

Mémoire

Pour l'obtention du Diplôme de Master en Hydraulique

Option : Eau, Sol et Aménagement

Thème

**Etude de la variabilité climatique à travers les séries
pluviométriques – Exemple du bassin versant du barrage
Hammam Boughrara -**

Présenté par :

BAHLOUL Ahmed Choukri

Soutenu en juillet 2013

Devant le jury :

Président :	DEBBAL Mohamed Zakaria	MAA	UABB - Tlemcen
Examineurs :	BOUANANI Abderrazek	Prof	UABB - Tlemcen
	MEGNOUNIF Abdessallem	MCA	UABB - Tlemcen
Encadreur :	DJEDID Hayat	MAA	UABB - Tlemcen

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicaces

A mes très chers parents qui m'ont guidés durant les moments les plus pénibles sur ce long chemin, ma mère qui a été à mes côtés et ma soutenue durant toute ma vie, et mon père qui a sacrifié toute sa vie afin de me voir devenir ce que je suis, merci beaucoup mes parents.

A toutes les personnes qui m'ont aidé pour poursuivre mes études

A mes très chers frères.

A ma chère sœur.

A toute La famille.

A tous mes amis : si Nadjib, Walid, abdelkader, Mohammed, Mourad, Mouloud, Said.

Mes collègues de master en hydraulique option Eau, Sol et Aménagement.

Promotion 2012-2013

Ahmed choukri

Remerciements

Louange à notre seigneur et créateur ALLAH qui nous a doté de la merveilleuse faculté de raisonnement et de nous avoir incité à acquérir le savoir. C'est à lui que j'adresse ma gratitude en premier lieu.

Je tiens à remercier vivement mon encadreur :

Madame DJEDID Hayat. Maître assistante à l'université d'Abou Bakr Belkaid de Tlemcen pour son soutien et ses nombreux conseils tout au long de ce travail.

Je tiens à remercier tout les membres de jury pour avoir accepté de présider et d'examiner ce travail :

Monsieur DEBBAL Mohamed Zakaria, président de jury

Messieurs BOUANANI Abderrezak et MAGHNOUNIF Adressalem, pour l'examinations du mémoire.

Tous mes remerciements profonds vont également à tous les enseignants d'Hydraulique de la faculté de technologie, Université Abou Bekr Belkaid TLEMCEEN, et toutes les personnes qui ont contribués de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire.

Summary

The water lake that has plagued the TAFNA watershed for years incites us to analyze its situation in order to notice the changes that have occurred in terms of rain amount that fall in the watershed.

For this purpose we took the HAMMAM BOUGHRARA watershed as a case study. In the first chapter, we give an overview of the watershed. The selected stations for the study, analysis and processing of rainfall data is then presented in the second chapter.

The third chapter includes an assessment of inter-average rainfall in the watershed performed using three different methods (mean, THIESSEN method and finite element method). In this chapter, an evaluation of the average rainfall for each year of the watershed has also been performed for the study period (1943/1944 to 2004/2005) using finite element method.

In the fourth chapter, a climate variability study using simple methods is performed based on the results of the previous chapter.

In general conclusion, we highlights throughout the rainfall series that the watershed undergoes a period of drought in the years 1974/1975.

Key word: climate variability, rainfall series, HAMMAM BOUGHRARA, drought.

Introduction générale

L'eau est une ressource rare sans laquelle aucune politique de développement ne peut être envisagée. C'est pourquoi, tous les pays du monde accordent une importance particulière à la politique de l'eau en établissant des stratégies visant à améliorer la disponibilité de la ressource. L'Algérie, à l'instar du reste des pays du monde, a tenté à travers le temps, diverses politiques en fonction des conjonctures. La construction de barrages constituait, à un moment donné, une parmi les solutions proposées pour l'amélioration de l'offre en eau. Dans cette optique, le bassin versant de la Tafna, qui est situé à l'extrême Nord-Ouest du pays, a vu la réalisation en son sein cinq barrages. Ces barrages étaient destinés à répondre à la demande en eau de presque toute la région de l'extrême Nord-Ouest du pays. En dehors des années récentes, ces barrages se remplissaient peu à cause d'une sécheresse qui s'était installée dans la région. C'est sur ce dernier point que nous avons voulu développer notre thématique de ce mémoire. Pour cela, nous avons pris comme cas d'étude le barrage Hammam Boughrara. Ce dernier, qui a été achevé vers l'année 1998, a une capacité de 177 Mm^3 est sensé régulariser un volume annuel de 59 Mm^3 .

A travers cet exemple, nous avons voulu montrer que la région subit une sécheresse qui s'est traduite par la diminution des précipitations ces dernières années. Pour cela et pour une question pratique, nous avons organisé le mémoire en quatre chapitres. Après cette introduction, on trouvera le chapitre I qui est réservé à la présentation du bassin versant du barrage Hammam Boughrara. On trouvera surtout un rappel des caractéristiques géographiques, géologiques et morphométriques. Le chapitre II est réservé pour le traitement des données pluviométriques. Ce traitement consiste en l'homogénéisation des séries, comblement des lacunes de longues durées et extension des séries au-delà de la durée des enregistrements. Le chapitre 3 nous introduit à l'évaluation de la pluie moyenne tombée par différentes méthodes. La caractérisation de la sécheresse est donnée en chapitre IV. Cette caractérisation est basée sur le calcul de paramètres simples qui utilisent uniquement les séries chronologiques des pluies. Une conclusion générale dressant le bilan de ce mémoire est donnée à la fin du document.

I.1. Situation géographique et topographique de la zone étudiée

I. 1.1. Situation géographique [4]

Le barrage Hammam Bouhrara est situé au Nord-Ouest de la Wilaya de Tlemcen, à 50 km du chef lieu de la Wilaya, à l'est de la commune de Maghnia.

Le bassin versant du barrage Hammam Bouhrara occupe la partie Ouest du grand bassin de la Tafna, qui est subdivisé en huit (8) sous bassins (Voir figure II.1 ci-dessous). Notre zone d'étude occupe les sous bassins 01, 02 et 03 et une partie du sous bassin 04.

Les coordonnées LAMBERT X=102920, Y=185900 désignent à peu près le centre du chantier du barrage où le lit mineur de l'Oued est à la cote Z=250.0m.

L'environnement du barrage est constitué par l'ensemble des éléments de son bassin versant.

Le barrage Hammam dont la mise à eau a été réalisé en 1998, constitue l'exutoire principal de l'oued Mouillah.

D'une capacité de 177 millions de m³, ce barrage est censé régulariser annuellement un volume de 59 millions de m³. Ce barrage est destiné au renforcement de l'alimentation en eau potable (AEP) des villes d'Oran, d'Ain Témouchent, de Maghnia et éventuellement le couloir Nord-Ouest de la Wilaya de Tlemcen. Cet ouvrage desservira également les périmètres d'irrigation de la moyenne et la basse Tafna.

Suite à la sécheresse qui servit dans la région depuis plus de deux décennies, l'écoulement permanent a disparu et les cours d'eau sont devenus des exutoires des eaux usées avec des impacts directs sur l'environnement.

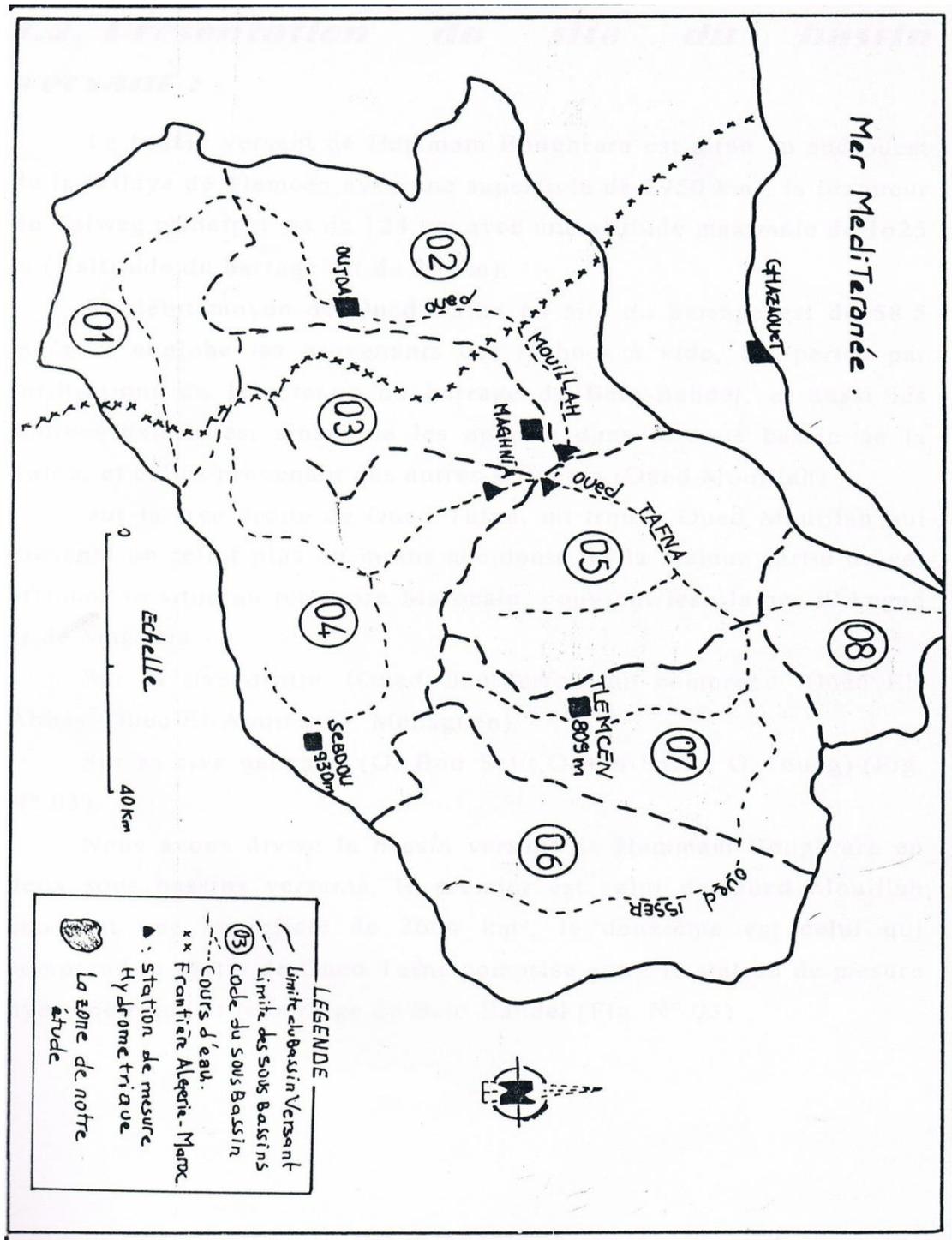


Figure I. 1. Bassin et sous bassin de Tafna. [1]

I.1.2. Relief et topographie de la région de Maghnia [6]

Le secteur d'étude présente un relief assez varié, allant des zones de montagnes, de piémonts jusqu'aux plateaux et vallées.

La zone montagneuse et les piémonts représentent environ 30% de la surface du bassin, constituant un couloir allant d'Ouled Aissa à l'Ouest jusqu'à Sidi Ali Benzemra à l'Est. Ce couloir d'une largeur de 7km se rétrécit à Ouled Aissa pour atteindre uniquement à 2km.

La topographie très accentuée correspond à des pentes qui dépassent les 25%, le point culminant se trouve à 1112m.

Les plateaux présentent 60% et peuvent être identifiés à des plaines d'importance locale.

Les dépressions et les vallées représentent 10%. La plus importante est la vallée de la moyenne Tafna qui s'étend sur une longueur de 8 km, avec une largeur comprise entre 200 et 1000 m. Son affluent, Oued Mouillah, présente un relief plus ou moins accidenté avec une topographie diminuant du Sud-Ouest vers le Nord-Est et une altitude moyenne de 400m.

I.1.3. Relief et topographie de la région d'Oujda [6]

La région d'Oujda, encadrée par la chaîne de montagne Beni Izhnassen au Nord et par la chaîne de Jerada au Sud, offre un relief complexe et morcelé. La région constitue un couloir qui s'étend à l'Est vers la dépression de Maghnia et au Sud-Ouest vers le bassin du Guercif.

Cette région est constituée par trois ensembles de dépression:

- La plaine d'Oujda qui s'étend à l'Est et au Nord-Est de la ville et se continue dans la plaine de Maghnia en Algérie.
- La plaine des Angad qui s'étend au Nord d'Oujda.
- Le bassin de Oued Isly moyen qui est limité au Nord par Djebel Soltane et à l'est par Djebel Hamra.

La ville d'Oujda est située à une altitude de 570m et apparaît circonscrit dans une cuvette ouverte vers la plaine d'Angad. Le Djebel Hamrar ferme la cuvette au Sud et au Sud-Est.

I.1.4. Géologie de la zone d'étude [6]

Les formations géologiques qui affleurent dans l'ensemble du bassin versant du barrage Hammam Boughrara du plus récent au plus ancien sont :

Les alluvions : Cette formation récente est représentée par des sables-argileux parfois limoneuses associées à des graviers.

Le quaternaire : Il affleure en général dans la zone d'étude au niveau des oueds comme Oued Abbés, Oued Aouina, Oued Tafna. Il représente les terrasses des Oueds (graviers hétérométriques hétérogènes, galets de taille différente, sables argileux).

Le pliocène continental : Constitué surtout de grés et parfois associés à des limons, il affleure au niveau des deux rives de l'oued Tafna à Sidi Medjahed.

Le miocène supérieur : Il est caractérisé à sa base par des grés qui annoncent la transgression miocène. On passe à des marnes miocènes bien représentées dans la zone d'étude. Au Nord, il forme la rive gauche de Oued Mouillah. Vers le haut, on passe à des marnes sableuses.

Le miocène inférieur: Il affleure au Sud-Ouest de la zone d'étude où il est représenté par des marnes.

Le jurassique supérieur: Il affleure à Maghnia et forme au Nord la rive droite de Oued Mouillah. Il est représenté par des marnes un peu gréseuses à la base qui passe à des dolomies cristallines.

I.2. Présentation du site du bassin versant [6]

Le bassin versant de Hammam Boughrara est situé au sud-ouest de la Wilaya de Tlemcen avec une superficie de 2950 km², la longueur du Talweg principal est de 124 km avec une altitude maximale de 1625 m (l'altitude du barrage est de 251 m).

Le débit moyen de Oued Tafna au site du barrage est de 58.5 m³/s, il englobe les prévenants des lâchées à vide, les pertes par infiltrations de la retenue du barrage de Beni-Bandel, et aussi les sources existantes, ainsi que les apports- dans le sous bassin de la Tafna, et celles provenant des autres affluents (Oued Mouillah).

Sur la rive droite d'Oued Tafna, on trouve Oued Mouillah qui présente un relief plus ou moins accidenté, et la majeure partie de cet affluent se situe au territoire Marocain, couvrant les plaines d'Angad et de Maghnia.

Sur sa rive droite; (Oued Ouerderfou qui comprend: Oued El- Abbas. Oued El-Aouina, O. Mehaguen).

Sur sa rive gauche : (O. Bou Selit, O.Ben Saria, O.Aoudg). (Figure I.2).

Nous avons divisé le bassin versant de Hammam Boughrara en deux sous bassins versants, le premier est celui d'Oued Mouillah couvrant une superficie de 2664 km², le deuxième est celui qui comprend la partie d'Oued Tafna comprise entre la station de mesure hydrométrique et le barrage de Beni Bahdel (Figure I.2),

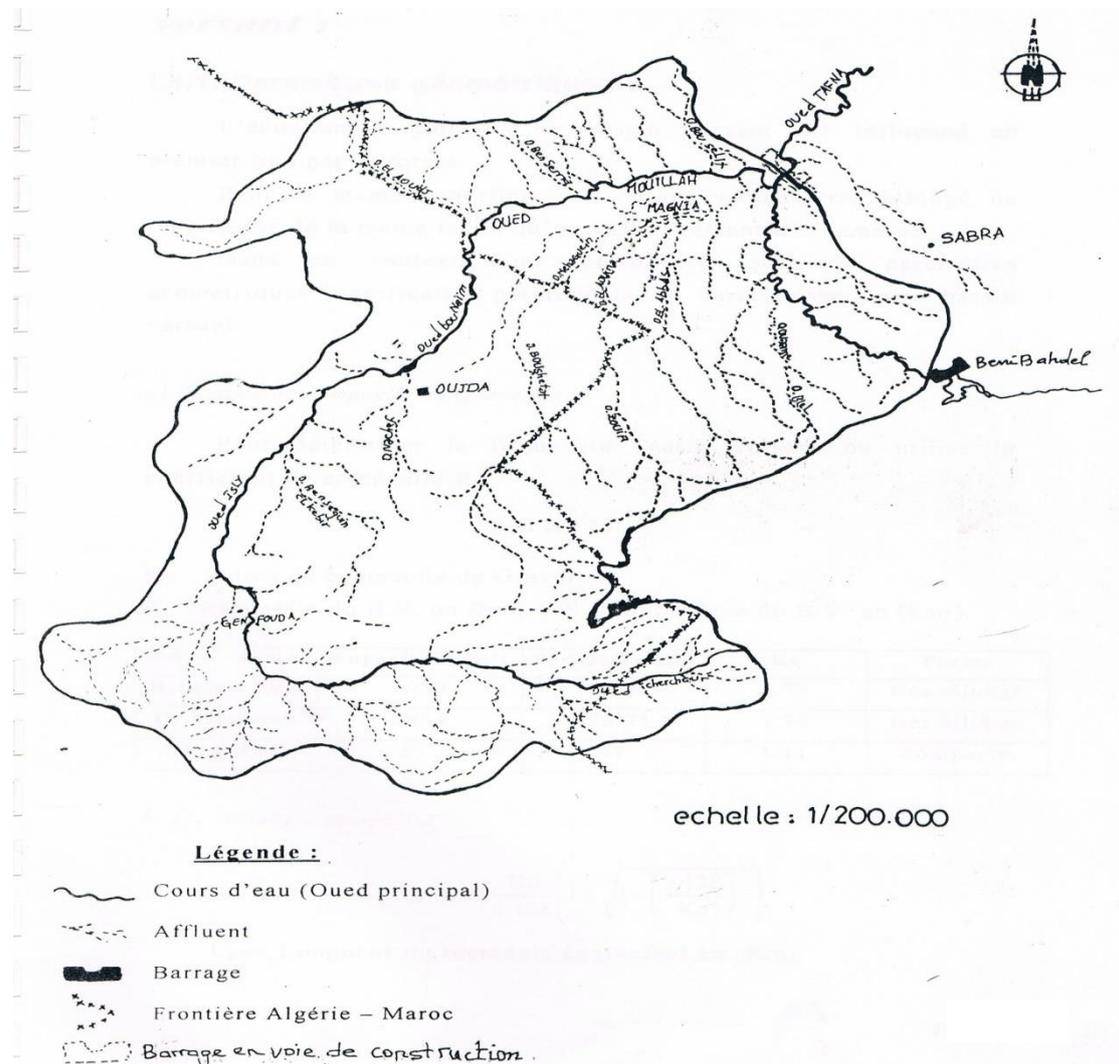


Figure I. 2. Réseau hydrographique du bassin versant de H. BOUGHRARA. [1]

I.2.1. Caractéristiques générales des bassins versants de la Tafna et de Mouillah [6]

I.2.1.1. Bassin versant de la Tafna

Le bassin versant de la Tafna, l'un des bassins néogènes sublittoraux, est le plus important de l'Algérie occidentale. Il se situe au Nord-Ouest algérien et occupe une superficie d'environ 7245 km² dont presque le tiers se trouve en territoire marocain. Il est limité:

- A l'ouest: par les Monts de Beni-Zénassem(Maroc)
- A l'Est: par Djebel Sebàa-Chilloukh
- Au Nord: par les Monts des Traras
- Au sud: par les Monts de Tlemcen.

Ce bassin est drainé essentiellement par Oued Tafna, qui est un cours d'eau permanent de 177 km de long. Il coule dans la partie Ouest de l'Algérie près de la frontière algéro-marocaine.

Il prend sa source dans les monts de Tlemcen, son écoulement y est d'abord souterrain et son exurgence se trouve sur le rebord Sud en amont de Sebdou, au niveau de la grotte de Ghar Boumaza.

Les écoulements générés par Oued Tafna sont retenues par le barrage de BeniBahdel pour être acheminée vers la ville d'Oran par une canalisation. Après le barrage, Oued Tafna franchit les Monts de Tlemcen, son écoulement taille des gorges abruptes. Une fois les gorges franchies, Oued Tafna débouche dans la plaine de Maghnia. A ce niveau, il récupère Oued Mouillah qui draine la rive gauche du bassin.

L'Oued traverse ensuite les plaines de Remchi, récupère son principal affluent, Oued Isser et termine son parcours par un estuaire au niveau de la plage de Rachgoun.

Les principaux affluents d'Oued Tafna sont:

- Oued Isser (avec une superficie de sous bassin de 1860 km²) est le plus important, sa confluence avec l'oued Tafna a lieu dans la plaine de Remchi à 80 ni
- Oued Sikkak draine un sous bassin de 442 km²
- Oued Chouly draine un sous bassin de 178 km² Rive gauche
- Oued Khemis (avec un sous bassin de 340 km²) draine une vallée des Monts de Tlemcen et rejoint Oued Tafna au niveau du barrage de Beni Bandel.

I.2.1.2. Bassin versant d'Oued Mouillah

Le bassin versant d'Oued Mouillah est constitué par des zones très hétérogènes. On trouve au Sud les plaines de Maghnia et des Angad qui représentent des vallées encaissées entre les monts de Tlemcen et au Nord les monts des Traras. Le relief est assez varié constitué des zones de montagnes, de plaines et de vallées.

Oued Mouillah draine un bassin partagé entre l'Algérie et le Maroc et dont la superficie est de l'ordre de 2000 km² (1240 km² au Maroc et 760 km² en Algérie)

Oued Mouillah débute au Sud-Ouest de la ville Oujda (au Maroc) sous le nom de Oued Bounaïm avant de franchir le territoire Algérien au niveau de Maghnia, à l'extrême Ouest de la wilaya de Tlemcen, sous le nom de Oued Mouillah.

La confluence d'Oued Mouillah avec la Tafna se situe à 150 m d'altitude dans les plaines de Maghnia, son débit moyen annuel est de 2.05 m³/S.

Oued	Section	Superficie (km ²)	Apport réel (hm ³)	Débit moyen (m ³)	Transport solide (t/an)
Tafna	Barrage Béni bahdel	1016	73.0	2.31	/
Tafna/Mouillah	Barrage H.boughrara	2984	84.1	2.7	601400
Mouillah	H.boughrara Sidi belkheir	2650	54.9	1.74	/

Tableau I. 1. Les caractéristiques des bassins versants considérés.

