

**Chapitre 3 : Climat et bioclimat du bassin
versant de l'oued Daoura**

Introduction du chapitre

Ce chapitre est consacré à l'étude des éléments climatiques (températures, humidité relative, vents, précipitations et évapotranspirations). Ces facteurs sont fixés comme étant les principaux facteurs déterminant et favorisant plus ou moins les fonctionnements hydrologiques et hydrogéologiques des bassins versants.

En effet, l'étagement orographique (zone de montagne, zone de plateau et zone de dépression), l'extension nord-sud et est-ouest, et l'ouverture de la zone d'étude sur le désert font que le BV de Daoura connaît un climat essentiellement plus contrasté. Ces paramètres accélèrent la variabilité spatio-temporelle des précipitations et des températures entre la partie amont et la partie aval et leurs impacts sur la réponse hydrologique des oueds de l'aire d'étude. Dans cette synthèse climatique nous étudierons la variabilité spatio-temporelle des éléments climatiques, notamment les précipitations.

3-1 Données climatiques utilisées : dépouillement et diagnostic

L'agence du bassin hydraulique du Guir-Ziz-Rhériss est dotée d'un réseau de stations climatiques qui mesurent essentiellement les données pluviométriques. Du fait de la dominance d'un environnement désertique monotone au Sud, le réseau d'observation est moins dense qu'en milieu montagnard, au Nord, où les conditions climatiques sont plus contrastées (figure 33). Les données pluviométriques mensuelles collectées ont concerné 13 stations dont la période d'observation est un peu plus d'un demi-siècle (1957-58/2008-2009) (tableau 24). Elles couvrent les bioclimats semi-aride et saharien.

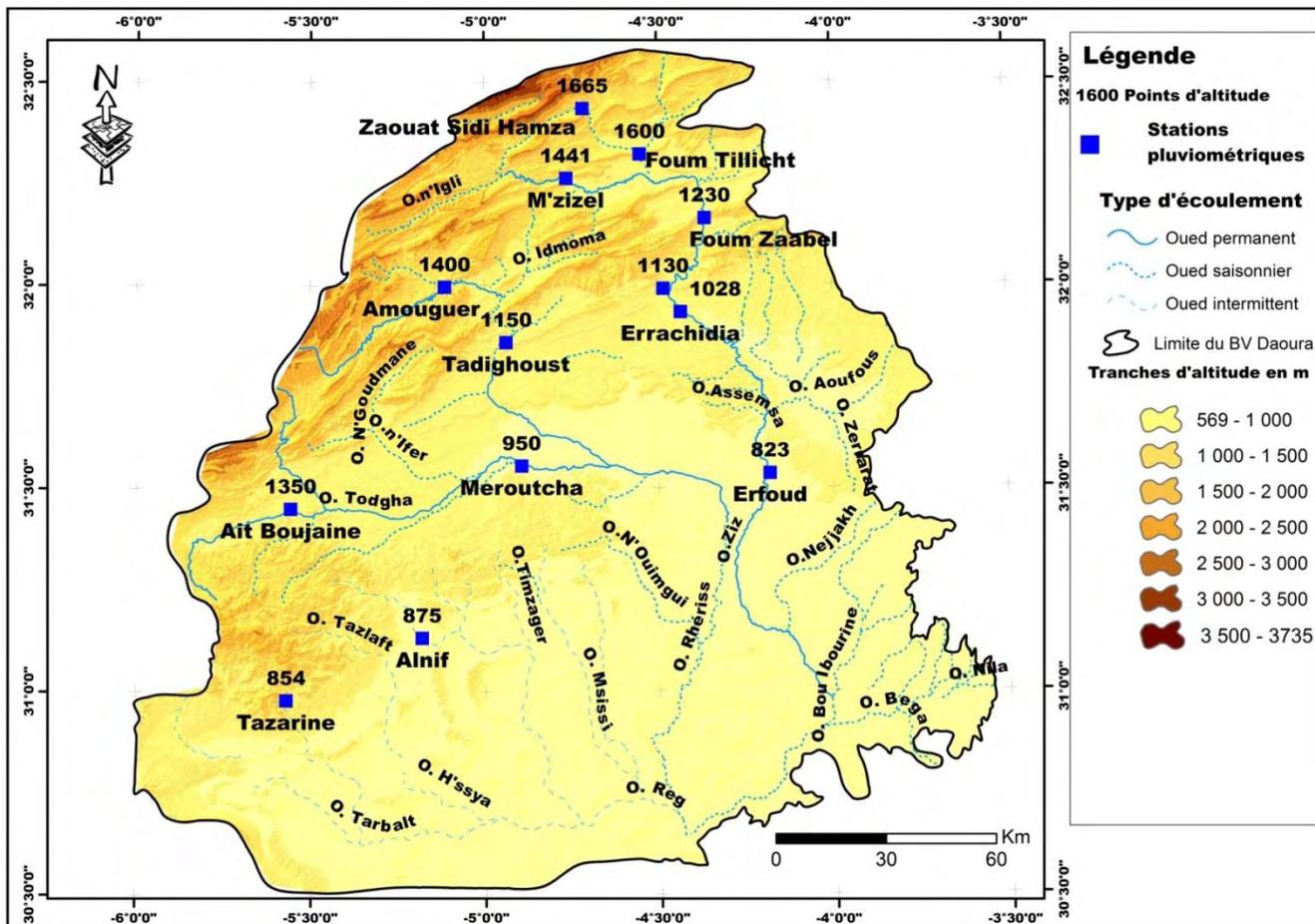
Habituellement, l'enregistrement des données peut connaître un déplacement des postes d'observation, un changement d'observateur ou une modification du matériel d'enregistrement. C'est la raison pour laquelle un test de leur homogénéité est indispensable. En plus, les séries présentent certaines lacunes qu'il fallait aussi combler (tableau 25). Ce sont donc les deux premières contraintes qu'il a fallu surpassées avant même d'effectuer une régionalisation spatio-temporelle et une analyse de tendances et de ruptures dans les séries pluviométriques temporelles.

L'étude et l'analyse des éléments climatiques du BV de l'oued Daoura peut s'appuyer sur un réseau d'observation de 13 stations pluviométriques, 9 stations thermométriques et 3 stations pour l'analyse spatiotemporelle de l'humidité relative et du vent, dont les caractéristiques sont figurées dans la figure ci-dessus.

Les stations étudiées sont :

- ❖ Pour l'étude de la variabilité thermique entre l'amont et l'aval de Daoura : nous nous sommes appuyés sur les données thermométriques de 9 stations (tableau 25). Ces données sont observées sur 27 ans (1982-83/2008-09).
- ❖ Pour l'analyse de la variation spatiale de l'humidité relative et le vent, nous utilisons uniquement les données de 3 stations (Ait Boujaine, Tadighoust et Tazarine) sur 27 ans (1982-83/2008-09) pour la station d'Ait Boujaine et Tadighoust et 13 ans pour la station de Tazarine.
- ❖ Pour l'étude de la variabilité spatiotemporelle des précipitations, nous utilisons les données de 13 stations sur 53 ans (1957-58/2008-09), en essayant d'homogénéiser les séries étudiées et en même temps de reconstituer les lacunes des données manquantes.

Pour la réalisation des cartes de la spatialisation des températures et des précipitations, nous avons utilisé une fonctionnalité d'ARC-GIS 10.2, par l'importation d'un fichier Excel contenant les coordonnées des stations météorologiques trouvées au sein de la zone d'étude et les moyennes de chaque élément climatique étudié.



(Source : 23 cartes topographiques + MNT)

Figure 33 : Localisation géographique des stations météorologiques du BV de l’oued Daoura et ses SBVs

3-1-1-Test d'homogénéité

Le terme *homogénéisation* désigne la correction de séries de données présentant des ruptures artificielles dues à des modifications dans les réseaux d’observations (déplacement de station, changement d’instrument de mesure, changement dans l’environnement immédiat d’une station, changement d’observateur, etc.). Ces ruptures artificielles sont présentes dans la plupart des enregistrements climatiques et peuvent interférer avec les variations réelles du climat. La détection et la correction de ces ruptures sont nécessaires pour construire des bases de données climatiques qui serviront ultérieurement à analyser le signal climatique et suivre son évolution dans le temps.

Une série d’observations météorologiques est homogène, quand les conditions de mesure n’ont pas varié le long du temps. Par extension, on peut parler d’une série homogène si les modifications qui

ont eu lieu (dans les données) n'ont pas affecté sensiblement les observations (*Mestre, 2000*). Une définition alternative serait: « une série de données météorologiques dont les variations sont causées seulement par des variations dans le temps, alors que le climat est une série climatique homogène » (*Conrad et Pollak, 1950, Easterling et Peterson, 1998*).

Dans un second temps, après que les hétérogénéités ont été corrigées et la série devenue homogène, on peut identifier les tendances réelles ou les sauts climatiques. Si les deux conditions ne sont pas remplies, « tout saut climatique peut être un artefact » (*Yamamoto, 1986*).

En général, les méthodes d'homogénéisation des séries temporelles forment deux catégories : les méthodes régressives et les modèles qui étudient les points de rupture dans la moyenne (*Hanchane, 2016*).

3-1-2-RHTEST de Wang et Feng

Le test correspond à une régression à deux phases qui a été exploitée par plusieurs chercheurs dans le domaine des changements climatiques.

Wang et Feng (2007) proposent une variante pour la détection et correction des hétérogénéités de moyennes inconnues d'une série de données sur la base des tests "Penalized Maximal t test" (*PMT, Wang et al. 2007*) et "Penalized Maximal F test" (*Wang 2008*) qui sont intégrés dans une méthodologie récursive (*Wang, 2008*). Le test admet que les séries présentent une auto-corrélation de type lag-1 attribuée de manière empirique et permet à la série testée d'avoir une tendance nulle ou linéaire tout au long de la période enregistrée. PMT tient compte de la position relative de chaque rupture potentielle pour diminuer le pouvoir discriminant d'échantillons de longueur inégale.

La version de la régression à deux phases de Wang (2003) a été programmée avec le logiciel R. Le logiciel RHTest (2005) sert à détecter des sauts multiples dans une série avec une tendance linéaire pour la série de base complète. Les fonctions de RHtestsV3 peuvent traiter des séries annuelles, mensuelles ou journalières d'erreurs gaussiennes. Cette méthode a la capacité de détecter à la fois des sauts et des tendances. La méthode que nous avons appliquée n'a pas pris en compte une station de référence et elle a été utilisée pour le test d'homogénéité des données mensuelles. Tout d'abord, la méthode permet de détecter tous les points de changement qui pourraient être significatifs au niveau nominal même en absence de métadonnées (ils sont nommés points de changement de type 1). Si aucun point de changement significatif n'a été identifié à cette étape, les séries temporelles testées peuvent être déclarées homogènes. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau ci-dessous :

| Station | Points de changement de type 1 |
|------------------------|--------------------------------|
| Foum Zaabel | ? 2008/01 |
| Erfoud | ? 2007/09 |
| Barage Hassan Addakhil | ? 2006/04 |
| Errachidia | Homogène |
| Foum Tillicht | Homogène |
| Zaouiat Sidi Hamza | Homogène |
| Ait Bouijane | Yes 2006/04 |
| Meroutcha | ? 2005/12 |
| Tadighoust | Yes 2006/04 |
| Amouguer Taghia | Homogène |
| Alnif | Homogène |
| Tazarine | Homogène |

Tableau 26 : Résultats du test d'homogénéité selon le test de pénalité de Wang et Feng

A l'exception du mois d'avril 2006 des stations Ait Bouijane et Tadighoust où des sauts significatifs sont constatés, certains sauts sont probablement non significatifs alors que les séries complètes des données sont homogènes.

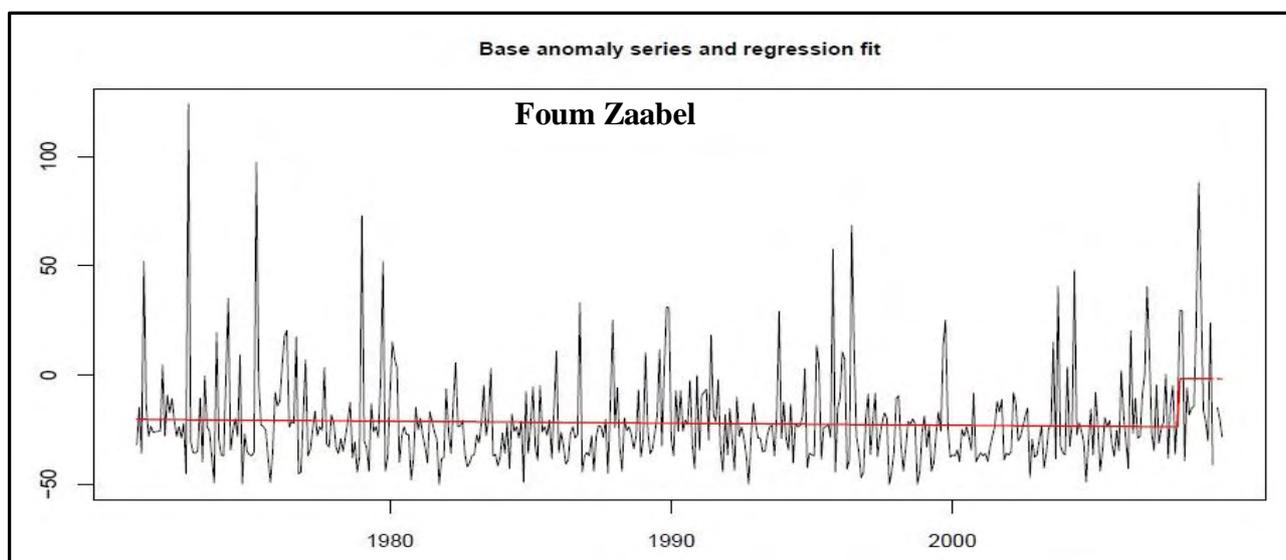


Figure 34: Exemple du résultat du test d'homogénéité de la station de Foum Zaabel

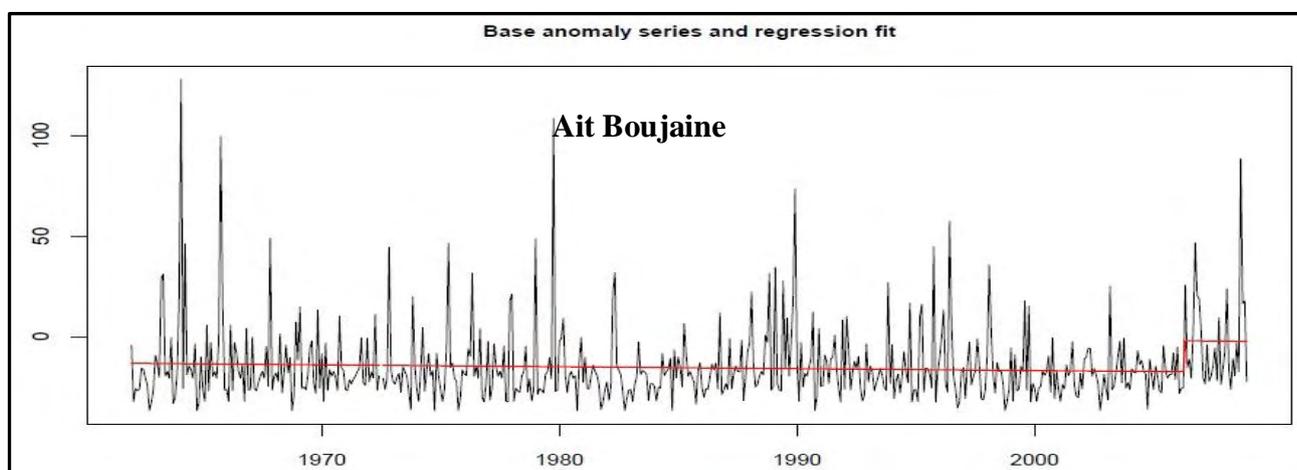


Figure 35: Exemple du résultat du test d'homogénéité de la station de d'Ait Bouijane

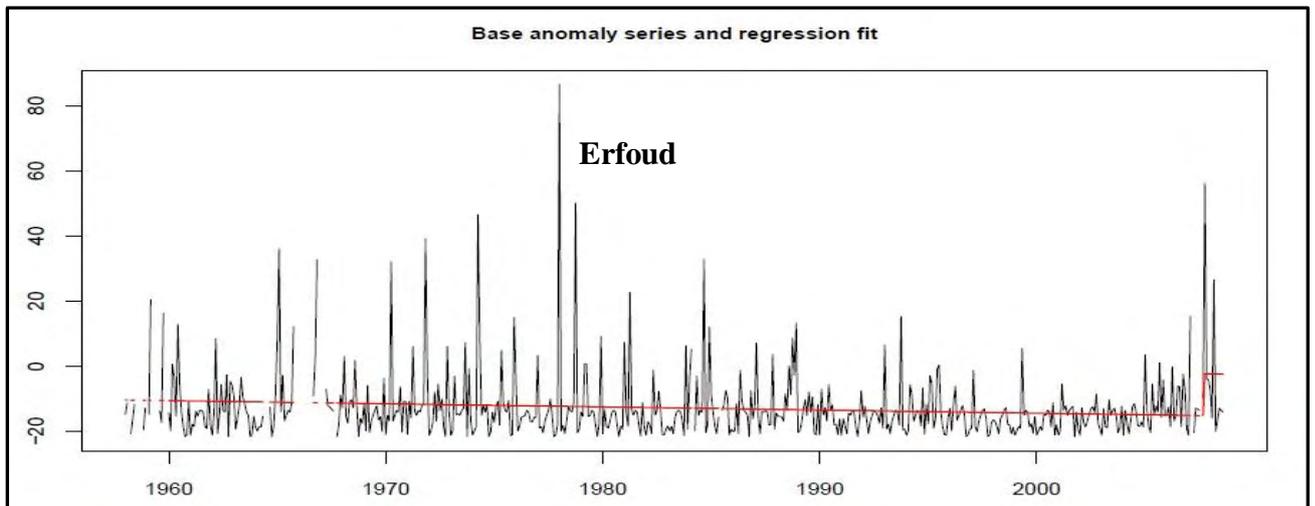


Figure 36: Exemple du résultat du test d'homogénéité de la station d'Erfoud

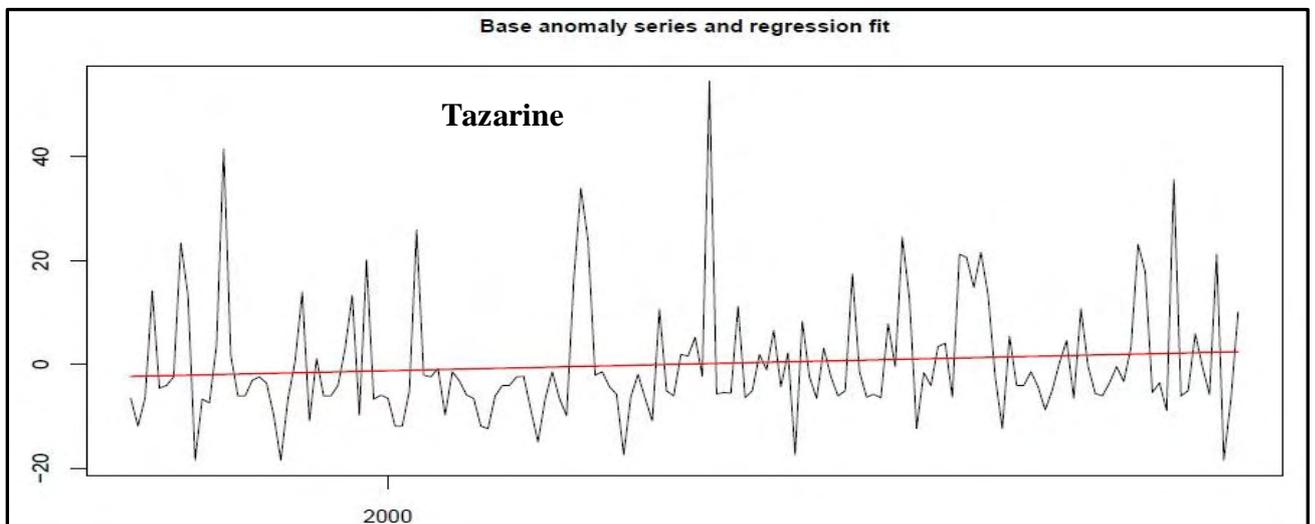


Figure 37: Exemple du résultat du test d'homogénéité de la station de Tazarine

3-1-3- Reconstitution des données manquantes par analyse en composantes principales (ACP)

3-1-3-1-Principe de l'ACP

L'une des contraintes majeures de l'analyse des séries climatiques temporelles est la présence de lacunes dans les données enregistrées. Pour pallier à ce problème, l'Analyse en Composantes Principales (ACP) est une méthode statistique qui s'est avérée efficace.

L'ACP s'intéresse à des matrices de données avec les variables quantitatives en k colonnes (ex. la pluviométrie à un pas de temps donné) et les individus en I lignes (ex. les années). Elle permet d'identifier les stations qui possèdent un régime pluviométrique sensiblement identique selon une procédure automatique. Dans notre cas, chaque individu "année" est observé dans un espace à k dimensions et chaque variable "**pluviométrie mensuelle d'une station donnée**" est observée dans un espace à I individus.

La représentation du nuage de points des individus dans un espace à K dimensions consiste à définir une notion de ressemblance entre individus grâce au théorème de Pythagore:

$$d^2(i, i') = \sum_{k=1}^K (x_{ik} - x'_{i'k})^2$$

Quant aux variables pluviométriques, elles sont dans un espace à I dimensions. En ACP, il est de coutume de représenter les variables selon un cercle de corrélation (figure). Le Cos de Θ_{kl} est une représentation géométrique du coefficient de corrélation entre les variables l et k .

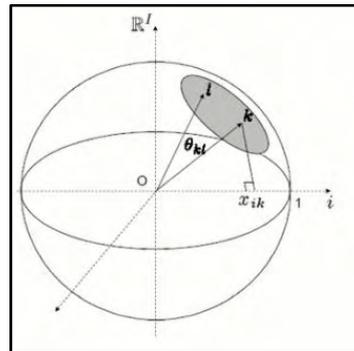


Figure 38: Cercle de corrélation entre les variables d'une matrice de données traitée par ACP

De même que pour les individus, l'ACP sur les variables va permettre de représenter le nuage des variables en cherchant des dimensions ou axes orthogonaux. Le premier axe (ou axe qui représente le mieux les variables) est celui qui maximise la somme des corrélations entre le facteur et chacune des variables. Donc le meilleur facteur est celui le mieux lié à l'ensemble des variables.

3-1-3-2- Gestion des données manquantes par ACP

On effectue tout d'abord une ACP sur un jeu de données incomplet. D'un point de vue géométrique, son principe consiste en une minimisation de l'erreur de reconstitution, par approximation de la matrice de données initiale par une matrice de rang inférieur. L'ACP utilisée pour la gestion des données manquantes correspond à une de moindres carrés pondérés. Ceci revient à minimiser les moindres carrés uniquement sur les données observées. Il existe plusieurs algorithmes de moindres carrés pondérés alternés (*Gabriel et Zamir, 1979*). C'est le cas de l'ACP itérative (*Kiers, 1997*). Il faut bien noter que le problème de cette méthode est une réduction de la variabilité dans les données reconstruites et une surestimation des données manquantes. La solution correspond donc à une ACP régularisée

qui améliore l'erreur de prédiction (Josse et al. 2009). La reconstitution des données manquantes a été effectuée sous R.

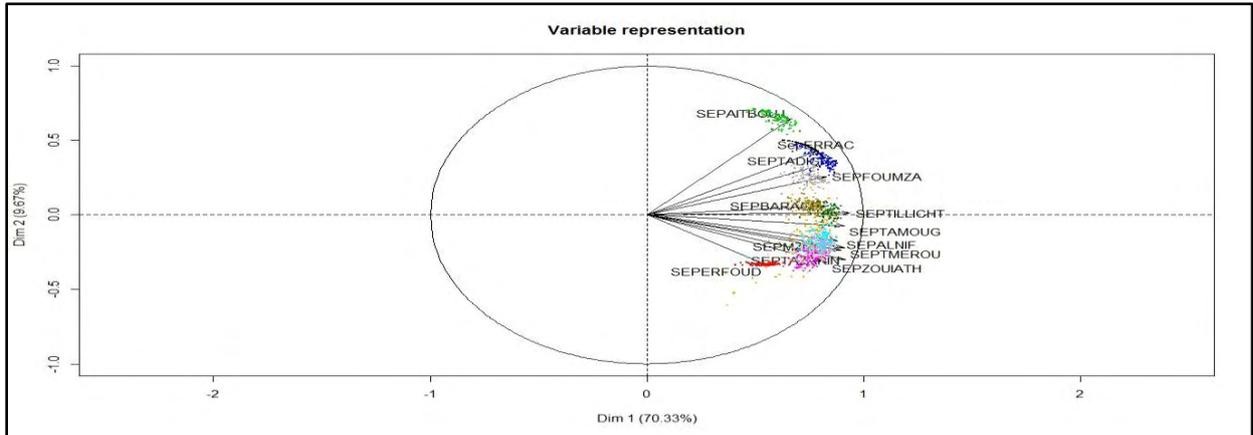


Figure 39: Exemple d'une ACP sur les données pluviométriques du mois de septembre avant la reconstitution des données manquantes

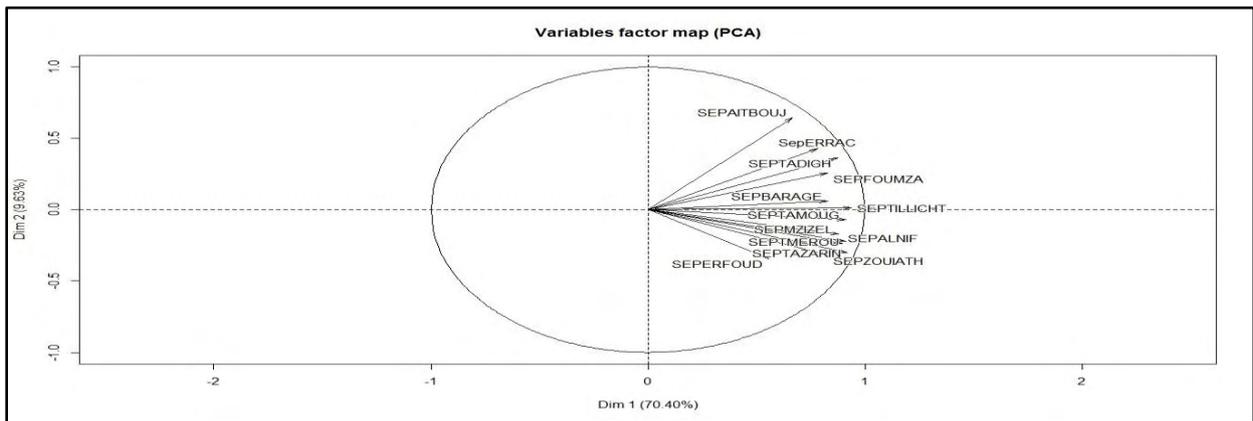


Figure 40: Exemple d'une ACP sur les données pluviométriques du mois de septembre après la reconstitution des données manquantes

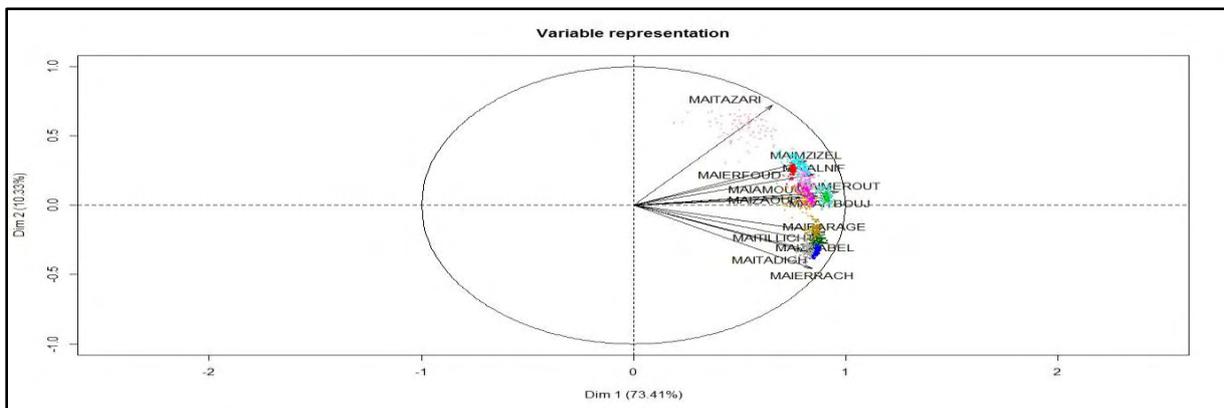


Figure 41: Exemple d'une ACP sur les données pluviométriques du mois de mai avant la reconstitution des données manquantes

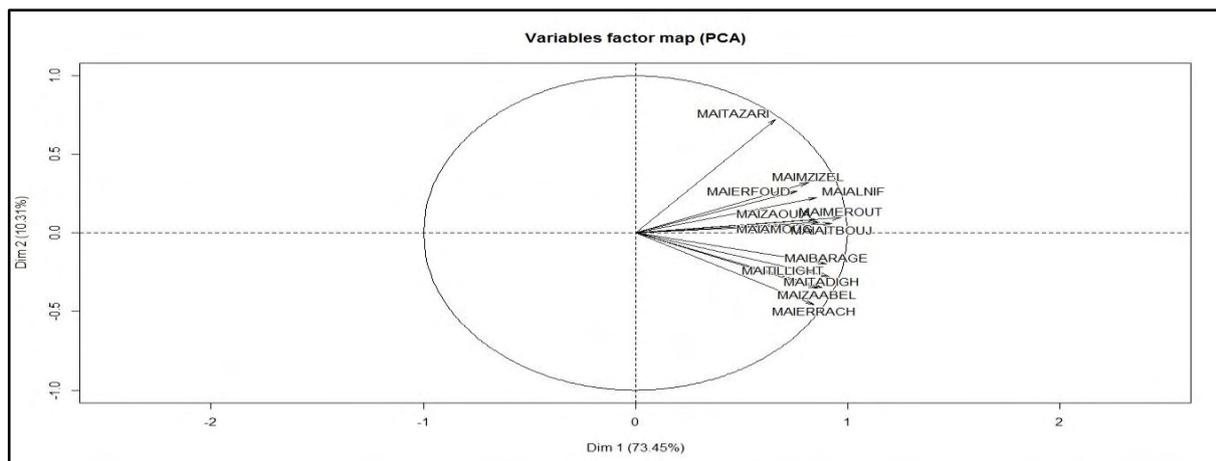


Figure 42: Exemple d'une ACP sur les données pluviométriques du mois de mai après la reconstitution des données manquantes

3-2- Les conditions dynamiques maîtrisant le climat du Sud-est marocain

La position latitudinale subtropicale conjuguée à une continentale enclavée de la zone d'étude forment une entité paysagère unique de transition entre la Méditerranée et le Grand Sahara. L'aridité marquante du bassin relève de deux éléments essentiels : une demande climatique, exprimée par une évapotranspiration potentielle, qui, en moyenne, excède l'offre en eau de pluie le long de l'année et une pluviométrie insuffisante et extrêmement variable. Les ressources en eau dépendent entièrement du réseau hydrographique superficiel qui est alimenté par des chutes de pluies et de neige du Haut Atlas Oriental.

