climat fluctuant autour du semi-aride avec la succession de cycles humides et secs durant la période d'observation (1968-2009) et d'autres part, une grande variabilité des ressources en eaux.

L'exploitation des données dérivées du modèle numérique du terrain (MNT) et des cartes Raster disponibles sur la zone d'étude et leur intégration dans un SIG, ont permis d'en réaliser les différents cartes présentées dans le rapport et d'en déduire les caractéristiques physiques du bassin de Mikkès.

L'étude hydrologique basée sur les relations pluies-débits a permis de mettre en évidence la forte sensibilité des ressources eaux aux aléas climatiques et contexte géologique, ainsi que de distinguer le régime hydrique du bassin qui est un régime pluvial océanique.

L'analyse fréquentielle des débits de Mikkès a permis, d'une part, d'ajuster l'écoulement de surface aux différents lois statistiques, d'autre part, de distinguer la période de retour des crues maximales et des étiages ainsi que leurs valeurs de débits.

Mots clés: Oued Mikkès (Maroc), climatologie, géologie, pluie-débit, analyse fréquentielle.