Les apports liquides d'Oued Mouillah jusqu'au barrage Hammam Boughrara mesurée par l'ANRH durant la période 1988-1997 représentent en moyenne 79% de l'apport total soit 51,9 hm³/an. Les affluents d'Oued Mouillah sont:

Oued Isly: Ce cours d'eau se trouve au Maroc. Il draine la région sud d'Oujda. Il reçoit les rejets de la mine (de Plomb et de Zinc) de Sidi Boubekeur, les rejets urbains des agglomérations de Touissite, de Sidi Boubekeur et les Oueds El Heimer et Guenfouda.

Oued Bou Naim: Ce dernier draine toutes les eaux usées urbaines et industrielles de la ville de Oujda et d'autres agglomérations secondaires avoisinantes : Beni Drar, El Aleb, etc.

Oued Ouerdeffou: Oued Ouerdeffou se forme au niveau de Maghnia par les affluents de Oued Lemhaguene et Oued Aounia, traverse la ville de Maghnia en drainant les eaux usées urbaines et les eaux résiduaires industrielles de l'ENOF ainsi que les déchets solides (décharges sauvages dans le lit de l'Oued). A l'Est de Maghnia, il est rejoint par Oued Abbés qui véhicule les rejets industriels de la maïserie, de l'usine des corps gras et l'usine de céramique.

Oued Lemhaguene et Oued Aouina: Ces deux Oueds forment l'Oued Ouerdeffou au Sud immédiat de Maghnia. Ils drainent surtout les eaux de lessivage des terres agricoles au Sud de Maghnia.

Oued Abbés: Cet Oued draine les terres agricoles au Sud de Maghnia et reçoit les eaux usées des entreprises ENCG (Corps gras), CERTAF (Céramique) et ERIAD (Maïserie).

I. 3. Caractéristique physique du bassin versant du barrage Hammam Boughrara

I. 3. 1. Caractéristiques morphométriques du bassin versant

Le bassin versant, appelé aussi bassin de drainage d'un oued, en un point donné d'un cours d'eau, est l'aire limitée par le contour à l'intérieur duquel l'eau précipitée y est drainée vers ce point, appelé exutoire.

Le bassin versant a une fonction de collecteur, il recueille les pluies et les transforme en écoulement à l'exutoire. Cette transformation est fonction des conditions climatiques et des caractéristiques physiques du bassin versant.

I. 3. 2. Paramètres géométrique

L'écoulement global d'un bassin versant est influencé en premier lieu par sa forme.

Pour la même superficie, un bassin versant très allongé ne réagira pas de la même façon qu'un bassin versant très ramassé. [1]

Dans ce contexte on déterminera quelques paramètres géométriques significatifs permettant de caractériser notre bassin versant.

a) Indice de compacité de Gravelius

Pour déterminer, la forme du bassin versant on utilise le coefficient de compacité K_c .

$$K_c = 0.28 \frac{P}{\sqrt{S}}$$

K_c : Indice de compacité de Gravelius.

P: Périmètre du B. V. en (km).

S: Superficie du B.V. en (km²).

Bassin versant	Superficie (Km ²)	Périmètre (Km)	Kc	Forme
H.Boughrara	2950	374.00	1.93	Très allongé
O.Mouillah	2664	323.75	1.75	Très allongé
O.Tafna	252	57.00	1.11	compacte

b) Le rectangle équivalent

$$L_{RE} = \sqrt{S} \frac{K_c}{1.128} \left(1 \pm \sqrt{1 - \left(\frac{1.128}{K_c} \right)^2} \right)$$

L_{RE} : Longueur du rectangle équivalent en (Km)

c) Densité de drainage

$$Dr = \frac{\sum I_u}{S}$$

Dr : densité de drainage en (Km/Km²).

I_u : longueur des affluents (Km).

S: surface totale du B.V (Km²).

Bassin versant	Longueur(LRE) (Km)	Largeur(IRE) (Km)	Densité de drainage (Km/Km ²)
H.Boughrara	168.40	17.50	0.195
O.Mouillah	141.30	18.85	0.170
O.Tafna	15.87	15.87	0.460

La densité de drainage du sous bassin Oued Tafna est la plus grande ce qui engendre un écoulement facile des eaux de ruissellement car la stagnation de ces eaux est faible.

I. 3. 3. Paramètres de relief [2]

a) Courbe hypsométrique

La plupart des phénomènes hydrologiques et climatologiques sont directement liés à l'altitude. Il est donc important de connaître la répartition des altitudes dans le bassin. On utilise pour cela la représentation de la courbe hypsométrique. Elle peut aussi être donnée sous forme d'histogramme, c'est la courbe des fréquences altimétriques.

La forme de cette courbe donne implicitement une certaine idée sur les pentes du bassin et leurs répartitions en altitude et permet d'apprécier le potentiel érosif du bassin versant. La courbe hypsométrique est déterminée par planimétrie des surfaces entre les courbes de niveau.

Les tableaux et les courbes hypsométriques relatifs aux bassins versant du barrage Hammam Bouhrara et des Oueds Tafna et Mouillah sont donnés ci-après.

Tranches d'altitudes	Surfaces partielles (Km ²)	Surfaces cumulées (Km ²)	Surfaces partielles %	Surfaces cumulées %	Altitudes cumulés %
1600-1400	26	26	0.88	0.88	100
1400-1200	306.60	334.6	10.49	11.37	85.71
1200-1000	412.20	746.8	14.02	25.39	71.42
1000-800	402.20	1149	13.68	39.07	57.14
800-600	513.30	1662.3	17.45	56.52	42.85
600-400	997.20	2659.5	33.90	90.42	28.47
400-200	281.50	2941	9.45	100	14.28

Tableau I. 2. Les paramètres de courbe hypsométrique du bassin versant du barrage H.Bouhrara. [1]

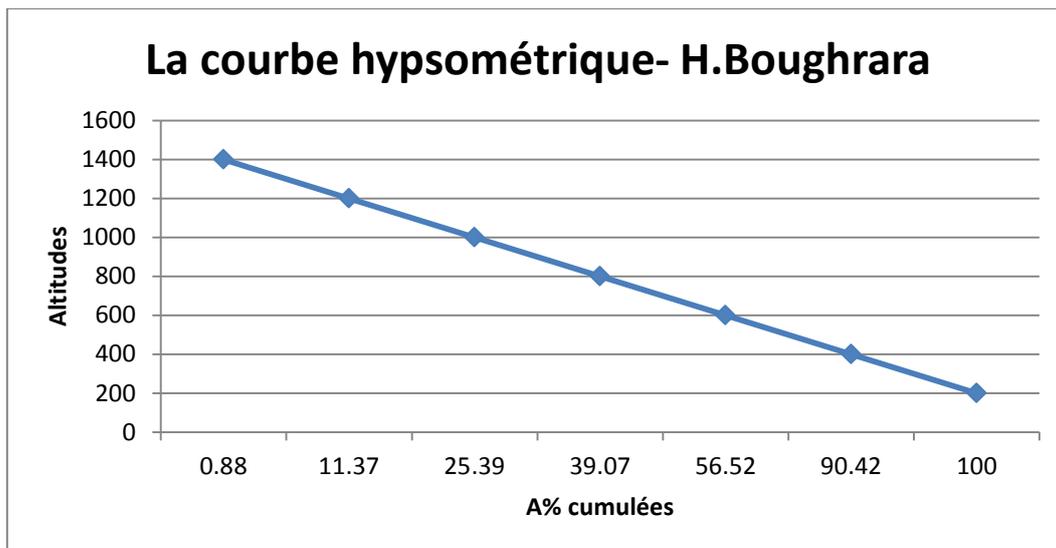


Figure I. 3. Courbe hypsométrique du bassin versant du barrage H.Boughrara.

Tranches d'altitudes	Surfaces partielles (km ²)	Surfaces cumulées (Km ²)	Surfaces partielles %	Surfaces cumulées %	Altitudes cumulés %
1430-1400	26.80	26.00	0.98	0.98	100
1400-1200	306.00	332.00	11.55	12.53	97.39
1200-1000	381.00	713.00	14.38	26.91	79.92
1000-800	375.00	1088	14.15	41.06	62.45
800-600	414.50	1502.20	15.64	56.70	44.98
600-400	904.00	2406.5	34.11	90.81	27.51
400-285	243.50	2650	9.19	100	10.01

Tableau I. 3. Les paramètres de courbe hypsométrique du bassin versant d'Oued Mouillah. [6]

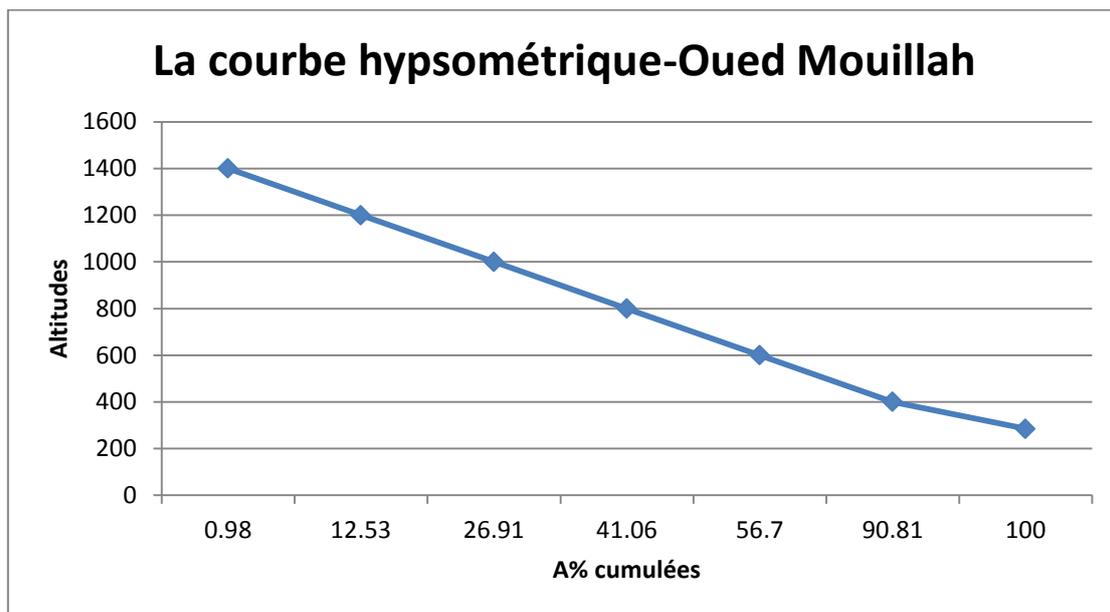


Figure I. 4. Courbe hypsométrique du bassin versant d'Oued Mouillah.

tranches d'altitudes	Surfaces partielles (Km ²)	Surfaces cumulées (Km ²)	Surfaces partielles %	Surfaces cumulées %	Altitudes cumulés %
1255-1200	1.6	1.6	0.63	0.63	100
1200-1000	29.20	30.8	11.59	12.22	93.88
1000-800	25.20	56	10.00	22.22	71.66
800-600	96.80	152.8	38.41	60.63	49.44
600-400	83.00	235.8	32.97	93.60	27.22
400-355	16.00	251.8	6.35	100	5

Tableau I. 4. Les paramètres de courbe hypsométrique du bassin versant d'Oued Tafna. [1]

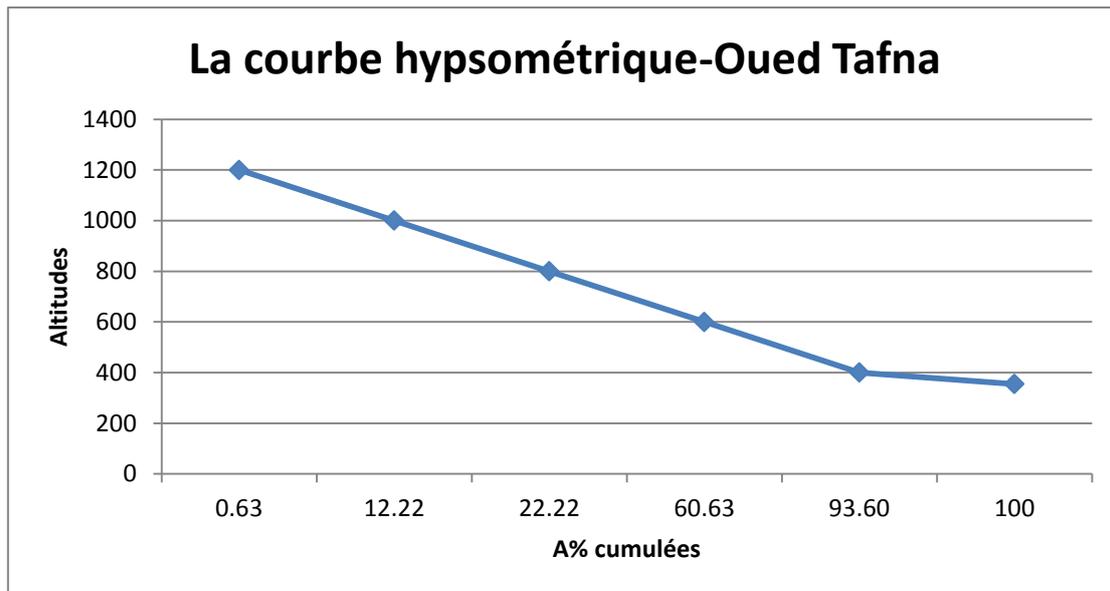


Figure I. 5. Courbe hypsométrique du bassin versant d'Oued Tafna.

b) Altitudes caractéristiques

Certaines altitudes sont notées pour caractériser les bassins versants. Ces altitudes donnent des indications supplémentaires sur le potentiel érosif du bassin. Ces altitudes sont:

- L'altitude moyenne, c'est l'altitude qui correspond à la moyenne de la courbe hypsométrique.
- L'altitude la plus fréquente, c'est le maximum de la courbe des fréquences altimétriques.
- L'altitude de fréquence 1/2, c'est l'altitude qui correspond au point d'abscisse 1/2 de la courbe des fréquences altimétriques.

c) Les indices des pentes

Le relief d'un bassin est caractérisé par des indices qui ont été définis pour rendre compte de l'influence de la pente sur le régime hydrologique et pour comparer des bassins entre eux.

L'indice de pente introduit par Roche (1963) est donné par:

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L_{Re}}} \sum_{i=1}^n \sqrt{B_i(a_i - a_{i-1})}$$

Dans cette formule, L_{Re} , B_i , a_i et a_{i-1} représentent respectivement la longueur du rectangle équivalent, la fraction en pourcent de la surface comprise entre deux lignes de niveaux, les altitudes délimitant la surface B_i .

L'indice de pente global I_g sert à caractériser la pente d'un bassin et de permettre des comparaisons et des classifications. Il est déterminé à partir de la connaissance de la répartition hypsométrique du bassin.

Cet indice est donné par la formule:

$$I_g = \frac{H_{95\%} - H_{5\%}}{L_{Re}}$$

Dans cette formule, $H_{95\%}$ et $H_{5\%}$ représentent les altitudes qui correspondent respectivement à 95% et à 5% de la surface totale du bassin. Elles sont toutes les deux tirées de la courbe hypsométrique. L_{Re} , qui est la longueur du rectangle équivalent, est exprimé en kilomètre.

L'indice de pente moyen I_m est utilisé dans les mêmes conditions que le précédent. Il est donné par:

$$I_m = \frac{D_{max}}{L}$$

D_{max} étant la différence entre les niveaux extrêmes du bassin versant.

d) Dénivelée spécifique

Le dénivelé spécifique sert à classer les bassins en fonction de leurs reliefs. Cette dénivelée est donnée par:

$$D_s = I_g \sqrt{A}$$

Les paramètres de la formule ont été définis auparavant..

On se réfère généralement à la classification dressée par l'O.R.S.T.O.M. pour classer les bassins en fonction de leurs reliefs. Cette classification est donnée par le tableau I.5 suivant:

	Relief	Valeur de I_g	Valeur de D_s
1	Relief très faible	$I_g < 0.002$	$D_s < 10$
2	Relief faible	$0.002 < I_g < 0.005$	$10 < D_s < 25$
3	Relief assez faible	$0.005 < I_g < 0.01$	$25 < D_s < 50$
4	Relief modéré	$0.01 < I_g < 0.02$	$50 < D_s < 100$
5	Relief assez fort	$0.02 < I_g < 0.05$	$100 < D_s < 250$
6	Relief fort	$0.05 < I_g < 0.5$	$250 < D_s < 500$
7	Relief très fort	$0.5 < I_g$	$500 < D_s$

Tableau I.5 : Classification selon l'O.R.S. T. O.M du relief [8]

e) Densité de drainage

La densité de drainage (D_d), qui s'exprime en km/km^2 , est définie pour un bassin donné de superficie A , comme la longueur totale des cours d'eau de tous ordre sur la surface drainée. Elle est donnée par la relation suivante:

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

Dans cette relation, L_x est la longueur cumulée de toutes les rivières d'ordre x (km) et A la superficie du bassin versant (km^2).

La densité de drainage du sous bassin Oued Tafna est la plus petite ce qui engendre un écoulement facile des eaux de ruissellement car la stagnation de ces eaux est faible.

I. 3. 4. Indices climatiques [1]

Le climat intervient comme un élément déterminant dans toutes les études d'aménagement hydraulique.

L'objectif principal d'une étude climatique est de mettre en évidence les actions directes et indirectes des facteurs qui sont (précipitation, température, humidité...).

L'étude climatique consiste à la détermination d'un certain nombre de paramètres qui permettent de caractériser notre zone d'étude.

Cette dernière n'est dotée d'aucune station météorologique, la plus proche est celle de Maghnia avec les coordonnées suivantes:

Station	x	y	z	Longitude	Latitude
Maghnia	88.10	176.75	395.00	W 1 ⁰ 44	N 34 ⁰ 51

Mois	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D	Moy
P(mm)	29.00	37.40	41.59	34.79	32.51	08.76	2.45	2.42	13.79	14.96	41.71	34.99	294.37
M(°C)	15.58	17.18	19.38	21.46	24.59	29.72	34.69	35.13	31.24	25.60	20.50	16.84	24.33
m(°C)	2.35	4.34	5.99	7.61	10.57	14.50	17.52	18.38	16.01	11.66	8.10	4.16	10.10
M+m/2 (°C)	8.97	10.76	12.68	14.54	17.58	22.11	26.10	26.76	23.63	18.63	14.30	10.50	17.21

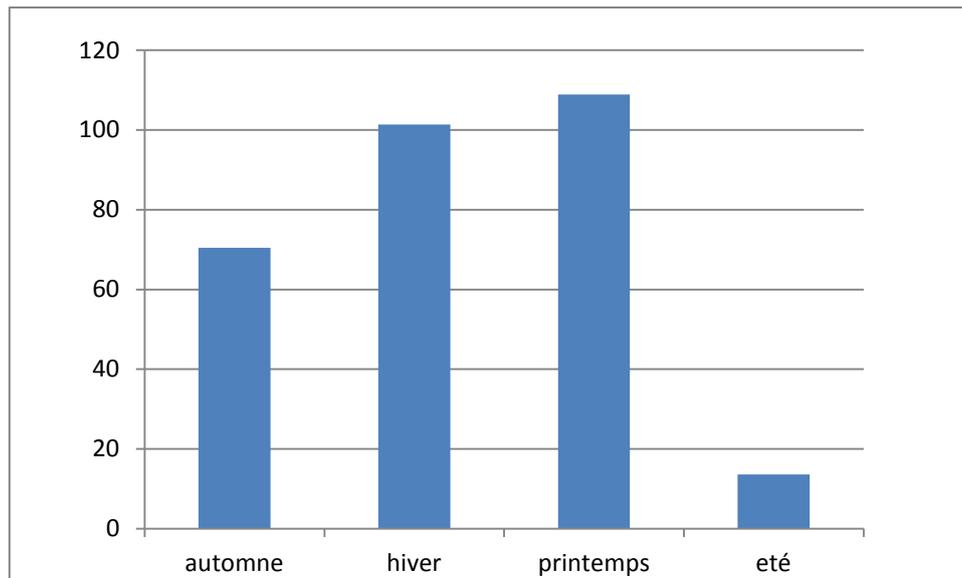
Tableau I. 6. Moyennes mensuelles des précipitations et températures maximales et minimales (période 1980-1994).

Dans la suite de notre étude on répartira l'année climatique en quatre saisons:

- L'automne du 1^{er} Septembre au 30 Novembre.
- L'hiver : du 1^{er} Décembre au 28 Février.
- Le printemps : du 1^{er} Mars au 31 Mai
- L'été du 1^{er} Juin au 31 Août.

Automne	Hiver	Printemps	Eté
70.46	101.39	108.89	13.63

Tableau I. 7. Répartition saisonnière des précipitations (1980-1994).



Les précipitations sont extrêmement variables d'une saison à l'autre comme nous le montre le tableau I.7 les plus importantes sont celles qui tombent au printemps par rapport à celles de l'automne et de l'hiver et ces derniers constituent un apport non négligeable.

Quand à la période sèche, elle se prolonge pendant tout l'été.

a) Indice de DEMARTONE

Demartone a donné un indice d'aridité défini par la relation suivante:

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

P: précipitations annuelles (mm)

T: température moyenne annuelle (°C)

Dans notre cas, la station de Maghnia a donné un indice $I = 10,82$

Cet indice $10 < I < 20$ ce qui montre que le milieu est caractérisé par régime semi-aride à écoulement temporaire (voir figure I.6).