Situé aux latitudes voisinant les 30 °N, le bassin versant de l'oued Daoura est soumis, en moyenne, à la branche descendante de la cellule septentrionale de Hadley. Cette subsidence est à l'origine d'une stabilité atmosphérique quasi-permanente et explique donc l'aridité du milieu. En effet, l'air équatorial ascendant subit une divergence au sommet de la troposphère et se dirige vers le nord et le sud de l'équateur. Le haut géopotential ainsi formé dirige un flux d'air vers les latitudes tropicales. Lors de son déplacement se refroidit progressivement et subit une déviation à cause de l'augmentation de la force de Coriolis. Son extrême déviation est située en moyenne aux latitudes 30° N et S. A ces latitudes, l'air devient suffisamment froid et lourd pour subir une subsidence. Celle-ci est l'origine d'un réchauffement adiabatique et d'un éloignement de l'air de son point de saturation, expliquant ainsi sa demande climatique importante en vapeur de l'eau. Cette subsidence est à l'origine de la formation de l'anticyclone dynamique des Açores dont la dorsale joue un rôle de barrière contre les infiltrations atmosphériques subpolaires.

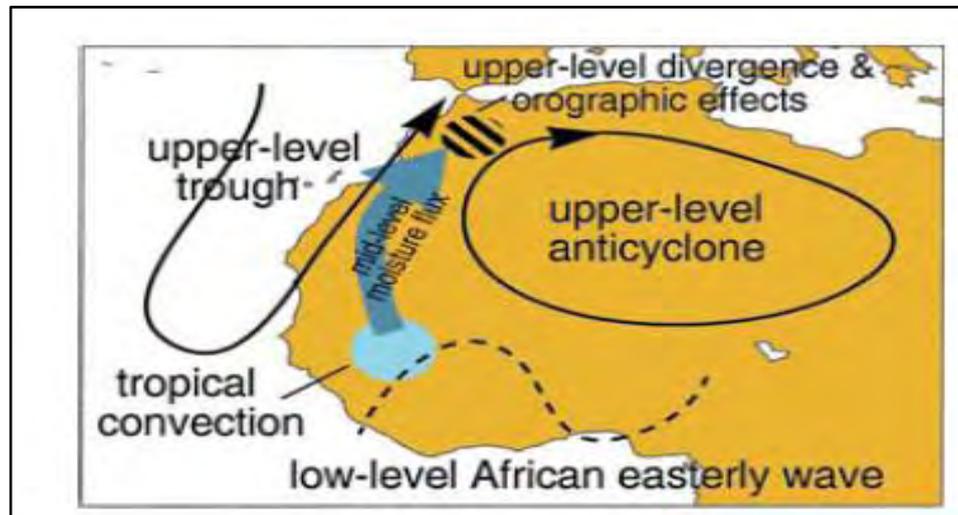
Cette situation atmosphérique moyenne, explicative de l'installation d'un climat aride et subdésertique au niveau de la zone d'étude, n'exclut par le fait que la zone d'étude subit des événements pluviométriques extrêmes qui sont à l'origine de crues importantes. C'est le cas de celle de 1965 qui a dévasté la vallée de Ziz et a poussé le gouvernement marocain à ériger le barrage de retenue Hassan Addakhil en 1971, à l'amont de la ville d'Errachidia. Ces crues sont aléatoires et sont généralement de deux types:

- les crues de montagnes de faible importance, liées à des averses localisées dans la zone amont et peuvent survenir dans les différents Oueds à n'importe quel moment ;
- les fortes crues, se produisant généralement en automne, sont dues à de fortes pluies de courtes durées et généralisées. Certaines plus longues, survenant au printemps, sont liées à la fonte des neiges et aux précipitations.

En s'intéressant aux coulées froides d'altitude ou bas géopotentiels, (*Knippertz, 2003*) a expliqué les situations dont dépendent les précipitations au sein de la zone d'étude. L'auteur montre que les précipitations tendent de tomber à l'est des coulées froides lorsqu'elles sont plus méridionales en atteignant le sud des îles Canaries ou le Sahara. L'auteur suppose le rôle de l'orographie. En effet, le Haut Atlas est trop élevé pour permettre aux flux perturbés de le traverser. Par conséquent, un flux d'air froid maritime à l'intérieur de la vallée en position sud-ouest au bord de l'Atlas subit une rotation cyclonique sur le flanc sud de l'Atlas en avant de la vallée qui est favorable au déclenchement des précipitations dans la région sud-est subdésertique du pays. L'auteur précise que la relation entre l'apparition des bas géopotentiels et la pluviométrie semble particulièrement forte ; près de 85% de la pluviométrie est reliée à des axes de vallées d'altitude dans une bande longitudinale relativement étroite entre 5 ° et 17,5 ° W.

Contrairement aux régions du nord et de l'ouest des montagnes de l'Atlas, où le climat est clairement dominé par des précipitations d'hiver, des stations situées au sud-est du pays reçoivent des précipitations importantes durant la saison sèche, allant du mois de mai au mois d'octobre. Comme cela a été décrit plus haut, ces événements pluviométriques sont souvent associés à la formation de convection humide profonde sur les montagnes du haut atlas (orages ou averses) qui se forment directement sous ou en avant de la vallée d'altitude (aux niveaux entre 5 and 12 km d'altitude) en s'approchant de la région de l'Atlantique (*Born et al. 2010*). Dans plusieurs cas, caractérisés par des pluies significatives de fin d'été/début d'automne, la saison des pluies de la mousson atteint les sommets en cette période (*Born et al. 2010*).

Knippertz et al. (2003) et montrent que le transport de l'humidité du nord-ouest africain vers le nord est souvent causé par des interactions entre des creux en déplacement vers l'ouest des ondes d'est africaines humides dans la basse troposphère tropicale de l'Afrique occidentale et les crêtes en déplacement vers l'est (ou stationnaire) dans la haute troposphère des régions subtropicales (figure 43). Nicholson (1981) a déjà suggéré cette théorie.

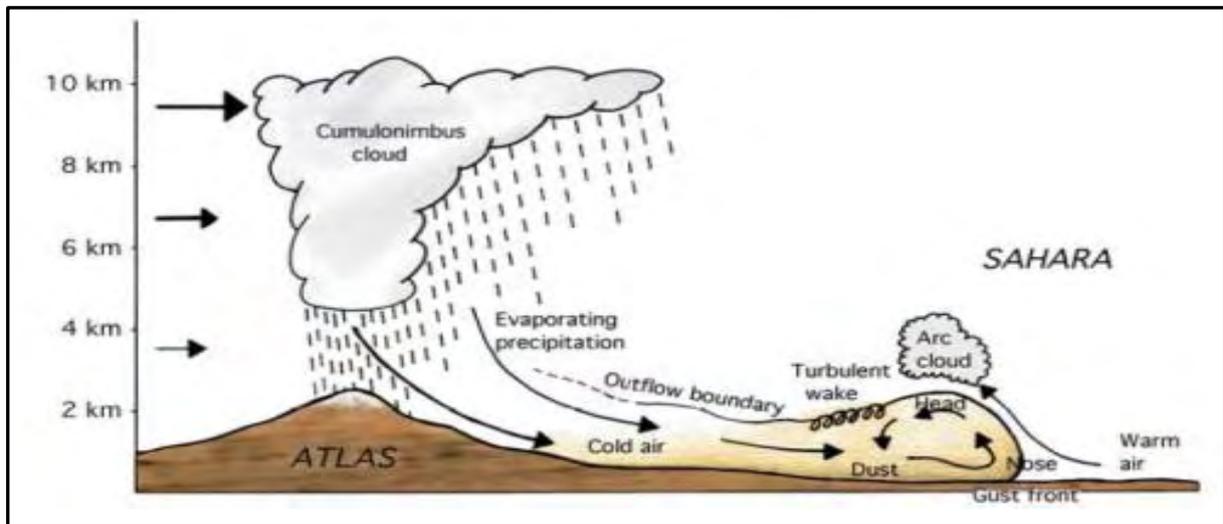


(Source : Knippertz et al. 2003)

Figure 43: Représentation schématique du transport d'humidité tropicale vers le nord-ouest africain

Des investigations sur des cas isolés suggèrent que la convection est déclenchée par une convergence à proximité des surfaces surchauffées des montagnes de l'Atlas au cours de l'après-midi, qui est soutenue par une ascendance dynamique et une faible stabilité verticale associée à la vallée d'altitude (Born et al. 2010). En effet, pendant la saison chaude, la couche limite planétaire (PBL) sur la partie saharienne du Maroc est généralement très profonde et bien mélangée pendant les heures de l'après-midi (Knippertz et al. 2009). Les températures élevées près de la surface et une faible humidité relative offrent un énorme potentiel pour l'évaporation de précipitations. Dans des situations avec cisaillement vertical du vent d'ouest ou du nord, les hydrométéores formés dans la convection profonde sur la crête des montagnes de l'Atlas sont soufflés vers le côté saharienne des montagnes, où une grande partie des précipitations associée s'évapore. La stratification dans la PBL permet à l'air refroidi par évaporation d'accélérer sa descente vers la surface, où la colonne d'air froid se répand horizontalement comme un courant avec un bord d'attaque aigu. Ce passage d'air à l'intérieur des terres sahariennes est accompagné de changements dans la direction du vent, d'augmentations du point de rosée, de la vitesse et de la pression du vent, et de la diminution de la température et de la visibilité en raison de la

présence de poussières fraîchement mobilisées (*Knippertz et al. 2007; Emmel et al. 2009*). Ces déplacements d'air froid peuvent atteindre des extensions horizontales de plusieurs centaines de kilomètres et sont confrontés à de l'air chaud saharien en prévenance du sud. Cette confrontations est à l'origine de la formation d'un front orageux (figure 44).



(Source : *Knippertz et al. 2007*)

Figure 44: Représentation schématique d'une formation convective sur le flanc sud du Haut Atlas en été

En réalité, les massifs du Haut-Atlas et de l'Anti-Atlas forment une barrière naturelle pour les influences tempérées d'une part, et, d'autre part, la zone d'étude est ouverte aux pénétrations des courants d'airs chauds du Sud et Sud-est.

Le BV de l'oued Daoura et ses SBVs se caractérisent par des précipitations faibles et irrégulières, les températures sont très élevées, l'évapotranspiration est très forte, les vents sont très violents et chauds et l'humidité relative est très faible. Ces mécanismes climatiques sévères favorisent une saison sèche extrêmement aride. Ces paramètres créent un climat subdésertique chaud et sec de type continental.

3-3-Variabilité spatiotemporelle des températures

Afin de comprendre les mécanismes spécifiques de l'hydrologie des milieux arides du BV de l'oued Daoura, il est donc obligatoire de faire une petite synthèse du régime thermique de la répartition spatiale des températures (annuelles, saisonnières et mensuelles) dans la zone étudiée.

L'étude des températures se base sur les données enregistrées dans neuf stations thermométriques qui sont : Ait Boujaine, Tadighoust, Foum Zaabel, Amouguer, barrage Hassan Addakhil, Erfoud, Alnif, Taouz et Tazarine.

3-3-1 Variabilité interannuelle des températures moyennes annuelles

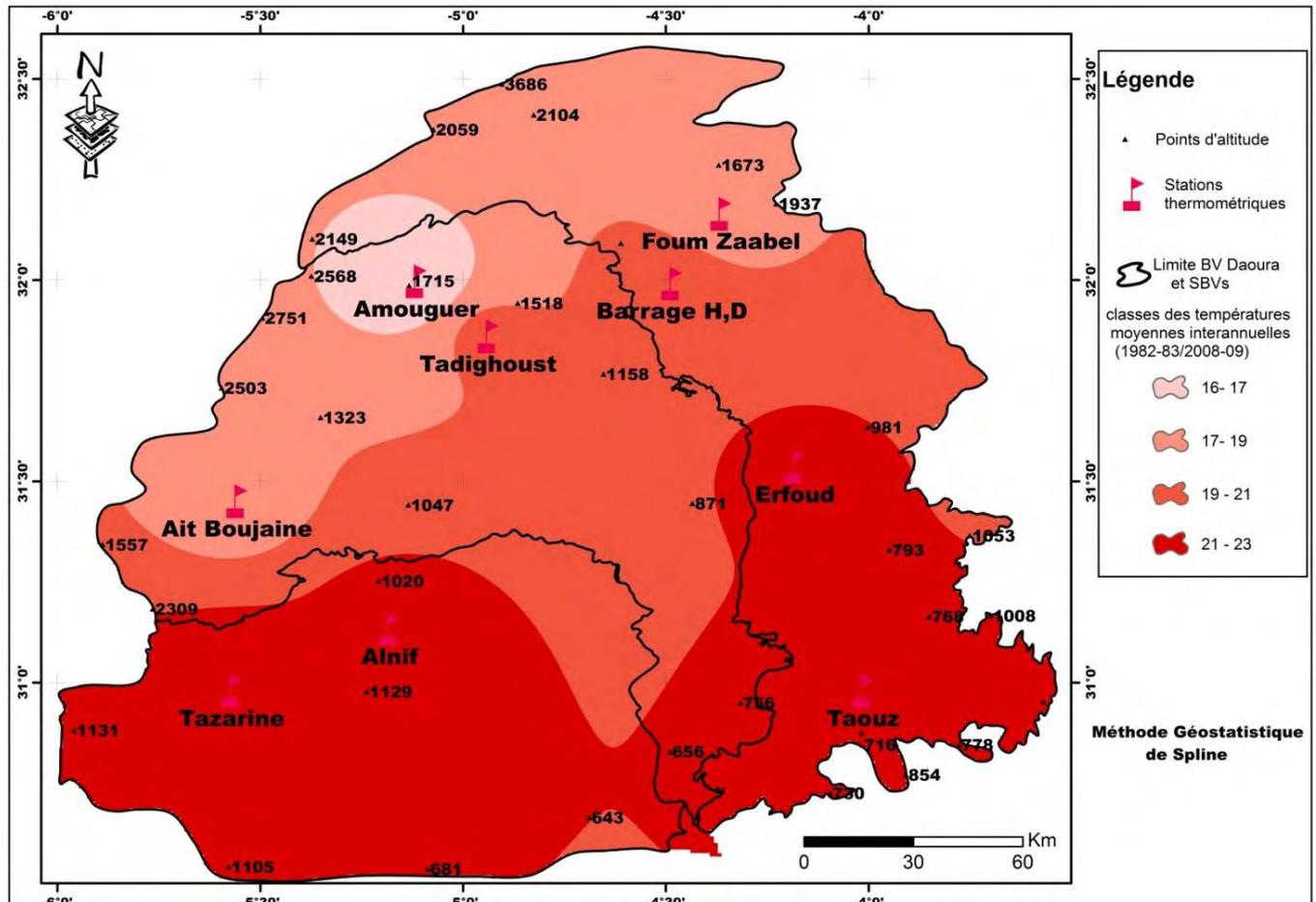
Les températures moyennes annuelles observées dans les neuf stations réparties dans la zone d'étude (tableau 27 et figure 45) varient du Nord au Sud et de l'Ouest à l'Est. En réalité la station d'Amouguer (16°C), qui est située au Nord-ouest du BV du Rhériss, connaît les moyennes les plus basses. Les stations d'Ait Boujaine, Foum Zaabel, Tadighoust et barrage Hassan Addakhil enregistrent des valeurs intermédiaires avec respectivement 18.3 °C, 18.5 °C, 19.7 °C et 19.9 °C, nous remarquons également que ces dernières stations (Tadighoust et B. H. Addakhil) se localisent sur le piémont Sud-Atlasique. Les autres stations à savoir Tazarine (22.5 °C), Alnif (21.6 °C) et Erfoud (21.4 °C) se situent dans les isothermes les plus chauds de la zone d'étude. La station de Tazarine connaît la température la plus haute et la plus importante du BV de l'oued Daoura et se trouve dans les versants Sud-ouest de Jbel Sargho au sein du bassin du Maider.

| BV | Stations thermométriques | T.M.A* | Ecart type | D1 | Q1 | Q2 | Q3 | D9 | CV (%) |
|---------|--------------------------|--------|------------|------|------|------|------|------|--------|
| Ziz | Foum Zaabel | 18,5 | 0,8 | 17,4 | 18,1 | 18,7 | 19,0 | 19,5 | 4 |
| | B H Addakhil | 19,9 | 1,3 | 18,4 | 18,8 | 20 | 21 | 21,8 | 7 |
| | Erfoud | 21,4 | 0,65 | 20,5 | 21,1 | 21,4 | 21,7 | 22,1 | 3 |
| Rhériss | Amouguer | 16 | 1,2 | 14,5 | 15,2 | 15,6 | 16,6 | 17,3 | 8 |
| | Tadighoust | 19,8 | 0,7 | 18,8 | 19,2 | 19,9 | 20,2 | 20,8 | 3 |
| | Ait Boujaine | 18,3 | 0,8 | 17,2 | 17,7 | 18,4 | 18,9 | 19,4 | 4 |
| Maider | Alnif | 21,8 | 0,52 | 20,9 | 21,4 | 21,9 | 22,2 | 22,5 | 2 |
| | Tazarine | 22,5 | 0,4 | 21,9 | 22,3 | 22,5 | 22,7 | 22,8 | 2 |

(Source des données brutes : AHGZR ; 2014)

TMA* : Températures moyennes annuelles, D1 et D9 : Déciles 10% et 90%, Q1, Q2 et Q3 : Quartile 25%, 50% et 75% ; CV : coefficient de variation en %.

Tableau 27 : Températures moyennes annuelles aux différentes stations du BV de l'oued Daoura et ses SBVs en °C (1982-83/2008-09)



(Source des données brutes : AHGZR ; 2014)

Figure 45 : Carte des isothermes moyennes annuelles en °C (1982-83/2008-09) du BV de l'oued Daoura et ses SBVs.

D'après la carte ci-dessus, nous remarquons que la zone d'étude s'étend entre les isothermes 16 °C et 24 °C. Les températures moyennes interannuelles sont plus basses dans le domaine Atlasique, intermédiaire en piémonts et plus hautes des zones de plaines.

En effet, les températures moyennes annuelles augmentent du Nord (Haut-Atlas) au Sud, de même ces valeurs enregistrées dans les différentes stations sont réparties au sein du BV de l'oued Daoura. Ce dernier qui se caractérise par une grande différence thermique d'un bassin à l'autre, par exemple le bassin du Maider, a enregistré les moyennes plus hautes que dans les bassins du Ziz et du Rhériss. Cette température, élevée, accélère le volume d'eau évaporé, l'évapotranspiration arrive quelques fois à 4000 mm/an à la station de Taouz.

3-3-2- Variabilité interannuelle des températures moyennes maximales

Les moyennes maximales des températures sont enregistrées pendant le mois de juillet. La température maximale la plus élevée (33.5°C) est enregistrée à la station de Tazarine, la valeur la plus basse est observée dans la station d'Amouguer avec 27.4 °C. Les amplitudes thermiques moyennes connaissent aussi une variabilité spatiale irrégulière entre 19.5 °C à la station de Foum Zaabel et 23.1 °C dans les stations Erfoud et Tazarine.

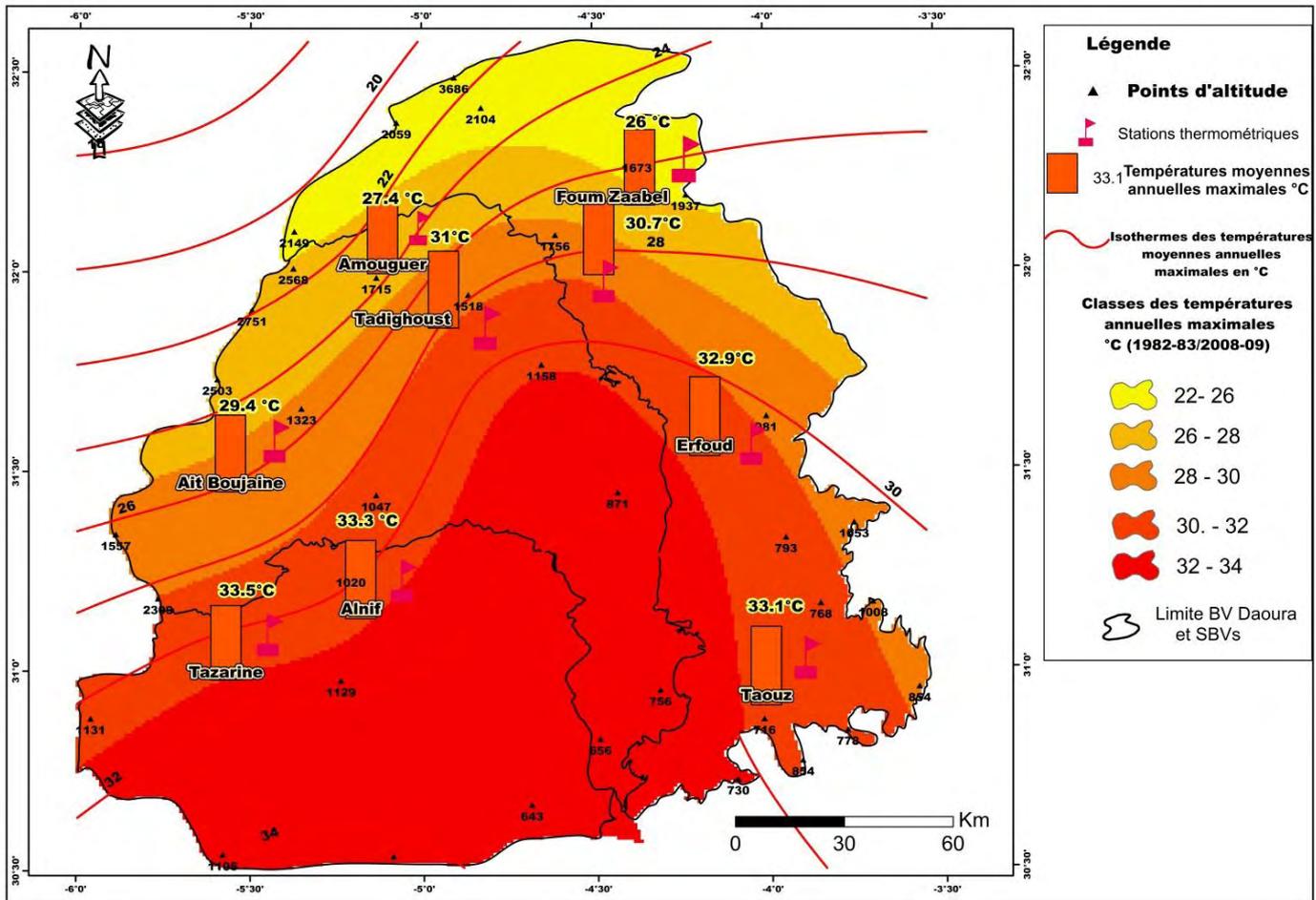
| BV | Stations thermométriques | T.M.M* | Ecart type | D1 | Q1 | Q2 | Q3 | D9 | CV (%) |
|---------|--------------------------|--------|------------|------|------|------|------|------|--------|
| Ziz | Foum Zaabel | 26 | 1,0 | 28,1 | 29,0 | 29,8 | 30,1 | 30,9 | 3 |
| | B. H. Addakhil | 30,7 | 1,1 | 28,1 | 30,3 | 31 | 31,5 | 32 | 4 |
| | Erfoud | 32,9 | 0,8 | 31,5 | 32,5 | 33,1 | 33,6 | 33,8 | 2 |
| Rhériss | Amouguer | 27,4 | 1,7 | 25,3 | 26,2 | 27,3 | 28,2 | 30,5 | 6 |
| | Tadighoust | 31 | 0,9 | 29,8 | 30,6 | 31 | 31,6 | 32,5 | 3 |
| | Ait Boujaine | 29,4 | 0,7 | 28,5 | 28,9 | 29,4 | 30 | 30,4 | 2 |
| Maider | Alnif | 33,3 | 0,7 | 31,9 | 33 | 33,4 | 33,6 | 34,2 | 2 |
| | Tazarine | 33,5 | 0,6 | 32,9 | 33,3 | 33,5 | 33,9 | 34,1 | 2 |

(Source des données brutes : AHGZR ; 2014)

TMM* : Températures moyennes maximales, D1 et D9 : Déciles 10% et 90%, Q1, Q2 et Q3 :

Quartile 25%, 50% et 75% ; CV : coefficient de variation en %.

Tableau 28 : Températures moyennes annuelles maximales aux différentes stations du BV de l'oued Daoura et ses SBVs en °C (1982-83/2008-09)



(Source des données brutes : AHGZR ; 2014)

Figure 46: Classes des températures moyennes maximales des stations thermométriques du BV de l'Oued Daoura (1982-83/2007-08)

3-3-3-Variabilité interannuelle des températures moyennes minimales

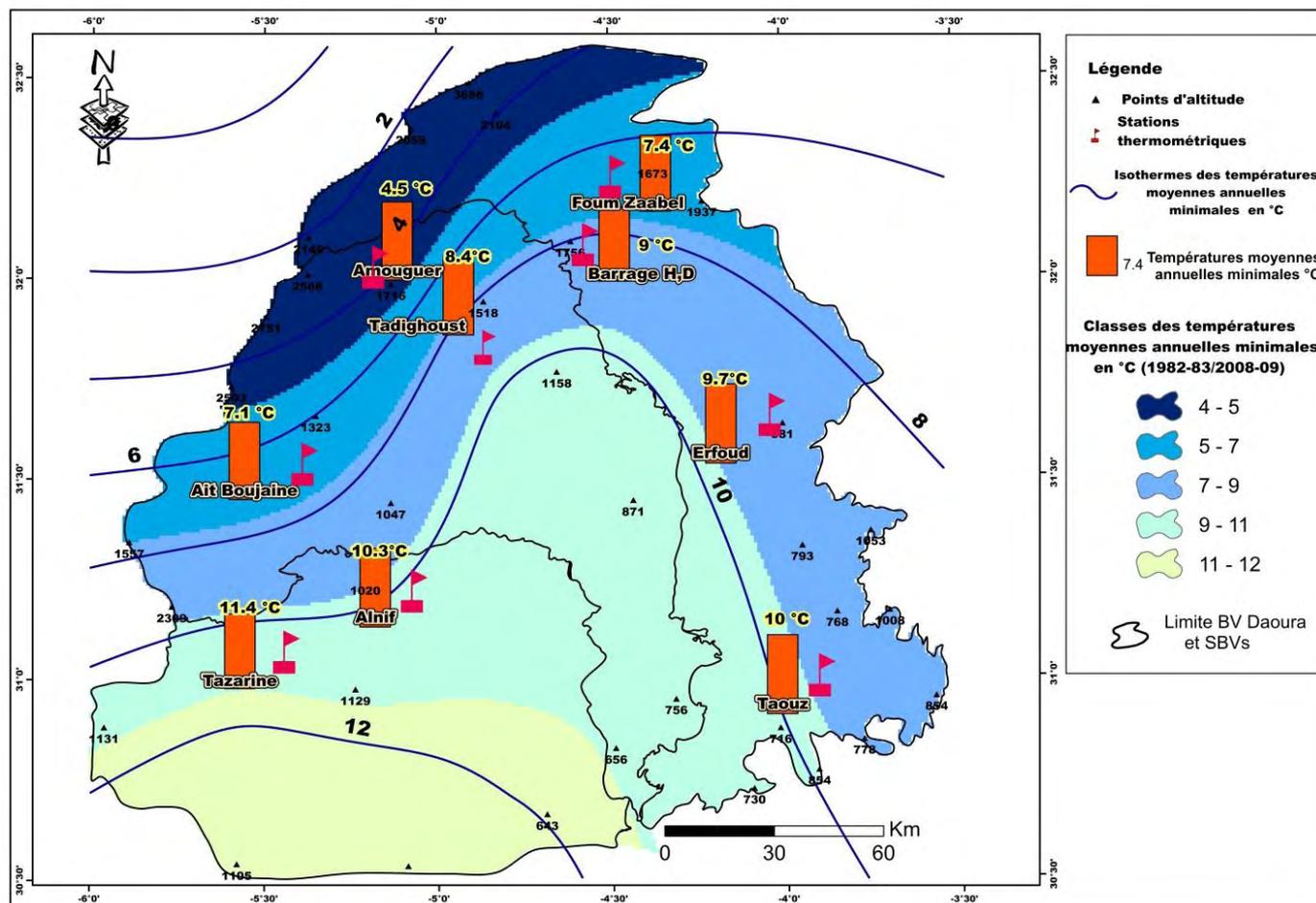
Sur le volet des températures (moyennes minimales) enregistrées durant le mois le plus froid de janvier. On a trouvé que les valeurs observées connaissent une variabilité spatiale irrégulière entre l'amont et l'aval du BV de l'Oued Daoura. La variation de ces valeurs est marquée par la diminution à deux directions : une direction Nord-atlasique qui fait apparaître l'influence orographique du Haut-Atlas, et l'autre Ouest-est qui évoque l'impact du gradient longitudinal. D'après le tableau ci-dessous, on remarque que la station d'Amouguer qui enregistre la moyenne minimale la plus basse avec 4.5°C, suivie par les stations d'Ait Boujaine (7.1 °C), Foug Zaabel (7.4 °C), Tadighoust (8.4 °C), barrage Hassan Addakhil (9.1 °C), Erfoud (9.8 °C), Taouz (10 °C) et dernièrement la station de Tazarine avec 11.4 °C comme la plus haute moyenne des températures minimales.