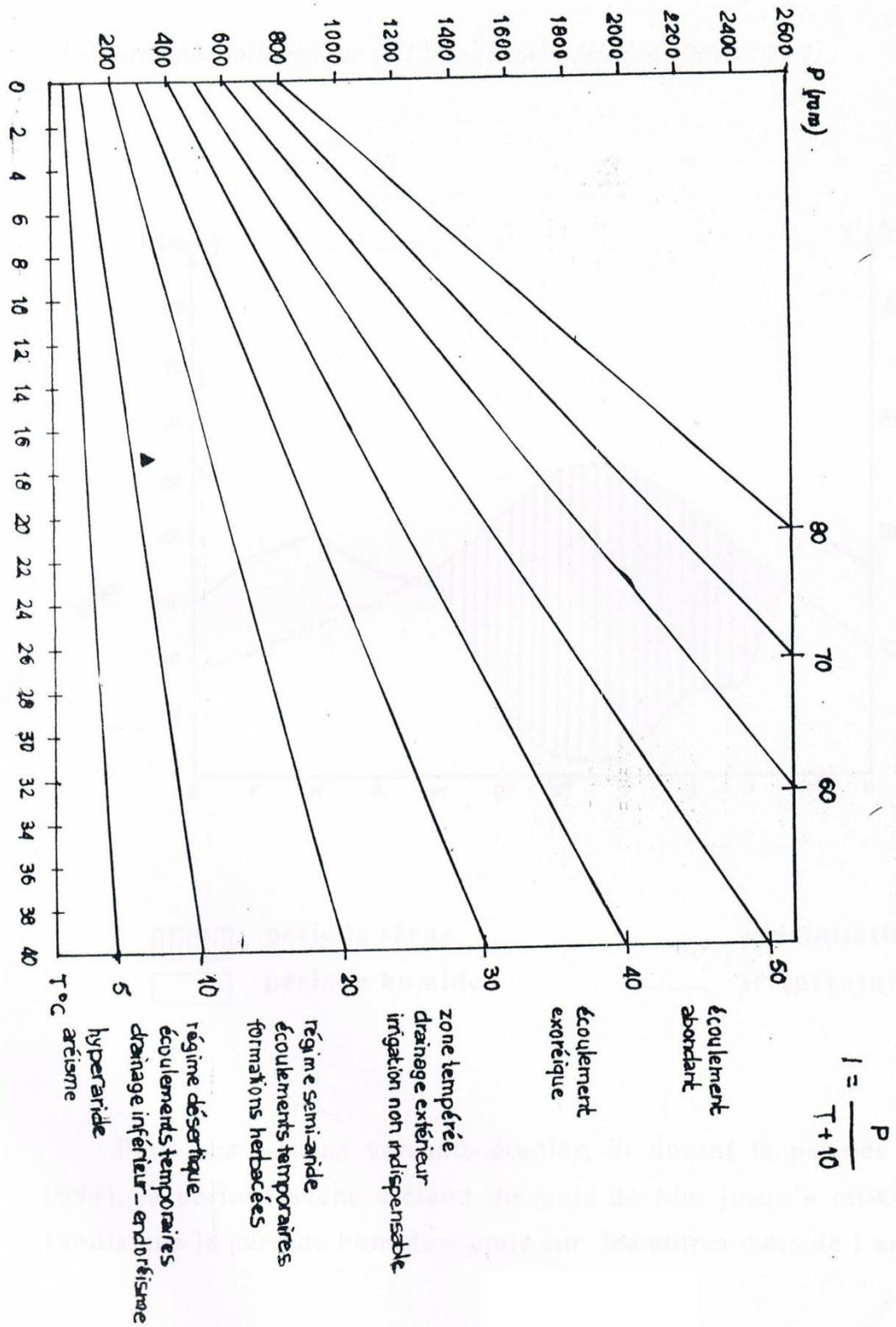


Figure I. 6. Abaque pour classier le climat d'après DEMARTONE. [1]

b) Climagramme de L'EMBERGER

La formule d'Emberger s'exprime comme suit:

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

Ou

$$Q_2 = \frac{2000P}{M^2 - m^2}$$

P: pluviomètre en mm

M: Moyenne des maxima du mois le plus chaud

m: Moyenne des minima du mois le plus froid.

Les températures sont exprimées en degré Kelvin.

$$Tk = Tc + 273,2 \text{ } ^\circ C$$

$$Q_2 = 30.80$$

On distingue d'après le climagramme d'EMBERGER que notre zone a un régime semi-aride inférieur proche de l'aride supérieure (voir figure I.7).

c) Conclusion

On peut dire comme conclusion qu'en général notre région est caractérisée par un climat semi-aride à tendance aride, avec un hiver frais et un été plus ou moins sec.

M: Station de Maghnia.

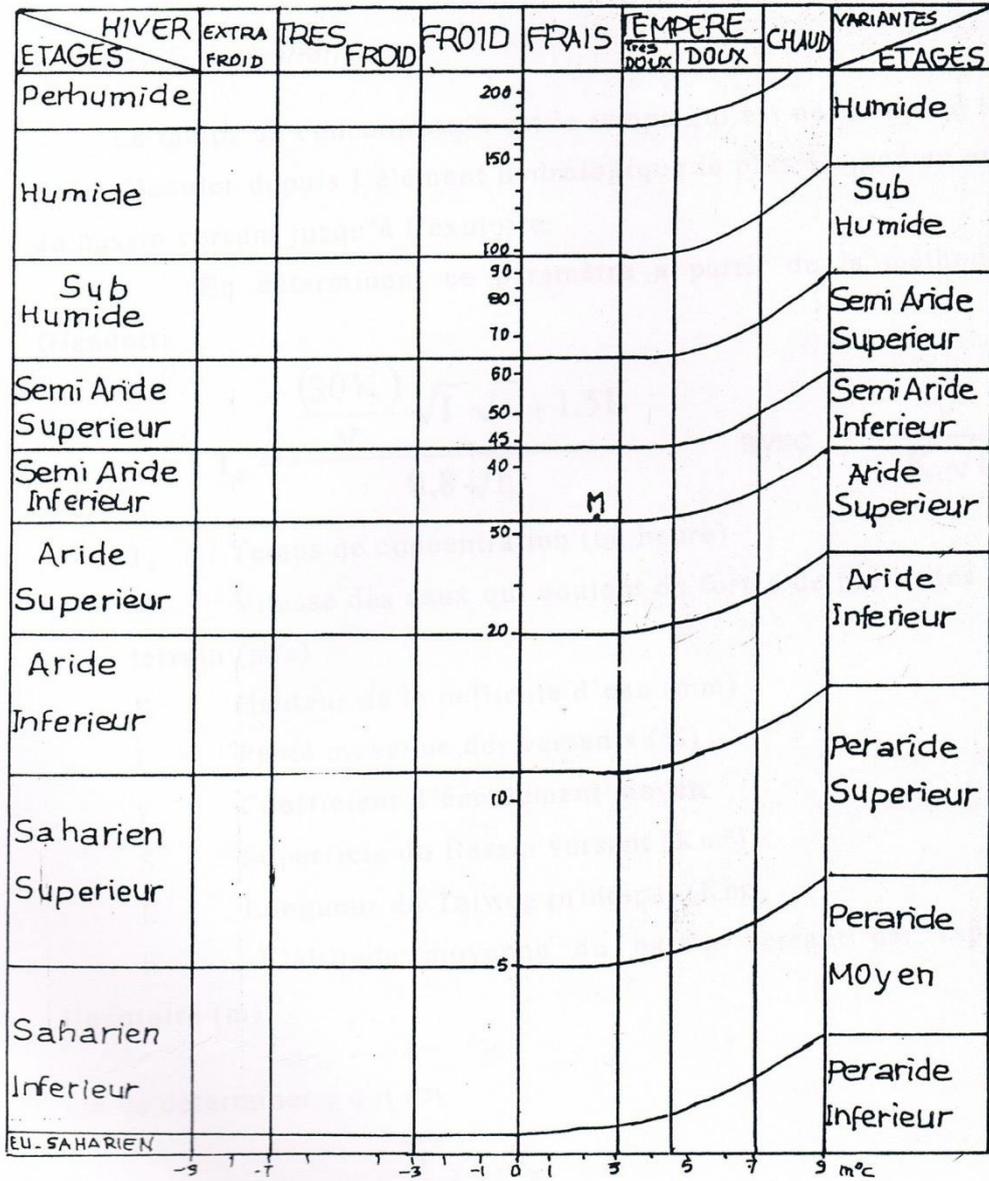


Figure I. 7. Climagramme d'EMBERGER (actualisé par SAUVAGE). [1]

II.1. Introduction

L'étude de la variabilité climatique nécessite un certain nombre de données. Ces données sont principalement, la pluie, le dédit, la température, etc.

Dans la présente étude, nous avons choisi le bassin versant de hammam boughrara pour lequel nous disposons d'un certain nombre de donnée pluviométriques.

II.2. Présentation et examen des données pluviométriques

II. 2. 1. Examens des données pluviométriques

L'évaluation des ressources de surface d'un bassin versant nécessite la connaissance des mesures de la pluviométrie. Ces mesures doivent être importantes en ce qui concerne le nombre mais doivent aussi s'étaler sur de longues périodes. La qualité de cette évaluation dépendra en grande partie de la qualité et de la quantité de cette information [2]. Pour la présente étude nous disposons de la pluviométrie annuelle enregistrée dans huit stations du bassin du barrage Hammam Boughrara et deux stations limitrophes.

On remarque que les stations sont bien réparties sur le bassin du coté Algérien, malheureusement nous n'avons pas d'information concernant la partie Marocaine.

Les séries de données pluviométriques peuvent être classées en trois catégories:

- **Des séries pluviométriques longues et continues:**

La station du bassin dont la durée d'observation est longue et continue est la station de Béni Bahdel (60403). Les enregistrements relatifs à cette station vont de 1943/1944 jusqu'à 2004/2005.

- **Des séries pluviométriques longues mais discontinues:**

Certaines stations du bassin sont anciennes mais ont cessées de fonctionner pendant des périodes relativement longues et continues. C'est le cas de la station de Béni Oussine (160303), de Khemis (160406).

- **Des séries pluviométriques de durée d'observation limitée:**

Pour le reste des stations du bassin on possède des séries de mesures de date récente. C'est le cas des stations de Maghnia (160301), de Béni Boussaid (160315), de Sidi Medjahed (160407), de Sabra (160502) et de Hammam Bouhrara (160501).

- **Stations périphériques:**

Pour la présente étude, deux stations limitrophes au bassin ont été utilisées. Les durées d'observations sont variables : station Sidi Boudjenane (40103) dont la durée d'observation est assez longue mais discontinue et de Sidi Djilali (80101) dont la durée d'observation est continue mais de date récente.

Il faut signaler que les données que nous avons utilisées dans cette étude sont celles fournies par l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH) dans des études précédentes. Comme il a été mentionné ci-dessus, les durées des observations des stations sont variables, le tableau II.1 donné ci-après donne la liste des stations utilisées, leurs coordonnées et la période des observations dont nous disposons pour chacune d'elles.

N°	Nom de la station	Code	coordonnées			Période d'observation
			X	Y	Z	
1	Maghnia	160 302	90.65	174.65	430	73/74 - 04/05
2	Béni ouassine	160 303	90.83	180.7	418	53/54 - 61/62 67/68 - 04/05
3	Béni boussaid	160 315	92.35	159.6	675	85/86 - 04/05
4	Béni bahdel	160 403	114.98	164.6	666	43/44 - 04/05
5	Khemis	160 406	109.3	157.1	870	43/44 - 54/55 69/70 - 98/99
6	Sidi medjahed	160 407	102.8	173.1	360	67/68 - 98/99
7	H. bouhrara	160 501	103.7	185.8	270	69/70 - 04/05
8	Sabra	160 502	115.1	178.75	620	70/71 - 98/99
9	Sidi boudjnene	40103	77.4	192.9	425	52/53 - 62/63 68/69 - 98/99
10	Sidi djilali	80101	154.7	135.5	1410	69/70 - 69/70 72/73 - 98/99

Tableau II. 1. Stations de mesures et périodes d'observations des stations utilisées dans cette étude.

La position de ces stations dans le bassin du barrage Hammam Boughrara est représentée dans la figure II.1.

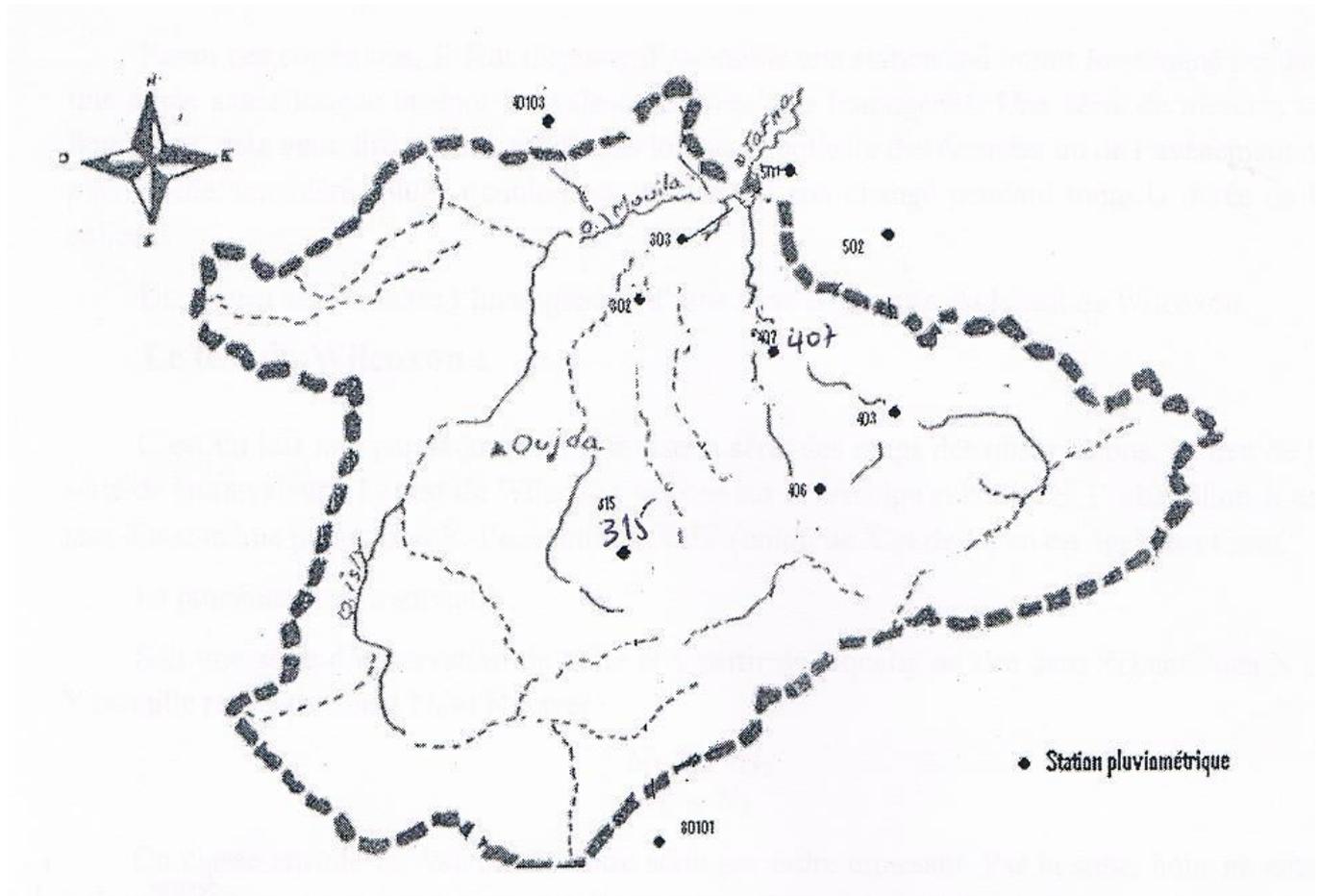


Figure II. 1. Position des stations pluviométriques utilisées [3].

II. 2. 2. Choix de la station de référence

Toute étude hydrologique d'un bassin versant se base sur l'exploitation de mesures hydrométriques et climatologiques (pluviométrie, débit, température, etc.), la qualité de l'étude dépend de la qualité et de la quantité des données disponibles. Pour l'évaluation des ressources en eau d'un bassin, on a besoin des mesures de la pluviométrie en des points (stations) bien répartis sur le bassin et dont le fonctionnement soit le plus long possible. Si le bassin est couvert par un réseau pluviométrique d'une manière uniforme, la durée de l'observation peut remplacer la quantité de stations. Pour le bassin du barrage Hammam

Bouhrara, il est doté de huit stations. Nous avons choisi de compléter le réseau par deux stations limitrophes au bassin. La répartition des stations sélectionnées pour l'étude laisse clairement apparaître une couverture assez correcte de la partie Est, par contre la partie Ouest qui se trouve dans le territoire marocain n'est pas pourvue de station (En fait, nous ne disposons pas d'information).

Il est à remarquer que seule la station Béni Bahdel est longue et continue. Les autres stations sont soit courtes soit contenant des lacunes importantes. Il existe des techniques qui permettent d'allonger les séries de mesures dans le temps moyennant le respect de certaines conditions.

Parmi ces conditions, il faut disposer d'au moins une station qui aurait fonctionné pendant une durée assez longue et dont les valeurs doivent être homogènes. Une série de mesures est homogène, cela veut dire que les conditions lors de la collecte des données ou de l'avènement du phénomène considéré (pluie, écoulement, etc.) n'ont pas changé pendant toute la durée de la collecte[6].

Un moyen de connaître l'homogénéité d'une série de mesure est le test de Wilcoxon.

II. 2. 3. Le test de Wilcoxon

C'est un test non paramétrique qui utilise la série des rangs des observations, au lieu de la série de leurs valeurs. Le test de Wilcoxon se base sur le principe suivant: Si l'échantillon X est issu d'une même population Y, l'échantillon XUY (union de X et de Y) en est également issu.

La procédure est la suivante

Soit une série d'observation de taille N à partir de laquelle on tire deux échantillons X et Y de taille respectivement N_1 et N_2 , avec

$$N = N_1 + N_2$$

$$N_1 \leq N_2.$$

On classe ensuite les valeurs de notre série par ordre croissant. Par la suite, nous ne nous intéressons qu'au rang de chacun des éléments des deux échantillons dans cette série. Si une valeur se répète plusieurs fois, on lui associe le rang moyen correspondant.

On calcule ensuite la somme W_x des éléments du premier échantillon dans la série commune $W_x = \sum \text{Rang } x$.

Wilcoxon a montré que, dans le cas où les échantillons X et Y constituent une série homogène, la qualité W_x est comprise entre deux bornes W_{\min} et W_{\max} , donnée par les formules suivantes:

$$W_{\min} \leq W_x \leq W_{\max}$$

$$W_x = \sum \text{Rang}(X)$$

$$W_{\min} = \frac{(N_1+N_2+1)N_1-1}{2} - Z_{1-\alpha/2}$$

$$W_{\max} = (N_1+N_2+1) N_1 - W_{\min}$$

$Z_{1-\alpha/2}$: représente la valeur de la variable centrée réduite de la loi normale correspondant à $1-\alpha/2$ (au seuil de confiance de 95%, nous avons $Z_{1-\alpha/2}=1,96$). **[11]**

Nous allons donc tester l'homogénéité des données pluviométriques de la station de Beni Bahdel au niveau de signification de 5%.

La série des données de la station Béni Bahdel comporte soixante deux (62) valeurs (pluie annuels)

On commence par diviser notre série pluviométrique en deux échantillons de longueur respective $N_1=12$ valeurs et $N_2=50$. On classe la série par ordre croissant et on affecte les rangs aux valeurs classées de la série pluviométrique originale.

Nous formons ensuite le tableau II.2 pour faciliter les calculs. Dans la première, quatrième et septième colonne on reporte les rangs affectés aux pluies classées, la deuxième, cinquième et huitième colonne on reporte les pluies classées, en troisième, cinquième et neuvième colonne, on mentionne l'origine de la valeur de la série, c'est-à-dire on note si elle provient de l'échantillon X ou de l'échantillon Y.

On calcul ensuite W_x , W_{\min} et W_{\max}

Le résultat de l'application du test de Wilcoxon est donné dans le tableau II.3.

On peut donc conclure que la station Beni Bahdel est homogène.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Rang	X U Y	Origine	Rang	X U Y	Origine	Rang	X U Y	Origine
1	206.1	Y	22	435.0	Y	43	523.5	X
2	210.5	Y	23	435.9	Y	44	527.4	Y
3	213.6	Y	24	438.0	Y	45	529.9	Y
4	224.6	X	25	451.7	Y	46	539.6	X
5	260.8	Y	26	453.5	X	47	546.2	Y
6	282.4	Y	27	464.2	Y	48	556.9	Y
7	295.6	Y	28	464.6	Y	49	560.9	Y
8	296.6	Y	29	468.7	Y	50	591.6	Y
9	301.1	Y	30	471.5	Y	51	599.8	Y
10	303.5	Y	31	474.3	Y	52	606.6	Y
11	335.1	Y	32	476.2	Y	53	611.7	X
12	341.5	Y	33	477.5	X	54	646.3	X
13	341.8	Y	34	495.8	X	55	661.8	Y
14	344	Y	35	495.9	Y	56	669.8	Y
15	351.7	Y	36	499	Y	57	670.3	X
16	354.8	Y	37	504.8	Y	58	680.8	Y
17	372.2	Y	38	507.8	Y	59	686.2	X
18	375.5	X	39	513.0	Y	60	720.6	X
19	387.7	Y	40	515.7	Y	61	729.1	Y
20	397.3	Y	41	516.2	Y	62	756.9	Y
21	434.9	Y	42	519.0	Y			

Tableau II. 2. Application de la méthode de Wilcoxon.

Variable	Valeur
N_1	12
N_2	50
W_{\min}	267.5
W_x	487
W_{\max}	488.5

Tableau II. 3. Résultats du test de Wilcoxon.

II.3. Homogénéisation des séries et comblement de lacunes

II. 3. 1. Généralités

La compréhension des processus intervenant dans le cycle de l'eau ainsi que l'étude de leurs variations spatiales et temporelles nécessitent de disposer de données. Celles-ci sont obtenues à partir d'un réseau de mesures implantées au niveau du bassin de l'étude. La densité des réseaux doit tenir compte du phénomène observé, du but des observations, de la précision désirée, de la topographie, de facteurs économiques, etc.

Il arrive que des bassins soient dotés d'un nombre de pluviomètres insuffisants ou ayant fonctionné pendant des périodes relativement courtes par rapport au phénomène étudié ou ayant des lacunes au sein des séries prélevées. Les hydrologues ont mis au point des outils permettant d'utiliser des séries de mesures d'un bassin autre que celui de l'étude, de prolonger des séries dans le temps ou de combler quelques lacunes constatées au niveau d'une série. Concernant la pluviométrie, plusieurs méthodes peuvent être utilisées moyennant le respect de certaines conditions.

Il est clair que l'homogénéisation ou l'extension des séries de données n'est pas un but en soi mais vise à ce que ces données offrent la meilleure fiabilité possible en vue d'une exploitation quelconque. En prenant l'exemple sur les séries de mesure de la pluie, autant l'information est fiable, autant l'aménagement du bassin sera optimisé. [2]

II. 3. 2. Comblement de lacunes

II. 3. 2. 1. Nature des lacunes

En hydrologie, l'information occupe une importance capitale. En effet, celle-ci est essentielle et constitue un préalable à toute analyse hydrologique, que ce soit dans le but de procéder à une étude du cycle de l'eau, d'impacts environnementaux ou pour procéder au dimensionnement d'ouvrages hydrauliques. Cette information doit être la plus complète possible durée dans le temps, représentativité, etc. Il arrive, comme c'est le cas de la pluviométrie, que des lacunes soient constatées dans les séries. Ces lacunes peuvent être de courtes ou de longues durées (pannes de la station, défaillance dans la chaîne de transmission de l'information, perte de l'information, etc.). Pour le besoin d'étude, on peut être amené à compléter l'information.

Il faut rappeler que la pluviométrie est relevée journallement. L'exploitation s'effectue sous forme de moyennes mensuelles et de moyennes annuelles. La carence dans une série peut donc être l'absence de la mesure d'un ou plusieurs mois d'une même année comme elle peut être l'absence de la mesure d'une ou plusieurs années. Ces carences doivent donc être comblées. En fonction des lacunes constatées dans les séries disponibles, les choix suivants ont été décidés [2]

A. Le comblement de lacunes ponctuelles mensuelles

Quand les lacunes ont concerné un ou deux mois d'une même année, les valeurs des mois manquants ont été reconstituées selon la méthode de la moyenne pondérée dont la formule est la suivante [10]:

$$P_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\overline{P_x}}{\overline{P_i}} \cdot P_i$$

Dans la formule précédente:

P_x : est la valeur du mois manquant de la série x,

$\overline{P_x}$: est la moyenne à long terme des précipitations à la station x correspondant au mois manquant,

$\overline{P_i}$: est la moyenne à long terme des stations environnantes choisies calée sur la même période sur laquelle à été calculée.

P_i : est la valeur des précipitations correspondant au mois manquant des stations environnantes choisies.

N: est le nombre de stations environnantes choisies pour compléter la série x.

B. Le comblement des lacunes ponctuelles annuelles

Quand les lacunes ont concerné une ou deux années dans une série continue, les valeurs des années manquantes ont été reconstituées selon la méthode de la moyenne pondérée décrite ci-dessus mais dont les termes deviennent:

P_x : est la valeur de l'année manquante de la série x,

$\overline{P_x}$: est la moyenne interannuelle à long terme des précipitations à la station x,

\bar{P}_i : est la moyenne interannuelle des stations environnantes choisies calée sur la même période sur laquelle à été calculée.

P_i : est la valeur des précipitations correspondant à l'année manquante des stations environnantes choisies.

N : est le nombre de stations environnantes choisies pour compléter la série x .

C. Le comblement des lacunes longues

Dans les cas des lacunes longues, le comblement des lacunes a été effectué en recherchant des corrélations entre la série de référence et la série à compléter. Il faut signaler que dans le cas des lacunes longues, deux situations se sont présentées:

- Soit la série est continue mais de courte durée et qu'il a été nécessaire de l'étendre dans le passé,
- Soit que la station relative à la série de mesure ait fonctionné pendant deux périodes continues mais séparées par une période de non fonctionnement relativement longue elle aussi.

II. 3. 2. 2. Comblement de lacunes ponctuelles

Les données fournies par l'ANRH concernent huit stations du bassin du barrage Hammam Bouhrara et deux stations périphériques. Les périodes de fonctionnement des différentes stations ont été relevées dans le tableau donné auparavant.

La technique de la moyenne pondérée a été appliquée pour compléter les données des stations auxquelles manquaient juste les mesures d'une ou deux années dans une série continue.

II. 3. 2. 3. Comblement de lacunes longues

Si deux postes considérés sont situés dans une même grande région climatique et sont séparés d'une distance relativement faible par rapport à l'échelle d'un continent, il existe une liaison positive significative entre les totaux annuels pluviométriques, c'est-à-dire qu'il existe seulement 5% de chance par exemple pour que les séries soient complètement

indépendantes ou présentent des variations de sens contraires [7]. Le test qui permet de déceler cette dépendance est le test dit du double cumul.

Le principe du test du double cumul permet de déceler si une station présente une hétérogénéité par rapport à une autre. Si la première est homogène, cela veut dire que la source de l'hétérogénéité est un facteur externe.

Partant du constat que la station de Béni Bahdel est la plus longue et est homogène, le test du double cumul sera donc effectué pour chaque station par rapport à celle-ci.

Le test du double cumul s'illustre par des droites :

- ❖ Si ces droites ne présentent pas de cassures nettes, les séries sont homogènes et l'extension est possible moyennant l'obtention d'une corrélation satisfaisante.
- ❖ Si ces droites présentent des cassures, c'est le signe qu'une hétérogénéité s'est produite à l'endroit de la cassure. Dans ce cas, il y'a lieu d'abord d'homogénéiser la série avant la recherche de corrélation. Il se peut qu'une droite présente plus d'une cassure, c'est le signe apparent que plusieurs hétérogénéités se sont produites dans cette série : changement du lieu de la station, changement dans l'environnement de la station, changement du personnel qui prélevait les mesures, etc.

II. 3. 2. 4. Méthode du double cumul et homogénéisation des séries

En disposant d'une série homogène de mesure correspondant à une station de référence, le test du double cumul permet de déceler les hétérogénéités des autres séries. En effet, si une série est jugée comme homogène, la somme cumulée de la variable (pluviométrie) constitue une base de données homogène. En comparant la somme cumulée de la pluviométrie de la station homogène par rapport à la somme cumulée de la pluviométrie des stations à tester, on arrive à détecter les anomalies des stations testées et à les corriger.

Le principe consiste à représenter sur un système de coordonnées, les pluies cumulées de la station de référence en abscisse et les pluies cumulées de la station à tester en ordonnées. Si les points obtenus sont alignés selon une droite, cela veut dire que le coefficient de proportionnalité est constant et que la série testée est homogène. Si par

contre la droite présente une ou plusieurs cassures, cela indique qu'une ou plusieurs ruptures d'homogénéité ont survenu et qu'il y'a lieu de corriger la série avant toute exploitation.

La décision de corriger l'un des tronçons est généralement prise après une connaissance détaillée des circonstances de « l'accident » au cours de l'année qui présente la brisure. Ne pouvant enquêter sur toutes les ruptures d'homogénéité rencontrées, la solution choisie qui paraît la plus judicieuse est:

- de retenir la période la plus longue comme période de référence et de corriger la période courte sur la base de la période longue.
- de conserver intacte la fraction de la série relative à l'emplacement actuel du poste pluviométrique et de corriger la période avant l'anomalie sur la base de cette série.

Pour notre étude, c'est la dernière considération qui a été retenue dans la mesure où la plupart des hétérogénéités se sont produites vers les années pré ou post-indépendance.

Le test d'homogénéité a été effectué entre la série de la station de Béni Bahdel et toutes les autres stations. Il s'est avéré positif pour quatre d'entre elles (Maghnia, Sidi Medjahed, Sabra, Sidi boudjnane) et négatif pour les autres.

Nous donnons sur les figures ci-dessous la représentation graphique du test d'homogénéité appliqué aux différentes stations.

On juge le test positif quand il ya une linéarité des courbes c'est-à-dire pas de cassures (Figures II.2, II.3, II.4 et II.5).

Le test est jugé négatif quand la droite présente une ou plusieurs cassures c'est le cas des stations El Khemis, Béni Boussaid, Hammam Boughrara, Béni Ouassine et Sidi Djillali. Dans ces cas les données ont été corrigées en fonction des pentes des segments des droites représentatives du test sur les figures. La procédure de correction consiste à multiplier la valeur de la mesure par le rapport suivant :

$$m = \frac{m_1}{m_2}$$

m_1 est la pente du segment de la droite représentant le test graphique des mesure récentes supposées homogènes et m_2 correspond à la pente des mesures anciennes hétérogènes. Les séries des stations de Khemis, Beni Boussaid ont présentés une rupture d'homogénéité, celles de H.Boughrara, Beni Ouassine, Sidi Djilali deux ruptures

d'homogénéité[2]. Les résultats graphiques du test de ces stations avant et après correction sont représentés dans les figures II.6 à II.15.

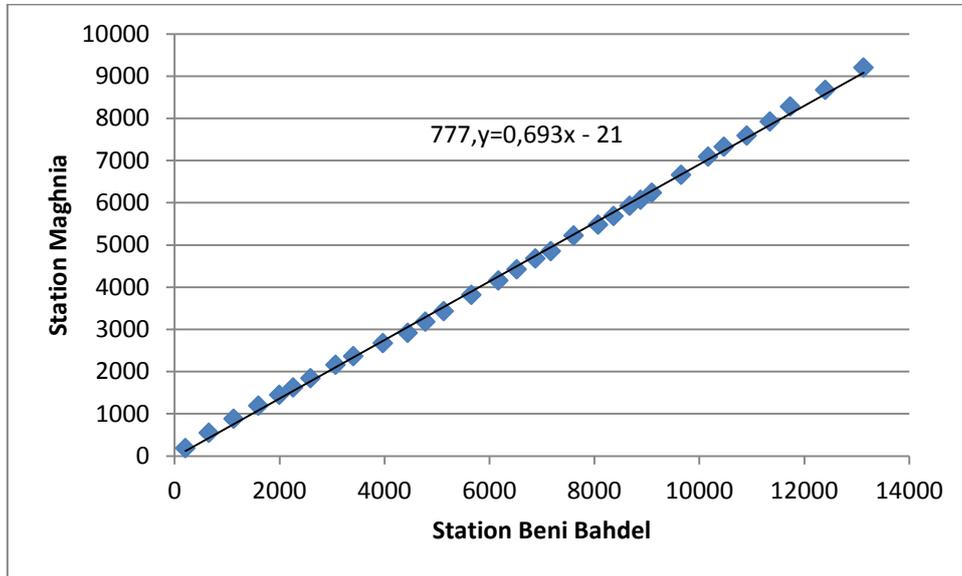


Figure II. 2. Test du double cumul entre la station Beni Bahdel et la station de Maghnia.

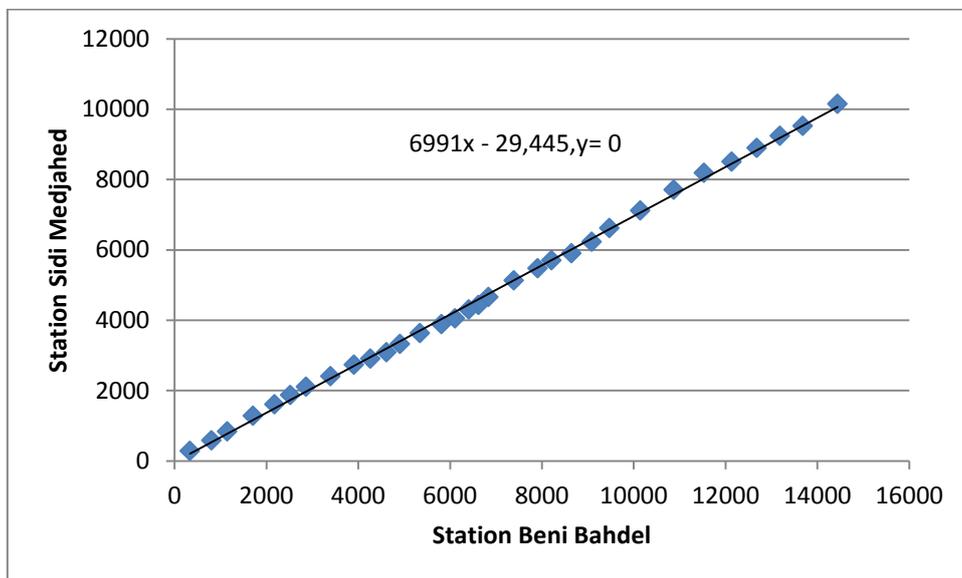


Figure II. 3. Test du double cumul entre la station Beni Bahdel et la station de Sidi Medjahed.

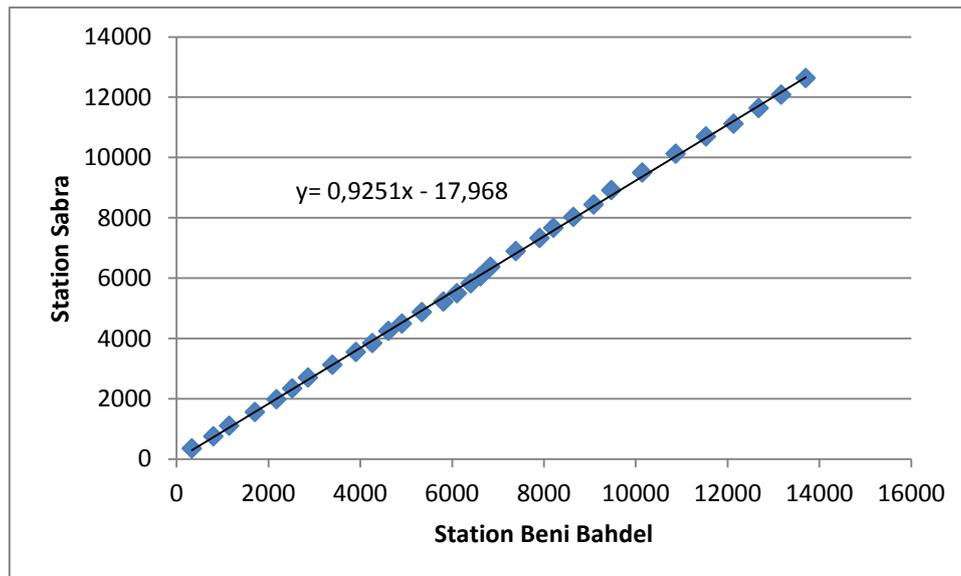


Figure II. 4. Test du double cumul entre la station Beni Bahdel et la station de Sabra.

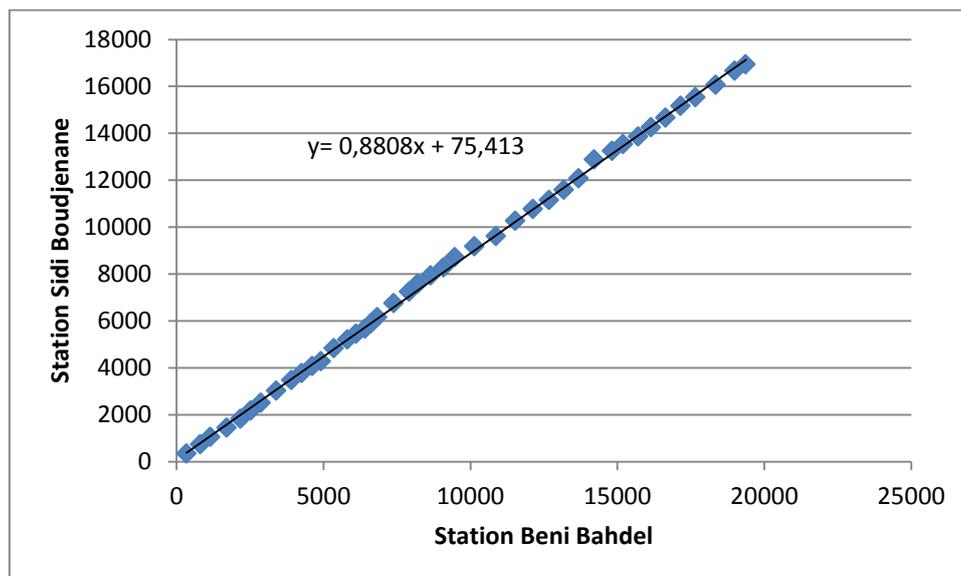


Figure II. 5. Test du double cumul entre la station Beni Bahdel et la station de Sidi Boudjenane.

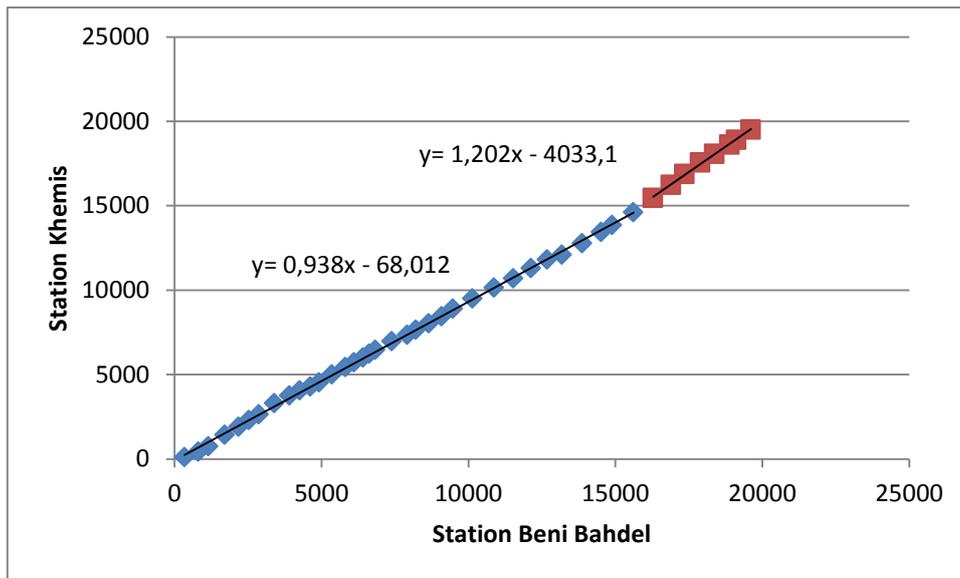


Figure II. 6. Test du double cumul entre la station Beni Bahdel et la station de Khemis.

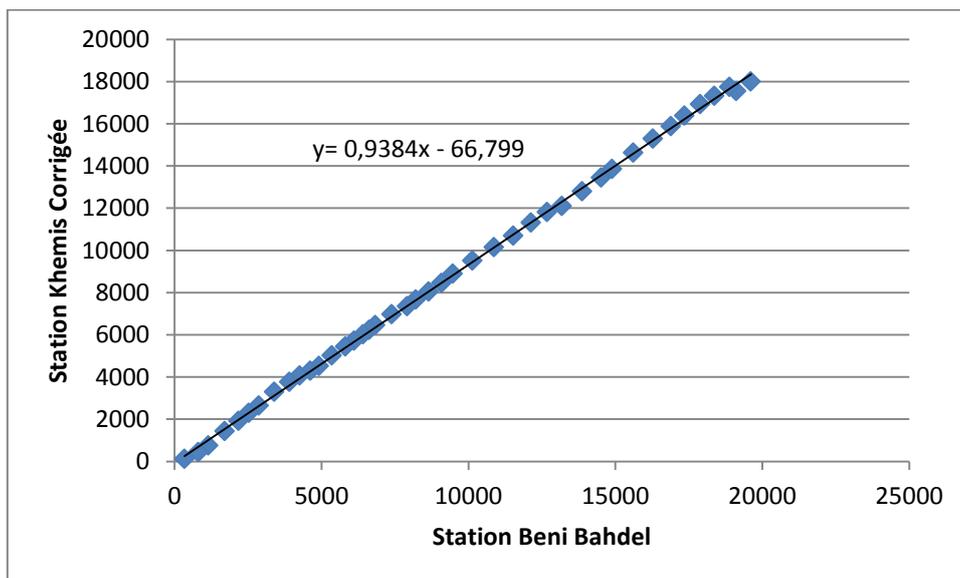


Figure II. 7. Test du double cumul entre la station Beni Bahdel et la station de Khemis corrigée.

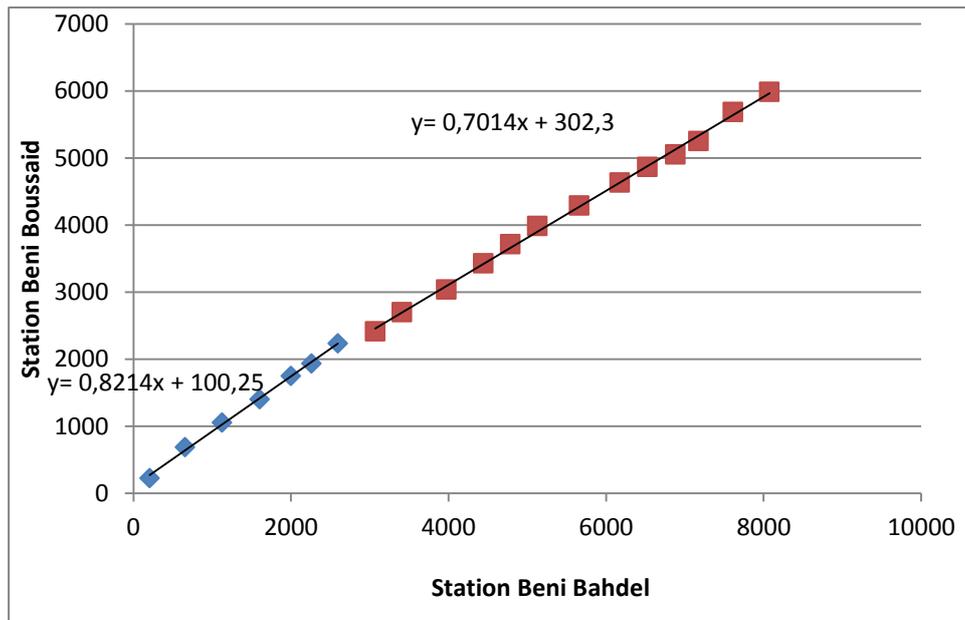


Figure II. 8. Test du double cumul entre la station Beni Bahdel et la station de Beni Bousaid.

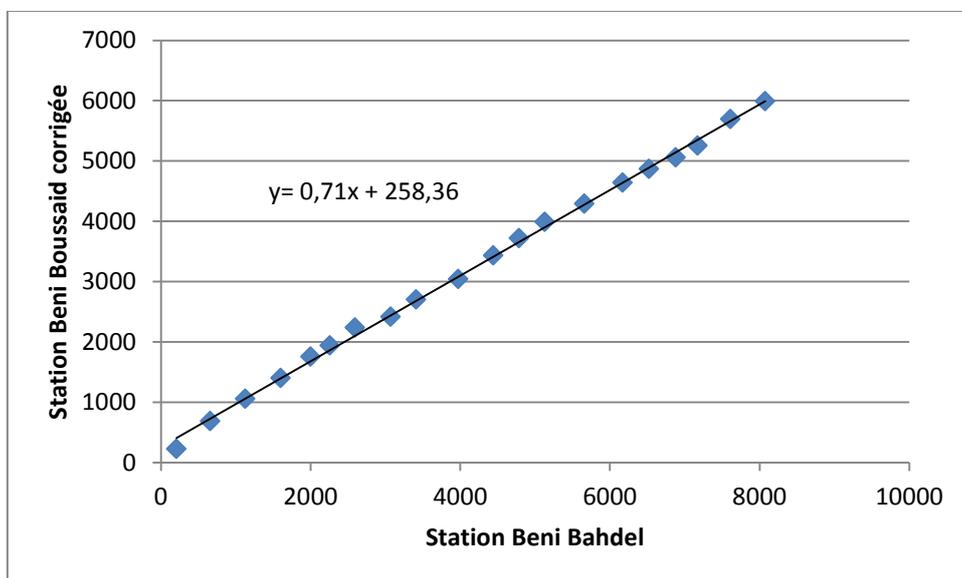


Figure II. 9. Test du double cumul entre la station Beni Bahdel et la station de Beni Bousaid corrigée.