| BV | Stations thermométriques | T.M.m* | Ecart type | D1 | Q1 | Q2 | Q3 | D9 | CV (%) |
|---------|--------------------------|--------|------------|------|------|------|------|------|--------|
| Ziz | Foum Zaabel | 7,4 | 0,9 | 5,6 | 7,1 | 7,4 | 8,1 | 8,4 | 12 |
| | B H Addakhil | 9 | 2,3 | 5,7 | 7,3 | 9,3 | 11,1 | 12,2 | 26 |
| | Erfoud | 9,7 | 0,7 | 8,9 | 9,4 | 9,7 | 10,2 | 11 | 7 |
| Rhériss | Amouguer | 4,5 | 1,4 | 3,3 | 3,7 | 4 | 4,9 | 7,7 | 32 |
| | Tadighoust | 8,4 | 0,8 | 7,3 | 7,9 | 8,5 | 8,7 | 9,8 | 10 |
| | Ait Boujaine | 7,1 | 1,2 | 5,3 | 6,5 | 7,1 | 7,7 | 9,6 | 17 |
| Maider | Alnif | 10,3 | 0,6 | 9,5 | 9,9 | 10,2 | 10,6 | 11,3 | 6 |
| | Tazarine | 11,4 | 0,5 | 10,8 | 11,1 | 11,5 | 11,7 | 11,8 | 4 |

(Source des données brutes : AHGZR ; 2014)

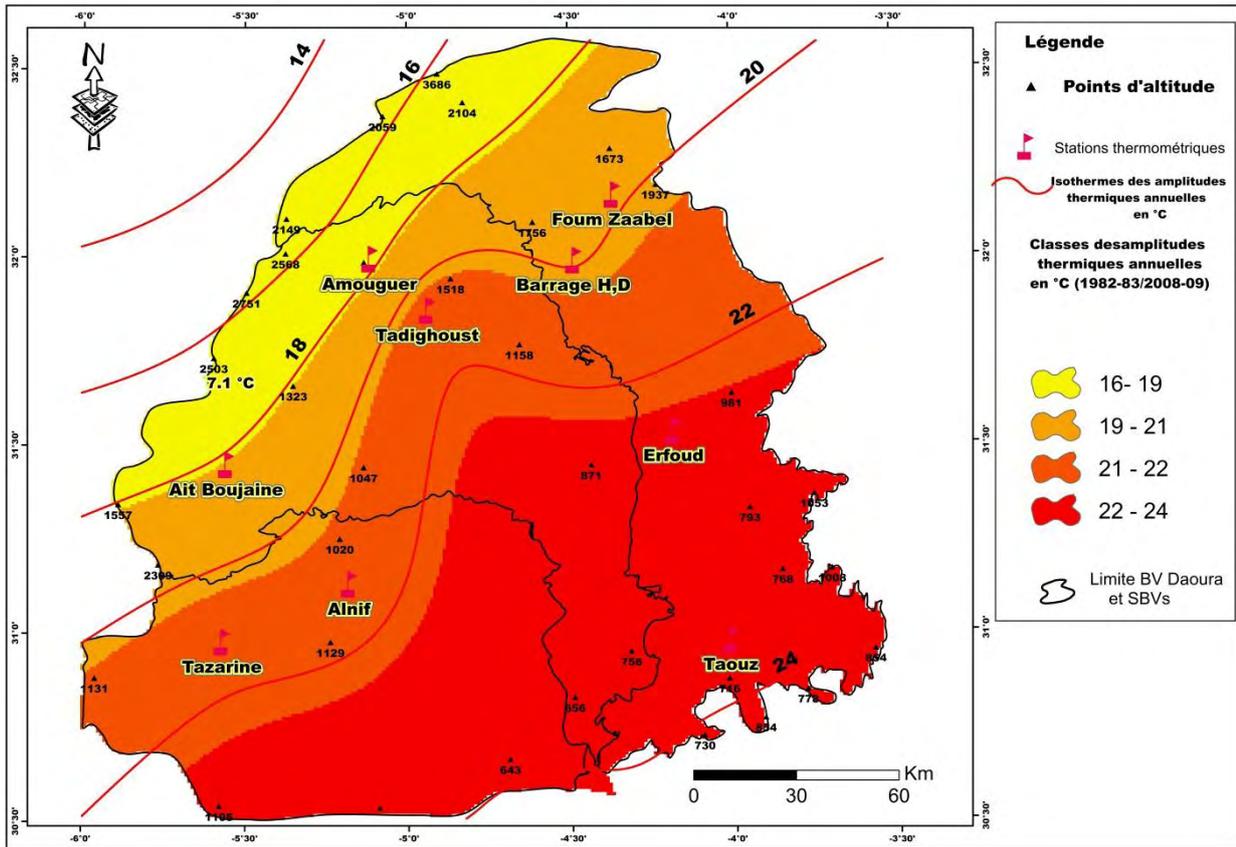
T.M.m* : Températures moyennes minimales, D1 et D9 : Déciles 10% et 90%, Q1, Q2 et Q3 : Quartile 25%, 50% et 75% ; CV : coefficient de variation en %.

Tableau 29 : Températures moyennes annuelles minimales aux différentes stations du BV de l'oued Daoura et ses SBVs en °C (1982-83/2008-09)



(Source des données brutes : AHGZR ; 2014)

Figure 47: Classes des températures moyennes minimales des stations thermométriques du BV de l'oued Daoura (1982-83/2007-08)



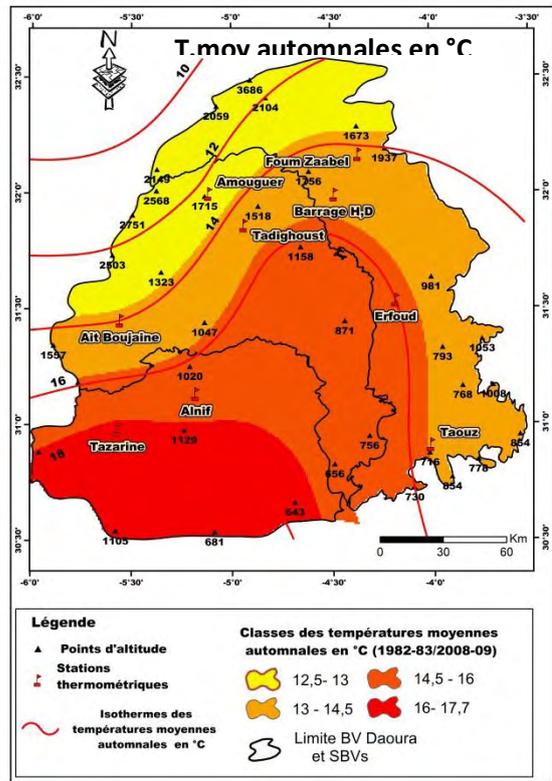
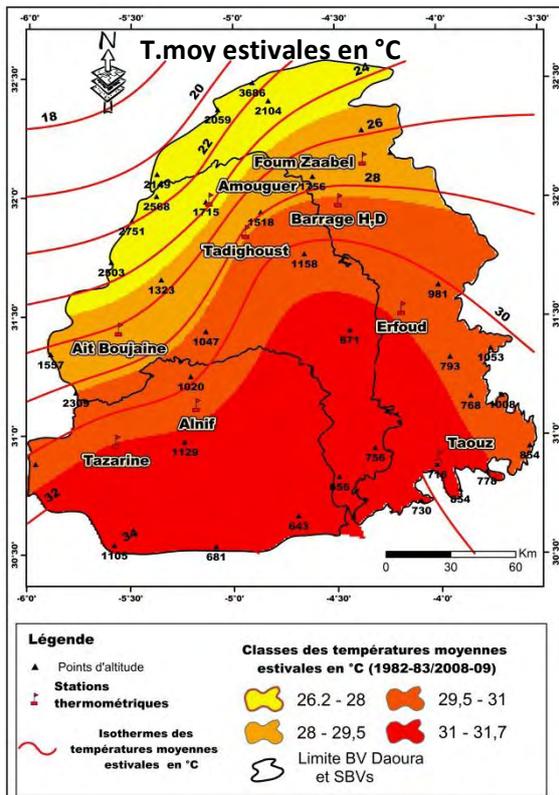
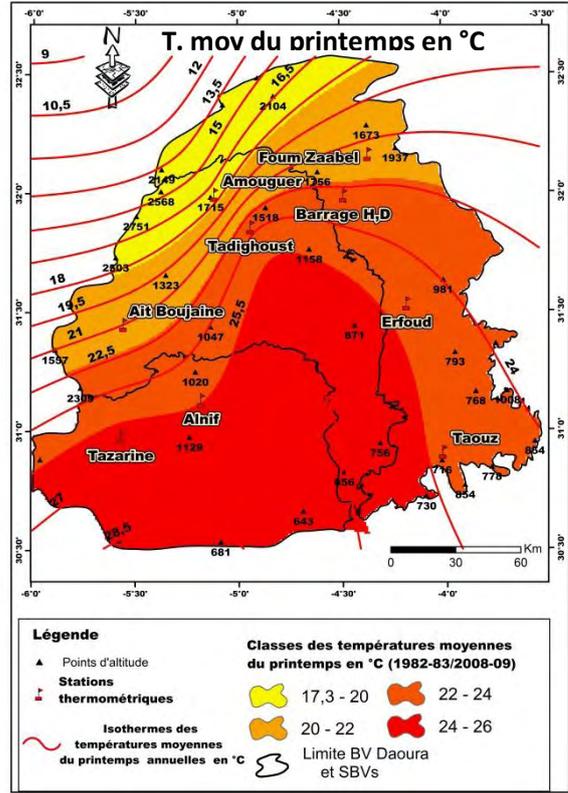
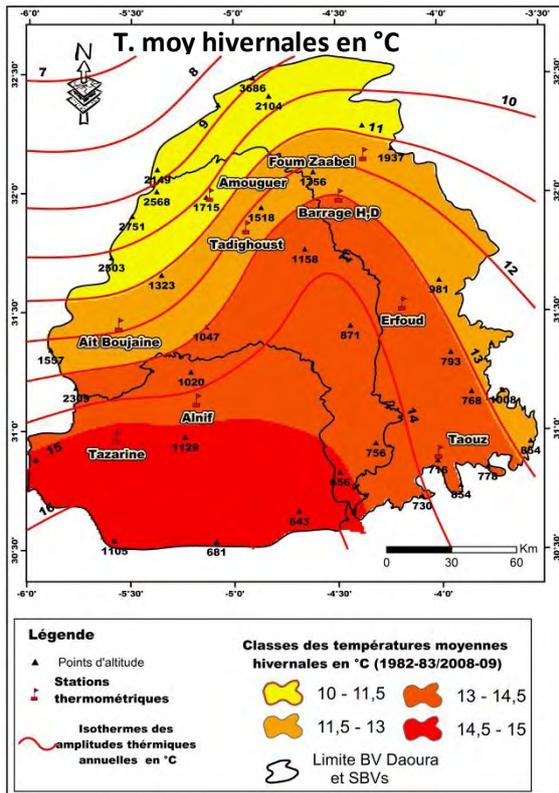
(Source des données brutes : AHGZR ; 2014)

Figure 48 : Amplitude thermique annuelle des températures en °C (1982-83/2007-08)

En parallèle à cette différence spatiale des températures moyennes minimales et maximales s’ajoute une irrégularité temporelle bien soulignée. En effet, l’amplitude thermique annuelle des températures (figure 48), varie entre 16 et 19 °C au nord et 22 et 24 °C au sud. Donc, la variation spatiale des amplitudes thermiques suit généralement le gradient nord-sud. Toutefois, ces valeurs font apparaître l’influence du contexte topographique local (site, altitude, exposition,...) propre à chaque station thermométrique. Il est certain que l’augmentation de l’amplitude thermique annuelle du sud vers le nord a eu un rôle très influent dans l’accroissement de l’intensité de l’étiage des oueds du BV de l’oued Daoura, notamment dans la partie aval.

3-3-4- Variabilité des températures saisonnières

Les températures moyennes saisonnières influent sur le fonctionnement hydrologique d’un bassin versant par les phénomènes d’évaporation et d’évapotranspiration, notamment pendant la saison très chaude (l’été). Les valeurs sont inégalement réparties durant l’année et varient d’une saison à l’autre (figure 49).



(Source des données brutes : AHGZR ; 2014)

Figure 49: Spatalisation des températures moyennes saisonnières selon la méthode de Spline (1982-83/2007-08) aux stations pluviométriques du BV de l'oued Daoura et ses SBVs.

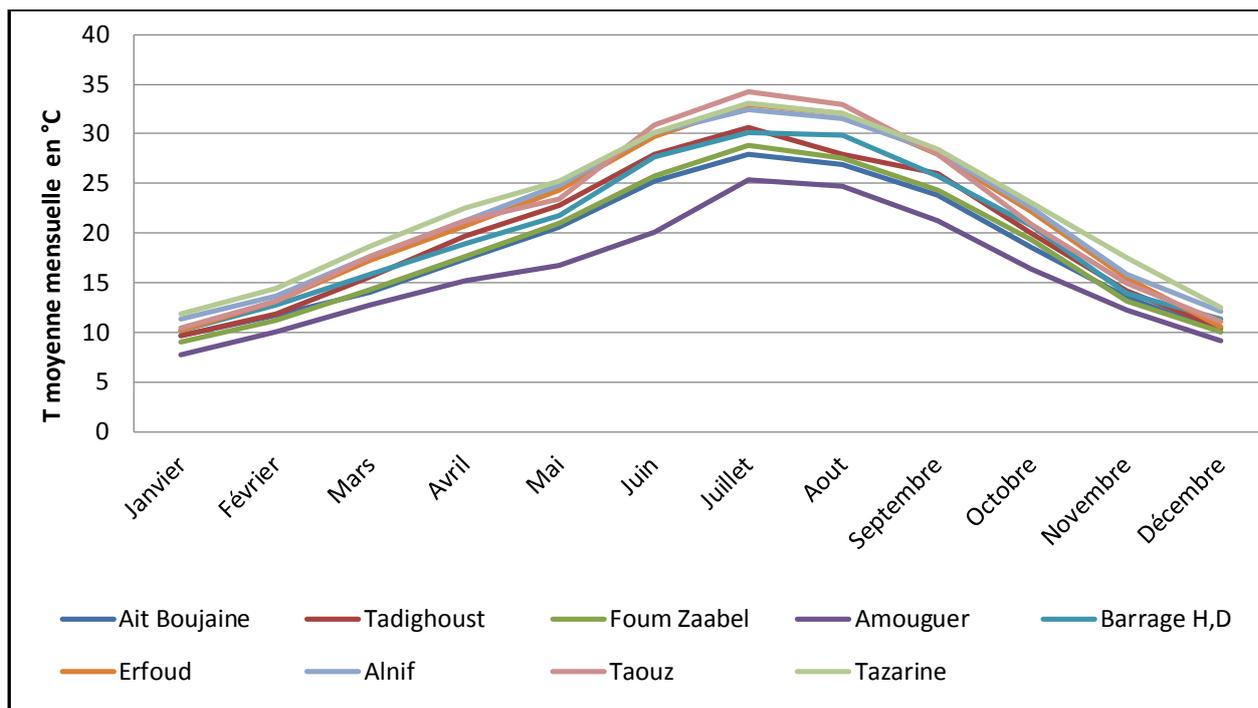
D'après les cartes illustrées ci-dessus qui concernent les variations thermiques saisonnières, nous notons les constats suivants :

- ❖ Les températures hivernales : elles atteignent des valeurs minimales extrêmes pendant l'hiver. Janvier est le mois le plus froid de l'année, où les maxima et les minima atteignent respectivement 7.1 °C et -1.2 °C à Ait Boujaine, 9.1 °C et 0.8 °C à barrage Hassan Addakhil et 9.8 °C et -1.1 °C à Erfoud.
- ❖ Les températures printanières : elles sont plus ou moins élevées. les températures maximales montrent qu'un réchauffement accéléré s'est produit. Les maxima dépassent 39.8 °C dès le mois de mai à la station d'Erfoud, alors que l'augmentation des températures minimales reste modérée.
- ❖ Les températures estivales : l'été est la saison la plus critique pour les débits comme pour la formation végétale au sein des oasis. Juillet est considéré comme le mois le plus chaud dans toutes les stations thermométriques du BV de l'oued Daoura.
- ❖ Les températures automnales : pendant cette saison la diminution des températures est très marquée. Les températures sont très variables (12.5 °C à Amouguer, 14.2 °C à Foum Zaabel et 17.7 °C à Tazarine).

On présume donc que, les valeurs des températures saisonnières dans les stations étudiées montrent une variation spatiale très marquée, par un rythme croissant du Nord vers le Sud. Les saisons printanière et estivale constituent les périodes de l'année les plus critiques, au cours desquelles les phénomènes hydrologiques extrêmes (crues et étiages) affectent le BV de l'oued Daoura.

3-3-5- Variabilité des températures mensuelles

Les températures mensuelles sont très variables dans toutes les stations observées. Les principaux résultats des neuf stations thermométriques disponibles pour la série (1982-83/2008-09) sont présentés dans la figure ci-après :



(Source des données brutes : AHGZR ; 2014)

Figure 50 : Températures moyennes mensuelles interannuelles en °C (1982-83/2008-09)

Ces valeurs, représentées dans un graphique (Figure 50), montrent que les moyennes mensuelles des minima et des maxima montrent que le mois le plus froid est généralement janvier et le plus chaud est juillet. Le nombre des mois de gelée, par an, varie d'une station à l'autre. Il est de l'ordre de 3 mois/an à Amouguer, de 2 mois/an à Foum Zaabel et de 1 mois/an à Alnif localisée au Sud-ouest de la zone d'étude, alors que, les mois les plus gelés sont les mois de décembre, janvier et février qui varient du Nord au Sud du BV de l'oued Daoura.

En déduit que, les températures moyennes mensuelles interannuelles connaissent une existence de deux saisons thermiques nuancées : une période chaude qui dure de mai à octobre. Cette saison englobe les mois où les valeurs dépassent la moyenne générale mensuelle et une deuxième saison moins chaude fait apparaître un creux (figure 50) qui s'étale sur six mois de novembre à avril. L'amplitude maximale des températures moyennes mensuelles s'observe dans toutes les stations entre le mois de janvier et le mois de juillet.

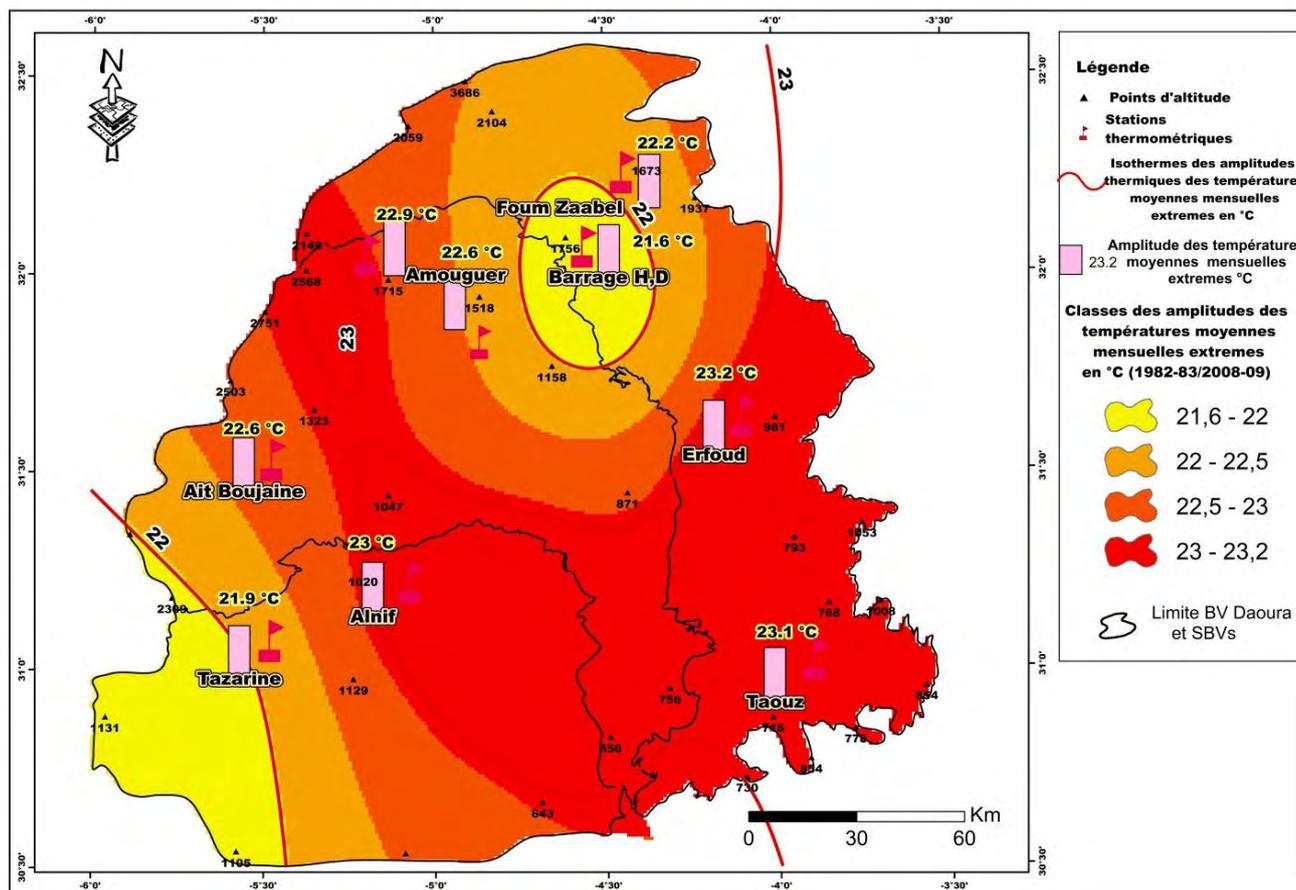
En parallèle, les températures minimales sont observées dans toutes les stations au cours du mois de janvier (Foum Zaabel : -2.3 °C ; B.H. Addakhil : 0.8°C ; Erfoud : -1.1 °C ; Taouz : -1.5°C ; Amouguer : -3.2°C ; Ait Boujaine : -3.2°C ; Tadighoust : -1.6 °C ; Alnif : -0.5°C et Tazarine avec 0.8°C. En effet, les températures moyennes maximales enregistrent leur maximum durant le mois de juillet. Alors que la station de Taouz qui est la plus chaude avec 45.6 °C situé

dans la partie aval du BV de l'oued Ziz. La répartition spatiale des amplitudes thermiques des températures mensuelles extrêmes varie d'une station à l'autre, les amplitudes thermiques varient entre 21.6 °C dans la station de B. H. Addakhil et 23.2 °C dans la station d'Erfoud. La variabilité spatiale de ces moyennes (amplitudes thermiques) varie dans le même sens comme la variabilité des températures moyennes.

3-3-6- Température moyennes mensuelles extrêmes

Les températures minimales sont enregistrées dans toutes les stations au cours du mois de janvier. Alors que les maximums des températures minimales sont observés au cours du mois de juillet. Pour les températures maximales, elles sont dans le même sens que les températures minimales.

La figure ci-dessous, présente les températures moyennes extrêmes mensuelles (1982-83/2008-09).



(Source des données brutes : AHGZR ; 2014)

Figure 51 : Ecart des moyennes de températures extrêmes du BV de l'oued Daoura et ses SBVs (Période : 1982-83/2008-09)

L'importance de ces amplitudes nous montre la continentalité du climat du BV de l'oued Daoura et ses SBVs. Les températures moyennes, accusent une variabilité dans le temps, mais

dans l'espace entre l'amont et l'aval de la zone d'étude. Il faut noter aussi que la température dépasse quelques fois 45 °C dans la plaine de Tafilalet et son environnement. La température très élevée peut avoir des impacts négatifs sur la vie et sur le territoire oasien qui est influencé par l'augmentation des quantités d'eau évaporée et leur impact sur l'agriculture vivrière de la population de Tafilalet. Cette situation critique accélère la progression de l'aridité plus au Nord de la zone d'étude.

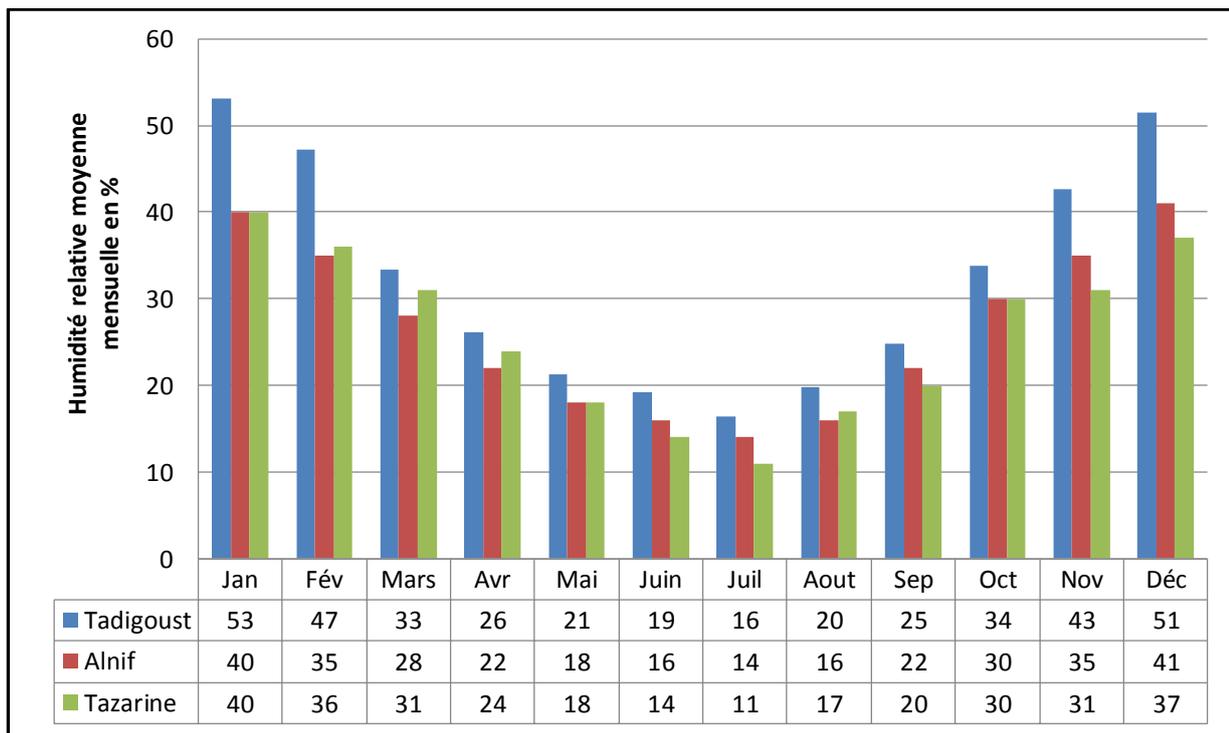
Au terme de cette analyse des facteurs thermiques et leur impact sur l'écoulement dans un milieu aride et présaharien, on remarque les points suivants :

- ❖ La zone d'étude se caractérise par une température très élevée avec une variation spatiotemporelle entre l'amont et l'aval ;
- ❖ Le BV de l'oued Daoura est exposé aux influences continentales de Chergui et Sehli, ces courants, desséchants, augmentent la température surtout en été ;
- ❖ L'été est connu par une température très forte, notamment dans les régions situées au Sud du sillon Atlasique (Taouz, Erfoud, Alnif, Tazarine...);

3-4- Humidité relative

L'humidité relative est le rapport de la tension de vapeur réelle (observée) e à la tension de vapeur saturante e_s à la même température : on l'exprime généralement en % : $Hr = e / e_s * 100$ (Réménieras, 1986). L'humidité relative se compte de 0 à 100%. L'air est sec quand l'humidité relative est inférieure à 35%. L'air est moyennement humide entre 35 et 65%, et humide à plus de 65% d'humidité relative. À l'intérieur d'un même espace, l'humidité relative varie en fonction des changements de température : elle augmente si la température baisse et diminue si elle s'élève (André Bergeron et Colette Naud, 1995).

Les données disponibles sont très rares, notre étude se base sur les données au niveau des stations de Tadhighoust, Alnif et Tazarine sur la période 1997/98-2008/2009.



(Source des données brutes : AHGZR ; 2014)

Figure 52 : Humidité relative moyenne mensuelle en (%) dans quelques stations du BV de l’oued Daoura et ses SBVs (1997-98/2008-09)

D’après les données observées dans la figure 52, on remarque que l’humidité relative est plus élevée dans la station de Tadighoust avec 32 % localisé au Nord du bassin de Daoura, par contre, ces valeurs diminuent aux stations situées au Sud de la zone d’étude (Tazarine, 26 % et Alnif, 26 %). Les valeurs les plus élevées sont enregistrées pendant le mois de janvier, soit 53 % au niveau de la station de Tadighoust en décembre, soit 41 % pour la station d’Alnif et en janvier, soit 40 % pour la station de Tazarine. Les valeurs, les plus faibles de l’humidité relative sont enregistrées au cours du mois de juillet (Tadighoust, 16 % ; Alnif, 14 % et Tazarine avec 11 %).

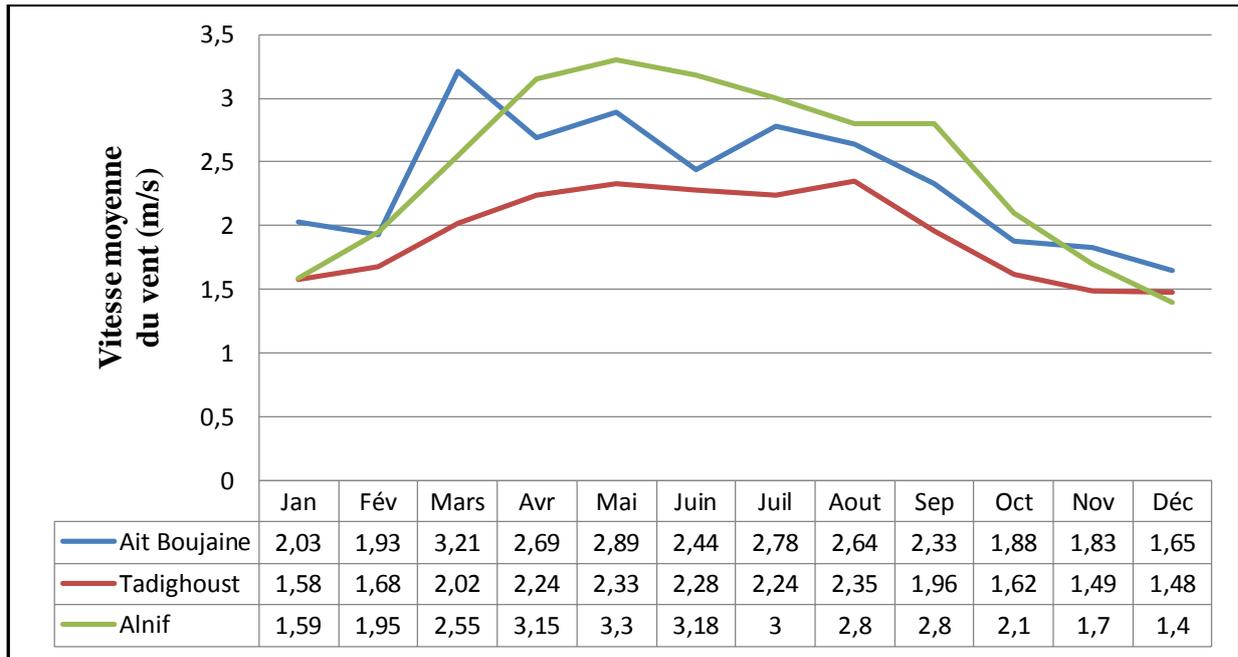
En résumé qu’il y a une relation très étroite entre la température et l’humidité relative, dans la zone d’étude on trouve que la température a augmentée du Nord vers le Sud, au contraire, l’humidité relative a augmenté du Sud vers le Nord. En effet la répartition spatiale de l’humidité relative varie d’une station à l’autre.