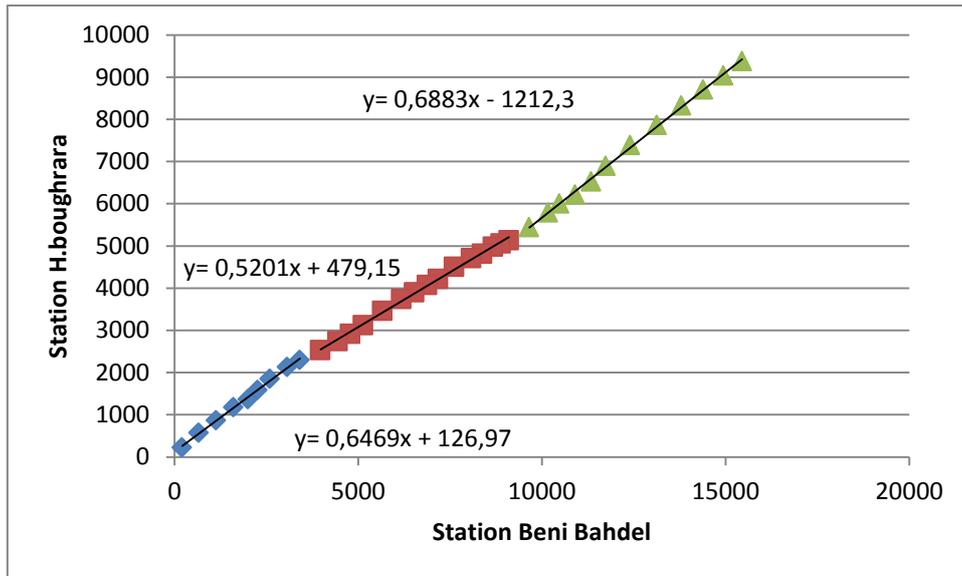


Figure II. 10. Test du double cumul entre la station Beni Bahdel et la station de H.Boughrara.

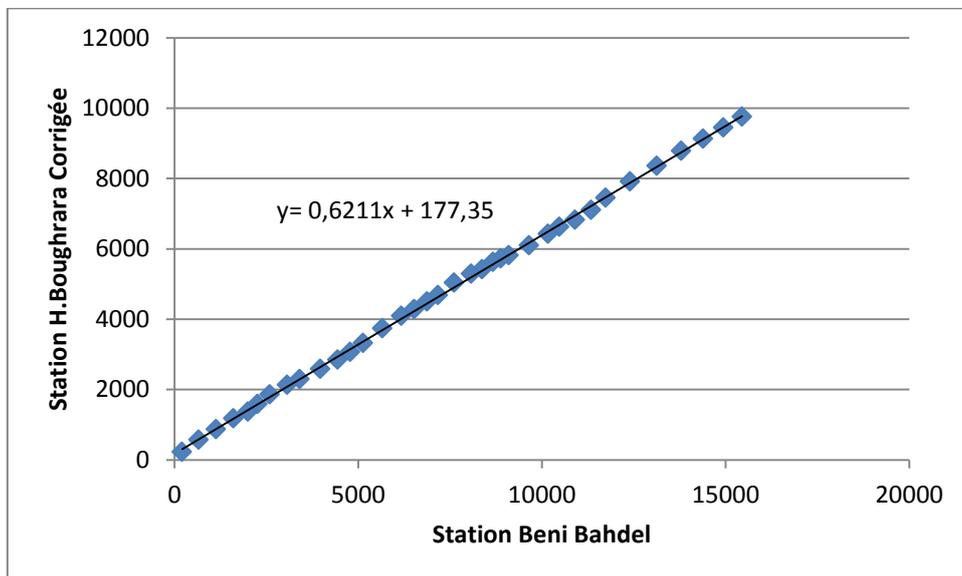


Figure II. 11. Test du double cumul entre la station Beni Bahdel et la station de H.Boughrara corrigée.

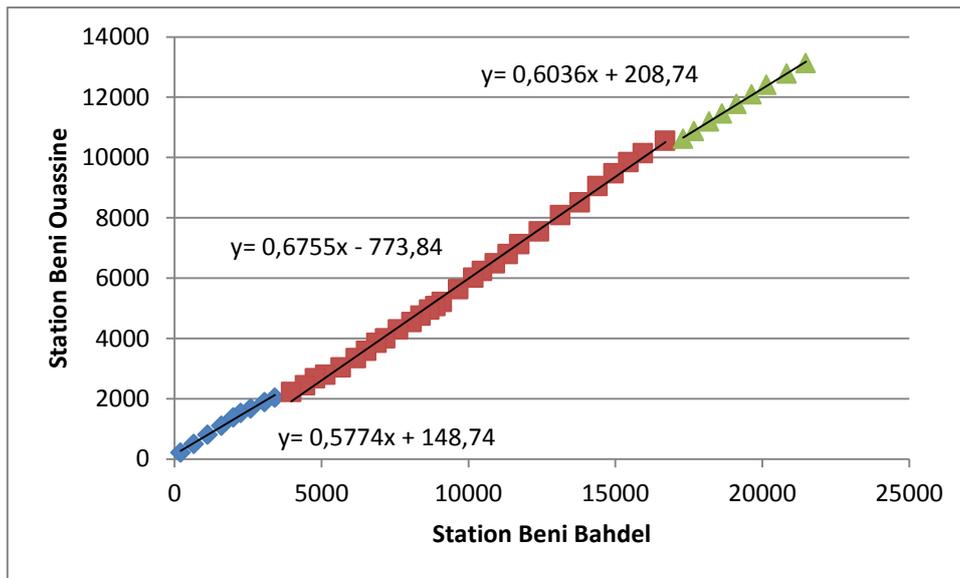


Figure II. 12. Test du double cumul entre la station Beni Bahdel et la station de Beni Ouassine.

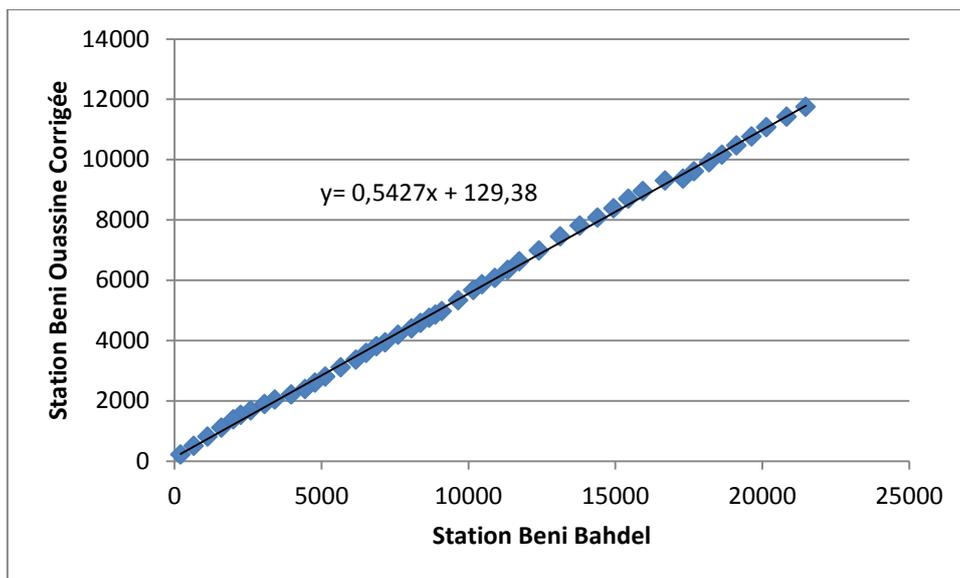


Figure II. 13. Test du double cumul entre la station Beni Bahdel et la station de Beni Ouassine corrigée.

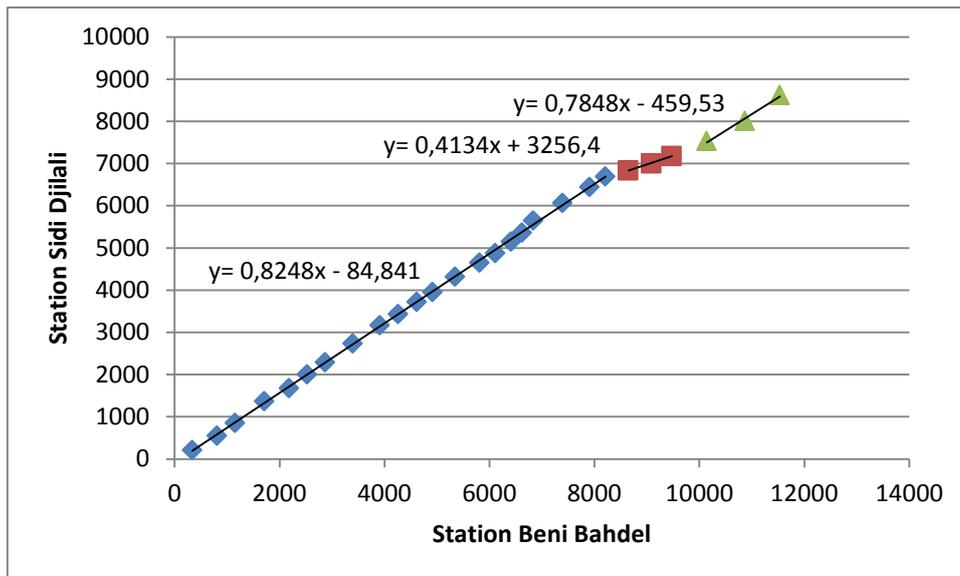


Figure II. 14. Test du double cumul entre la station Beni Bahdel et la station de Sidi Djilali.

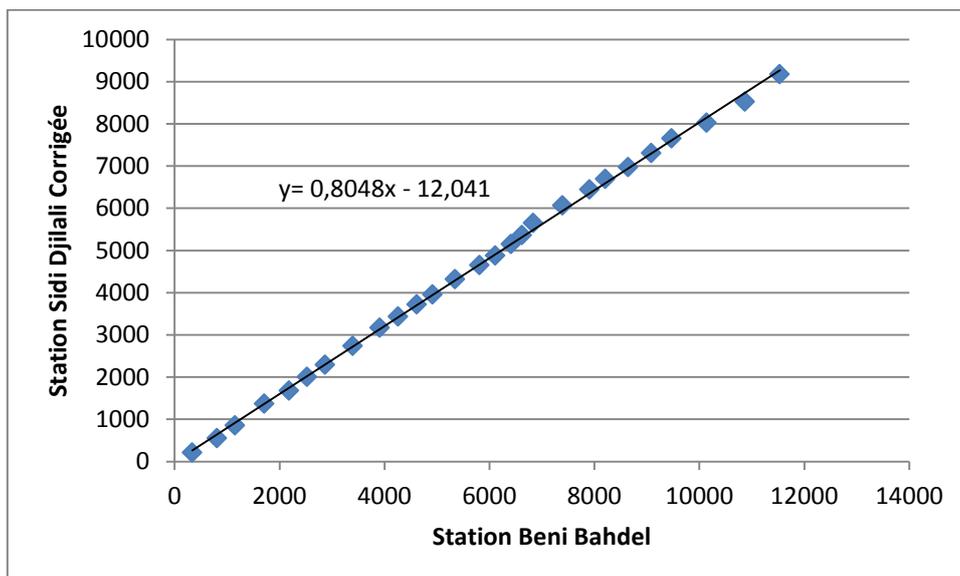


Figure II. 15. Test du double cumul entre la station Beni Bahdel et la station de Sidi Djilali corrigée.

II.4. Extension des séries hydrologiques

II. 4. 1. Généralités

Les études d'homogénéité sont le préalable aux études d'extension des séries de données pour des périodes où l'information n'est pas disponible. L'extension vise à améliorer la qualité de l'information pour que l'exploitation à des fins d'évaluation de la ressource en eau ou à des fins de projection soit fiable. Il faut dire que souvent, dans les études d'aménagements de bassin versant, l'information est insuffisante parce que, soit elle est courte dans le temps et ne peut caractériser le phénomène à étudier soit elle ne couvre pas toute la superficie nécessaire à l'aménagement et l'étude sera qualitativement incomplète. D'ailleurs, c'est pour ces raisons que les méthodes d'extension des séries de données ont été développées.

II. 4. 2. Méthode des régressions linéaires

Parmi les méthodes utilisées pour étendre les séries de données, on citera la méthode dite de corrélation et de régression qui peut être linéaire, logarithmique, exponentielle,...

En général, les précipitations enregistrées dans des stations appartenant au même bassin versant ne sont pas indépendantes et les corrélations établies sont souvent linéaires [7]. Ceci est mis souvent en évidence graphiquement d'abord en disposant sur un diagramme, les données des deux séries à examiner l'une en abscisse et l'autre en ordonnées. L'ajustement linéaire (par une droite) est retenu si le nuage de points le suggère. Il s'agira ensuite de déterminer les coefficients de cette droite par la méthode dite des moindres carrés.

L'équation de régression linéaire revêt la forme suivante:

$$Y = A.X + B$$

Dans l'équation précédente, A, B, X et Y représentent respectivement la pente de la droite, l'ordonnée à l'origine, la variable de la station de référence (variable indépendante) et la variable de la station à compléter (variable dépendante).

L'intensité de la liaison est généralement mesurée par le coefficient de corrélation R qui varie de -1 (corrélation négative) à +1 (corrélation positive). Plus le nuage de points est aligné, plus le coefficient de corrélation s'approche de +1 ou -1 selon le cas.

Concernant l'extension des séries hydrologiques, On peut estimer le nombre d'années N' où on aurait la même confiance dans l'information reconstituée comme si elle était réellement mesurée [11]. Ce nombre est donné par :

$$N' = \frac{K}{E}$$

K : est le nombre des années de la série courte

E : le coefficient d'efficacité de la corrélation. Ce dernier est donné par:

$$E = 1 + (1 - k/N) ((1 - (k-2).R^2) / (k-3))$$

N et R sont respectivement le nombre d'années de la série longue et coefficient de corrélation.

II. 4. 3. Extension des séries hydrologiques

Le travail préliminaire étant accompli, il s'agit maintenant d'étendre les séries hydrologiques dont on dispose pour estimer les précipitations du bassin versant de Hammam Boughrara. La série de référence étant la série de la station de Beni Bahdel, toutes les autres stations seront opposées à cette série pour obtenir les droites de régression et les coefficients de corrélation. L'extension des séries sera effectuée avec les données corrigées (homogénéisées).

Nous donnons ci-dessous les figures illustrant la dispersion des nuages de points, les équations des droites de régression et le coefficient de corrélation. Nous avons noté que les corrélations sont excellentes dans la mesure où tous les coefficients de corrélations sont compris entre 0,80 à 0,90.

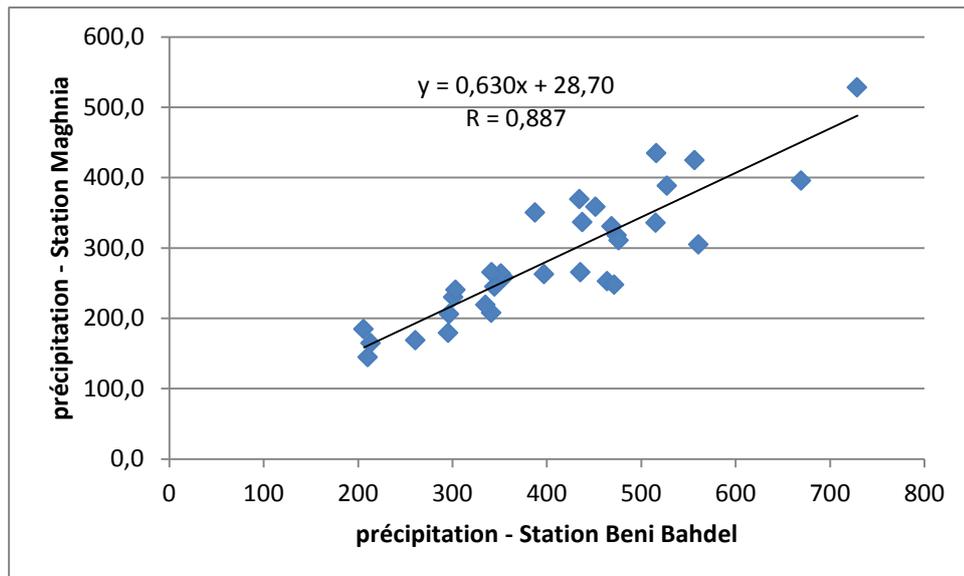


Figure II. 16. Droite de régression de la station de Magnhia.

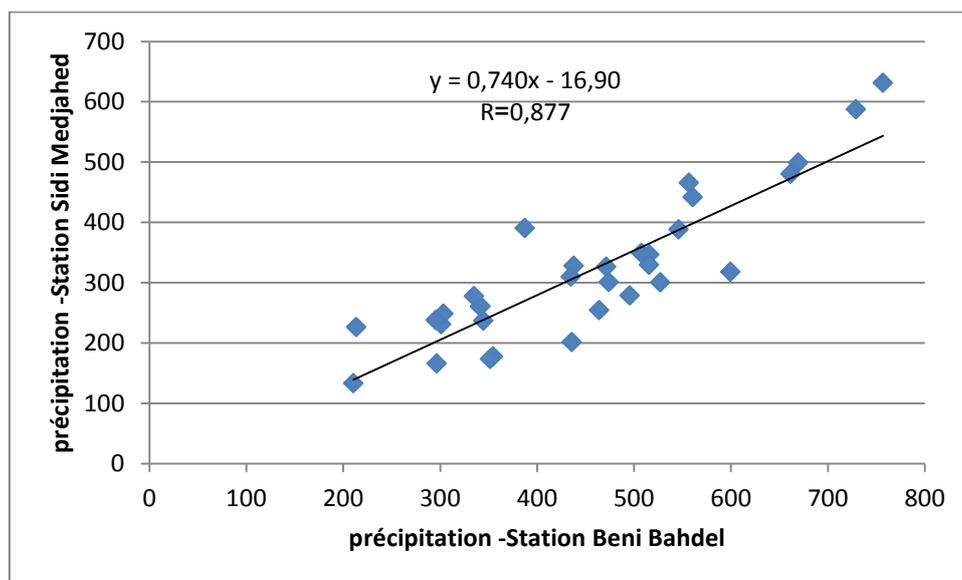


Figure II. 17. Droite de régression de la station de Sidi Medjahed.

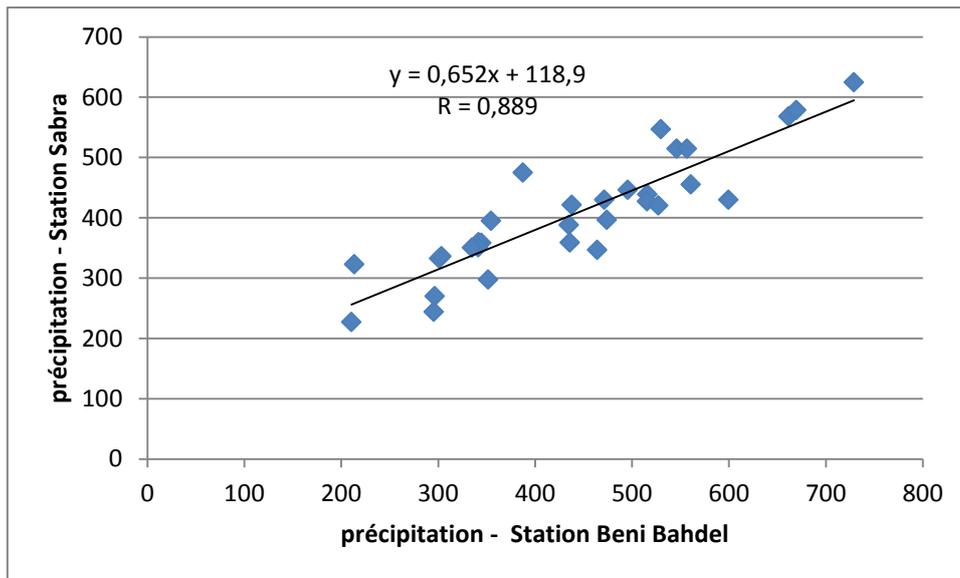


Figure II. 18. Droite de régression de la station de Sabra.

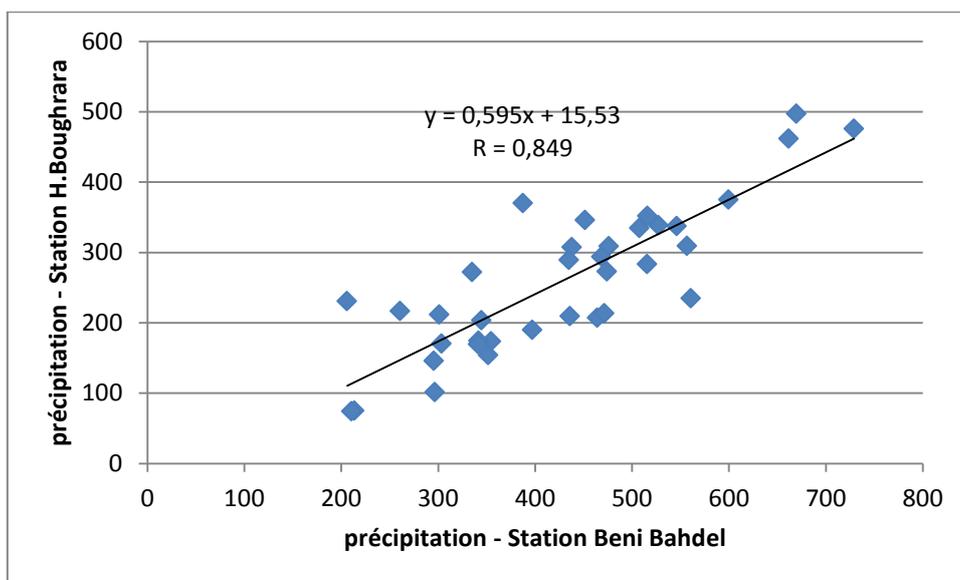


Figure II. 19. Droite de régression de la station de H. Boughrara.

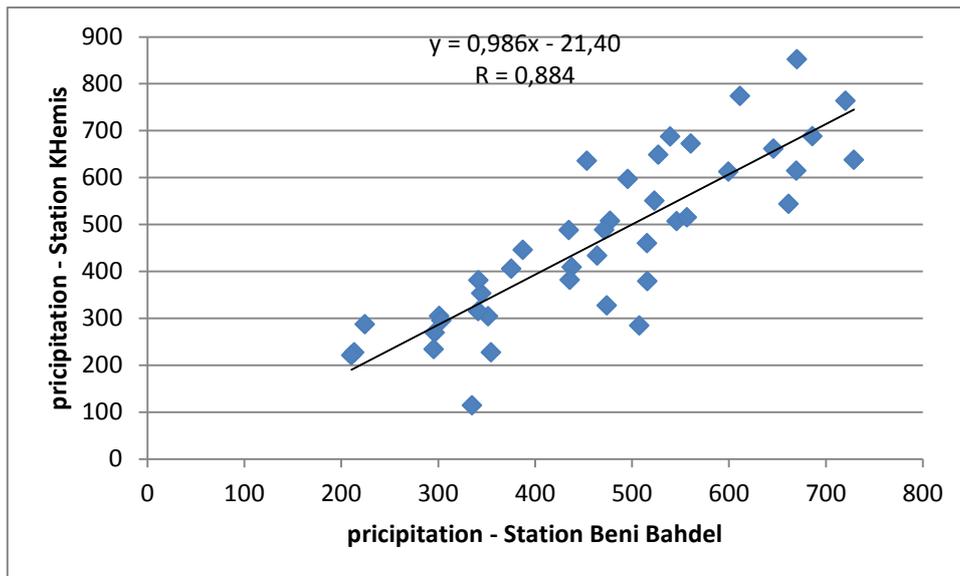


Figure II. 20. Droite de régression de la station de Khemis.

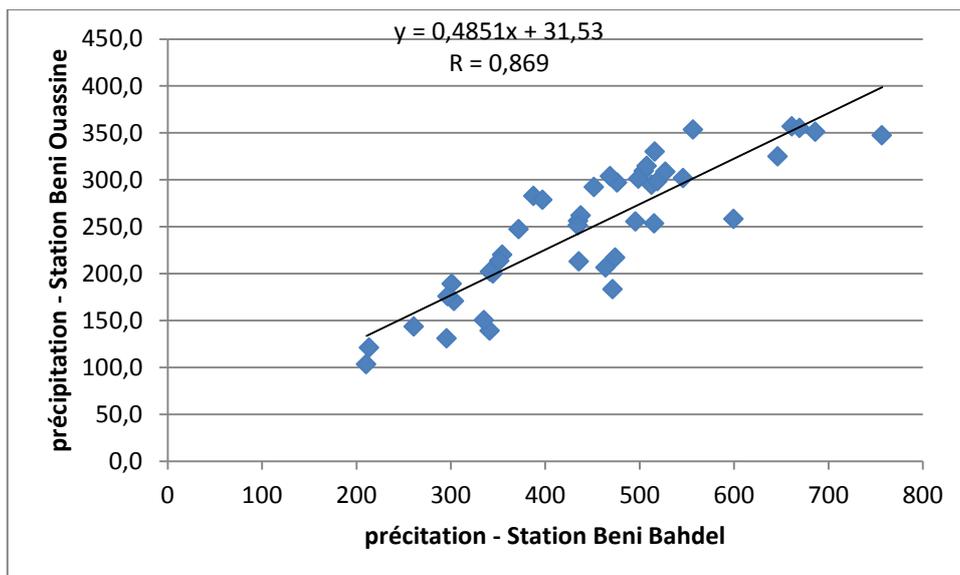


Figure II. 21. Droite de régression de la station de Beni Ouassine.

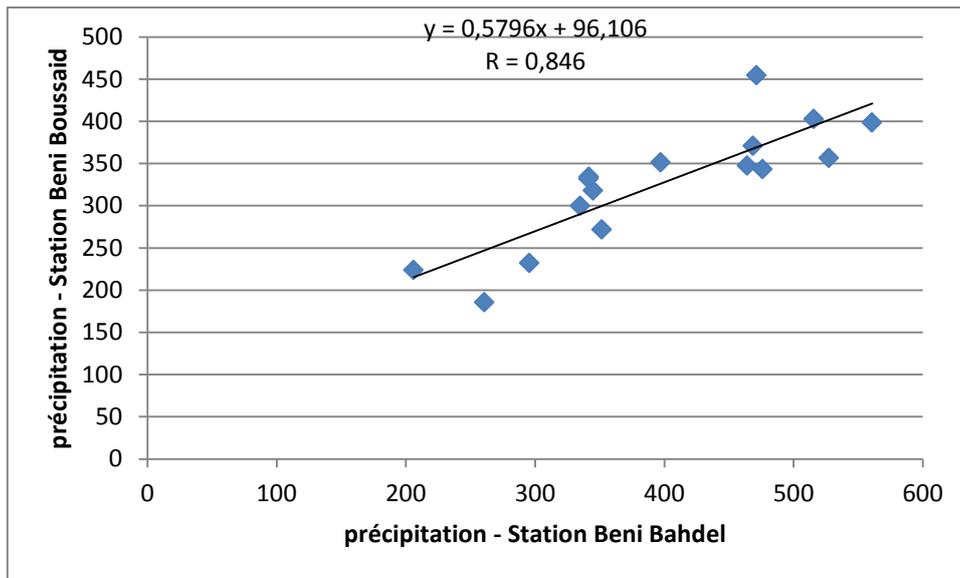


Figure II. 22. Droite de régression de la station de Beni Bousaïd.

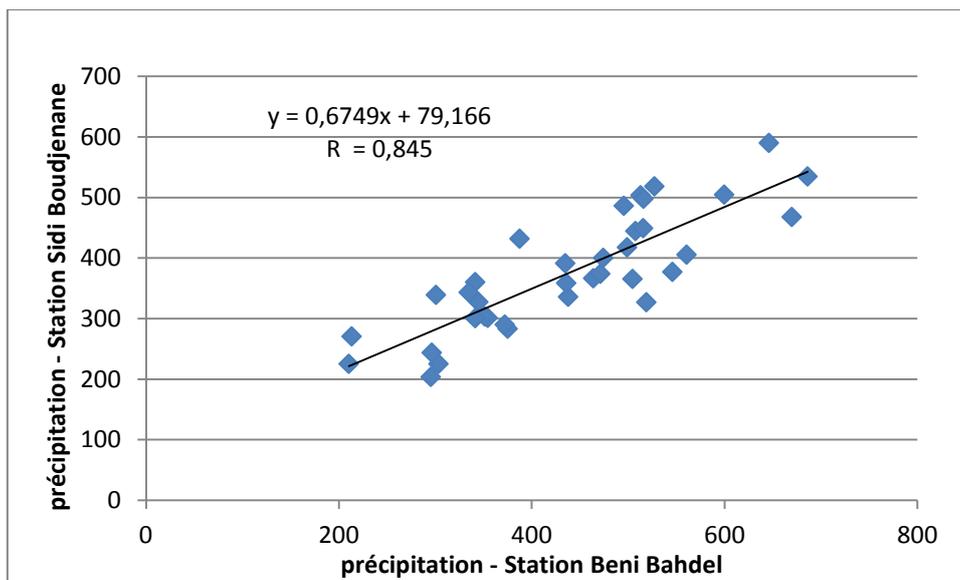


Figure II. 23. Droite de régression de la station de Sidi Boudjenane.

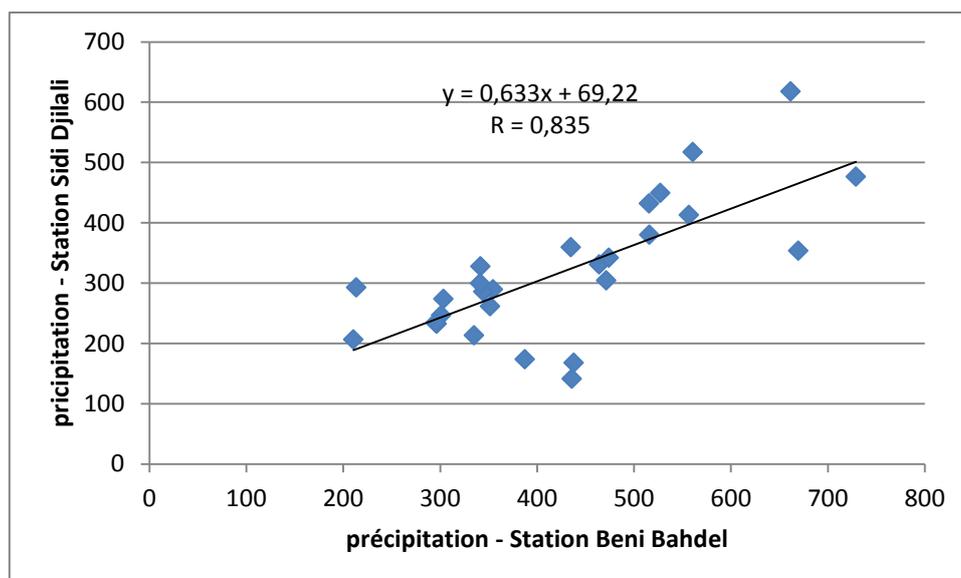


Figure II. 24. Droite de régression de la station de Sidi Djilali.

Le tableau II.4 donné ci-après rassemble toutes les données concernant les régressions linéaires. On trouvera notamment les équations des régressions linéaires, les coefficients de corrélation, le nombre d'années d'observation et le nombre d'années comblées ayant permis la recherche de la corrélation.

Il faut noter que nous avons fait l'extension des séries sur toute la période d'étude, c'est-à-dire 62 ans, le coefficient N' n'a pas été pris en considération.

III. 1. Généralités

L'évaluation de la pluie tombée sur un bassin Pour l'évaluation de la pluie moyenne tombée sur le bassin du barrage de Hammam Bouhrara, il faut d'abord estimer le volume total des précipitations sur le bassin. Pour cela, nous disposons des données pluviométriques de 08 stations réparties sur le bassin et 02 stations périphériques très proches de la limite du bassin.

III. 2. Méthodes d'évaluation

Pour l'évaluation de la pluie tombée sur le bassin nous avons choisis d'utiliser trois méthodes différentes ; Méthode de la moyenne arithmétique, Méthode des polygones de Thiessen et la méthode des éléments finis.

III. 3. Période sèche et période humide

Le tracé de la variation de la pluviométrie moyenne annuelle sur la période d'étude a permis de voir une tendance à la baisse de la pluie à partir de l'année 1975 (ceci a été bien confirmé dans l'étude de la variabilité climatique dans le chapitre suivant). Ainsi et pour voir l'importance de diminution en pluviométrie nous avons définis deux périodes pour lesquels nous allons calculer la pluie moyenne. Ces deux périodes sont :

Période humide: S'étale de 1943/1944 à 1974/1975

Période sèche: S'étale de 1975/1976 à 2004/2005

Pour pouvoir voir l'importance de cette variation nous avons calculé les déficits entre la période humide et la période sèche ensuite entre la période totale et la période sèche. Ces déficits sont définis par les formules suivantes :

❖ Déficit années humides – années sèches :

$$DHS = 100 \times \frac{\text{Moyenne humide} - \text{Moyenne sèche}}{\text{Moyenne humide}}$$

❖ Déficit Période totale – années sèches :

$$DTS = 100 \times \frac{\text{Moyenne totale} - \text{Moyenne sèche}}{\text{Moyenne totale}}$$

Le calcul a été fait pour toutes les stations retenues dans l'étude, ainsi que pour la moyenne pluviométrique sur le bassin.

Les résultats de ces calculs sont regroupés dans le tableau III.1.

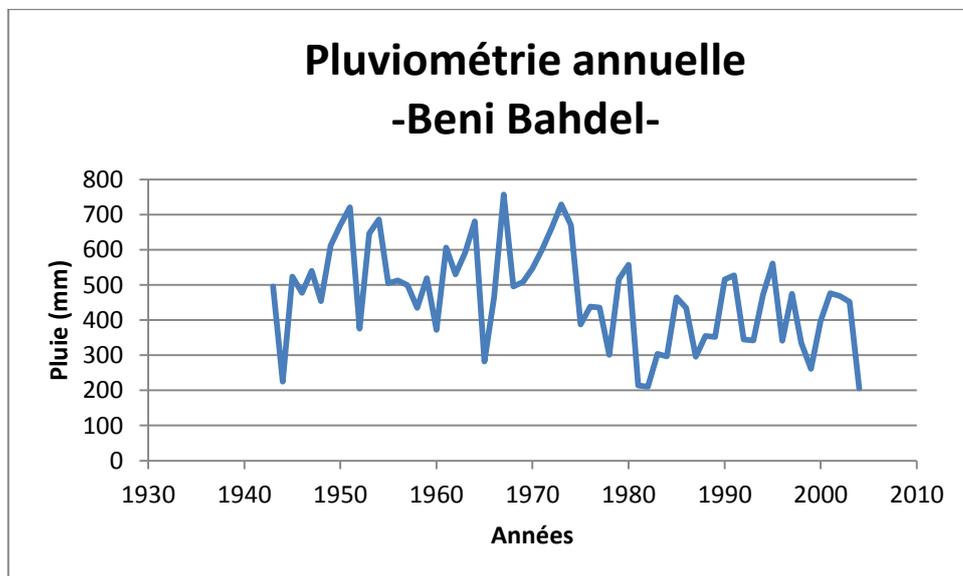


Figure III. 1. Moyenne annuelle des précipitations de la station Beni Bahdel.

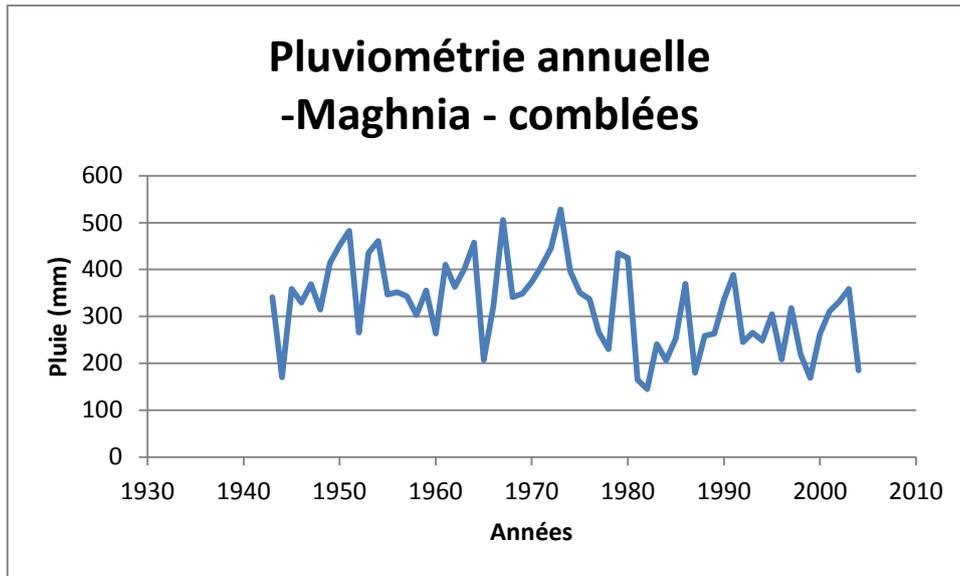


Figure III. 2. Moyenne annuelle des précipitations de la station Maghnia.

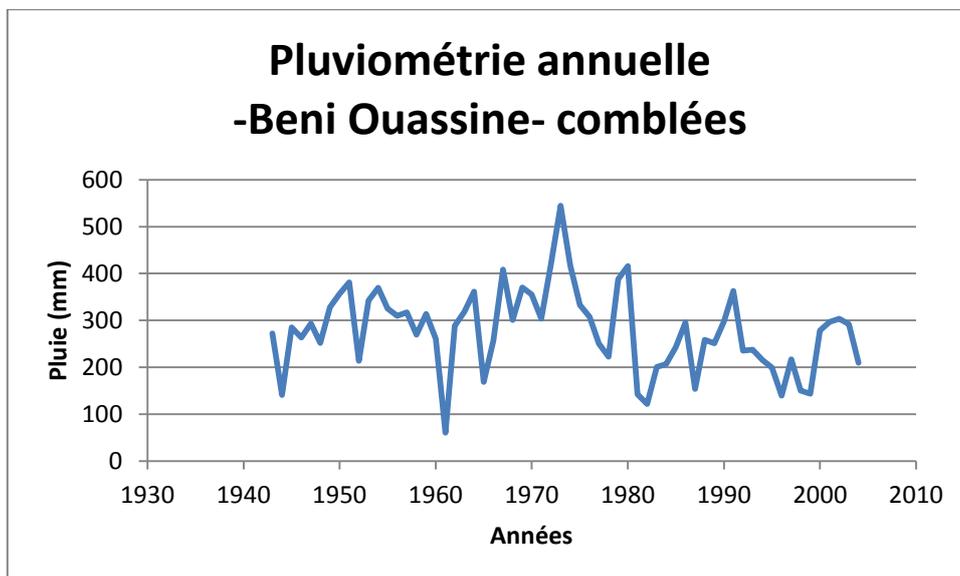


Figure III. 3. Moyenne annuelle des précipitations de la station Beni Ouassine.

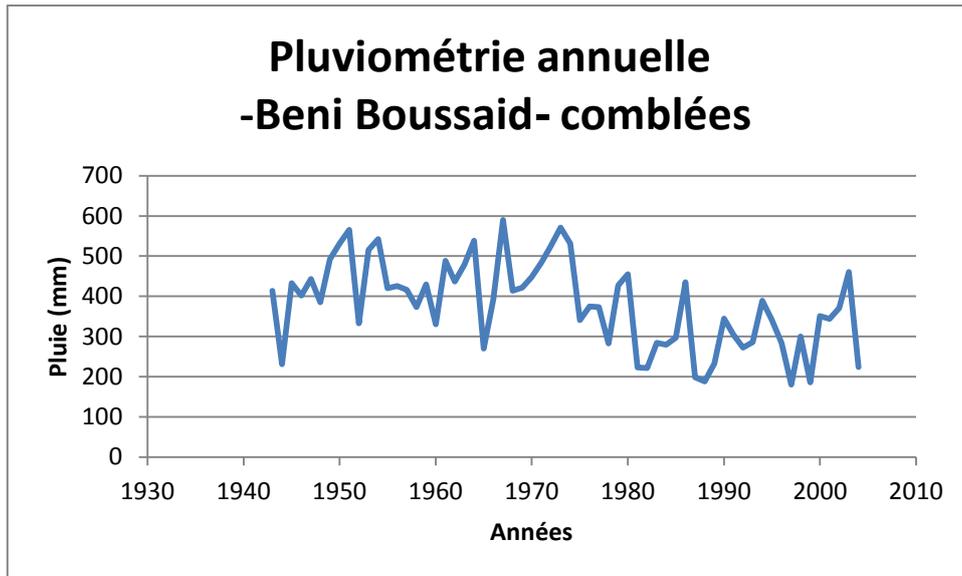


Figure III. 4. Moyenne annuelle des précipitations de la station Beni Boussaid.

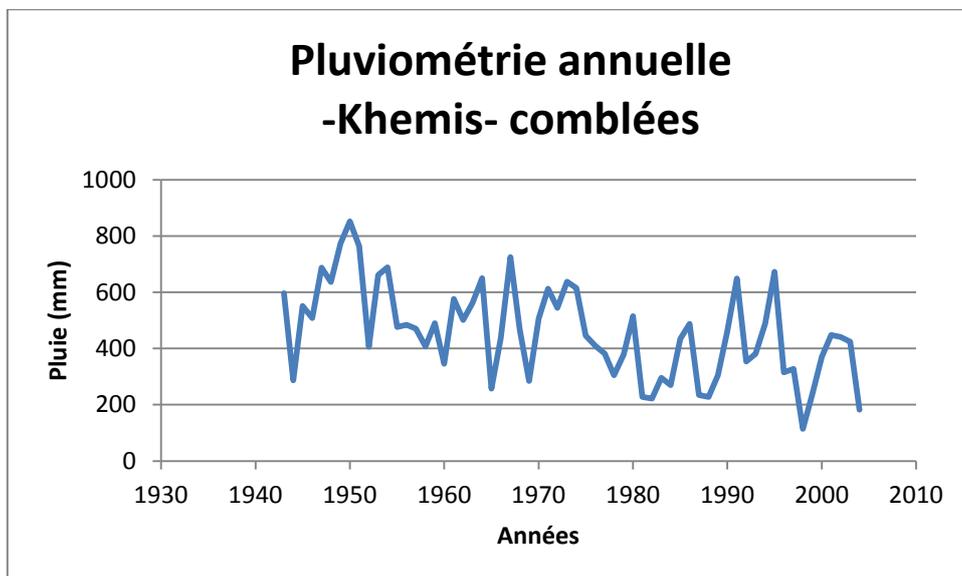


Figure III. 5. Moyenne annuelle des précipitations de la station Khemis.

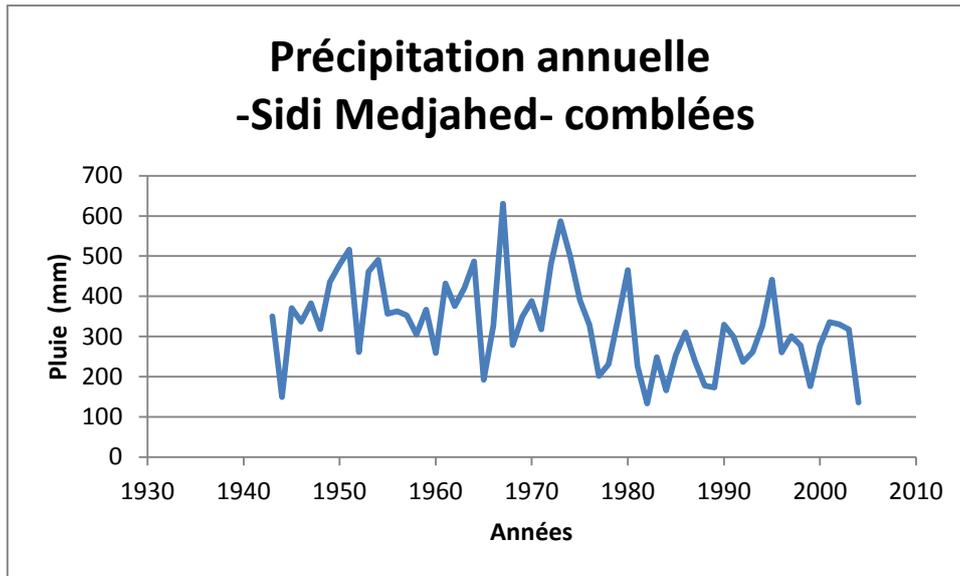


Figure III. 6. Moyenne annuelle des précipitations de la station Sidi Medjahed.

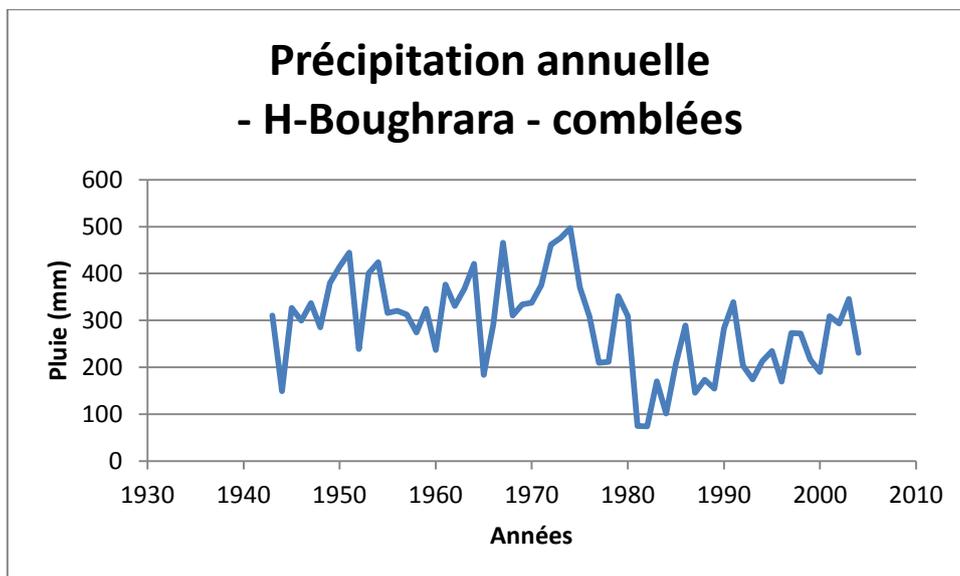


Figure III. 7. Moyenne annuelle des précipitations de la station H.Boughrara.