Généralement, l’humidité relative est très faible à cause des températures très élevées et par la continentalité qui menace la quasi-totalité des bassins situés au Sud du domaine Atlasique.

3-5 Vitesse du vent

L'étude de la vitesse moyenne mensuelle du vent (m/s) se base sur les données de trois stations uniquement en raison du manque de données. Les stations étudiées sont : Ait Boujaine, Tadighoust et Alnif. La période d'observation s'étend de 1982-1983/2008-2009.

D'une manière générale, le vent joue un rôle essentiel dans les processus d'évaporation et reste un agent efficace de la morphogenèse de plusieurs modelés éoliens.



(Source des données brutes : AHGZR ; 2014)

Figure 53 : Vitesse moyenne du vent aux différentes stations du bassin versant de l'oued Daoura et SBVs

D'après la figure ci-dessous, nous constatons que la vitesse moyenne du vent enregistrée dans les trois stations est de l'ordre de 2.64 m/s à la station d'Ait Boujaine, de 2.35 m/s à la station de Tadighoust et de 2.8 m/s à la station d'Alnif. Les vents sont violents et rapides pendant les mois de mars à septembre.

Par ailleurs, on observe une augmentation de la vitesse moyenne du vent du Nord vers le Sud (Tadighoust, 2.35 m/s ; Ait Boujaine, 2.45 m/s et Alnif, 2.8 m/s). Les variations du déficit d'écoulement sont en fonction de l'augmentation de la vitesse du vent dans la zone d'étude.

3-6- Etude de la variabilité spatiotemporelle des précipitations

Les précipitations représentent la source et le moteur générateur de l'écoulement. Elles sont caractérisées par trois principaux paramètres : **leur volume, leur intensité et leur fréquence** qui varient selon les lieux, les jours, les mois et les années (Guyot, G.1997). La connaissance de ses trois

paramètres est essentielle pour planifier l'utilisation des hauteurs des précipitations, les précipitations sont des données climatiques très variables dans l'espace et dans le temps.

D'une manière générale, les précipitations jouent un rôle primordial sur le fonctionnement hydrologique d'un BV. Il est donc indispensable d'utiliser l'ensemble des hauteurs de précipitations mensuelles, saisonnières et annuelles.

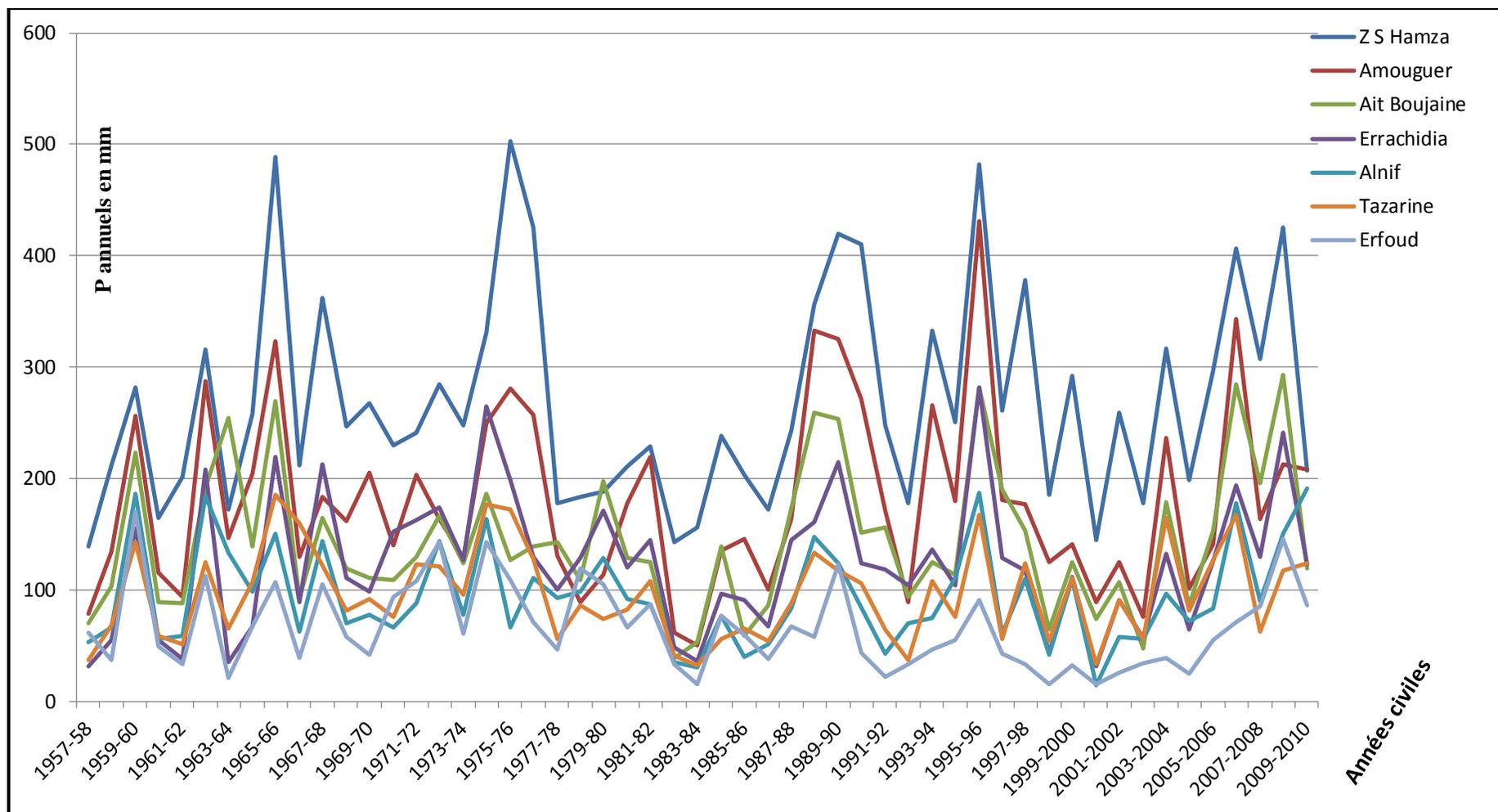
A cet effet, nous avons réalisé des tableaux, des graphiques et des cartes résumant les hauteurs de précipitations annuelles, saisonnières et mensuelles observées au cours d'une série chronologique donnée de chaque station située dans la zone d'étude.

L'étude des précipitations est basée sur l'exploitation des données pluviométriques enregistrées sur les treize stations (Ziz : 7 stations ; Rhériss : 4 stations et Maider : 2 stations). Cette étude vise à définir la variabilité spatiotemporelle des précipitations.

3-6-1 Analyse chronologique des précipitations annuelles et leur irrégularité spatiotemporelle

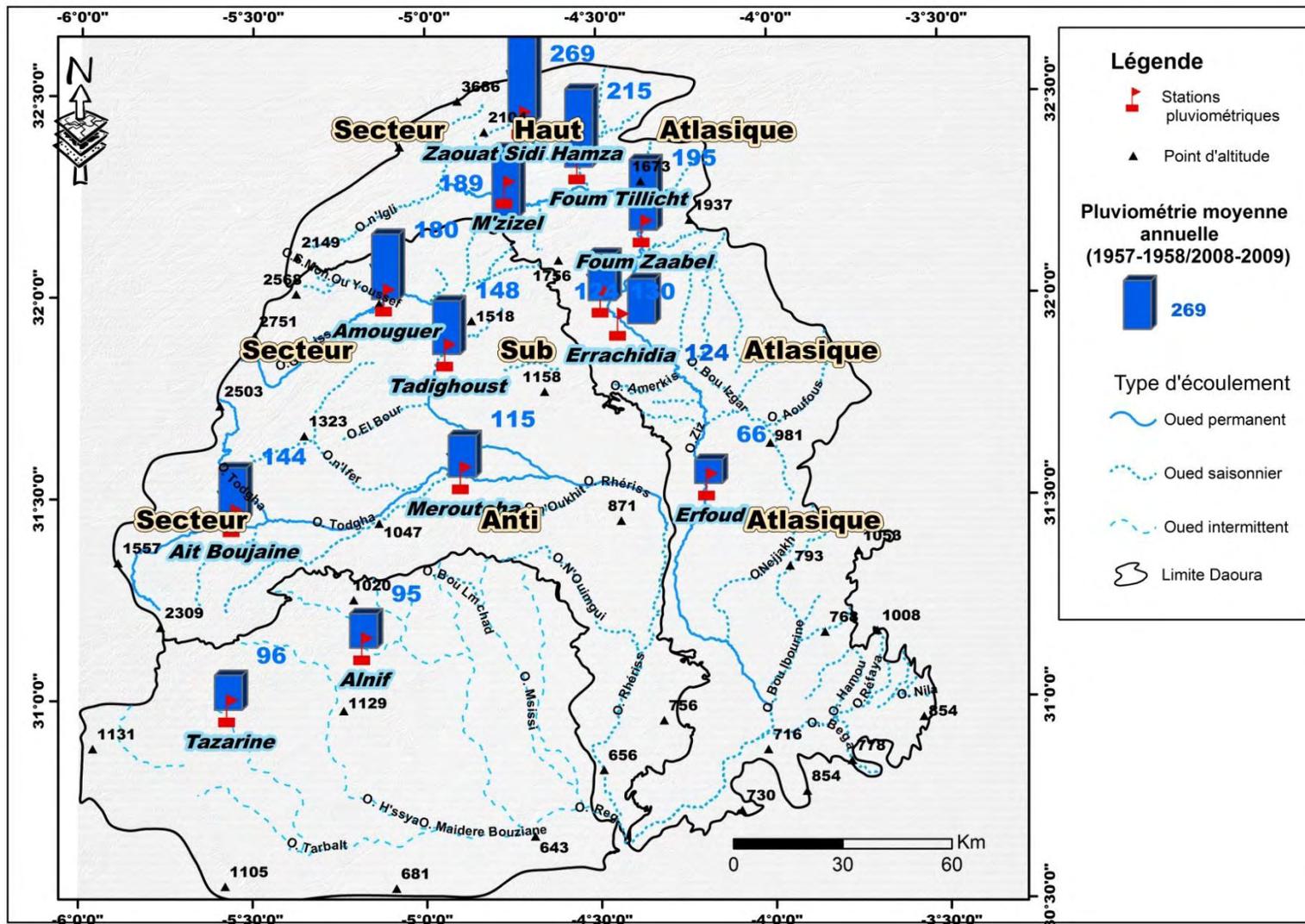
3-6-1-1- La variabilité annuelle

Les précipitations annuelles (1957-58/2008-09) dans le BV de l'oued Daoura connaissent une grande variabilité, dans la majorité des stations situées au sein de la zone d'étude. Ces valeurs varient entre 269 mm sur les reliefs du Haut-Atlas au Nord (station de Zaouiat Sidi Hamza), de 130 mm dans la zone d'Errachidia au centre et moins de 70 mm au niveau de la plaine de Tafilalet dans la station d'Erfoud au Sud de la région étudiée. En effet, la quantité d'eau qui arrose l'amont du BV de l'oued Ziz est nettement supérieure à celle qui tombe dans l'amont du Rhériss et du Maider (Zaouiat Sidi Hamza ; 269 mm, Amouguer ; 180 mm et Alnif ; 95 mm pour la période de 1957-58/2008-09).



(Source des données brutes : AHGZR ; 2014)

Figure 54 : Précipitations moyennes annuelles aux différentes stations du bassin versant de l’oued Daoura et ses SBVs en mm (1957-58/2008-09)



(Source des données brutes : AHGZR ; 2014)

Figure 55 : Pluies moyennes annuelles en mm (1957-58/2008-09) dans 13 stations du bassin versant de l'oued Daoura

| BV | Stations pluviométriques | P.M.A* | Ecart type | D1 | Q1 | Q2 | Q3 | D9 | CV (%) |
|---------|--------------------------|--------|------------|-----|-----|-----|-----|-----|--------|
| Ziz | Zaouat Sidi Hamza | 269 | 95.48 | 171 | 199 | 248 | 317 | 425 | 35 |
| | Foum Tillicht | 215 | 96.27 | 103 | 151 | 186 | 292 | 358 | 45 |
| | M'zizel | 189 | 82.80 | 94 | 125 | 164 | 241 | 319 | 44 |
| | Foum Zaabel | 195 | 94 | 92 | 119 | 160 | 258 | 339 | 48 |
| | Barrage H. Addakhil | 129 | 63 | 51 | 88 | 118 | 167 | 228 | 49 |
| | Errachidia | 124 | 21.26 | 44 | 89 | 123 | 155 | 215 | 49 |
| | Erfoud | 66 | 38.30 | 25 | 37 | 58 | 91 | 123 | 58 |
| Rhériss | Amouguer | 180 | 81.80 | 89 | 125 | 164 | 219 | 323 | 46 |
| | Tadighoust | 148 | 74.81 | 69 | 96 | 130 | 191 | 275 | 51 |
| | Ait Boujaine | 144 | 64.60 | 70 | 103 | 129 | 179 | 259 | 45 |
| | Meroutcha | 115 | 57.70 | 51 | 75 | 102 | 150 | 207 | 50 |
| Maider | Alnif | 95 | 44.80 | 43 | 63 | 84 | 124 | 178 | 47 |
| | Tazarine | 96 | 41.40 | 51 | 63 | 91 | 124 | 167 | 43 |

(Source des données brutes : AHGZR ; 2014)

PMA* : Pluies moyennes annuelles, D1 et D9 : Déciles 10% et 90%, Q1, Q2 et Q3 : Quartile 25%, 50% et 75% ; CV : coefficient de variation en %.

Tableau 30 : Précipitations moyennes annuelles aux différentes stations du BV de l'oued Daoura et ses SBVs en mm (1957-58/2008-09)

D'après la figure 54 et 55 et le tableau 30, nous enregistrons les remarques suivantes pour chaque secteur localisé au sein du BV de l'oued Daoura :

1- Le secteur du Haut-Atlas

Cette partie est située dans la zone septentrionale de la zone d'étude, on enregistre que cette période est généralement sèche, comparé à la série pluviométrique (1957-58/2008-09). Elle contient un grand nombre d'années, pour la station de Z. S. Hamza (32 années situées sous la moyenne (269 mm) de même la station d'Amouguer (31 années) localisée sous la moyenne (180 mm).

2- Le secteur Sub-Atlasique

Les stations pluviométriques situées dans ce secteur connaissent une quantité des apports pluviométriques moins faible que le secteur précédent, on observe qu'il y a un grand nombre d'années situées sous la moyenne interannuelle (Tadighoust, 31 années trouvées sous la moyenne (140 mm) et Errachidia, 25 années situées sous la moyenne de 124 mm.

3- Le secteur Anti-Atlasique

La moyenne des précipitations annuelles des stations pluviométriques localisées dans ce secteur calculé entre 1957 et 2009, vont de 96 à 66 mm. En effet, cette période est généralement sèche. Dans le même sens, on remarque que le nombre d'années sèches moyennement grand sont dans les stations (d'Alnif 32 années située sous la moyenne 95 mm, Tazarine ; 28 années trouvées sous la moyenne 96 mm et Erfoud ; 29 années situées sous la moyenne 66 mm).

3-6-2- Variabilité des précipitations moyennes interannuelles en relation avec l'altitude

Le facteur orographique dans la zone d'étude joue un rôle déterminant et important dans la répartition des précipitations. Il est distinctement prononcé comme le montrent les valeurs

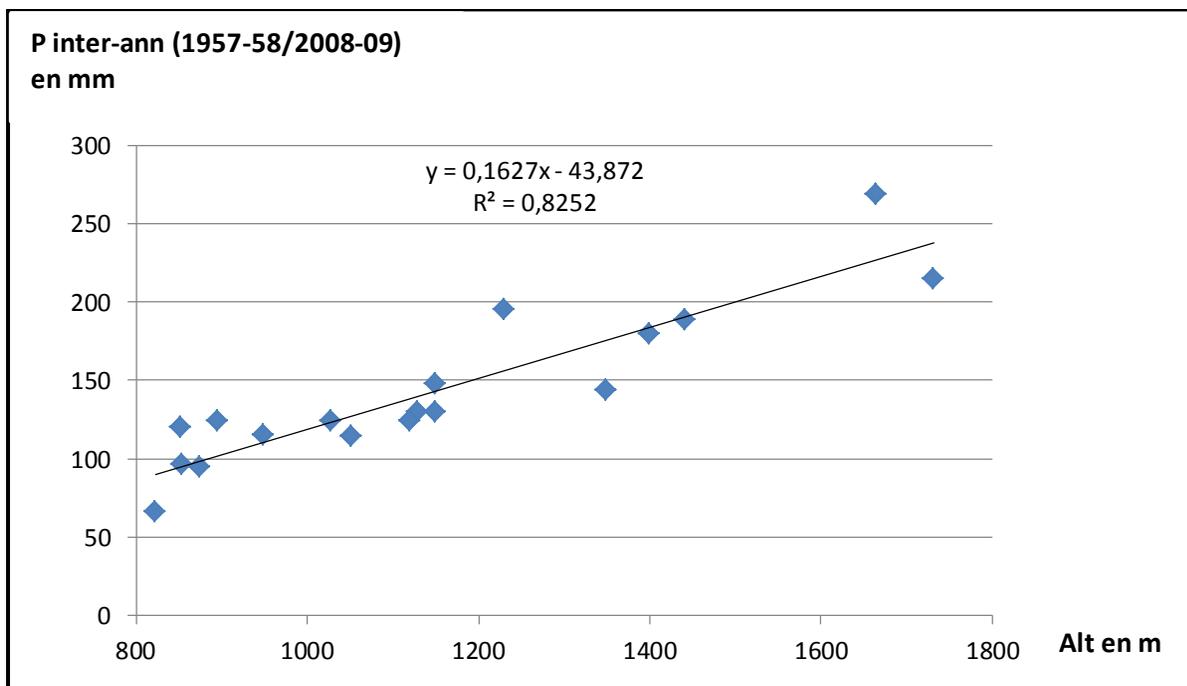
enregistrées dans les diverses stations à différentes altitudes (tableau 31). En effet au Zaouat Sidi Hamza (1650 m), le module inter- annuel est de 269 mm alors qu'à Tazarine (854 m) le module diminue à 96 mm. La répartition spatiale des précipitations diminue du Nord vers le Sud et en fonction de l'altitude.

| BV | Stations pluviométriques | Altitude | Précipitations moyenne annuelle |
|---------|--------------------------|----------|---------------------------------|
| ZIZ | Zaouat Sidi Hamza | 1665 m | 269 |
| | Foum Tillicht | 1600 m | 215 |
| | M'zizel | 1441 m | 189 |
| | Foum Zaabel | 1230 m | 195 |
| | Barrage Hassan Addakhil | 1130 m | 130 |
| | Errachidia | 1028 m | 124 |
| | Erfoud | 823 m | 66 |
| Rhériss | Amouguer | 1400 m | 180 |
| | Ait Boujaine | 1350 m | 144 |
| | Tadighoust | 1150 m | 148 |
| | Meroutcha | 950 m | 115 |
| Maider | Alnif | 875 m | 95 |
| | Tazarine | 854 m | 96 |

(Source des données brutes : AHGZR ; 2014)

Tableau 31 : La répartition de la moyenne pluviométrique interannuelle en relation avec l'altitude au bassin versant de l'oued Daoura (d'après les observations de la période (1957-58/2008-09))

Pour évaluer cet effet, nous avons effectué une analyse de régression linéaire entre les précipitations moyennes annuelles et l'altitude des stations pluviométriques. En représentant en nuage de points les précipitations annuelles et l'altitude, de faible à haute altitude (823-1665 m), on montre :



(Source des données brutes : AHGZR ; 2014)

Figure 56 : Régression linéaire des précipitations moyennes annuelles avec l'altitude pour les 13 stations étudiées du bassin versant de l'oued Daoura et ses SBVs

Le coefficient de corrélation est fort, et l'effet orographique montre une augmentation des précipitations annuelles en fonction de l'altitude.

D'après la figure 56, on constate que l'altitude joue un rôle essentiel dans la répartition spatiale des précipitations dans la zone d'étude, puisque la variation des quantités précipitées décroît de l'amont vers l'aval en fonction de l'altitude, par exemple, la station de Zaouat Sidi Hamza située au sommet du Haut-atlas (1665 m) reçoit 269 mm, mais la station d'Erfoud située à l'extrême Sud du bassin ne reçoit que 66 mm. En effet, dans le secteur de la montagne (du Haut-Atlas et de l'Anti-Atlas) provoque un maximum de précipitations par rapport autres secteurs de la zone d'étude. Le module pluviométrique dépasse 200 mm dans l'ensemble des unités du Haut-Atlas, mais le module est inférieur à 70 mm à la partie aval du BV de l'oued Daoura.

3-6-3- Estimation des apports pluviométriques dans le bassin versant de l'oued Daoura et ses SBVs

Pour quantifier et spatialiser les lames d'eau précipitées de la zone d'étude, nous utilisons plusieurs méthodes, celles de Thiessen ou des isohyètes.

3-6-3-1-Méthode de Thiessen

La méthode de Thiessen comme l'a définie *M.ROCHE (1963)* « est une méthode arithmétique dans laquelle on attribue à chaque pluviomètre un poids proportionnel à une zone d'influence présumée, tel qu'un point situé dans cette zone soit plus près, en distance horizontale du pluviomètre correspond que de tout autre pluviomètre ». Cette méthode qui se base essentiellement sur la triangulation utilisant la méthode des médiatrices entre deux stations.

La précipitation moyenne pondérée ***P moy*** pour le bassin, se calcule alors en effectuant la somme des précipitations ***P_i*** de chaque station, multipliées par le facteur de pondération (***Aire a_i***), le tout divisé par la surface totale (***A***) du bassin. Cette littérature est traduite par la formule suivante :

$$P_{moy} = \frac{\sum a_i \cdot P_i}{A} \text{ Avec : } P_{moy} : \text{Précipitation moyenne sur le bassin,}$$

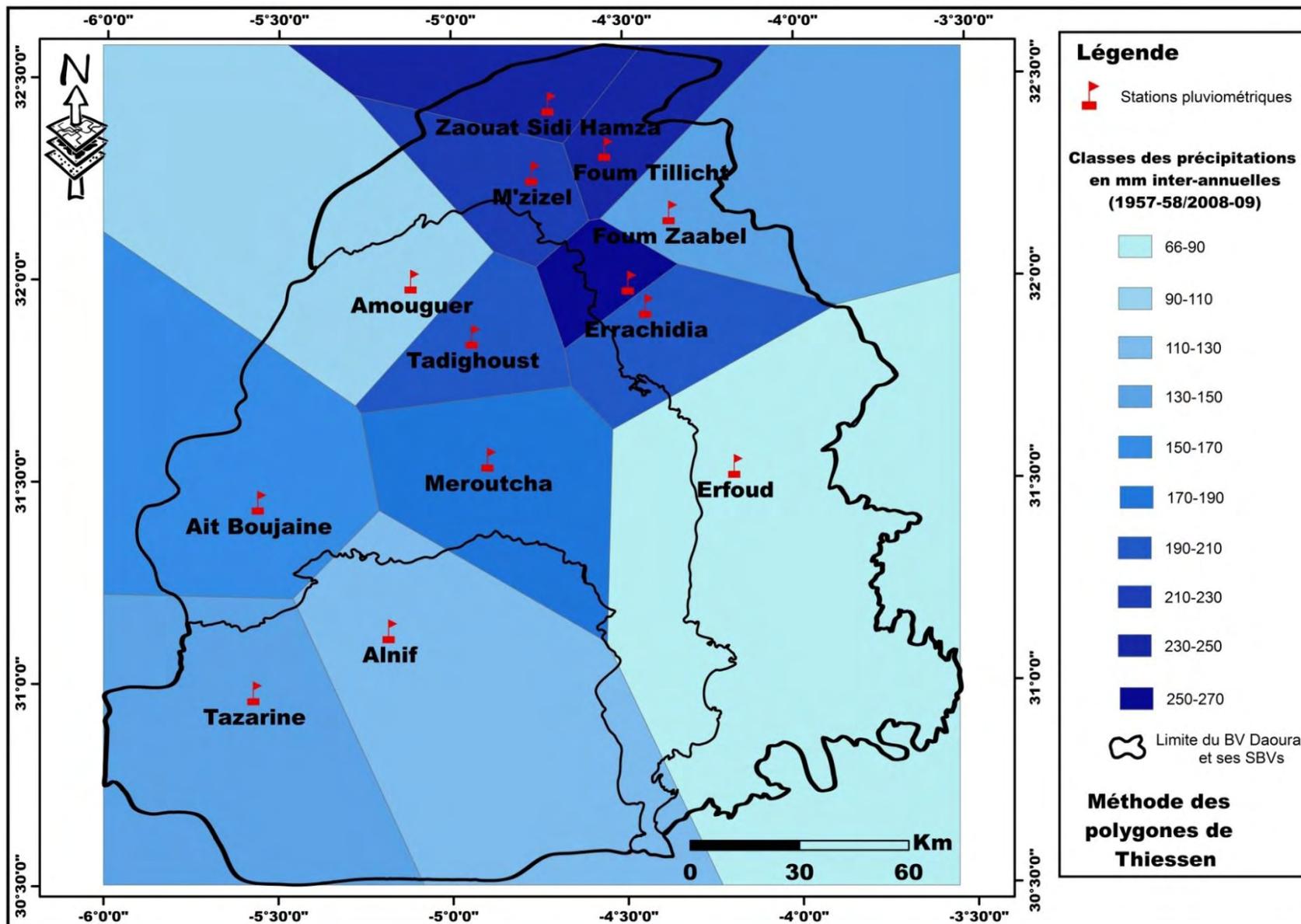
A : Aire totale du bassin (=∑A_i),

P_i : Précipitation enregistrée à la station i,

a_i : Superficie du polygone associée à la station i.

La spatialisation des moyennes des précipitations selon la méthode de Thiessen nous permet de déterminer l'apport moyen des précipitations du BV de l'oued Daoura et ses SBVs. La zone influencée par un poste est représentée par un polygone dont les côtés sont les médiatrices des droites qui relient les stations adjacentes. Certains côtés du polygone sont remplacés par les limites du bassin étudié (*Sirtou. M, 1995*).