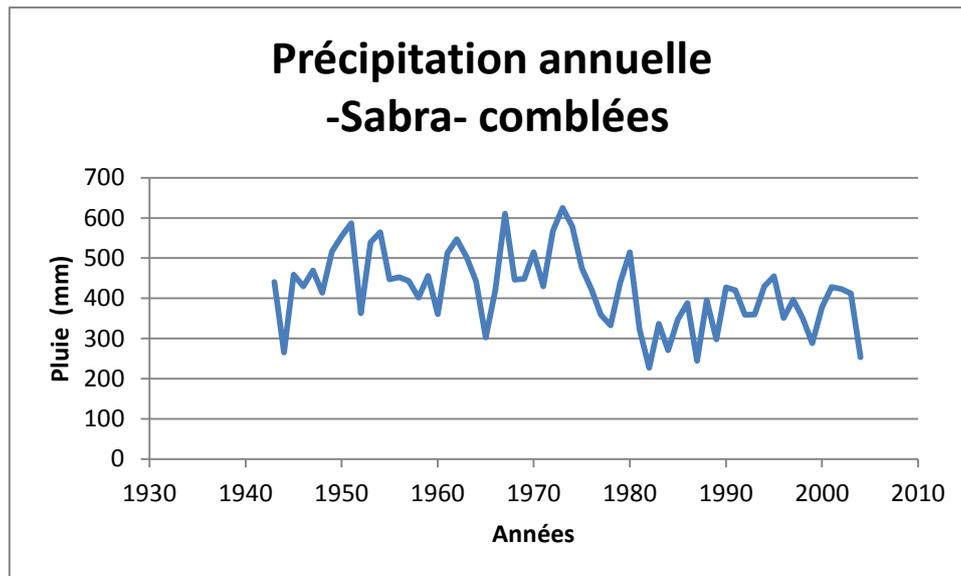


Figure III. 8. Moyenne annuelle des précipitations de la station Sabra.

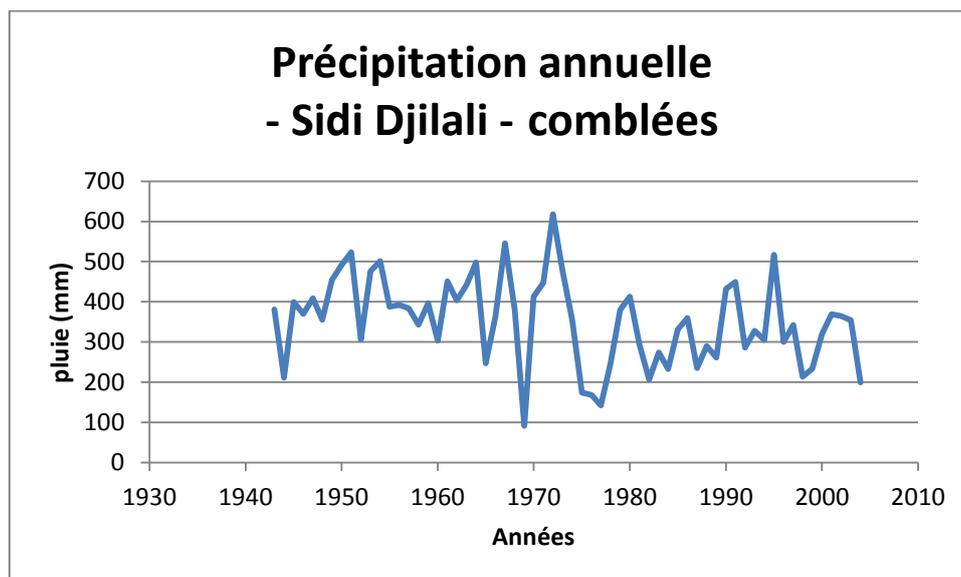


Figure III. 9. Moyenne annuelle des précipitations de la station Sidi Djilali.

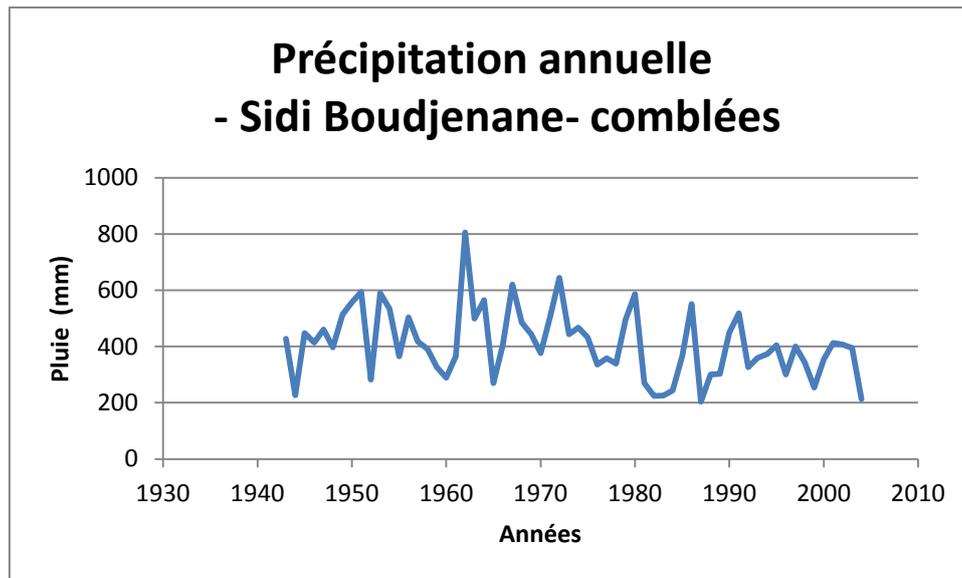


Figure III. 10. Moyenne annuelle des précipitations de la station Sidi Boudjenane.

III. 4. Evaluation de la pluie moyenne tombée

III. 4. 1. Méthode de la moyenne arithmétique

Cette méthode considère la hauteur moyenne des précipitations sur le bassin comme étant la moyenne arithmétique des précipitations enregistrées dans les différentes stations pluviométriques du bassin.

La formule est la suivante :

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

P_{moy} : représente la moyenne interannuelle du bassin;

P_i : est la moyenne pluviométrique interannuelle de la station i ;

N : le nombre total des stations du bassin.

L'inconvénient de cette méthode se situe au niveau de la répartition spatiale des stations et leurs durées de fonctionnement. En effet, si cette répartition ne couvre pas le bassin d'une manière homogène où si les périodes de fonctionnement sont différentes, la valeur trouvée risque de ne pas être représentative. En d'autre termes, les stations ont le même poids dans le calcul de la moyenne pluviométrique

quelques soient leurs positions géographiques à l'intérieur du bassin et leur durées de fonctionnement.

Tout en ne préjugant pas de la valeur à trouver par cette méthode, l'examen graphique de la répartition spatiale des stations au sein et autour du bassin versant du barrage Hammam Bouhrara montre que ce dernier est plus ou moins bien encadré dans la partie se trouvant en territoire Algérienne. Pour la partie se trouvant en territoire Marocain, nous ne disposons pas d'information.

Les valeurs trouvées par cette méthode sont regroupées dans le tableau III.1 suivant :

III. 4. 2. Méthode de Thiessen

La méthode des polygones de Thiessen permet d'évaluer la hauteur moyenne des précipitations sur un bassin d'après la moyenne pondérée des enregistrements effectués en plusieurs stations. Le facteur de pondération d'une station est la superficie du polygone formé par les médiatrices des segments d'union entre cette station et les stations avoisinantes.

La pluviométrie moyenne interannuelle sur le bassin est donnée par:

$$P_{\text{moy}} = \frac{\sum_{i=1}^N P_i \cdot A_i}{\sum_{i=1}^N A_i}$$

Dans cette formule, P_i et A_i représentent respectivement la pluviométrie moyenne interannuelle de la station i et la surface du polygone d'influence de cette station.

Le calcul a été effectué en utilisant les données corrigées et étendues. Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau suivant:

	Période			Déficit	
	Totale (mm)	Humide (mm)	Sèche (mm)	DHS (%)	DTS (%)
Moyenne	367.90	425.14	306.86	27.82	16.59

Tableau III. 2. Moyennes interannuelles des précipitations du bassin de Hammam Boughrara par la méthode de Thiessen.

III. 4. 3. Méthode des éléments finis

L'évaluation de la lame d'eau tombée sur le bassin versant peut être effectuée par la méthode des éléments finis. Cette dernière, est plus élaborée que les méthodes précédentes mais plus difficile à utiliser d'où la nécessité de l'outil informatique.

La méthode repose sur la discrétisation du bassin en quadrilatères ou en toute autre forme géométrique facilement définissable. Ces quadrilatères forment les éléments avec, à leurs sommets, les stations qui constituent les nœuds.

La méthode développée dans ce travail s'approche de la méthode de Thiessen puisqu'elle consiste à estimer les précipitations par éléments, l'assemblage permet d'obtenir les précipitations moyennes sur le bassin en totalité.

En discrétisant le bassin en éléments dont les nœuds (sommets) sont les stations, une matrice de $2N \times M$ sera constituée où N est le nombre de nœuds par éléments et M le nombre d'éléments. Les éléments de cette matrice sont les coordonnées des nœuds dans un repère fixe choisi arbitrairement. Cette matrice aura donc autant de ligne que d'éléments.

Une ligne de cette matrice est formée comme indiquée ci-dessous:

$$[E] = [X_i \ X_j \ X_k \ X_l \ Y_i \ Y_j \ Y_k \ Y_l]$$

Les X et Y représentent respectivement l'abscisse et l'ordonnée des différents nœuds dans le repère choisi. Les indices i, j, k, l représentent les numéros des nœuds.

Dans tous les cas traités, les éléments étaient des quadrilatères. La figure suivante représente le maillage utilisé.

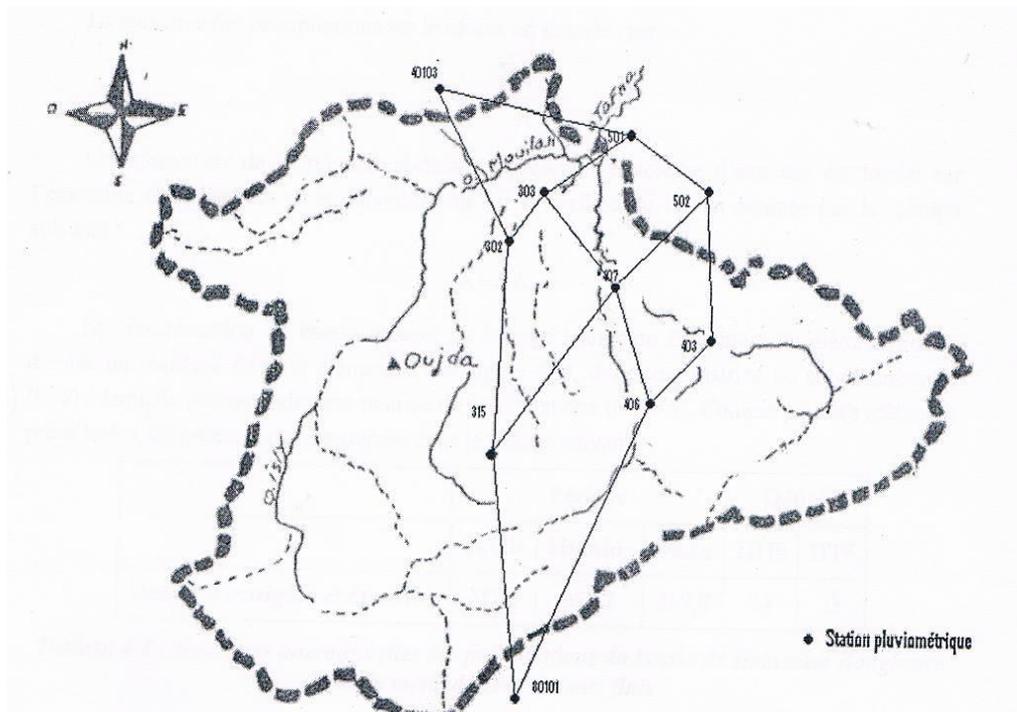


Figure III. 11. Maillage du bassin pour la méthode des éléments finis.

A la matrice de coordonnées correspondra la matrice de pluviométrie NxM où maintenant les éléments sont les précipitations moyennes aux différents nœuds. Une ligne de cette matrice sera forme de la manière suivante:

$$[P] = [P_i \ P_j \ P_k \ P_l]$$

La pluviométrie moyenne sur un élément est donnée par:

$$P_m^E = [A_0 \ A_1 \ A_2] \times \begin{bmatrix} P_i + P_j + P_l + P_k \\ -P_i + P_j + P_l - P_k \\ -P_i - P_j + P_l + P_k \end{bmatrix}$$

Les coefficients A_i sont des coefficients d'interpolation qui sont donnés par:

$$A_0 = 1/8[(Y_i - Y_j)(X_k - X_i) - (Y_k - Y_i)(X_l - X_j)]$$

$$A_1 = 1/8[(Y_k - Y_l)(X_j - X_i) - (Y_j - Y_i)(X_k - X_l)]$$

$$A_2 = 1/8[(Y_l - Y_j)(X_k - X_i) - (Y_k - Y_j)(X_l - X_i)]$$

La moyenne des précipitations sur le bassin est donnée par:

$$P_m = \frac{\sum P_m^E}{A}$$

Le numérateur de la relation ci-dessus représente le volume d'eau qui est tombé sur l'ensemble des éléments et le dénominateur est la surface du bassin estimée par la relation suivante:

$$A = 4A_0$$

La discrétisation du bassin versant du barrage Hammam Boughrara en élément finis a donné un maillage de cinq éléments (voir figure III.11), donc une matrice de coordonnées de (8x5) à laquelle correspondra une matrice de précipitations de (4x5). Comme pour les méthodes précédentes, les valeurs sont regroupées dans le tableau suivant:

	Période			Déficit	
	Totale (mm)	Humide (mm)	Sèche (mm)	DHS (%)	DTS (%)
Données corrigées et étendues	361.5	420.7	298.4	29.07	17.45

Tableau III. 3. Moyennes interannuelles des précipitations du bassin de Hammam Bouhrara par la méthode des éléments finis.

III. 5. Interprétation des résultats

Les valeurs obtenues par les différentes méthodes sont regroupées dans le tableau suivant. On peut remarquer qu'il n'y a pas de différences notables dans les valeurs obtenus. On remarque surtout que la méthode des éléments finis donne des valeurs légèrement inférieures par rapport aux deux autres méthodes.

On notera aussi que le déficit entre la période humide et la période sèche tourne autour de 27% alors que le déficit entre la période totale et la période sèche tourne autour de 16%.

Méthodes	Totale (mm)	Humide (mm)	Sèche (mm)	DHS (%)	DTS (%)
Moyenne Arithmétique	371,5	427,3	311,9	26,81	15,98
Thiessen	367,9	425,14	306,86	27,82	16,59
Elément finis	361,5	420,7	298,4	29,07	17,45

Tableau III. 4. Comparaison des moyennes interannuelles des précipitations par méthodes – valeurs corrigées et étendues –

III. 6. Calcul de la pluie moyenne tombée sur le bassin versant année par année

Dans ce qui a précédé nous avons calculé la moyenne interannuelle des précipitations pour différentes périodes par trois méthodes différentes. Dans un deuxième temps et pour la suite de l'étude nous avons calculé la pluie moyenne tombée sur le bassin pour chaque année depuis 1943/1944 jusqu'à 2004/2005. Nous avons choisi de faire le calcul par la méthode des éléments finis car nous pensons que cette méthode présente un risque d'erreur moindre que les deux autres utilisés, elle présente l'avantage d'être indépendante de l'effet d'échelle et des choix de l'utilisateur.

La méthode nécessite l'introduction pour chaque année d'une matrice de précipitation différente; c'est pourquoi nous avons programmé la méthode sur Excel pour faire le calcul de la moyenne des précipitations pour les soixante années d'étude.

La série de précipitation issue de ce calcul est utilisée pour traiter le volet concernant la variation climatique dans le chapitre suivant.

IV. 1. Introduction

Dans la plus grande partie de l'Afrique, la sécheresse est la calamité climatique la plus fréquente. L'Algérie et surtout l'Ouest, a connu plusieurs grandes sécheresses durant ce siècle, les années 40 et les années 80 jusqu'à nos jours. La plus récente a été caractérisée par son ampleur spatiale, son intensité et par son impact majeur et sensible qui est la diminution des ressources en eau.

Etudier l'impact négatif de la sécheresse sur les ressources en eau est devenue un impératif de plus en plus pressant en Algérie

Cette partie a comme objectif de déterminer comment se manifeste la sécheresse selon son intensité, sa durée et sa situation chronologique. Dans cette optique, nous proposerons de faire l'étude des données pluviométriques et hydrologiques observées au niveau de bassin versant de Barrage Hammam Boughrara, afin de dégager les caractéristiques de la sécheresse et d'étudier les conséquences de la réduction des précipitations sur les potentialités en eau. [9]

Cette partie sera donc consacrée à l'étude de la variabilité climatique qu'a subit la région Ouest de l'Algérie à travers l'analyse de quelques stations pluviométriques du bassin du barrage Hammam Boughrara. Il sera question d'appliquer quelques méthodes simples qui permettent de déceler l'existence et la persistance des périodes de déficit pluviométrique, c'est-à-dire des périodes sèches.

IV. 2. Caractérisation de la sécheresse

IV. 2. 1. Généralités

Plusieurs auteurs se sont penchés sur l'étude des ruptures dans les séries hydrologiques, que ça soit la pluviométrie ou les débits. Pour notre part, on utilisera uniquement les séries pluviométriques car nous ne disposons pas de série de débits assez longue qui permettrait de caractériser le bassin pris comme objet de l'étude. Pour les séries pluviométriques, nous utiliserons principalement la série pluviométrique de la station du barrage Hammam Boughrara, la station du barrage Béni Bahdel et la série de la pluie

moyenne calculée sur le bassin du barrage Hammam Bouhrara. Cette moyenne est calculée par la méthode des éléments finis.

IV. 2. 2. Indice de l'écart à la moyenne (Em)

C'est l'indice le plus utilisé pour estimer le déficit pluviométrique à l'échelle de l'année. L'écart à la médiane est le plus utilisé par les agrométéorologues. Bien évidemment, quand l'échantillon de données est dissymétrique, la différence entre la moyenne et la médiane est grande. L'écart à la moyenne est la différence entre la hauteur de précipitation annuelle (P_i) et la hauteur moyenne annuelle de précipitation (P_m).

$$E_m = P_i - P_m$$

L'écart est positif pour les années humides et négatives pour les années sèches. On parlera respectivement d'années excédentaires et d'années déficitaires. Les figures ci-dessous représentent l'écart à la moyenne des stations du barrage Hammam Bouhrara, de la station du Béni Bahdel et de la moyenne du bassin [5].

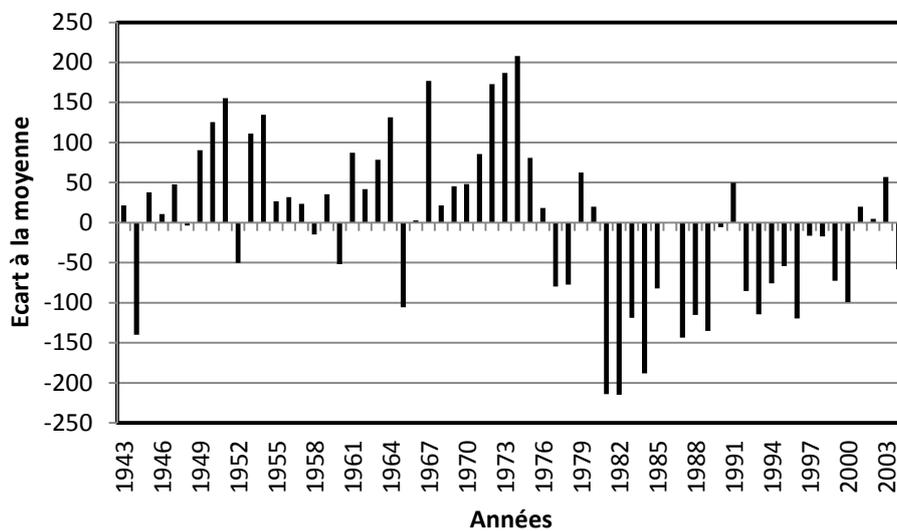


Figure IV. 1. Écarts par rapport à la moyenne station H.Bouhrara.

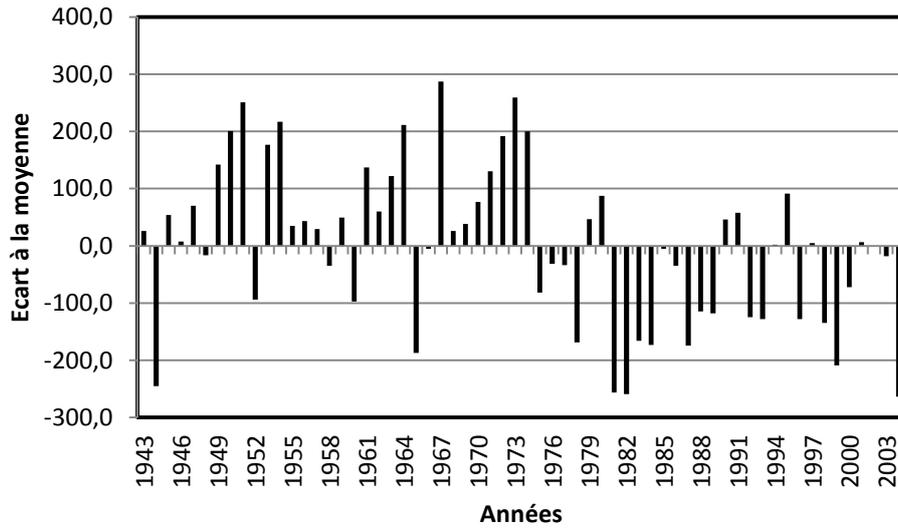


Figure IV. 2. Écarts par rapport à la moyenne de la station Beni Bahdel.