Le résultat obtenu par l'application de la méthode de Thiessen est le suivant :



(Source des données brutes : AHGZR ; 2014)

Figure 57 : Estimation des précipitations moyennes annuelles (1957-58/2007-08) selon la méthode de polygones de Thiessen

Les principaux résultats obtenus selon la méthode de Thiessen sont regroupés dans le tableau ci-dessous :

| Stations | Superficie Ai en km ² | P moy (mm) | Ai*Pi |
|-------------------|----------------------------------|------------|-----------|
| Zaouat Sidi Hamza | 1587,2 | 269 | 426956,8 |
| Foum Tillicht | 1234,97 | 215 | 265518,55 |
| Mzizel | 1386,13 | 189 | 261978,57 |
| Foum Zaabel | 3800 | 195 | 741000 |
| Errachidia | 1633,85 | 124 | 202597,4 |
| Erfoud | 13353,73 | 66 | 881346,18 |
| Total | 22995,88 | | 2779397,5 |

Tableau 32 : Calcul de la pluie moyenne selon la méthode de Thiessen au BV de Ziz

La pluviométrie moyenne du BV de l'oued Ziz est : **120.86 mm**

| Stations | Superficie Ai en km ² | Pi moy (mm) | Ai*Pi |
|--------------|----------------------------------|-------------|------------|
| Amouguer | 6664,21 | 180 | 1199557,8 |
| Tadighoust | 1404,55 | 148 | 207873,4 |
| Merroucha | 3145,4 | 115 | 361721 |
| Ait Boujaine | 5255,44 | 144 | 756783,36 |
| Total | 16469,6 | | 2525935,56 |

Tableau 33 : Calcul de la pluie moyenne selon la méthode de Thiessen au BV du Rhériss

La pluviométrie moyenne du BV de l'oued Rhériss est : **153.36 mm**

| Stations | Superficie Ai en km ² | P moy (mm) | Ai*Pi |
|----------|----------------------------------|------------|------------|
| Alnif | 7079,72 | 95 | 672573,4 |
| Tazaine | 5529,09 | 96 | 530792,64 |
| Total | 12608,81 | | 1203366,04 |

Tableau 34 : Calcul de la pluie moyenne selon la méthode de Thiessen au BV du Maider

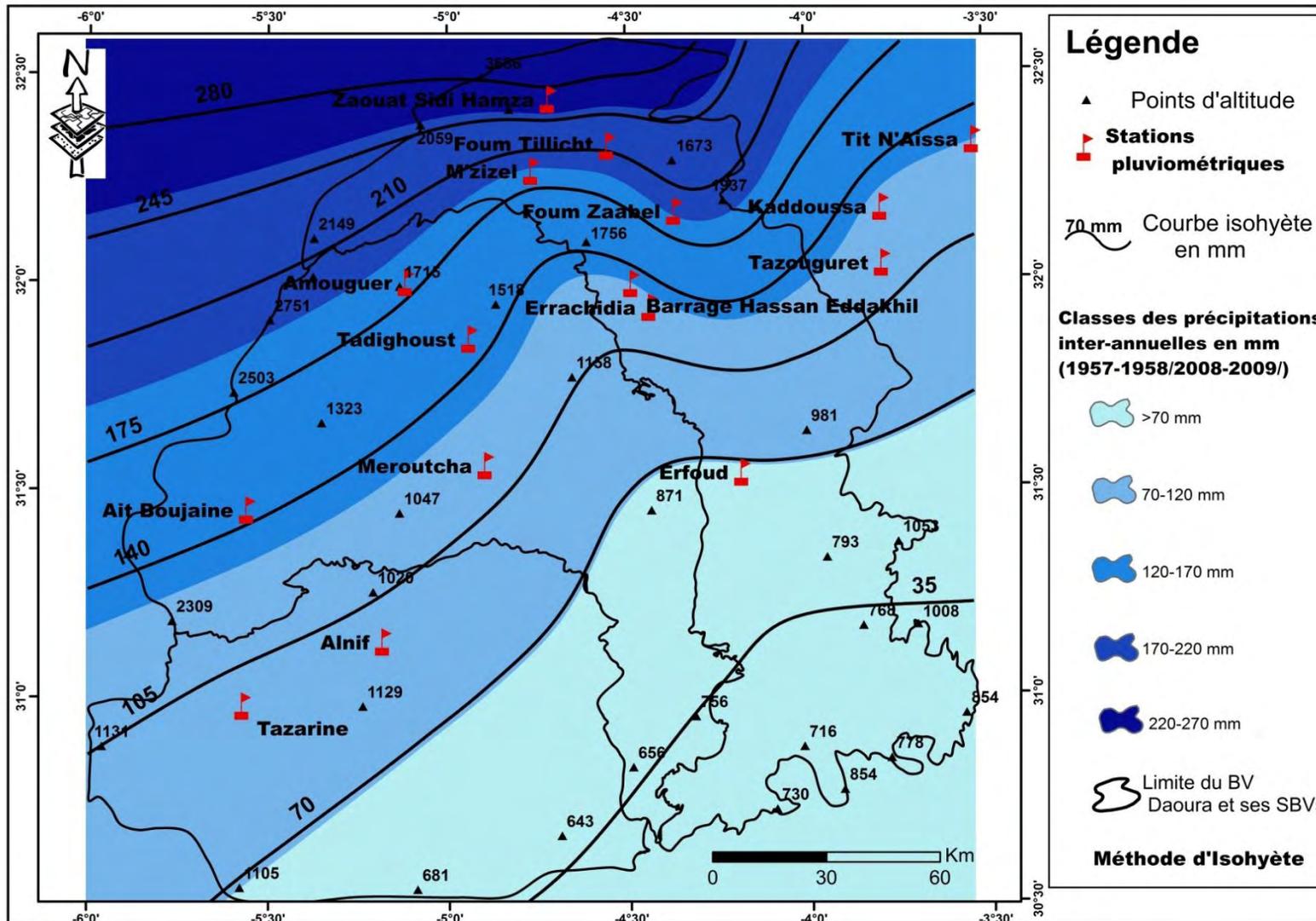
La pluviométrie moyenne du BV de l'oued Maider est : **95.43 mm**

3-6-3-2-Méthode des isohyètes

L'isohyète est le lieu géométrique des points où, est tombée la même quantité de pluie, pendant une période donnée. Ces courbes représentent approximativement la répartition spatiale des précipitations pendant la période prise en considération.

Le dessin des isohyètes, tient compte de la topographie, de la pluie moyenne annuelle des stations pour la période étudiée, de la distance qui intègre les postes pluviométriques entre eux, de l'exposition et d'un certain nombre de stations situées en dehors du bassin.

Mais malheureusement, la réalisation de la carte des isohyètes dans le BV de l'oued Daoura, rencontre plusieurs contraintes comme : l'insuffisance du nombre des stations de mesures (une station pour 2692.30 km²) et l'absence des stations dans la partie méridionale de la zone d'étude : l'estimation des précipitations moyennes par cette méthode dans les zones sud serait moyennement proche à la réalité.



(Source des données brutes : AHGZR ; 2014)

Figure 58 : Estimation des précipitations moyennes annuelles (1957-58/2008-09) par la méthode des isohyètes

D'après la carte ci-dessus (figure 58), on constate que, le BV de l'oued Daoura a connu une variabilité spatiale très importante entre l'amont et l'aval, l'isohyète 70-120 mm prend place pour faire une limite entre le bassin de crétacé d'Errachidia à faibles précipitations et le secteur du Haut-Atlas à pluviosité importante. Mais au Sud de la région d'Erfoud, l'estimation des précipitations est moins correcte à cause de l'absence des postes pluviométriques comme mentionnée précédemment.

Selon les résultats obtenus des deux méthodes d'estimations des précipitations moyennes annuelles, on remarque que la répartition spatiale des précipitations est différente du Nord vers le Sud. Ces valeurs pluviométriques sont décroissantes de l'amont à l'aval. La partie aval du BV de l'oued Daoura ne reçoit que $\frac{1}{4}$ des précipitations que chutent en amont. Dans le même sens ces valeurs connaissent aussi une diversité spatiale entre l'Est et l'Ouest bien qu'elle soit modérée, car les valeurs moyennes au niveau des stations situées à la même latitude (barrage Hassan Addakhil-Tadighoust et Erfoud-Merroutcha) montrent que des écarts sont forts (19 mm pour les stations Nord contre 49 mm pour les stations Sud).

Globalement, l'analyse de la pluviométrie moyenne annuelle au BV de l'oued Daoura fait ressortir le rôle primordial du relief dans la répartition spatiale des précipitations. Les cartes réalisées de la pluviométrie sont en grande partie calquées sur la carte des tranches d'altitude, sans oublier le rôle essentiel des autres facteurs géographiques (latitude, continentalité et surtout l'effet d'abri).

3-6-4-Grande irrégularité des précipitations annuelles.

La première remarque qu'on a enregistrée selon le tableau ci-dessous est que toutes les valeurs minimales trouvées dans toutes les stations sont observées dans la période située entre 1982-83 et 1986-87. Cependant les écarts entre les minima interannuels et les moyennes annuelles varient d'une station à l'autre. Ils sont importants pour les stations du sillon Atlasique (16 mm contre 115 mm pour Merroutcha, 17 mm contre 129 mm pour B.H. Addakhil), intermédiaires pour celles Anti-atlasique (15 mm contre 66 mm pour Erfoud, 32 mm contre 96 mm pour Tazarine) et moindres pour les stations situées au secteur Atlasique (139 mm contre 269 mm pour Z. S. Hamza, 68 mm contre 215 mm pour Foum Tillich).

En effet, les précipitations annuelles des 13 stations indiquent l'oscillation significative entre l'amont et l'aval avec des écarts importants entre les extrêmes (364 mm Z. S. Hamza, 231 mm à Merroutcha et 155 mm à Erfoud).

Les extrêmes par rapport à la moyenne reflètent cette irrégularité spatiale des pluies (tableau 35). La station d'Erfoud enregistre les variations pluviométriques les plus contrastées avec un coefficient de variation 58%, Merroucha avec 50% et par contre Zaouat Sidi Hamza enregistre un coefficient de variation 35%.

| BV | Stations pluviométriques | Moyenne 1957-58/2008-09 | Max | Min | Ecart par rapport à la moyenne | | Ecart-type | Coefficient de variation % |
|---------|--------------------------|-------------------------|-----|-----|--------------------------------|----------|------------|----------------------------|
| | | | | | Surplus | déficits | | |
| Ziz | Zaouat Sidi Hamza | 269 | 503 | 139 | 234 | 130 | 95 | 35 |
| | Foum Tillicht | 215 | 480 | 68 | 265 | 147 | 96 | 45 |
| | M'zizel | 189 | 370 | 58 | 181 | 131 | 83 | 44 |
| | Foum Zaabel | 195 | 429 | 66 | 234 | 129 | 94 | 48 |
| | B.H. Addakhil | 129 | 268 | 17 | 139 | 112 | 63 | 49 |
| | Errachidia | 124 | 282 | 31 | 158 | 93 | 61 | 49 |
| | Erfoud | 66 | 170 | 15 | 104 | 51 | 38 | 58 |
| Rhériss | Amouguer | 180 | 431 | 50 | 251 | 130 | 82 | 46 |
| | Ait Boujaine | 144 | 293 | 39 | 149 | 105 | 65 | 45 |
| | Tadighoust | 148 | 349 | 11 | 201 | 137 | 75 | 51 |
| | Meroutcha | 115 | 247 | 16 | 132 | 99 | 58 | 50 |
| Maider | Alnif | 95 | 191 | 14 | 96 | 81 | 45 | 47 |
| | Tazarine | 96 | 185 | 32 | 89 | 64 | 41 | 43 |

(Source des données brutes : AHGZR ; 2014)

Tableau 35 : L'irrégularité pluviométrique interannuelle dans les stations du bassin versant de l'oued Daoura et ses SBVs (1957-58/2008-09)

| Stations | Période de référence | Moy (mm) | Max (mm) | min. (mm) | Max/min |
|-----------------|----------------------|----------|----------|-----------|---------|
| Zaouat S. Hamza | 1957-1958/2009-10 | 269 | 503 | 139 | 3,62 |
| M'zizel | 1957-1958/2009-10 | 189 | 370 | 58 | 6,38 |
| Foum Tillicht | 1957-1958/2009-10 | 215 | 480 | 68 | 7,06 |
| Amouguer | 1957-1958/2009-10 | 180 | 431 | 50 | 8,62 |
| Ait Boujaine | 1957-1958/2009-10 | 144 | 293 | 39 | 7,51 |
| Foum Zaabel | 1957-1958/2009-10 | 195 | 429 | 66 | 6,50 |
| Tadighoust | 1957-1958/2009-10 | 148 | 349 | 11 | 31,73 |
| B H Addakhil | 1957-1958/2009-10 | 130 | 268 | 17 | 15,76 |
| Tazarine | 1957-1958/2009-10 | 96 | 185 | 32 | 5,78 |
| Errachidia | 1957-1958/2009-10 | 124 | 282 | 31 | 9,10 |
| Meroutcha | 1957-1958/2009-10 | 115 | 247 | 16 | 15,44 |
| Alnif | 1957-1958/2009-10 | 95 | 191 | 14 | 13,64 |
| Erfoud | 1957-1958/2009-10 | 66 | 170 | 15 | 11,33 |

(Source des données brutes : AHGZR ; 2014)

Moy : moyenne pluviométrique ; Max : maximale ; min : minimale ; Max/Min : coefficient d'irrégularité

Tableau 36 : La variabilité pluviométrique annuelle et coefficient d'irrégularité dans les stations pluviométriques du BV de l'oued Daoura et ses SBVs

Nous remarquons aussi une irrégularité des précipitations d'une année à l'autre. Les écarts peuvent être très grands entre les années pluvieuses et les années sèches. L'évolution de l'écart entre la précipitation annuelle et la moyenne interannuelle est illustrée dans les tableaux 35 et 36. L'analyse de ces tableaux met en évidence l'irrégularité de la pluie d'une année à l'autre. Ainsi la période janvier-décembre 1975, Zaouat Sidi Hamza située dans la partie amont de la zone d'étude, a reçu 503 mm, alors que la période janvier-décembre 1957, les précipitations ont baissé à 139 mm, par contre dans la partie aval du BV de l'oued Daoura, on registre une irrégularité interannuelle. Lors de la période de 1958-1959, Erfoud a reçu 170 mm, alors que pendant la période 1982-1983, les précipitations atteignirent à peine 15 mm, soit un rapport de 1/11 entre les deux périodes. En effet, ces graphiques montrent bien une période déficitaire caractérisant la période 1980-1981 à 1987-1988.

Généralement, à partir des années 80, le BV de l'oued Daoura et ses SBVs enregistrent la succession des années de sécheresse, qui ont eu des impacts négatifs sur le système d'écoulement, et sur les précipitations, à savoir l'écart par à la moyenne, l'écart type et le coefficient de variation expriment directement la variation spatiotemporelle des précipitations observées au sein du bassin versant de l'oued Daoura et ses SBVs.

3-6-5-Etude fréquentielle des précipitations annuelles

A l'échelle de l'étude de la variabilité interannuelle des précipitations dans la zone d'étude, nous allons choisir cinq stations très significatives du BV de l'oued Daoura, cette étude sera complétée par une étude fréquentielle.

L'étude fréquentielle est une méthode statistique de prédiction consistant à étudier les événements passés, afin d'en définir les probabilités d'apparition future (*Giret, 2007*). Afin de déterminer la répartition de ces moyennes pluviométriques sur la chronique des cinq stations les plus significatives, réparties de l'amont vers l'aval du BV de l'oued Daoura et à prévoir leurs temps de retour. Cette méthode statistique consiste à la recherche d'une loi d'ajustement plus adéquate à la distribution des pluies annuelles.

Plusieurs lois statistiques ont été testées pour choisir celle qui s'ajuste au mieux avec les moyennes pluviométriques de chaque station étudiée pour la période (1957-58/2007-08).

L'étude des pluies fréquentielles caractéristiques passe par les étapes suivantes :

- ❖ L'arrangement des valeurs de pluie par ordre croissant, en donnant à chaque variable son rang dans la série chronologique étudiée ;
- ❖ Nous calculons les fréquences expérimentelles à partir de la formule suivante :

$F = (r-0.3) / (N+0.4)$, avec ; r : le rang de chaque valeur, N = l'effectif de l'échantillon

- ❖ Nous calculons aussi la variable réduite U, avec la formule suivante :

$$u = -\ln (-\ln(F(x)))$$

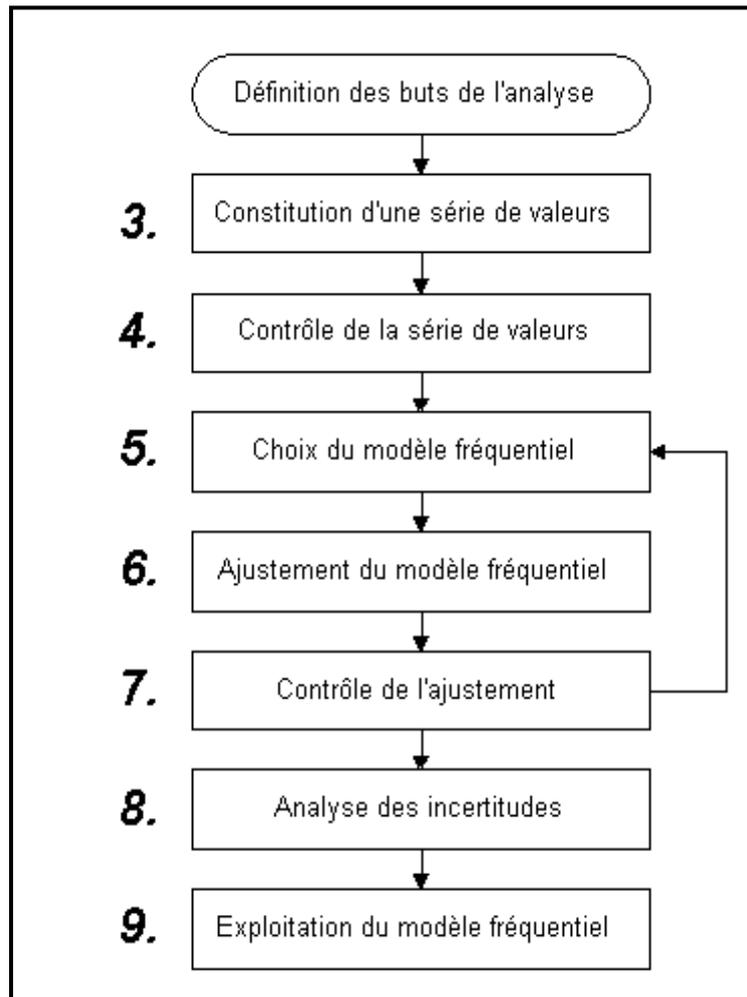
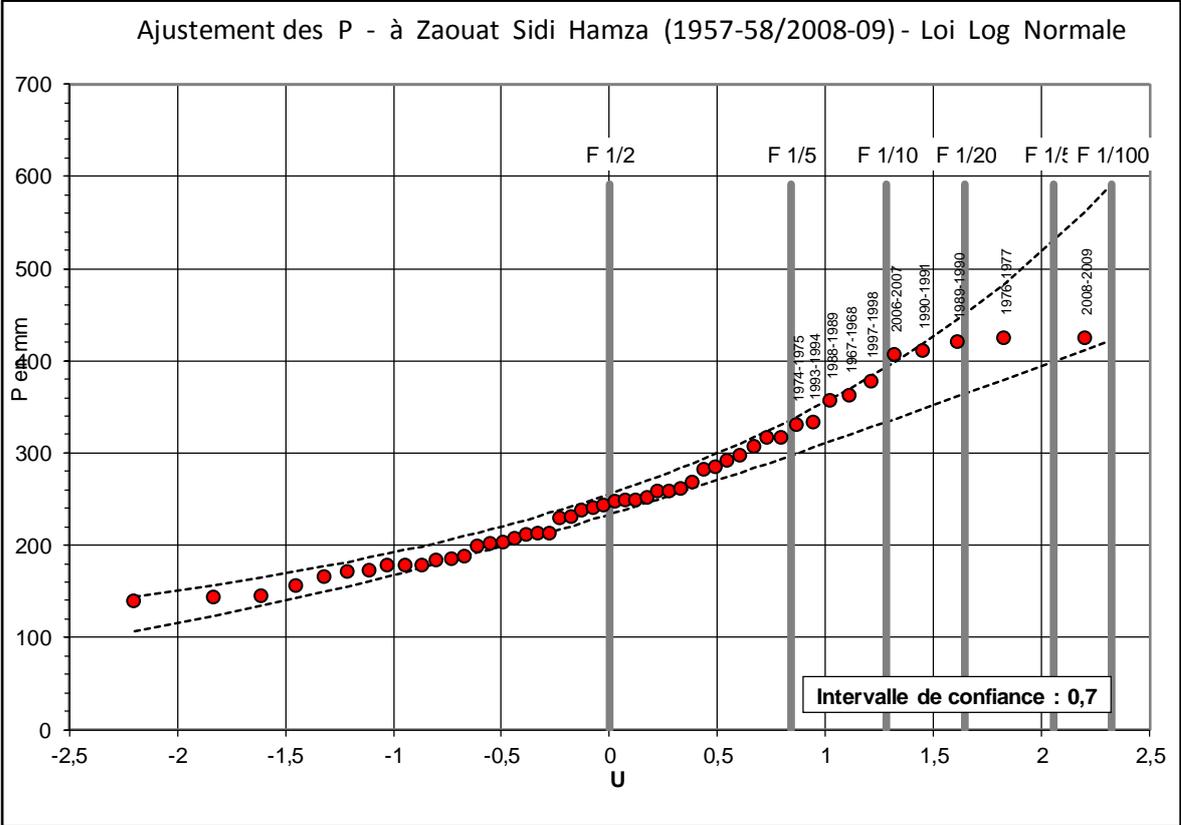
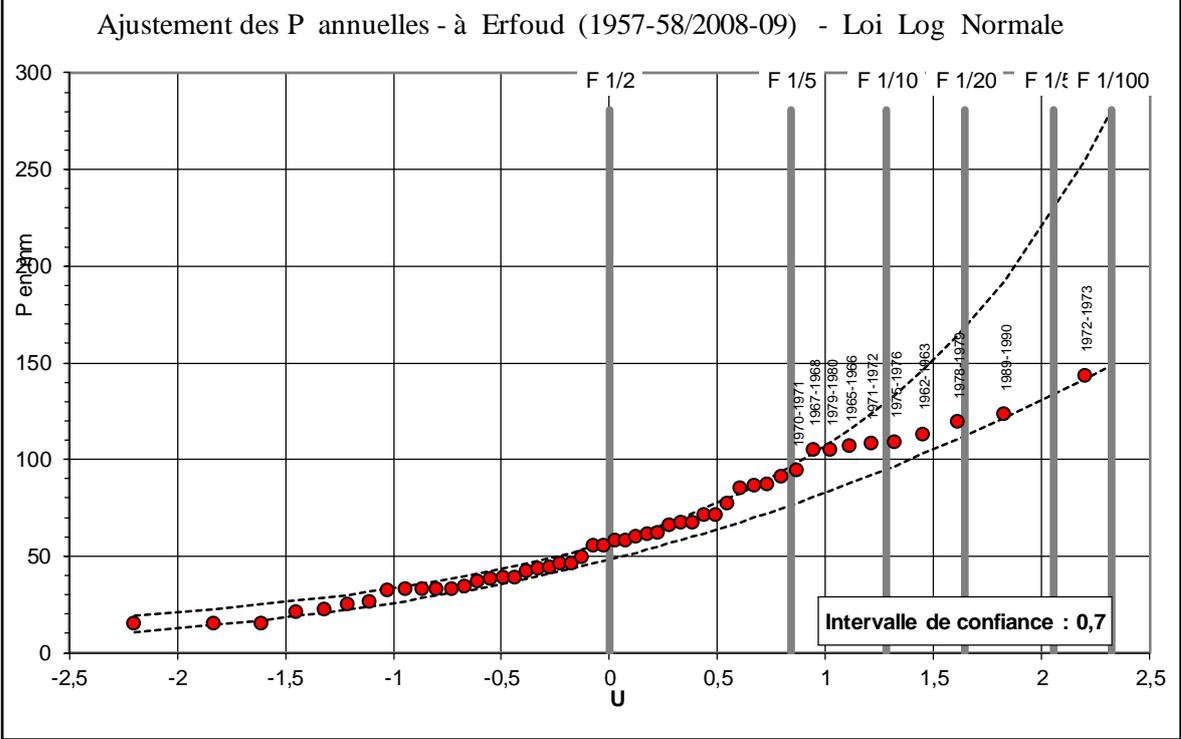
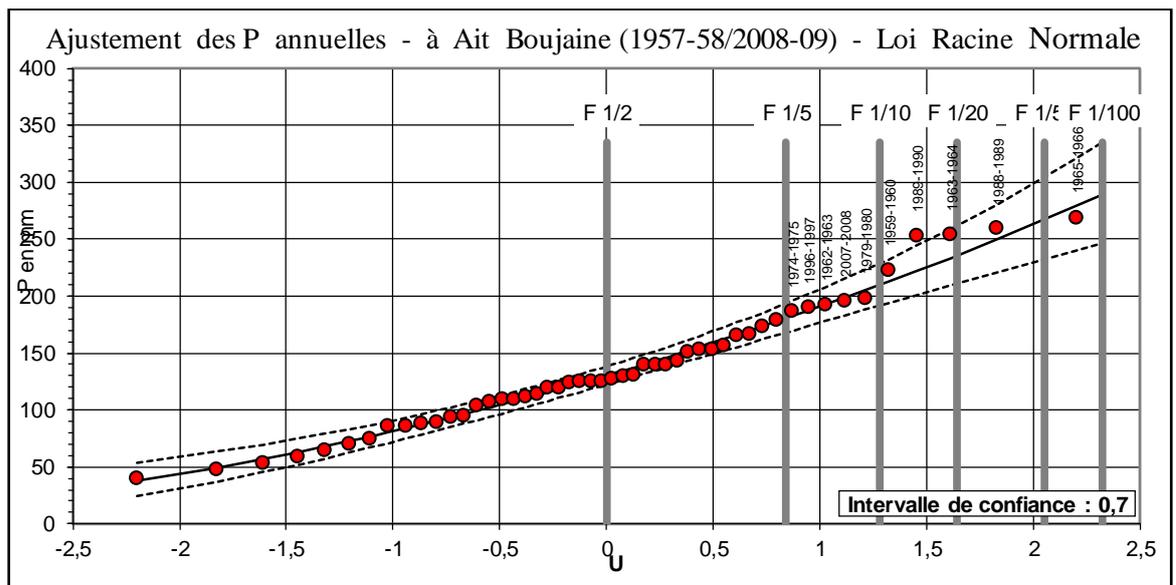
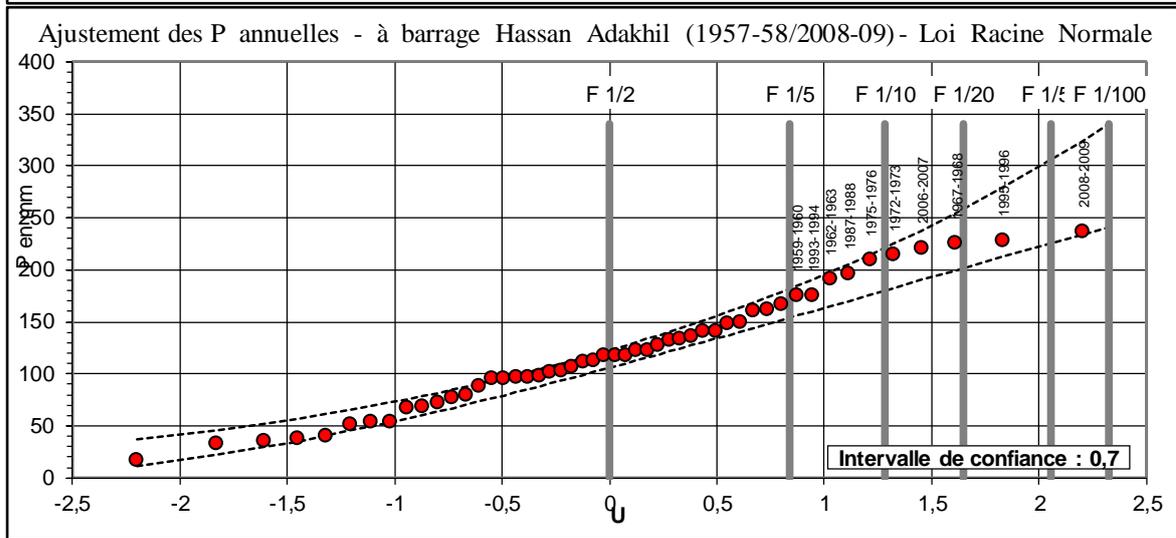
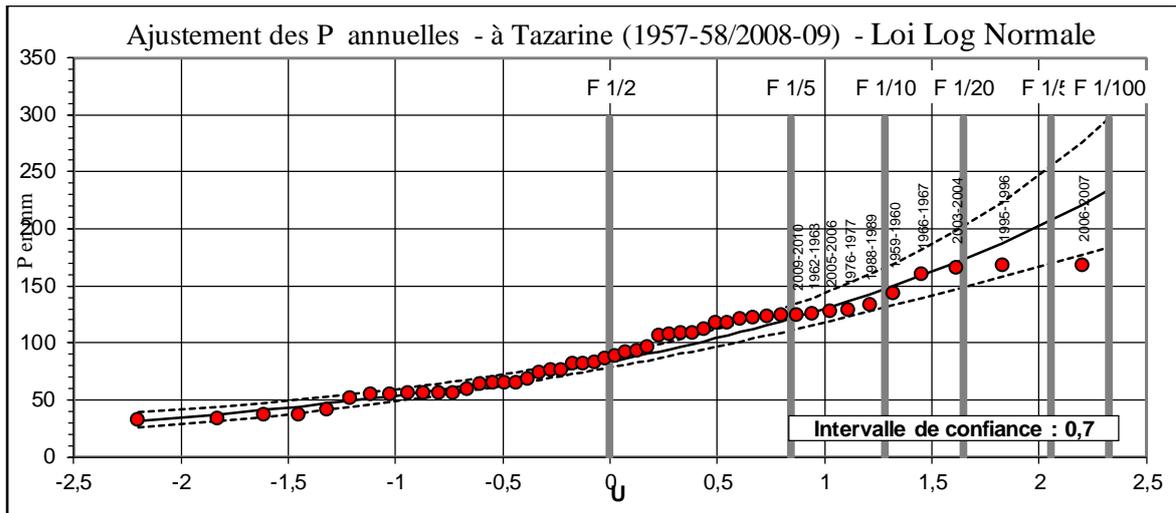


Figure 59 : Diagramme principales étapes de l'analyse fréquentielle (Source : Cité par Mezghab 2007)

En parallèle, le calcul des périodes de retour des précipitations, de donner une idée claire sur l'intensité des précipitations annuelles et sur les indications très intéressantes, pour les gestionnaires de l'aménagement notamment dans un milieu qui connaît des périodes de sécheresse récurrente. Cette période de retour est définie comme étant l'intervalle de temps moyen que l'on doit attendre avant que l'intensité moyenne de cet événement soit à nouveau égalisée ou dépassée (Obda 1991 et 2004, Janati 2010,). Pour cet objectif, nous avons testé un

ensemble de lois dans le but de déterminer celles qui s'ajustent au mieux avec les moyens annuelles des cinq stations. Nous avons choisi la loi *Log-Normale* pour Zaouat Sidi Hamza, Erfoud et Tazarine et la loi *Racine Normale* pour Ait Boujaine et barrage Hassan Addakhil.





(Source des données brutes : AHGZR ; 2014)

Figure 60 : Ajustement statistique des précipitations annuelles des stations de Z. S. Hamza, Barrage H.D, Ait Boujaine, Erfoud et Tazarine aux lois adéquates (1957-58/2008-09)

Suite à l'ajustement des séries des précipitations moyennes annuelles (1957/58-2008-09), nous constatons que les valeurs (P_i et U_i) sont plus proches d'une courbe de tendance. Cette distribution reflète une très grande irrégularité interannuelle.

| Fréquence | Période de retour des années sèches | | | | | $\frac{1}{2}$ | Période de retour des années humides | | | | |
|-------------------------------|-------------------------------------|------------|------------|------------|-----------|---------------|--------------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| | 1/100 | 1/50 | 1/20 | 1/10 | 1/5 | | 1/5 | 1/10 | 1/20 | 1/50 | 1/100 |
| Temps de retour | 100ans s | 50ans s | 20ans s | 10ans s | 5ans s | 2ans s | 5 ans | 10 ans | 20 ans | 50 ans | 100ans |
| Station de Z. Sidi Hamza | 113 | 123 | 138 | 156 | 178 | 238 | 306 | 354 | 382 | 429 | 500 |
| Station d'Ait Boujaïne | 32 | 37 | 49 | 62 | 83 | 126 | 173 | 205 | 234 | 250 | 290 |
| Station de Barrage H. Adakhil | 17 | 22 | 39 | 50 | 66 | 109 | 160 | 195 | 226 | 244 | 288 |
| Tazarine | 27 | 33 | 37 | 46 | 55 | 81 | 116 | 142 | 158 | 188 | 222 |
| Erfoud | 11 | 15 | 18 | 24 | 31 | 50 | 81 | 105 | 123 | 153 | 190 |

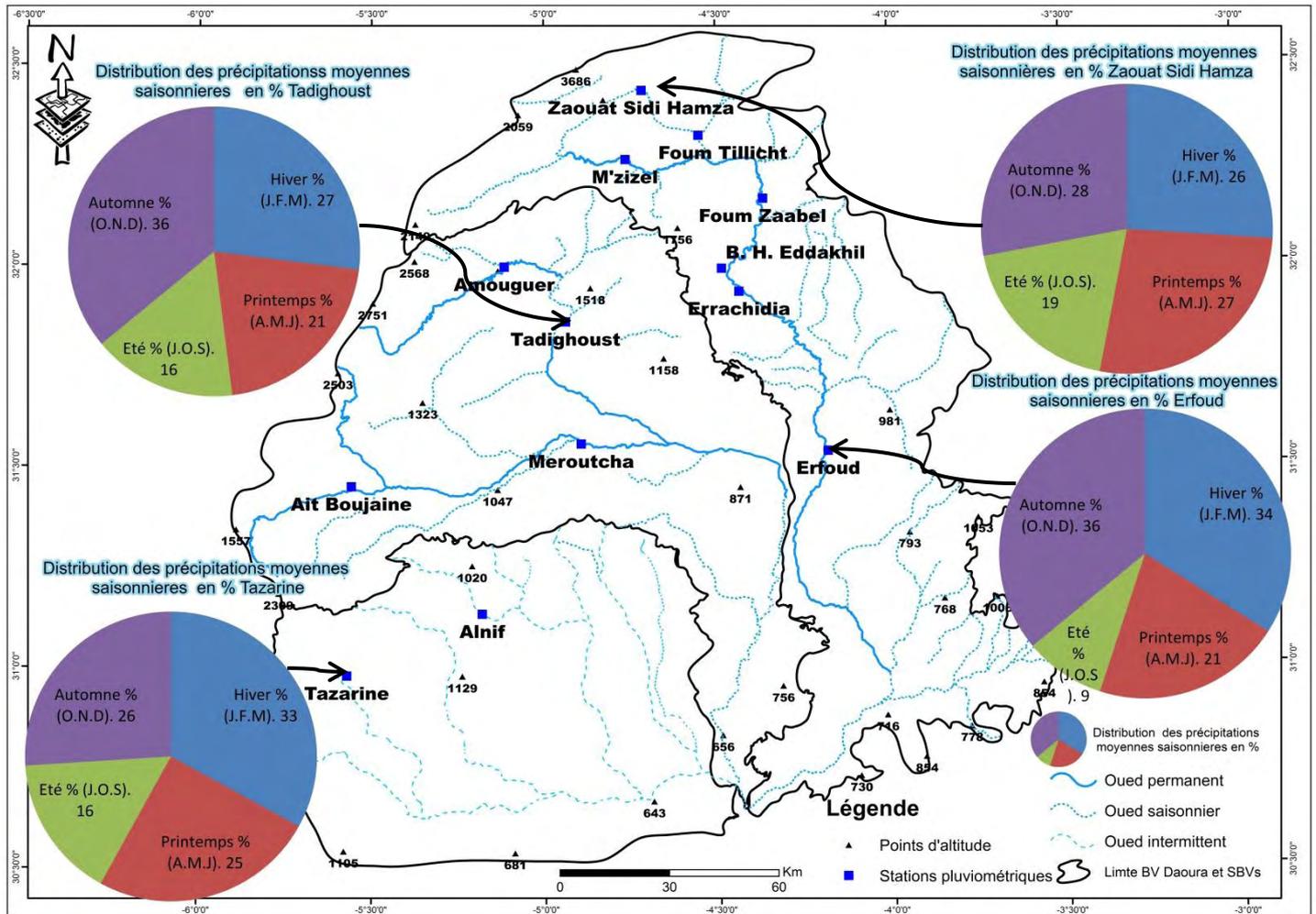
Tableau 37: Périodes de retour des précipitations annuelles selon une analyse fréquentielle appliquée dans les stations représentatives du BV de l'amont à l'aval (Zaouat Sidi Hamza, Ait Boujaïne, Barrage Hassan Addakhil, Erfoud et Tazarine) (1957-58/2008-09).

Le tableau 37 regroupe des résultats des fréquences des précipitations annuelles et leurs temps de retour. Les résultats de la série étudiée sont plus proches de la fréquence cinquantennale et centennale, cela reflète l'exactitude des résultats obtenus. Nous enregistrons aussi que les précipitations extrêmes de la série étudiée qui ont des périodes de retours longues, présentent des écartements très importants. En effet, les précipitations annuelles à des valeurs extrêmes se trouvent au-dessus des pluies exceptionnelles. Cette situation pluviométrique est définie comme étant un indice d'apparition des crues dévastatrices qui touchent la zone d'étude, alors que les résultats présentés en haut présentent une vision très précise sur la grande variabilité interannuelle des précipitations qui diminuent du Nord vers le Sud.

3-6-6-Variabilité de précipitations saisonnières

Le régime des précipitations moyennes saisonnières dans la zone d'étude est caractérisé par l'irrégularité spatiotemporelle des pluies d'une saison à l'autre. Les précipitations se concentrent en automne, avec une moyenne automnale de 76 mm à Z. S. Hamza, 66 mm à Fom Zaabel, 55 mm à Tadighoust et 25 mm à Erfoud, mais par contre l'hiver est la saison à maxima pluviométriques saisonnières dans la station de Tazarine. Dans ces postes

pluviométriques, se sont l'automne et l'hiver qui marquent les deux pics de pluies saisonnières. Après la lecture des données statistiques des précipitations moyennes saisonnières (figure 61), on registre que ces valeurs expliquent la rareté des pluies en période estivale qui dure généralement trois mois de juin à aout. Le mois le plus sec est juillet (7 mm à Zaouat Sidi Hamza, 3 mm à Foum Zaabel et 1 mm à Errachidia, Erfoud et Alnif).



(Source des données brutes : AHGZR ; 2014)

Figure 61 : Distribution des précipitations moyennes saisonnières en % sur Z. S .Hamza, Tadighoust, Tazarine et Erfoud (1957-58/2008-09)

Pour la période estivale, on peut dire aussi qu'il y a une faiblesse des précipitations avec des moyennes de températures très élevées, notamment juillet avec des vents desséchants (Chergui et Sehli) dus à la couverture de la zone d'étude sous l'influence des courants sahariens secs. Durant cette saison, les mois de juin, juillet et aout totalisent moins de (19 mm à Z. S. Hamza, 16 mm à Tadighoust et Tazarine et 9 mm à Erfoud). On peut noter aussi l'existence de deux mois transitoires (mai et septembre). Ils contiennent de rares précipitations localisées à caractères orageux et dont le volume est le plus souvent faible avec

un impact sur l'assèchement total de la quasi-totalité des affluents constituant le BV de l'oued Daoura.

| Bassin | stations | Hiver | % | Printemps (A.M.J) | % | Eté | % | Automne (O.N.D) | % | P moyennes en mm | Régime saisonnier moyen |
|---------|---------------|---------|----|----------------------|----|---------|----|--------------------|----|------------------------|-------------------------------|
| | | (J.F.M) | | | | (J.O.S) | | | | | |
| Ziz | Z S Hamza | 70 | 26 | 72 | 27 | 52 | 19 | 76 | 28 | 270 | (APH)E |
| | Foum Tillicht | 51 | 24 | 64 | 30 | 41 | 19 | 58 | 27 | 214 | PAHE |
| | M'zizel | 46 | 24 | 52 | 28 | 37 | 20 | 54 | 29 | 189 | (PA)HE |
| | Foum Zaabel | 53 | 27 | 46 | 24 | 29 | 15 | 66 | 34 | 194 | AHPE |
| | B. H Addakhil | 38 | 29 | 25 | 19 | 16 | 12 | 51 | 39 | 130 | (AH)PE |
| | Errachidia | 37 | 30 | 29 | 23 | 14 | 11 | 44 | 35 | 124 | (AH)PE |
| | Erfoud | 23 | 35 | 13 | 20 | 6 | 9 | 24 | 36 | 66 | (AH)PE |
| Rhériss | Amouguer | 42 | 23 | 48 | 27 | 40 | 22 | 51 | 28 | 181 | APHE |
| | Ait Boujaine | 40 | 30 | 31 | 23 | 23 | 17 | 40 | 30 | 134 | AHPE |
| | Tadighoust | 39 | 27 | 31 | 21 | 23 | 16 | 53 | 36 | 146 | AHPE |
| | Meroutcha | 32 | 28 | 29 | 26 | 14 | 12 | 38 | 34 | 113 | AHPE |
| Maider | Alnif | 28 | 29 | 21 | 22 | 14 | 15 | 33 | 34 | 96 | AHPE |
| | Tazarine | 31 | 33 | 24 | 25 | 15 | 16 | 25 | 26 | 95 | HAPE |

(Source des données brutes : AHGZR ; 2014)

Tableau 38 : Répartitions saisonnière des pluies moyennes annuelles en mm (1957-58/2008-09)

Afin de définir et de comprendre la variabilité spatiotemporelle des précipitations moyennes saisonnières et leurs impacts sur la réponse et le fonctionnement hydrologique du BV de l'oued Daoura, nous avons suivi une approche cartographique qui se base essentiellement sur la méthode *Géostatistique de Splines* (Arc-Maps,Arc-Gis ;10.2), pour interpoler les précipitations moyennes saisonnières des postes pluviométriques localisées au sein du BV de l'oued Daoura durant la période de (1957-58/2008-09).

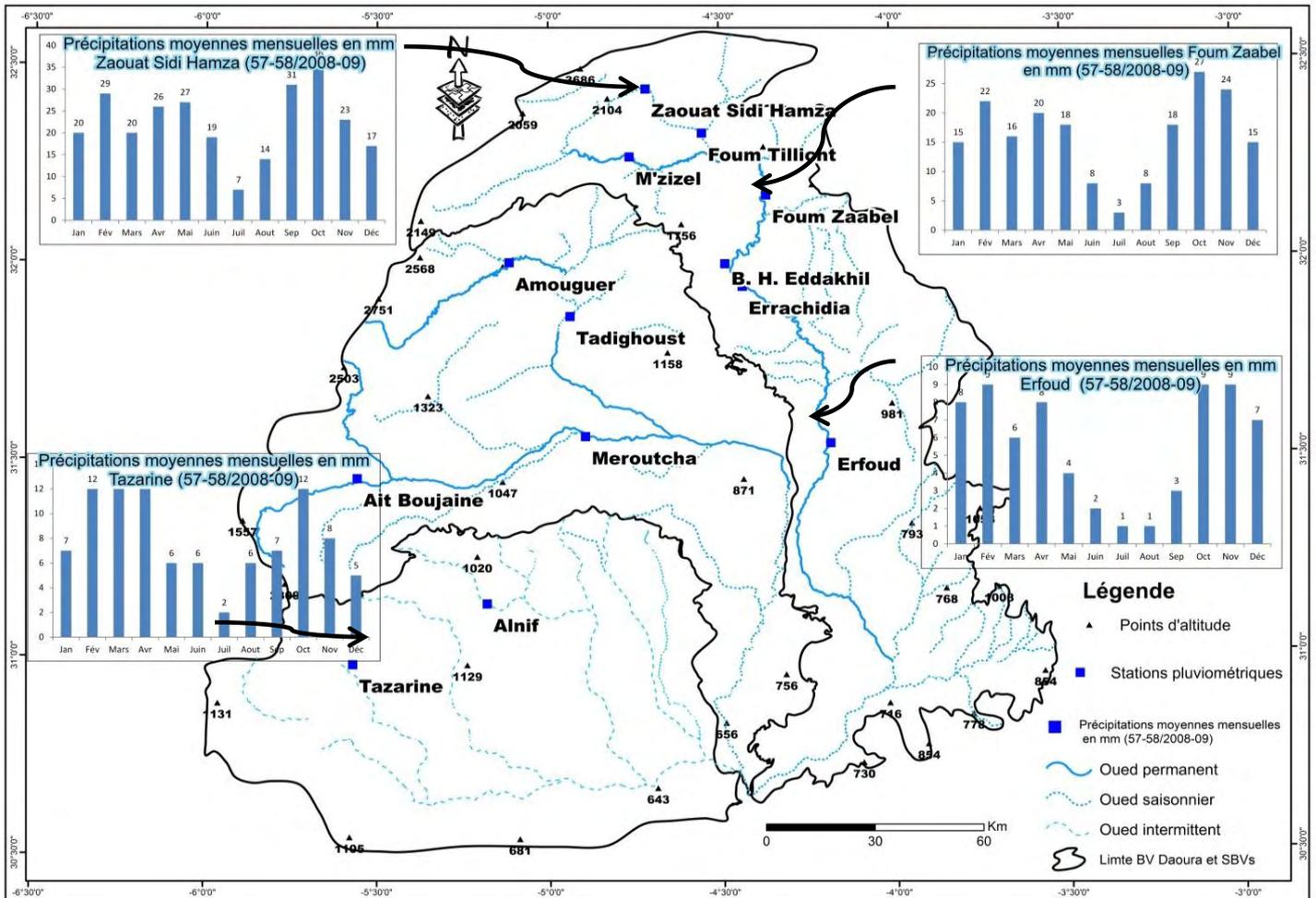
D'après les cartes de la spatialisation des précipitations moyennes saisonnières réalisées selon la méthode *Géostatistique de Spline*, on observe une concentration pluviométrique dans la saison automnale, à l'exception de la station de Tazarine qui connaît une saison pluvieuse en hiver.

Les pluies saisonnières connaissent une grande irrégularité d'une saison à l'autre au sein de la même station. D'une manière générale la répartition spatiale des précipitations moyennes saisonnières est différente du Nord vers le Sud. En effet, pour les stations pluviométriques localisées dans le secteur montagneux du Haut-atlas au Nord (Z. S. Hamza, M'zizel, Amouguer et Tadighoust) la pluviométrie est forte au printemps et enregistrent respectivement (28%, 29%, 28% et 36%). Pour les stations situées au Sud du BV de l'oued Daoura, l'hiver est marqué par des fortes pluies sous forme des orages exceptionnels. (Ait Boujaine 30 % et Tazarine 33%).

On peut dire aussi que la répartition saisonnière des précipitations est en fonction de l'altitude.

3-6-7-Variabilité des précipitations mensuelles

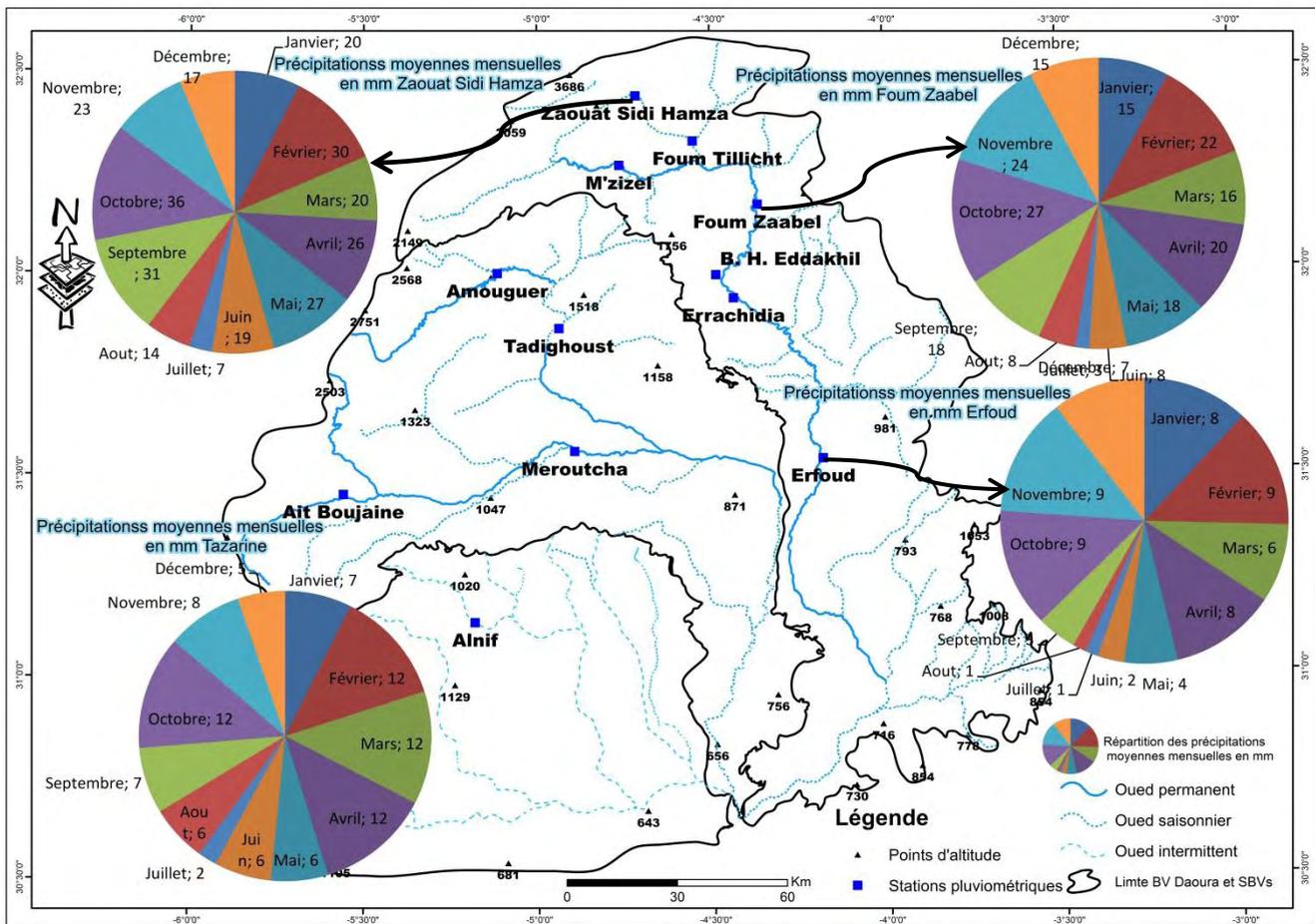
L'analyse et le traitement de données des précipitations moyennes mensuelles nous permettent d'identifier et de connaître les différentes variations du régime saisonnier. Les précipitations moyennes mensuelles sont très irrégulières dans le temps et dans l'espace. La figure ci-dessous représente des oscillations d'un mois à l'autre.



(Source des données brutes : AHGZR ; 2014)

Figure 63: Répartition mensuelle des pluies moyennes dans les 4 stations pluviométriques du BV de l'oued Daoura et ses SBVs

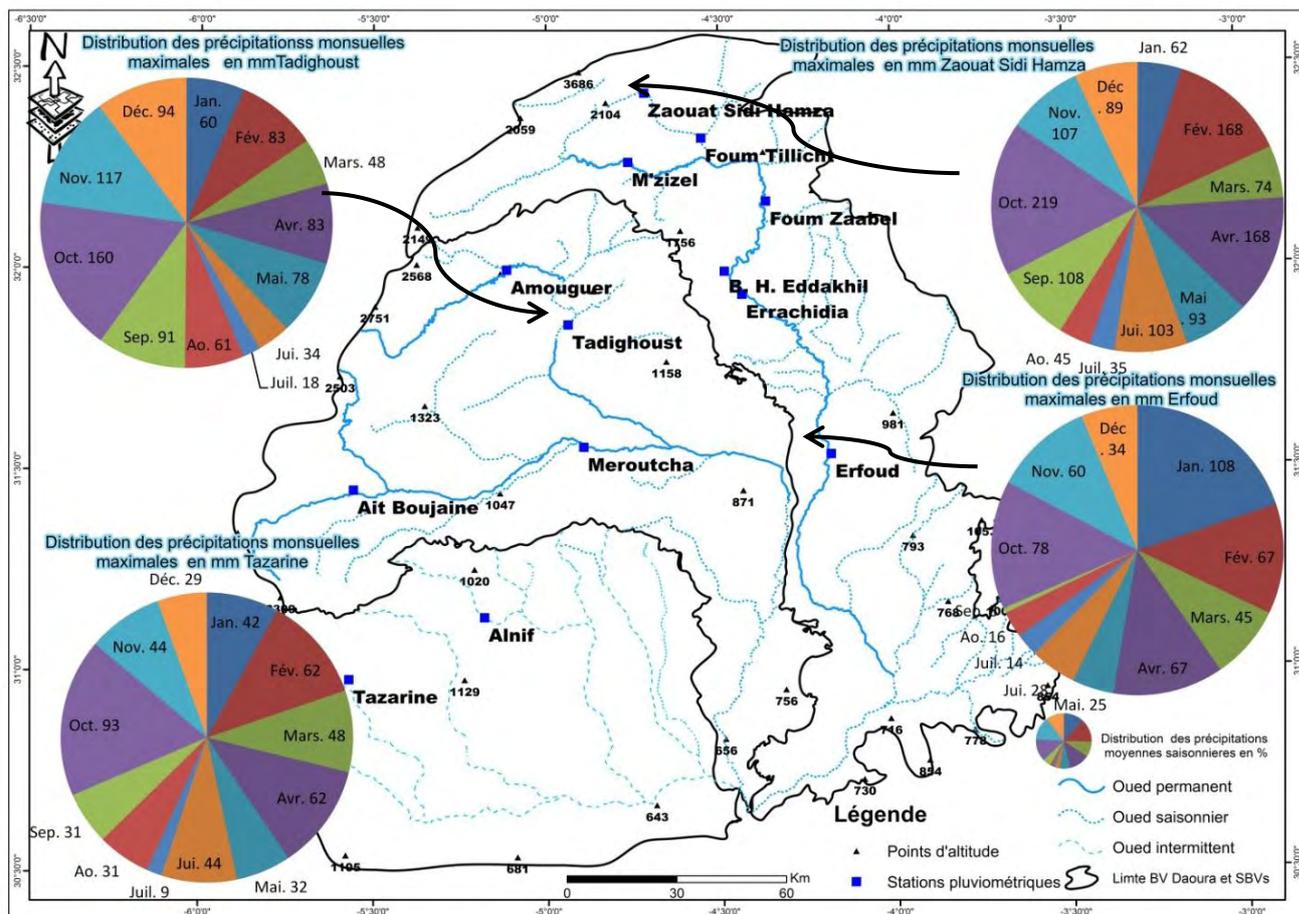
Selon la figure précédente, les précipitations moyennes mensuelles qui sont visualisées sur la figure 63, montre que la répartition des pluies est très irrégulière et mal répartie dans l'année. Elle se caractérise par la dominance de deux saisons : l'automne et le printemps. La période pluvieuse s'étend de septembre à mai, présentant des valeurs maximales en octobre dans la majorité des stations de la zone d'étude : Z. S. Hamza (36 mm) ; Fom Tillicht (29 mm) ; Ait Boujaine (21 mm) ; Alnif (15 mm), le mois de septembre pour la station d'Amouguer (27 mm) et le mois de novembre pour la station du barrage H. Addakhil (21 mm).



(Source des données brutes : AHGZR ; 2014)

Figure 64: Répartition mensuelle des pluies moyennes aux stations pluviométriques de Z.S. Hamza, Fom Zaabel, Erfoud et Tazarine.

Mais le mois de juillet est le mois le plus sec au niveau de toutes les stations avec des moyennes mensuelles, qui varient entre 7 mm à Z. S. Hamza (Domaine du Haut-Atlas) et 1 mm aux stations d'Errachidia, d'Erfoud, de Tadighoust, de Merroucha et d'Alnif. Les rapports entre les mois les plus humides et les mois les plus secs sont essentiellement importants, mais avec une répartition spatiale très variée du Nord au Sud et de l'Est vers l'Ouest (5.1 à Zaouat Sidi Hamza ; 5.8 à Fom Tillicht, 9.3 à M'zizel, 9 à Fom Zaabel ; 10.5 à barrage H. Addakhil ; 18 à Errachidia ; 9 pour Erfoud et Amouguer ; 20 à Tadighoust ; 17 à Merroucha ; 15 à Alnif et 6 à Tazarine. Cette irrégularité explique la variation spatiotemporelle des précipitations moyennes mensuelles d'une station à l'autre et d'un mois à l'autre.



(Source des données brutes : AHGZR ; 2014)

Figure 65 : Précipitations mensuelles maximales en mm dans les stations de Zaouat Sidi Hamza, Tadighoust, Erfoud et de Tazarine (1957-58/2008-2009)

3-6-8- Quels impacts du réchauffement climatique sur les modes de variabilité des précipitations dans le BV de Daoura ?

Le BV de Doura (35000 km²) fait partie de la grande moitié Sud présaharienne marocaine où l'aridité est le handicap majeur de tous les jours et donc les disponibilités en eau sont une précieuse ressource pour le développement. Cette contrainte hydrique se pose avec acuité dans un contexte de réchauffement climatique global qui a un impact sur les ressources hydriques régionales. La pluviométrie, comme élément climatique clé de la ressource hydrique, nécessite une étude très fine et assez précise pour dégager une éventuelle amorce d'un tel changement et identifier les tendances pluviométriques actuelles. Un tel objectif a nécessité des données pluviométriques mensuelles enregistrées sur une dizaine de stations climatiques et pendant une période de plus d'un demi-siècle (1957/58-2008/2009). Après un test d'homogénéité de Wong, une analyse en Composantes principales, effectuée sur les variables pluviométriques mensuelles, est utilisée pour la reconstitution des données manquantes et pour une

régionalisation spatio-temporelle. Les scores, ainsi déduits de cette régionalisation, seront utilisés pour une analyse des tendances pluviométrique, selon le test de Man Kendall, et pour une analyse d'une amorce d'un changement selon les tests de stationnarité de Pettitt et d'Hubert. Les résultats obtenus contribuent à la mise en place d'une gestion durable des ressources en eau dans un milieu présaharien où les ressources oasiennes représentent un enjeu majeur, fortement menacé par le réchauffement climatique.

Le dernier rapport du GIEC (*groupe d'experts_Intergouvernemental sur l'évolution du climat*) a fait état d'un réchauffement climatique mondial, d'origine anthropique, sans équivoque qui sera caractérisée par une baisse des précipitations d'environ de 20% pour la décennie 2090, notamment en Afrique du Nord-Ouest (*GIEC, 2007*). A l'instar des pays en développement, le Maroc est de plus en plus confronté à ce risque qui menace la ressource hydrique du pays.

En effet, au Maroc, le cumul des précipitations a connu une baisse importante d'environ 30% depuis le milieu des années 70 (*Driouech, 2010 ; Hanchane, 2010 ; Hanchane, 2015; Sabber et al, 2011 ; Knippertz and al. 2003 ; Born and al. 2008*). Globalement, cette diminution est accompagnée par une augmentation de la radiation solaire et une réduction de l'humidité relative (*Hess, 1998*). Un réchauffement net de 2°C entre les années 1970 et 1990 a ainsi été enregistré (*Zoubair et al. 2001*).

Au Maroc, l'eau est une ressource vitale pour l'alimentation de la population, pour l'agriculture et le bétail. Cette ressource dépend étroitement des apports pluviométriques et la connaissance de leur évolution dans un contexte de changement climatique est primordiale.

Les zones oasiennes marocaines, où domine un climat aride à saharien, sont les plus menacées par ce risque, car la vie des populations y est organisée autour de l'eau; l'irrigation est la préoccupation essentielle étant donné l'extrême aridité (moins de 100 mm/an). Seuls les oueds sont des lieux de vie sédentaire, et les oasis se confondent souvent avec les cours d'eau. L'impact des changements climatiques et anthropiques sur les ressources en eau dans ce milieu vulnérable permet de constater que les ressources hydriques dépassent largement les capacités de ces milieux. Il est donc crucial d'avoir une idée exhaustive sur les variations récentes du climat en vue d'évaluer les projections climatiques régionales. De nombreuses études se sont intéressées à ces milieux arides du pays et ont toutes souligné la problématique de gestion de la

ressource hydrique face au risque de changement climatique (*Bouhlassa et Paré, 2006; Mina, A. 1991; Le Houérou, 1995; Paré, 2006; Martin 2006; Ilahiane, 1996; Quintal, 2010*).

Dans cet ordre, il paraît nécessaire, sur le plan climatologique, de vérifier la tendance actuelle des précipitations et de détecter une éventuelle amorce d'un changement à différents pas de temps. En milieu oasien où la contrainte hydrique, liée à l'aridité du climat, est très forte, cette question se pose avec plus d'acuité. Dans ces régions continentales, à climat de type aride à saharien, les précipitations sont produites en majeure partie par de fortes averses et des orages. Les moyennes mensuelles et annuelles sont donc sujettes à de grandes fluctuations, tant dans l'espace que dans le temps. Celle-ci est souvent concomitante avec des épisodes à forte intensité pluviométrique et de crue des oueds qui peuvent entraîner de véritables drames et freiner le développement des régions touchées. On citera les crues d'oued Ziz de 2008 et la sécheresse de début des années 90.

Cette étude porte plus spécialement sur le BV de Daoura qui est caractérisé par une irrégularité des précipitations, une sédentarisation des populations, remontant à plusieurs siècles, et une activité agricole en irrigué qui constitue les principales sources de revenus de la population. Elle est fondée sur une série de données pluviométriques mensuelles qui sont issues du réseau d'observation de l'Agence du Bassin Hydraulique du Guir-Ziz-Rhériss (Province Errachidia). L'information pluviométrique de la zone d'étude provient de 13 stations pluviométriques, elles sont réparties de manière hétérogène sur le bassin.

L'objectif ultime est la mise en place de stratégies d'adaptation et de résilience face au risque de réchauffement climatique.

Ainsi, la présente étude repose essentiellement sur :

- un test d'homogénéité de Wong des séries pluviométriques ;
- une Analyse en Composantes principales (ACP), effectuée sur les variables pluviométriques mensuelles, pour la reconstitution des données manquantes et pour la régionalisation spatio-temporelle;
- une analyse de tendance (test de Mann Kendall) et de détection de rupture (tests de stationnarité de Pettitt), s sur les scores obtenus par ACP.

3-6-8-1 Bassin versant subdésertique de Daoura et son environnement oasien

Le climat est principalement semi-désertique à forte influence continentale. L'aridité qui caractérise la zone d'étude relevée, est marquée par des précipitations insuffisantes pour assurer

le maintien de la végétation, celles-ci étant piégées par les sommets montagneux des Atlas. Les écarts thermiques annuels et journaliers importants augmentent aussi en se dirigeant des zones montagneuses du nord vers les plateaux désertiques au sud.

Le champ des précipitations est marqué par une forte irrégularité spatiotemporelle, passant de 270 mm sur les reliefs du haut Atlas, au nord, (station de Zaouat Sidi Hamza) à 130 mm dans la zone d'Errachidia, au centre, pour chuter à moins de 70 mm, au niveau de la plaine de Tafilalet (station d'Erfoud), au sud. La variabilité interannuelle peut atteindre 50 % et le nombre de jours pluie ne dépassant pas une dizaine de jours, témoin d'un fort ensoleillement d'une durée de 330 jours. La région connaît aussi des pluies orageuses à l'origine des crues d'oueds dont certaines causent des dégâts matériels et humains importants.

Le long des oueds de la zone d'étude, domine un climat local oasien, différent du climat environnant qui est marqué par de fortes amplitudes thermiques journalières à cause d'un fort flux radiatif et d'une faible nébulosité : les apports radiatifs journaliers sont réémis sous forme de rayonnement infra-rouge en période nocturne par la surface. La vitesse du vent est souvent élevée à l'extérieur de l'oasis à cause de la faible rugosité du désert. L'oasis modifie en fait ces trois éléments climatiques par (i) la présence en eau en surface (nappe phréatique peu profonde et/ou irrigation); (ii) la présence des arbres augmente la force de frottement du vent; (iii) la stratification de la végétation agit sur la répartition du flux radiatif (*Riou, 1990*).

3-6-8-2 Données et méthodologie d'analyse des séries pluviométriques temporelles

L'agence du bassin hydraulique du Guir-Ziz-Rhériss est dotée d'un réseau de stations climatiques qui mesurent essentiellement les données pluviométriques. Du fait de la dominance d'un environnement désertique monotone au sud, le réseau d'observation est moins dense qu'en milieu montagnard, au nord, où les conditions climatiques sont plus contrastées. Les données pluviométriques mensuelles collectées ont concerné 13 stations dont la période d'observation est d'un peu plus d'un demi-siècle (1957-2009) (tableau 39). Elles couvrent les bioclimats aride et saharien.

Habituellement, l'enregistrement des données peut connaître un déplacement des postes d'observation, de changement d'observateur ou de modification du matériel d'enregistrement. C'est la raison pour laquelle un test de leur homogénéité est indispensable. En plus, les séries présentent certaines lacunes qu'il fallait aussi combler. Ce sont donc les deux premières

contraintes qu'il a fallu surpasser avant même d'effectuer une régionalisation spatio-temporelle et une analyse de tendances et de ruptures dans les séries pluviométriques temporelles.

| BV | Stations | Latitude (°,') | Longitude (°,') | Altitude (m) | P MA* (mm) |
|---------|-------------------------|----------------|-----------------|--------------|------------|
| Ziz | Zaouyat Sidi Hamza | 32°43' | 4°71' | 1665 | 269 |
| | Foum Tillicht | 32°32' | 4°55' | 1600 | 215 |
| | M'zizel | 32°26' | 4°76' | 1441 | 189 |
| | Foum Zaabel | 32°16' | 4°36' | 1230 | 195 |
| | Barrage Hassan Addakhil | 31°99' | 4°48' | 1130 | 130 |
| | Errachidia | 31°93' | 4°43' | 1028 | 124 |
| | Erfoud | 31°53' | 4°18' | 823 | 66 |
| Rhériss | Amouguer | 31°96' | 5°11' | 1400 | 180 |
| | Ait Boujaine | 31°45' | 5°56' | 1350 | 144 |
| | Tadighoust | 31°85' | 4°93' | 1150 | 148 |
| | Meroutcha | 31°55' | 4°89' | 950 | 115 |
| Maïder | Alnif | 31°13' | 5°18' | 875 | 95 |
| | Tazarine | 30°79' | 5°57' | 854 | 96 |

(Source des données brutes : AHGZR ; 2014)

(* : Pluviométrie Moyenne Annuelle ; BV : Bassin Versant)

Tableau 39: Position géographique des stations étudiées (Période : septembre 1957- aout 2009)

3-6-8-2-1 Reconstitution des données manquantes par ACP

L'une des contraintes majeures en analyse des séries climatiques temporelles est la présence de lacunes dans les données enregistrées. Pour pallier à ce problème, l'analyse en composantes est une méthode statistique qui s'est avérée efficace. D'un point de vue géométrique, son principe consiste en une minimisation de l'erreur de reconstitution, par approximation de la matrice de données initiale et par une matrice de rang inférieur. (Josse et Husson, 2011).

3-6-8-2-2 Test d'homogénéité de Wong

Ce test est basé sur la technique PMF (Penalized Maximal F-test : test F maxima avec pénalité) qui est développée par Wang (2008) (*logiciel RHtestV3 fonctionnant sous environnement R*). Son objectif est d'identifier et d'ajuster les variations non climatiques de la pluviométrie annuelle, causées par des changements artificiels (changement de pluviomètre, de poste, d'observateur...), qui peuvent nuire à l'évaluation des tendances en induisant des erreurs autorégressives du premier ordre. Il permet à une série temporelle testée d'avoir une tendance nulle ou linéaire pendant toute la durée enregistrée (c.-à-d. qu'il n'y a pas de changement dans la tendance). Dans notre cas, l'option de choisir une série de référence n'a pas été utilisée; c'est

la série de base qui est testée. Si un point de changement est détecté, le test nous renseigne s'il est, peu ou très significatif.

3-6-8-2-3 Régionalisation des précipitations mensuelles

La régionalisation des précipitations a été obtenue par une Analyse en Composantes principales avec Rotation de type Varimax (ACPR) qui a pour particularité de conserver l'orthogonalité entre les facteurs (*Richman, 1986*). Elle a été effectuée sur les cumuls pluviométriques mensuels et appliquée pour les 13 stations citées précédemment (tableau 47), durant la période allant de septembre 1958 à aout 2009.

L'ACPR regroupe sur chacun de ses facteurs les stations dont les évolutions temporelles se ressemblent, sans tenir compte de l'effet de taille ni d'un éventuel événement extrême du fait de la standardisation des données. En effet, l'existence d'un pic pluviométrique extrême ne peut pas modifier la régionalisation, même si celle-ci est dépendante du réseau des stations. Il y a ainsi autant de facteurs que de régions retenues. Chaque facteur n'explique qu'une partie de la variance des stations qu'il regroupe. Cette variance est désignée sous le terme de « variance expliquée ». Enfin, l'ACPR permet d'effectuer une régionalisation spatio-temporelle. Chaque région sera caractérisée par une tendance particulière en termes de précipitations mensuelles.

Les divers paramètres, associés aux précipitations mensuelles et correspondantes à chaque station, ont été à chaque fois régionalisés par l'ACPR avec les stations en variables (colonnes) et le temps (lignes) en observation.

Pour chaque groupe de stations ainsi régionalisées, des séries temporelles sont déterminées (scores) selon les divers paramètres étudiés. Ces séries temporelles, des tests non paramétriques de tendance linéaire et de stationnarité (présence de rupture ou non) ont été calculés. Nous conservons dans cette étude les résultats significatifs pour une région et un mois donnés. Seules seront représentées, les scores et les précipitations de la station la mieux représentative d'une région donnée, déduite selon l'ACPR.

3-6-8-2-4 Test de tendance de Mann-Kendall

Les séries temporelles relatives aux scores sont déterminées pour chacune des variables pluviométriques régionalisées. La significativité des tendances est évaluée à l'aide du test de Mann-Kendall. Ce test a l'avantage d'être non paramétrique (ne fait aucune hypothèse sur la distribution sous-jacente des données) et il est recommandé par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM).

En principe, chaque série temporelle est évaluée en tant que série ordonnée. Chaque donnée de la série est comparée à celle qui lui succède. La valeur initiale de la statistique **S** est initiée à 0 ; soit aucune tendance n'est décelée encore. Elle est ensuite incrémentée de 1 lorsque l'observation de l'année suivante (x_j) est supérieure à celle qui la précède (x_k) ou décrémentée de 1 dans le cas contraire, comme suit :

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sig}(x_j - x_k)$$

Avec : $\text{sig}(x_j - x_k) = 1$ si $x_j - x_k > 0$
 $\text{sig}(x_j - x_k) = 0$ si $x_j - x_k = 0$
 $\text{sig}(x_j - x_k) = -1$ si $x_j - x_k < 0$

Le résultat de toutes les augmentations et les diminutions est la valeur finale de **S**. Une forte valeur non nulle de **S** indique l'existence d'une tendance. Cependant, pour trancher vis-à-vis de la significativité de la tendance on calcule la probabilité associée à **S** et **n** (tailles de l'échantillon). Ceci est effectué à l'aide de la statistique **Z** comme suit :

$$Z = \frac{(S-1)}{[VAR(S)]^{1/2}} ; \text{ si } S > 0 ; \quad Z = 0 ; \text{ si } S = 0 ; \quad Z = \frac{(S+1)}{[VAR(S)]^{1/2}} ; \text{ si } S < 0$$

Z suit une loi normale de moyenne 0 et d'écart-type 1. L'hypothèse nulle est rejetée si la probabilité est supérieure au seuil $\alpha\%$ (p-value). Cela signifie que la tendance a moins de $\alpha\%$ de chance d'être obtenue par un simple hasard. Elle est donc statistiquement significative à « 100- $\alpha\%$ ». Il s'agit ici de tester la nullité de la tendance des données c.à.d. aucune tendance significative. La p value (α) est comprise entre des niveaux de significativité allant de 0.001 et 0.1.

3-6-8-2-5 Test de stationnarité de Pettitt

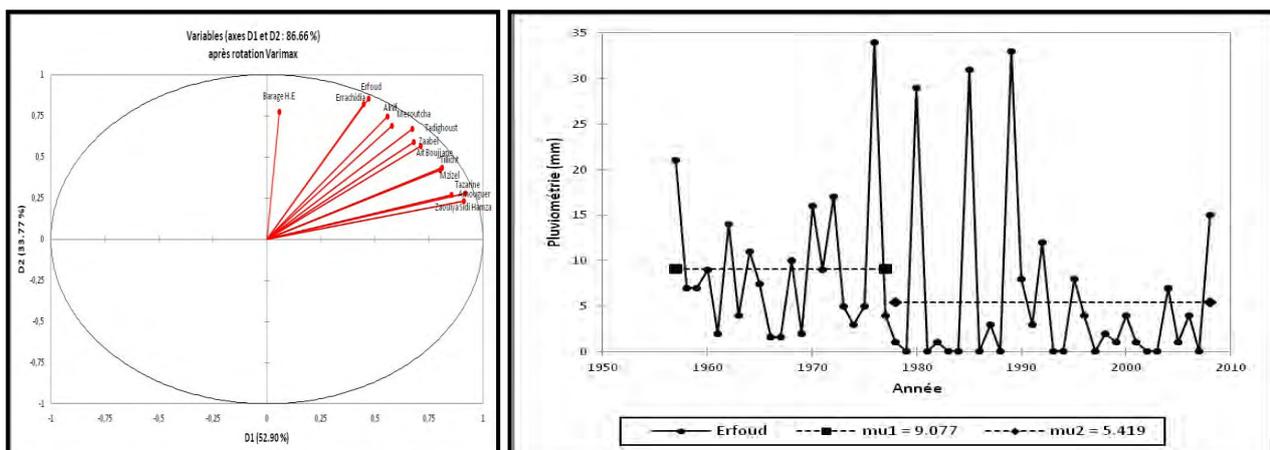
Ce test permet de détecter des ruptures dans les séries chronologiques (*Pettitt, 1979*). La série étudiée est divisée en deux sous-échantillons respectivement de taille **m** et **n**. Les valeurs des deux échantillons sont regroupées et classées par ordre croissant. On calcule alors la somme des rangs des éléments de chaque sous-échantillon dans l'échantillon total. Une statistique est définie à partir des deux sommes ainsi déterminées, et testées sous l'hypothèse nulle (absence de rupture) d'appartenance des deux sous-échantillons à la même population. Au maximum observé sur la série correspond vraisemblablement à la date de rupture. La valeur p de la statistique permet de savoir si cette rupture est statistiquement significative au seuil α (*Hanchane .M ; 2013*).

3-6-8-3 Résultats : A la recherche d'une amorce d'un changement climatique

Contrairement aux résultats des projections futures des précipitations au Maroc, fondés sur la modélisation du climat (Driouech, 2010), les résultats obtenus à partir des données pluviométriques actuelles **ne montrent pas de diminution généralisée sur l'ensemble du bassin de Daoura et pour les différents mois de l'année.**

En procédant par une ACPR sur les différents mois de l'année et pour la période d'observation septembre 1958-aout 2009 et en appliquant les tests de Mann-Kendall sur les scores des axes factoriels (D1 et D2) qui maximisent la variance expliquée, on note une absence de tendance significative pour tous les mois. Par ailleurs, le test de rupture de tendance de Pettitt a montré une rupture significative au niveau des scores du 2^{ème} axe factoriel, D2, pour les mois de décembre et de mars.

En effet, l'ACPR effectué sur le mois de décembre a différencié deux composantes (D1 et D2) qui expliquent 87 % de la variance totale. L'axe D1 (53 % de variance expliquée) regroupe les stations soumises surtout aux influences orographiques alors le second axe, D2 (34 % de variance expliquée), est représentatif des stations soumises aux influences désertiques du sud. Les scores de ce dernier axe D2 ont montré une rupture significative. La station la plus corrélée à cet axe est celle d'Erfoud où on enregistre une rupture en 1977 : la pluviométrie moyenne mensuelle est passée de 9 mm, durant la période 1958-1976, à 5 mm entre 1977 et 2009. Cette rupture est suivie d'une période de sécheresse qui a marqué toute la période des années 90 et le début de ce 21^{ème} siècle (figure 66).



(Source des données brutes : AHGZR ; 2014)

Figure 66 : Régionalisation spatiale des précipitations du mois de décembre (à gauche) et rupture de la série pluviométrique de la station d'Erfoud, la plus représentative du second axe factoriel (à droite).

différenciation spatio-temporelle des séries pluviométriques mensuelles a été dégagée dans cette étude. il s'agit :

- ❖ D'une amorce d'une phase humide, constatée depuis la fin des années 80, en régions montagneuses du Haut- atlas durant le mois de mars ;
- ❖ D'un début d'une phase sèche, détectée depuis le milieu des années 70, au cours du mois de décembre en régions soumises aux influences désertiques.

Ces deux résultats contrastés laissent supposer que la région a connu, durant les trois dernières décennies, un affaiblissement des flux perturbés d'hiver vers le Sud et un accroissement des pluies orageuses printanières en régions de montagnes. Il semblerait donc qu'en plus de la rareté systématiques des pluies dans les régions sub-désertiques sud. Celles-ci seront probablement menacées par une diminution des pluies en période hivernale. En outre, l'accroissement des pluies printanières sur les montagnes du Haut Atlas laissent supposer l'accroissement du risque d'inondation en aval surtout du sous bassin de Ziz

3-7- L'évapotranspiration, un élément climatique déterminant en milieu aride du BV de l'oued Daoura

L'évapotranspiration est la combinaison de deux processus : l'évaporation physique et la transpiration des végétaux. Dans ce sens on distingue essentiellement : l'évapotranspiration réelle (ETR) qui est la quantité d'eau réellement évaporée sous forme de vapeur, et l'évapotranspiration potentielle qui est la quantité d'eau qui est aurait pu s'évaporer si le sol était saturé en eau. De plus, la définition de l'évapotranspiration réelle est inférieure ou égale à l'évapotranspiration potentielle. Les valeurs de l'ETP sont corrélatives des moyennes des températures enregistrées : plus la température moyenne annuelle est forte, plus l'ETP sera aussi forte (Sirtou. M ; 1995).

Après la recherche bibliographique, plusieurs méthodes ont été utilisées afin de mesurer et d'estimer l'évaporation et l'ETP. Ces méthodes employées peuvent être classées en deux grands types :

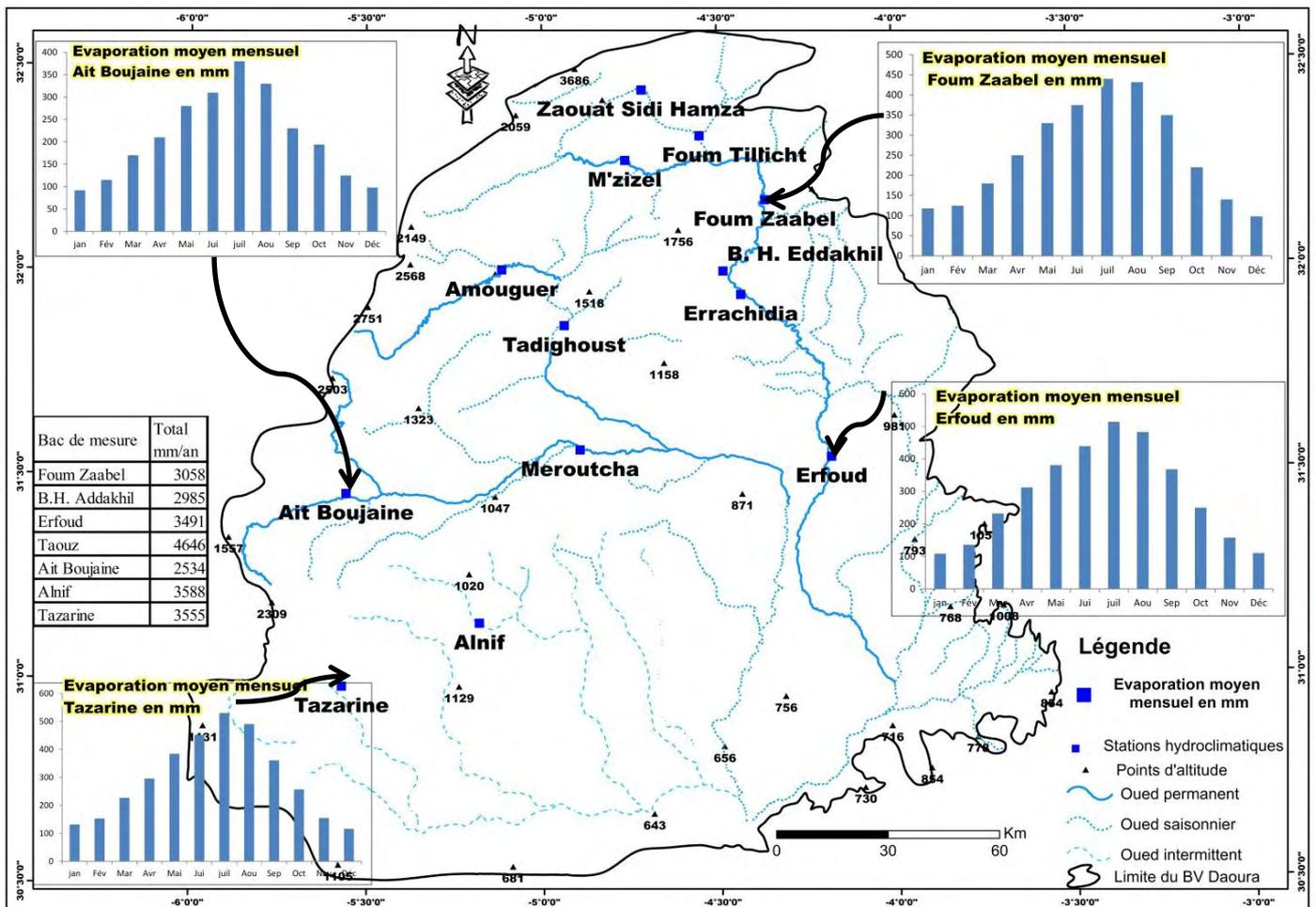
- ❖ Mesures directes de l'évaporation par des bacs de mesures rempli d'eau réparties au sein de Daoura sont gérées par l'agence hydraulique des bassins de Guir, Ziz et Rhériss. En l'absence de pluie, la variation du niveau dans le Bac est supposée proportionnelle à l'évapotranspiration, car l'eau du Bac est soumise aux mêmes conditions climatiques. Selon la FAO, la méthode de Bacs d'enregistrement de l'évaporation donnerait des estimations acceptables par rapport aux autres méthodes utilisées.

- ❖ Méthodes empiriques, notamment la formule de Thornthwaite (1948) ;



Photo 13: Bac d'évaporation cubique de 1 m d'arête utilisé dans la station météorologique d'Erfoud (05/06/2015)

Les mesures réalisées par les bacs de l'agence hydraulique dans plusieurs stations d'enregistrement réparties dans la zone d'étude et ses bordures ont enregistré des moyennes supérieures aux précipitations moyennes interannuelles, la figure et le tableau ci-dessous expliquent la variation spatiotemporelle de l'évapotranspiration dans la zone d'étude.



(Source des données brutes : AHGZR ; 2014)

Figure 68 : La répartition spatiale de l'évaporation moyenne mensuelle en mm (1974-75/2008-2009) du bassin versant de l'oued Daoura et ses SBVs (Bac de mesure)

D'après les résultats obtenus dans la figure 68, on remarque qu'il y a une variation spatiotemporelle de la moyenne mensuelle de l'évaporation d'une part, et, d'autre part, la moyenne annuelle est de l'ordre de 3058 mm/an à Foug Zaabel, de 2985 mm/an à B. H. Addakhil, de 3491 mm/an à Erfoud, de 4646 mm/an à Taouz, de 2534 mm/an à Ait Boujaine, de 3588 mm/an à Alnif et de 3555 mm/an à Tazarine, le tableau ci-dessus dégage une variabilité spatiale des lames d'eau moyennes évapotranspirées entre l'amont et l'aval de la zone d'étude. Cependant, on observe dans la station de Foug Zaabel que la moyenne ne dépasse pas 3058 mm/an, par contre le Bac enregistre 4646 mm/an à la station de Taouz située dans la partie aval de la zone d'étude. Ces valeurs augmentent du Nord vers le Sud parallèlement avec la température.

| BV | Evaporation moyen annuel mm /an |
|---------|---------------------------------|
| Ziz | 3545 |
| Rhériss | 2534 |
| Maidar | 3572 |

(Source des données brutes : AHGZR ; 2014)

Tableau 40 : L'évaporation moyen annuel selon les bassins versants de l'oued Daoura;

En d'autre terme, pour évaluer l'ETP sur la période (1982-83/2008-09), nous allons utiliser la méthode de Thornthwaite 1948, la formule utilisée est la suivante :

$$ETP(m) = 16 * \left[\frac{10 * T(m)}{I} \right]^a * F(m, \varphi)$$

Avec :

ETP (m) : L'évapotranspiration moyenne du mois m (m = 1 à 12) en mm,

T : Moyenne interannuelle des températures du mois, °C

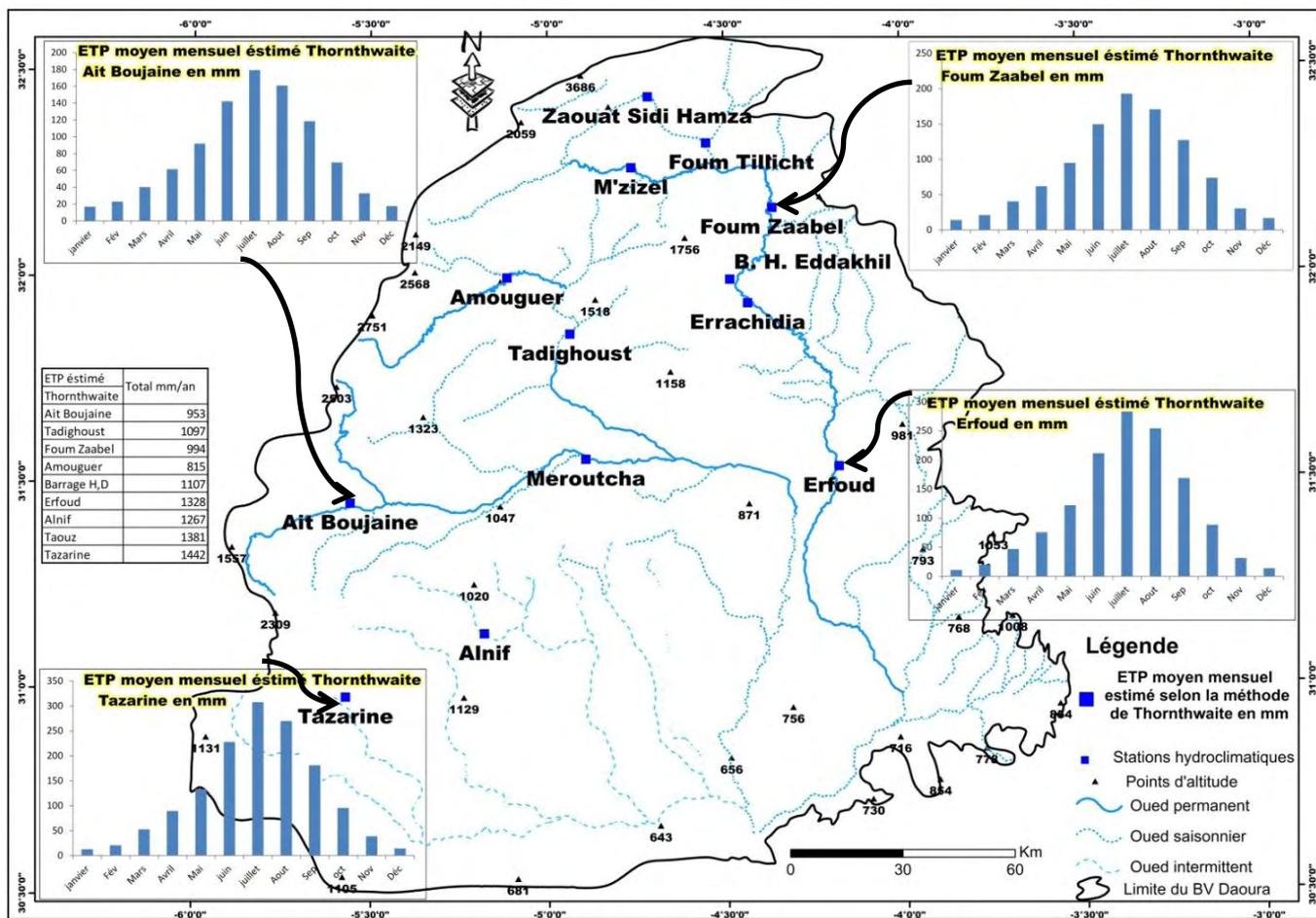
a : $0,016 * I + 0,5$

Indice thermique annuel :

K : Correction liée à la latitude (durée maxi de l'ensoleillement)

$$I = \sum_{m=1}^{12} i(m) i'm = \left[\frac{T(m)}{5} \right]^{1,514} \quad (\text{Source : Allen et al. 1994})$$

Le calcul de l'évapotranspiration potentielle moyenne annuelle selon la méthode de Thornthwaite (1948) a été calculé pour 8 stations réparties dans la zone d'étude. Les principaux résultats de la variabilité spatiale de l'ETP sont illustrés dans la carte ci-dessous :



(Source des données brutes : AHGZR ; 2014)

Figure 69: l'ETP estimée par la méthode de Thornthwaite (1948) aux différentes stations météorologiques du BV de l'oued Daoura (mm/an), (1982-83/2008/09)

| Stations | jan | Fév | Mars | Avr | Mai | juin | juil | Aout | Sep | Oct | Nov | Déc | Total |
|--------------|-----|-----|------|-----|-----|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-------|
| Ait Boujaine | 17 | 23 | 40 | 61 | 92 | 142 | 179 | 161 | 118 | 69 | 33 | 17 | 953 |
| Tadighoust | 13 | 19 | 43 | 73 | 108 | 177 | 225 | 177 | 140 | 75 | 32 | 15 | 1097 |
| Foug Zaabel | 14 | 21 | 40 | 62 | 95 | 150 | 193 | 171 | 127 | 74 | 31 | 17 | 994 |
| Amouguer | 17 | 24 | 42 | 56 | 70 | 99 | 151 | 139 | 101 | 62 | 34 | 20 | 815 |
| Barrage H.D | 15 | 23 | 45 | 66 | 98 | 174 | 216 | 205 | 138 | 80 | 29 | 18 | 1107 |
| Erfoud | 11 | 20 | 47 | 76 | 122 | 212 | 283 | 254 | 169 | 89 | 32 | 14 | 1328 |
| Alnif | 13 | 21 | 47 | 75 | 122 | 205 | 257 | 230 | 162 | 87 | 32 | 15 | 1267 |
| Taouz | 11 | 20 | 49 | 80 | 111 | 234 | 317 | 275 | 169 | 76 | 28 | 12 | 1381 |
| Tazarine | 12 | 20 | 52 | 89 | 134 | 228 | 308 | 270 | 181 | 95 | 39 | 14 | 1442 |

(Source des données brutes : AHGZR, 2014)

Tableau 41 : l'ETP estimée par la méthode de Thornthwaite (1948) dans les différentes stations thermométriques du BV de l'oued Daoura (mm/an), (1982-83/2008/09)

| Mois | Jan | Fév | Mar | Avr | Mai | Jui | Juil | Aout | Sep | Oct | Nov | Déc | Total |
|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|-----|-----|-----|-----|-------|
| ETP (mm/mois) | 12 | 18 | 46 | 71 | 128 | 204 | 294 | 261 | 148 | 81 | 33 | 16 | 1312 |

(Source : Samuel. P, 2006)

Tableau 42: L'ETP moyenne obtenue par le modèle de Thornthwaite dans la plaine de Tafilalet pour la période 1989/1990 à 2000/2001

Dans ce paragraphe, nous analysons et nous comparons les résultats des écarts mensuels des ETP calculés par la méthode de Thornthwaite et par les résultats obtenus de Samuel Paré (2006) par la même méthode (Thornthwaite). Dans ce sens, nous remarquons que ces résultats sont très proches dans la station d'Erfoud (tableau 41 et 42). Nous constatons aussi de faibles variations interannuelles dans la période s'inscrivent entre octobre et mars. La zone d'étude est connue par une prédominance du vent chaud et très sec au cours de plusieurs mois de l'année. Le Chergui est très fréquent de mars à septembre. Ces mois sont caractérisés également par une insolation assez importante, des températures très élevées et le manque des précipitations. Ces conditions climatiques difficiles contribuent à l'augmentation de la quantité d'eau évaporée. En effet, cette situation critique pourrait être à l'origine de l'apparition des étiages très aigus des oueds présahariens, notamment dans la partie méridionale de Daoura.

Apparemment les valeurs observées sont comprises entre 953.47 mm et 1441.72 mm/an pour la quasi-totalité du BV de l'oued Daoura. Les valeurs les plus fortes sont localisées dans les régions d'Erfoud (1327 mm/an), d'Alnif (1266 mm/an) et de Taouz (1381 mm/an).

Ces valeurs augmentent du Nord vers le Sud comme signalé précédemment ainsi qu'on la trouve dans la partie amont de la zone d'étude, on registre 953.47 mm/an à la station d'Ait Boujaine, par contre, on registre 1441.72 mm/an à la station de Tazarine dans la partie aval du BV de l'oued Daoura.

D'une façon générale, l'ETP a connu une variation spatiotemporelle très grande, les valeurs les plus élevées enregistrées entre le mois du mai au mois de septembre. La valeur maximale de l'ETP s'effectue au mois de juillet (tableau 41 et 42) au cours duquel sont enregistrées les températures les plus hautes.

Afin de rechercher plus les facteurs causaux de la dégradation quantitative des ressources en eau des oueds du BV de l'oued Daoura, nous allons calculer le déficit climatique (P-ETP) mensuel et annuel. L'objectif tracé est de constater la variabilité spatio-temporelle de déficit climatique et leur impact sur les ressources en eau.

Les principaux résultats obtenus sont présentés dans le tableau ci-dessous :

| Stations | | Jan | Fév | Mar | Avr | Mai | Jui | juil | Aou | Sep | Oct | Nov | Déc | Total |
|--------------|------------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-------|
| Ait Boujaine | P (mm) | 11 | 17 | 12 | 11 | 13 | 7 | 3 | 6 | 14 | 21 | 17 | 12 | 142 |
| | ETP (mm) | 17 | 23 | 40 | 61 | 92 | 142 | 179 | 161 | 118 | 69 | 33 | 17 | 953 |
| | P-ETP (mm) | -6 | -6 | -28 | -50 | -79 | -135 | -176 | -155 | -104 | -48 | -16 | -5 | -811 |
| Tadighoust | P (mm) | 11 | 17 | 11 | 12 | 13 | 6 | 1 | 6 | 16 | 20 | 20 | 13 | 146 |
| | ETP (mm) | 13 | 19 | 43 | 73 | 108 | 177 | 225 | 177 | 140 | 75 | 32 | 15 | 1097 |
| | P-ETP (mm) | -2 | -2 | -32 | -61 | -95 | -171 | -224 | -171 | -124 | -55 | -12 | -2 | -951 |
| Foum Zaabel | P (mm) | 15 | 22 | 16 | 20 | 18 | 8 | 3 | 8 | 18 | 27 | 24 | 15 | 195 |
| | ETP (mm) | 14 | 21 | 40 | 62 | 95 | 150 | 193 | 171 | 127 | 74 | 31 | 17 | 994 |
| | P-ETP (mm) | 1 | 1 | -24 | -42 | -77 | -142 | -190 | -163 | -109 | -47 | -7 | -2 | -799 |
| Amouguer | P (mm) | 9 | 20 | 13 | 18 | 18 | 12 | 3 | 10 | 27 | 25 | 14 | 11 | 180 |
| | ETP (mm) | 17 | 24 | 42 | 56 | 70 | 99 | 151 | 139 | 101 | 62 | 34 | 20 | 815 |
| | P-ETP (mm) | -8 | -4 | -29 | -38 | -52 | -87 | -148 | -129 | -74 | -37 | -20 | -9 | -635 |
| Barrage H.D | P (mm) | 12 | 17 | 9 | 12 | 8 | 5 | 2 | 3 | 11 | 18 | 21 | 12 | 129 |
| | ETP (mm) | 15 | 23 | 45 | 66 | 98 | 174 | 216 | 205 | 138 | 80 | 29 | 18 | 1107 |
| | P-ETP (mm) | -3 | -6 | -36 | -54 | -90 | -169 | -214 | -202 | -127 | -62 | -8 | -6 | -978 |
| Erfoud | P (mm) | 8 | 9 | 6 | 8 | 4 | 2 | 1 | 1 | 3 | 9 | 9 | 7 | 66 |
| | ETP (mm) | 11 | 20 | 47 | 76 | 122 | 212 | 283 | 254 | 169 | 89 | 32 | 14 | 1328 |
| | P-ETP (mm) | -3 | -11 | -41 | -68 | -118 | -210 | -282 | -253 | -166 | -80 | -23 | -7 | -1262 |
| Alnif | P (mm) | 8 | 12 | 8 | 9 | 7 | 5 | 1 | 4 | 9 | 15 | 10 | 8 | 95 |
| | ETP (mm) | 13 | 21 | 47 | 75 | 122 | 205 | 257 | 230 | 162 | 87 | 32 | 15 | 1267 |
| | P-ETP (mm) | -5 | -9 | -39 | -66 | -115 | -200 | -256 | -226 | -153 | -72 | -22 | -7 | -1172 |
| Tazarine | P (mm) | 7 | 12 | 12 | 12 | 6 | 6 | 2 | 6 | 7 | 12 | 8 | 5 | 95 |
| | ETP (mm) | 12 | 20 | 52 | 89 | 134 | 228 | 308 | 270 | 181 | 95 | 39 | 14 | 1442 |
| | P-ETP (mm) | -5 | -8 | -40 | -77 | -128 | -222 | -306 | -264 | -174 | -83 | -31 | -9 | -1347 |

(Source des données brutes : AHGZR ; 2014)

Tableau 43: Déficit climatique (P-ETP) mensuel et annuel dans les différentes stations météorologiques du BV de l'oued Daoura.

D'après les données présentées dans le tableau 43, le déficit climatique (P-ETP) dans toutes les stations est négatif. Ces valeurs croissent du Nord vers le Sud (Foum Zaabel, -799 mm ; Ait Boujaine, -811 mm ; Erfoud, -1262 mm ; Tazarine, -1347mm ;...).

Plus de 50 % de déficit climatique s'effectue du mois de juin au mois d'août (3 mois). Le maximum a lieu au mois de juillet au cours duquel sont enregistrées les températures les plus élevées.

Généralement, l'analyse des valeurs de déficit climatique montre que le bilan est globalement négatif et déficitaire, les eaux de pluie étant toutes évaporées. Ce phénomène critique menace de plus en plus la vie de certains périmètres oasiens et la prospérité de leur société.

3-8 Synthèse bioclimatique du bassin versant de l'oued Daoura : marquée par une aridité croissante

Les indices de la classification des zones bioclimatiques sont nombreux : Koppen, Lang, De Martonne, Emberger, Bagnouls, Gaussen...etc. Dans ce cadre, nous avons essayé de mettre en localisation notre zone d'étude, elle est donc située approximativement entre les isohyètes 269 et 66 mm d'une part, et d'autre part, dans ce but, nous nous utiliserons deux indices :

3-8-1- Indice d'Emberger

L'indice d'Emberger fut référence aux hauteurs de pluie précipitées, aux températures souvent extrêmes, moyennes du mois le plus chaud, ou moyennes des maximums du mois le plus chaud, ou moyennes des minimums du mois le plus froid, et aussi très souvent à la demande évaporatoire (ETP) (Floret Ch, Pontanier R ;1982).

Le présent travail a pour but d'analyser la variabilité spatiale de l'aridité climatique et leur impact sur le régime hydrologique du BV de l'oued Daoura et ses SBVs. Les indices bioclimatiques, comme signalés précédemment, sont plus variés, mais notre étude est basée sur l'indice d'Emberger (1932), car ce quotient est plus adapté au pays méditerranées, la formule utilisée est la suivante:

$$Q2 = \frac{P}{\frac{M + m}{2}(M - m)} * 1000$$

Où : P : la pluviométrie annuelle en mm ;

M : la température maximale du mois le plus chaud en °C (Juillet) ;

m : la température minimale du mois le plus froid en °C (Janvier) ;

Cet indice est adapté aux régions méditerranéennes (*Mokhtari et al, 2013*), calculé par le rapport entre la quantité de précipitations (mm) et la moyenne des températures extrêmes °C (le mois le plus chaud et le mois le plus froid).

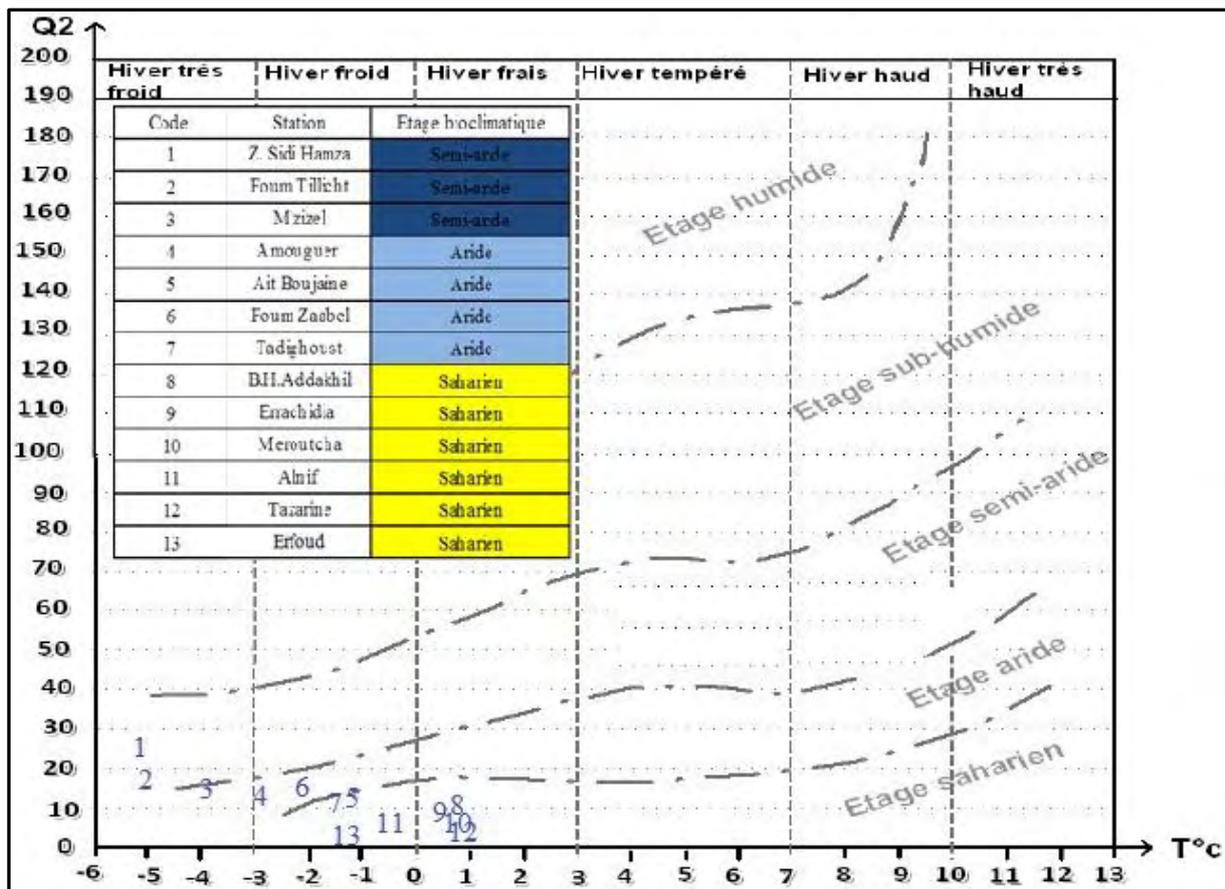
| N° Station | Stations pluviothermométriques | P. Moy. An des précipitations (mm) | T max du mois le plus chaud M | T min du mois le plus froid m | Indice bioclimatique d'Emberger (1932) | Bioclimat |
|------------|--------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--|------------|
| 1 | Z. Sidi Hamza | 269 | 31.2 | -5.2 | 25.82 | Semi-aride |
| 2 | Foum Tillicht | 215 | 32.5 | -5 | 19.98 | |
| 3 | M'zizel | 189 | 33.5 | -4.1 | 17.45 | |
| 4 | Amouguer | 180 | 37,1 | -3,2 | 15.39 | Aride |
| 5 | Ait Boujaine | 144 | 38,8 | -1,2 | 12.32 | |
| 6 | Foum Zaabel | 195 | 38,9 | -2,3 | 15.75 | |
| 7 | Tadighoust | 148 | 40,5 | -1,6 | 12.01 | |
| 8 | B.H. Addakhil | 130 | 40,6 | 0,8 | 11.11 | Saharien |
| 9 | Errachidia | 124 | 41,2 | 0,5 | 10.36 | |
| 10 | Meroutcha | 115 | 41.6 | 0.8 | 9.57 | |
| 11 | Alnif | 95 | 42,7 | -0,5 | 7.47 | |
| 12 | Tazarine | 96 | 43 | 0,8 | 7.71 | |
| 13 | Erfoud | 66 | 43,3 | -1,1 | 5.05 | |

(Source des données brutes : AHGZR ; 2014)

Tableau 44 : L'indice bioclimatique d'Emberger (1932) dans les treize stations pluviothermométriques du BV de l'oued Daoura

D'après les données illustrées dans le tableau 44 et la figure 70 calculées à partir des données pluviothermométriques des treize stations localisées au sein de la zone d'étude, nous avons trouvées trois étages bioclimatiques qui sont comme suit :

- ❖ Etage semi-aride : cet étage se situe dans la partie amont du BV de l'oued Daoura où ce secteur connaît une chute importante des précipitations, les stations concernées sont : Zaouat Sidi Hamza, Foum Tillicht et M'zizel,
- ❖ Etage aride : cet étage, regroupe les stations d'Amouguer, Foum Zaabel, Ait Boujaine et Tadighoust ;
- ❖ Etage saharien : les précipitations moins de 130 mm/an, les stations concernées sont : Barrage Hassan. Addakhil, Errachidia, Merroucha, Erfoud, Alnif et Tazarine ;



(Source des données brutes : AHGZR ; 2014)

Figure 70: Climagramme d'Emberger et situations des six stations dans le BV de l'oued Daoura.

D'une manière générale, l'aridité augmente quand l'indice d'Emberger diminue. Dans le même sens Le Houerou (1955) propose que la délimitation spatiale de l'aridité au Maroc est basée essentiellement sur des quantités des précipitations. À partir de cette classification on trouve trois zones bioclimatiques dans le BV de l'oued Daoura :

- Zone d'aridité moyenne : se localise entre l'isohyète 200-300 mm, c'est-à-dire que les stations pluviométriques situées dans le secteur Atlasique : stations de Zaouiat Sidi Hamza (269 mm) et station de Foum Tilicht (215 mm).
- Zone d'aridité inférieure : $200 > P > 100$ mm c'est-à-dire que la limite supérieure du Sahara correspond à l'isohyète de 100 mm, c'est le cas des stations de Foum Zaabel (195 mm), M'zizel (189 mm), Amouguer (180 mm), Tadighoust (148 mm), Ait Boujaine (144 mm), Barrage H.D (130 mm), Errachidia (124 mm) et Merroucha (115 mm).
- Zone du Sahara : on trouve trois stations comme suit : Tazarine (96 mm), Alnif (95 mm) et Erfoud (66 mm).

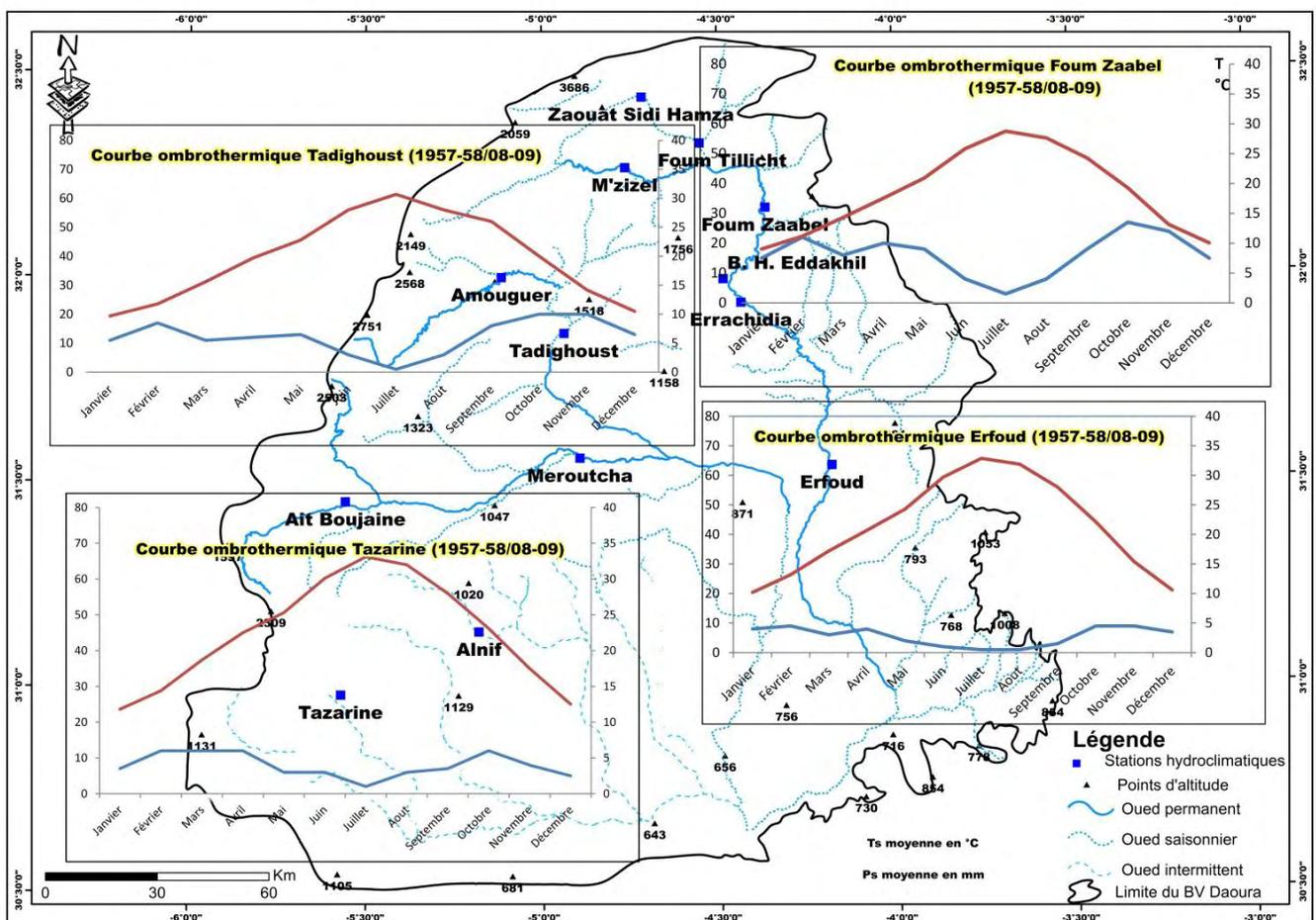
3-8-2- Indice de Gaussen

Le diagramme ombrothermique est développé par Gaussen et Bagnouls, ce diagramme représente les variations mensuelles des températures et des précipitations sur une année, une gradation de l'échelle des précipitations correspond à deux gradations de l'échelle des températures c'est-à-dire : $P = 2T$

P = précipitation mensuelle en mm ;

T = température moyenne mensuelle en °C ;

Selon la formule ci-dessus, quand la courbe de la température est au-dessus de celle de la précipitation, la zone délimitée représente la zone sèche.



(Source des données brutes : AHGZR ; 2014)

Figure 71: Carte des diagrammes ombrothermiques des stations de Fom Zaabel, de Tadighoust, d'Erfoud et de Tazarine.

D'après la carte ci-dessus et les diagrammes ombrothermiques de Fom Zaabel, Tadighoust, Erfoud et Tazarine, on constate que la saison sèche dure 11 mois en amont (mars à janvier à la

station de Foug Zaabel) et 12 mois aux autres stations situées dans la partie intermédiaire et l'aval de Daoura. Cela explique le contraste bioclimatique entre l'amont et l'aval de Daoura.

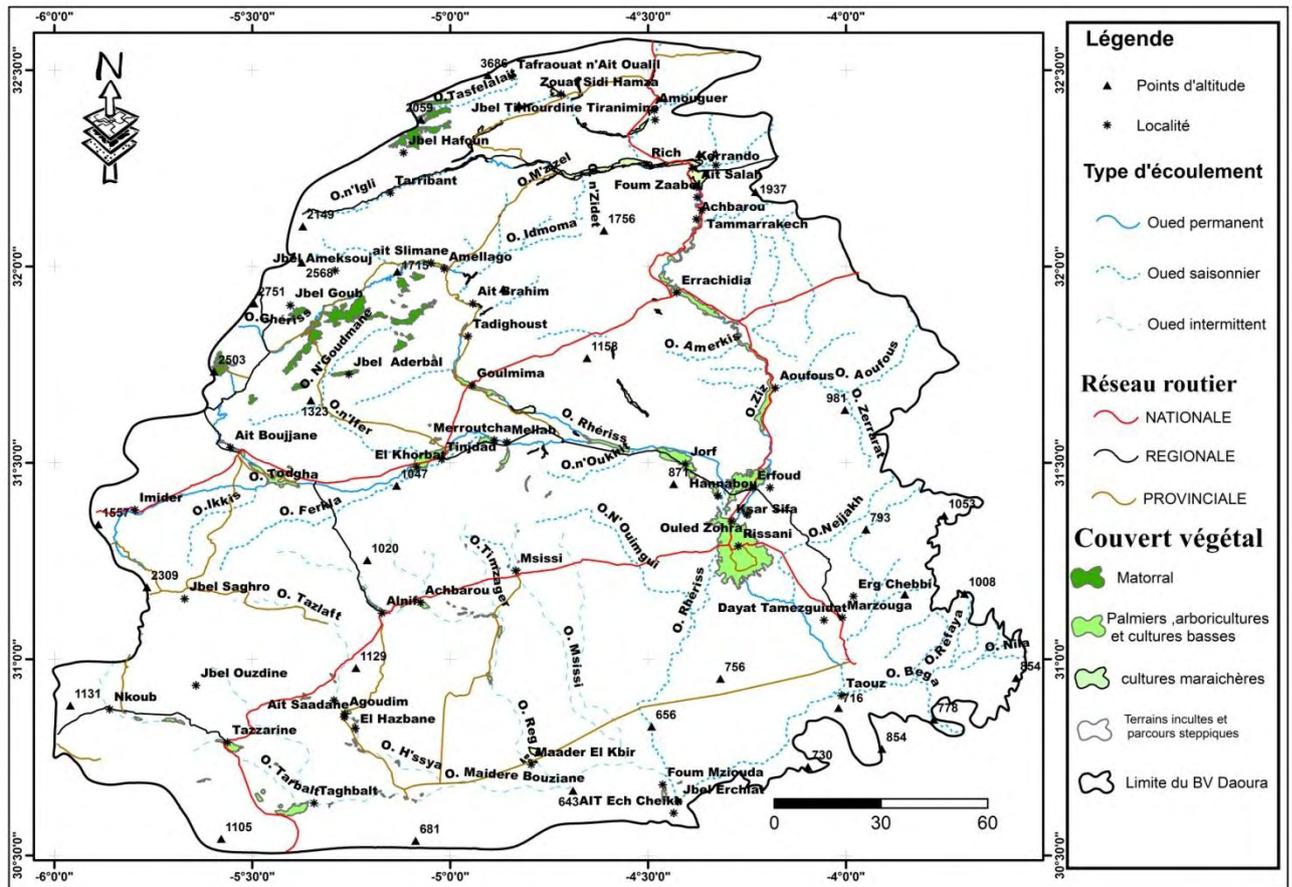
Cependant, les résultats obtenus de l'étude bioclimatique vont dans le même sens que ceux qui sont déjà réalisés par *Joly. F (1962), Margat. J (1962) et Ouali. A (1999)*.

Au terme de cette synthèse bioclimatique, on dégage les constatations suivantes :

- ❖ La zone d'étude se caractérise par trois bioclimats : semi-aride, aride et saharienne, avec l'intensité de l'aridité croissante du Nord vers le Sud ;
- ❖ L'étagement bioclimatique s'étend la zone saharienne qui regroupe les stations pluviométriques situées loin à l'abri des influences humides jusqu'à la zone aride qui reste localisé au domaine Atlasique du Haut-Atlas. Cette variabilité spatiale de l'aridité impose effectivement des variations spatiotemporelles d'écoulement entre la partie amont et la partie aval du BV de l'oued Daoura.
- ❖ Selon l'indice de Gaussen, la majorité des mois de l'année dans les stations étudiées sont sèches, sauf le mois de janvier qui est humide dans la station de Foug Zaabel.

3-9- Une dégradation continue de la végétation du bassin versant de l'oued Daoura

Le couvert végétal joue un rôle fondamental et complexe entre l'atmosphère et le sol. Ce dernier est lié à une relation directe avec la réponse hydrologique d'un BV. Dans la zone d'étude, l'aridité est le principal facteur limitant le développement du couvert végétal. Cependant, le vent en accroît certains facteurs. En même temps, on distingue : d'une part, une zone de la montagne où les ressources en eau est abondante, et, d'autre part, une zone de la plaine dont les ressources en eau est rare et très irrégulières.



(Source : 23 cartes topographiques (1/100000) et les images satellites du Google Earth Pro 2016)

Figure 72 : Carte du couvert végétal du bassin versant de l'oued Daoura et ses SBVs

La couverture végétale naturelle ou artificielle couvre seulement 2.22 % (748.66km²) de la surface totale du BV de l'oued Daoura (35461.25 km²) contre 7% au niveau national (Karmouni, 1988). La situation géographique de Daoura au bord des milieux présahariens et la position d'abri, notamment le compartimentage altitudinal, (gradient thermique et gradient pluviométrique) caractérisent la répartition spatiale des couvertures végétales et de leur densité. Dans la zone d'étude, le couvert végétal divise le paysage en cinq zones :

| Structure | Surface (ha) | Surface (%) |
|--|--------------|-------------|
| Matorral | 184,65 | 0,52 |
| Palmiers Arboricultures cultures basses | 366,11 | 1,03 |
| Palmiers cultures basses | 87,52 | 0,25 |
| Cultures maraichères | 110,38 | 0,32 |
| Terrain nu | 34712,59 | 97,88 |
| Total | 35461.25 | 100 |

(Source : 23 cartes topographiques (1/100000) et les images satellites du Google Earth Pro 2016)

Tableau 45 : Organisation structurale du couvert végétal du BV de l'oued Daoura et ses SBVs

D'après la carte ci-dessus (figure 72) et le tableau 45, la zone d'étude se caractérise par 4 types de couvert végétal qui sont les Matorrals dégradés localisés en montagnes, les palmiers, arboricultures et les cultures basses situées au bord des oueds et les cultures maraichères installées sur des périmètres étroits.

- La première regroupe les matorrals dégradés (sous influences semi-arides) situés, sur la totalité des versants Sud du Haut-Atlas et de l'Anti-Atlas.
- La deuxième correspond aux formations boisées (palmier-dattier, olivier et les cultures basses) qui sont réparties sur les plaines alluviales (Tafilalet, Tinjdad, Goulmima, Alnif, Tazarine...). Ce milieu a connu des cultures maraichères basées sur l'irrigation au bord des affluents du Ziz et Rhériss.
- Les formations steppiques très petites dispersées dans la majorité de la zone d'étude (sous influences présahariennes) elles sont exploités par les nomades pour pâturer leurs bétails.

Généralement, la plaine alluviale de Tafilalet est l'un des sites les plus importants au niveau de la biodiversité biologique. On trouve également dans cette zone 3 étages de cultures : le palmier dattier, l'olivier et les cultures basses (blé, orge et luzerne). Le palmier dattier est une composante principale de l'oasis de Tafilalet d'une part, et, d'autre part, c'est un moteur essentiel de l'économie régionale.



Photo 14 :Chou-Fleur de Bouhamama (Annabis aretioides) à l'aval du barrage Hassan Addakhil (6 décembre 2014)



Photo 15 : Talh (Acacia Raddiana) à Ksar Agoudim (30 km au Sud-ouest d'Alnif) (05 juin 2014)



Photo 16 : La propagation du Tamarix sur les bords de la vallée de l'Oued Rhériss (01 décembre 2014)



Photo 17 : L'étagement de cultures dans une oasis du Moyen Rhériss (le palmier dattier, l'olivier et la luzerne), (01 décembre 2014)

On résumé, que la répartition spatiale du couvert végétal est irrégulière entre la partie amont (Haut-Atlas) aride et la partie aval présaharienne. La majorité de la formation végétale de la zone d'étude se caractérise par des terrains nus et pauvres au niveau floristique. Par ailleurs la dégradation du couvert végétal accentuant du Nord vers le Sud, peut être considérée comme l'indicateur d'une tendance de bioclimat présaharien.

Conclusion du chapitre

Au terme de ce chapitre sur le volet climatique et bioclimatique, et leur impact sur l'écoulement, plusieurs remarques essentielles méritent d'être soulignées :

- ❖ Le BV de l'oued Daoura se caractérise par un climat aride au Nord et saharien au Sud ;
- ❖ Le régime thermique est caractérisé par les températures élevées à l'été et les températures faibles à la période hivernale ;
- ❖ L'irrégularité saisonnière des températures est très contrastée. Les températures oscillent entre -7°C en hiver à 45°C en été ;
- ❖ La variation spatiotemporelle d'ETP augmente du Nord vers le Sud ;
- ❖ La zone d'étude est exposée aux influences continentales et les massifs montagneux sont beaucoup plus arrosés que ceux qui sont à l'abri des influences ou qui se trouvent dans une position basse ;
- ❖ L'irrégularité spatiotemporelle des précipitations mensuelles, saisonnières et annuelles se caractérise par la sécheresse de l'été et par des pluies abondantes de la saison pluvieuse (printemps) ;
- ❖ L'étagement bioclimatique s'étend de l'espace présaharien, qui rassemblent des stations situées au sud, jusqu'aux espaces arides qui regroupe les stations localisées au nord du sillon sud-Atlasique ;
- ❖ Le couvert végétal de la zone d'étude est moins dense et se localise surtout en altitude, les matorrals sur les montagnes, les steppes sur les piémonts, les plaines et les hamadas et l'étage de palmier dattier, olivier et cultures basses qui bordent la plaine alluviale de Tafilalet et dans les petites oasis réparties dans la région d'étude ;

Tous les facteurs étudiés précédemment qui ont une relation très étroite avec la réponse hydrologique d'une part, et, d'autre part, sur la genèse des crues violentes qui ont touché le BV de l'oued Daoura d'une année à l'autre. Ces paramètres hydrologiques seront étudiés dans le chapitre suivant.