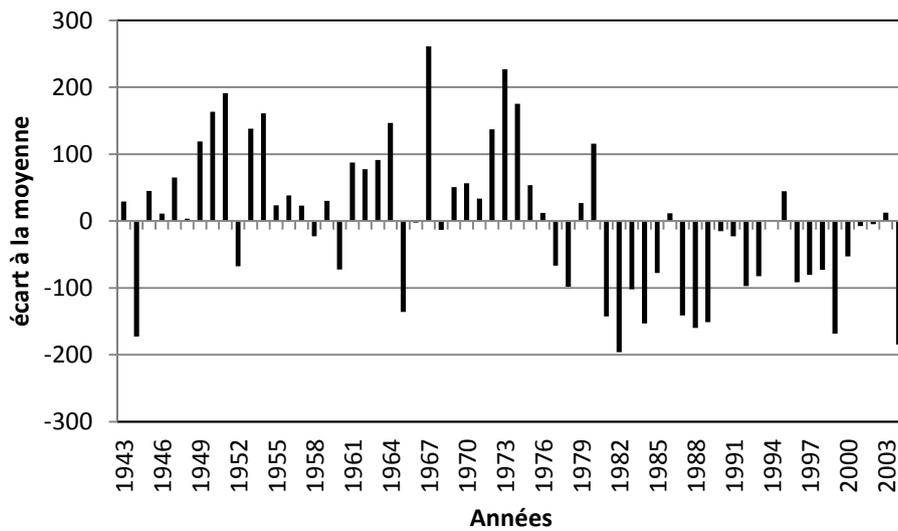


Figure IV. 3. Écarts par rapport à la moyenne du bassin versant du Barrage Hammam Boughrara.

IV. 2. 3. Indice de pluviosité (Ip)

C'est le rapport de la hauteur de précipitation annuelle à la hauteur moyenne annuelle des précipitations. Il s'écrit :

$$I_p = P_i / P_m$$

Une année est qualifiée d'humide si ce rapport est supérieur à 1 et de sèche s'il est inférieur à 1 [5]. Pour situer une pluviométrie dans une longue série de relevés pluviométriques, on utilise de préférence l'écart proportionnel à la moyenne (I_{pm}) qui diffère de la pluviosité en soustrayant 1 à cet indice. Cet écart s'écrit :

$$I_{pm} = I_p - 1$$

Le cumul des indices d'années successives permet de dégager les grandes tendances en faisant abstraction des faibles fluctuations d'une année à l'autre. Quand la somme des indices croît, il s'agit d'une tendance humide. La tendance est de type « sèche », dans le cas contraire.

Les figures ci-dessous représentent l'écart proportionnel à la moyenne pour les trois stations utilisées pour illustrer cette étude.

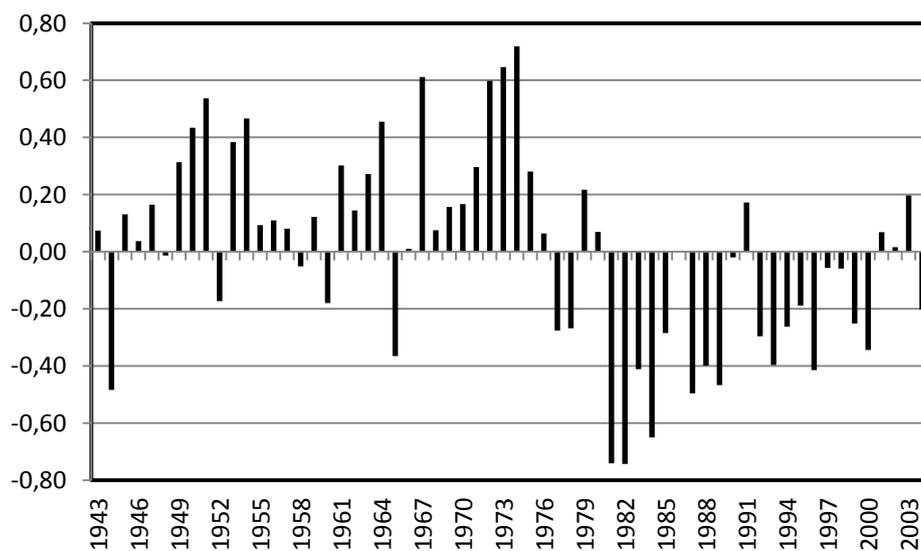


Figure IV. 4. L'écart proportionnel à la moyenne de la station Hammam Boughrara.

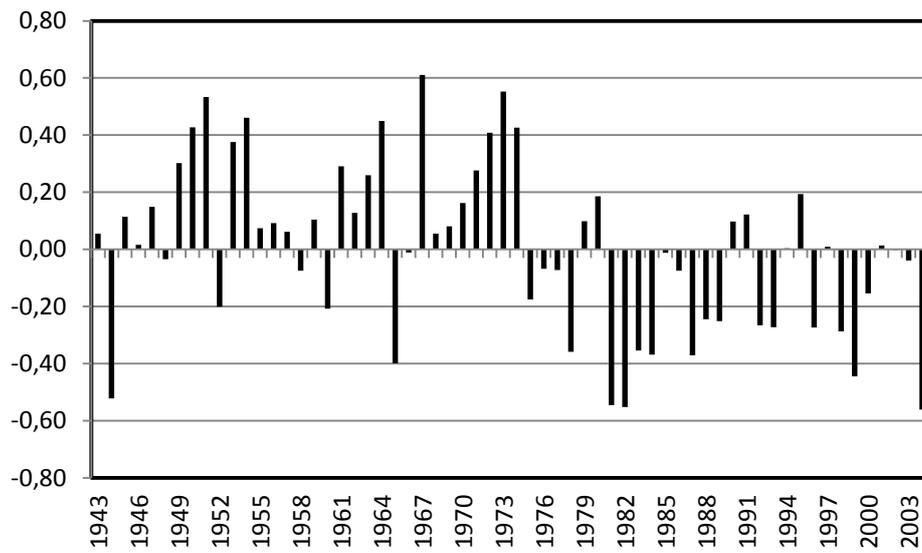


Figure IV. 5. L'écart proportionnel à la moyenne de la station Béni Bahdel.

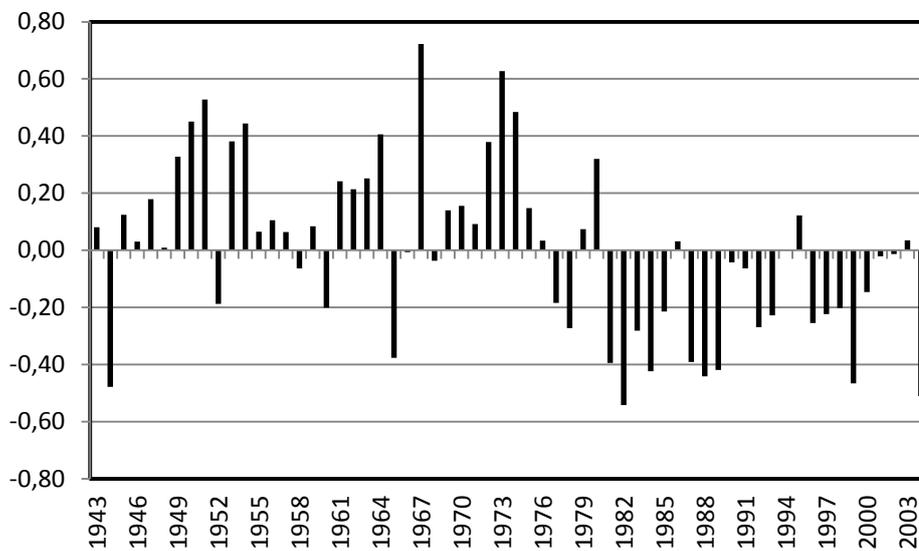


Figure IV. 6. L'écart proportionnel à la moyenne du bassin du barrage Hammam Boughrara.

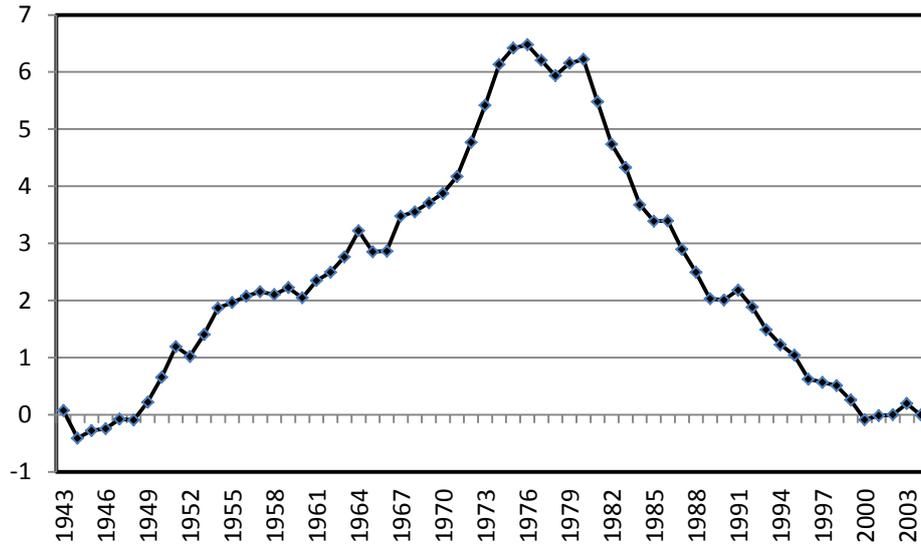


Figure IV. 7. Le cumul des écarts proportionnels à la moyenne de la station Hammam Boughrara.

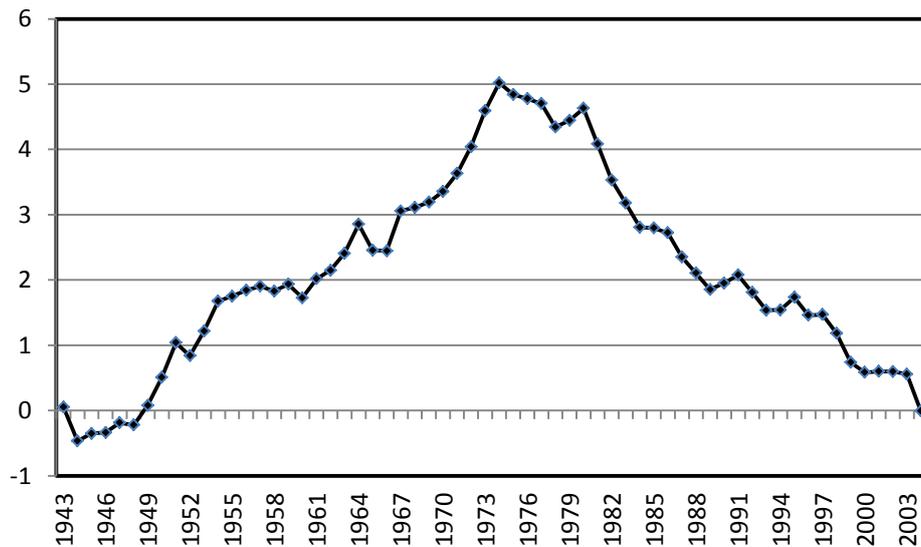


Figure IV. 8. Le cumul des écarts proportionnels à la moyenne de la station Béni Bahdel.

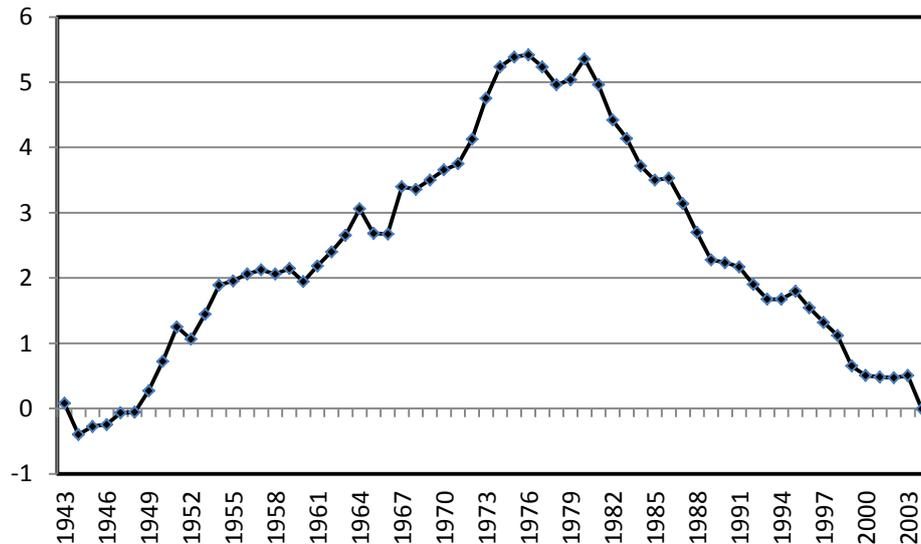


Figure IV. 9. Le cumul des écarts proportionnels à la moyenne du bassin du barrage Hammam Boughrara.

IV. 2. 4. La moyenne mobile

Une méthode qui permet de détecter la tendance dans une série temporelle est le calcul de la moyenne mobile. La durée à prendre en compte est variable et il n'y a pas de critère évident. Dans la bibliographie, on rencontre des moyennes centrées sur cinq ans ou sur trois ans. Dans notre cas, on utilisera la moyenne définie par Manning qui s'écrit :

$$M_i = 0,25P_{i-1} + 0,5P_i + 0,25P_{i+1}$$

Avec :

M_i : La moyenne mobile de l'année concernée;

P_{i-1} : la pluie moyenne de l'année précédente;

P_i : la pluie moyenne de l'année concerner;

P_{i+1} : la pluie moyenne de l'année arrivée.

Les figures suivantes donnent les moyennes mobiles de trois séries prises pour illustrer nos résultats. Il faut noter que, pour faciliter les comparaisons avec les autres résultats, les moyennes mobiles représentées ci-dessous sont des « écarts proportionnels à la moyenne » de la série en question.

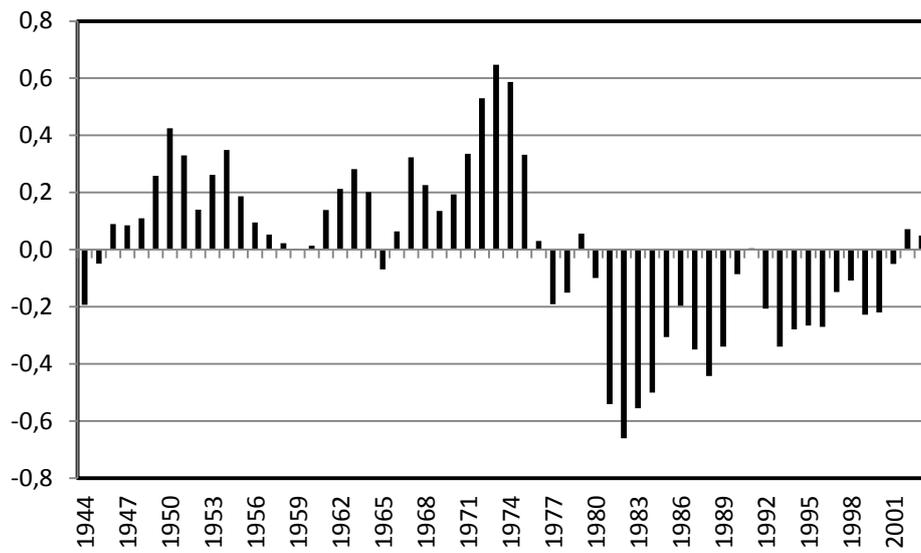


Figure IV. 10. Moyenne mobile de la station Hammam Bougrara.

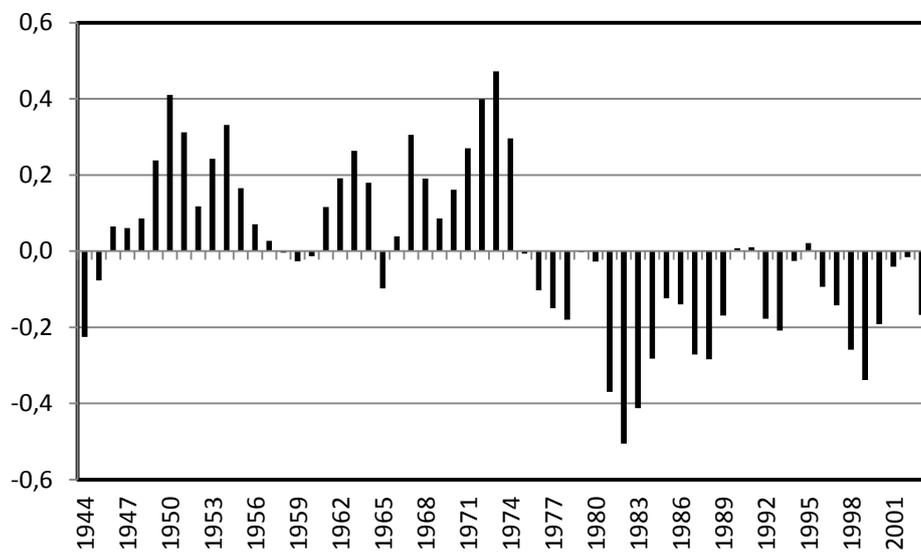


Figure IV. 11. Moyenne mobile de la station Béni Bahdel.

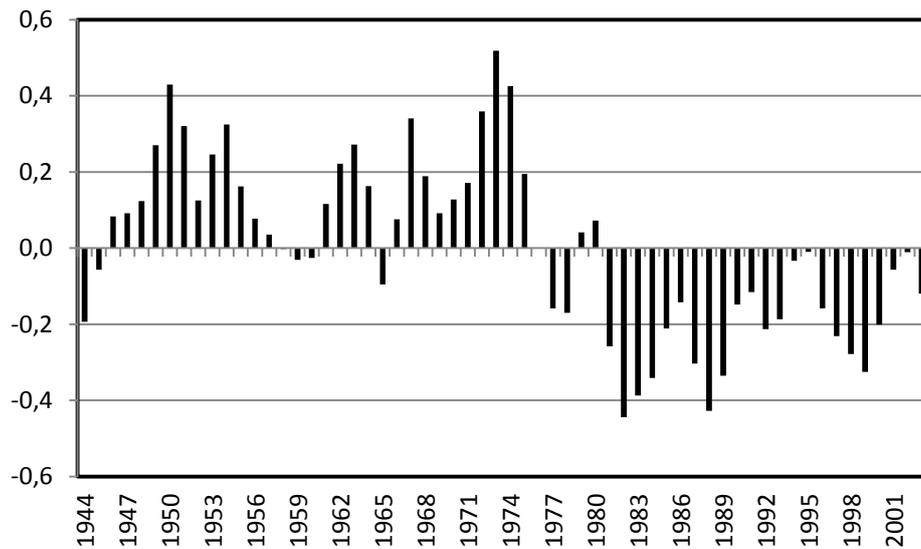


Figure IV. 12. Moyenne mobile du bassin du barrage Hammam Boughrara.

IV. 2. 5. Analyse fréquentielle

Parmi les méthodes que nous avons recensé et qui sont faciles d'application, il y'a la méthode de l'analyse fréquentielle. Cette dernière consiste à classer la série pluviométrique en ordre croissant puis la diviser en un certain nombre de classes. Nous utilisons la méthode des quintiles (il y'a la méthode des terciles et la méthode des déciles) qui consiste à diviser la série en cinq classes. La classe médiane est censée représentée la normalité du bassin, les deux classes de part et d'autres représentent les périodes humides et très humides et les périodes sèches et très sèches [5].

Les résultats de l'application de cette méthode aux enregistrements des trois stations sont donnés ci-après. Pour faciliter la lecture des figures, nous avons affecté le coefficient 3 aux pluies censées représentées la pluie normale des stations, 2 aux années sèches, 1 aux années très sèches, 4 aux années humides et 5 aux années très humides (Ordre des classes).

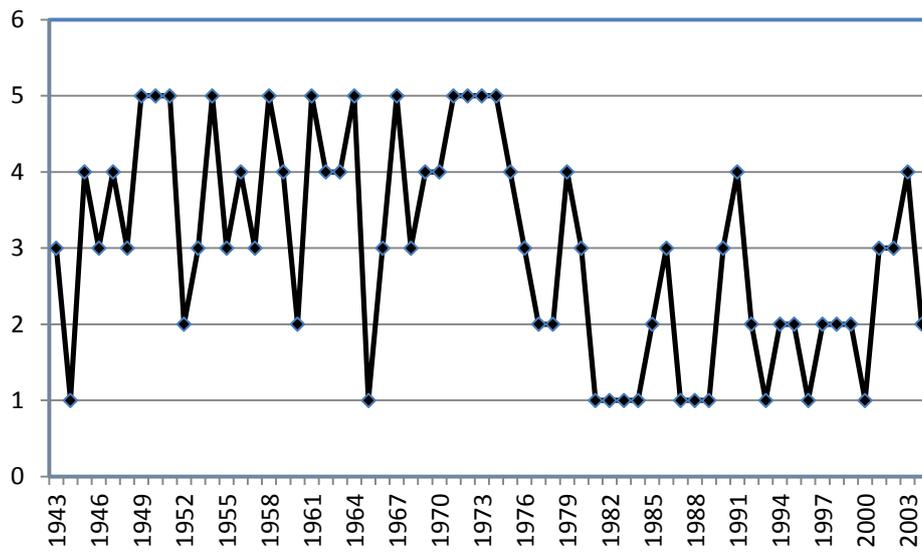


Figure IV. 13. Analyse fréquentielle appliquée à la station Hammam Bouhrara.

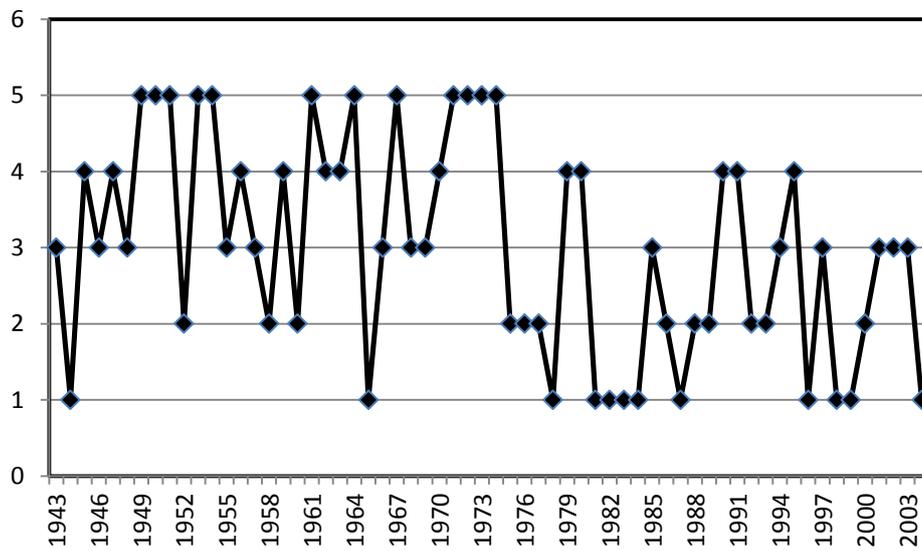


Figure IV. 14. Analyse fréquentielle appliquée à la station Béni Bahdel.

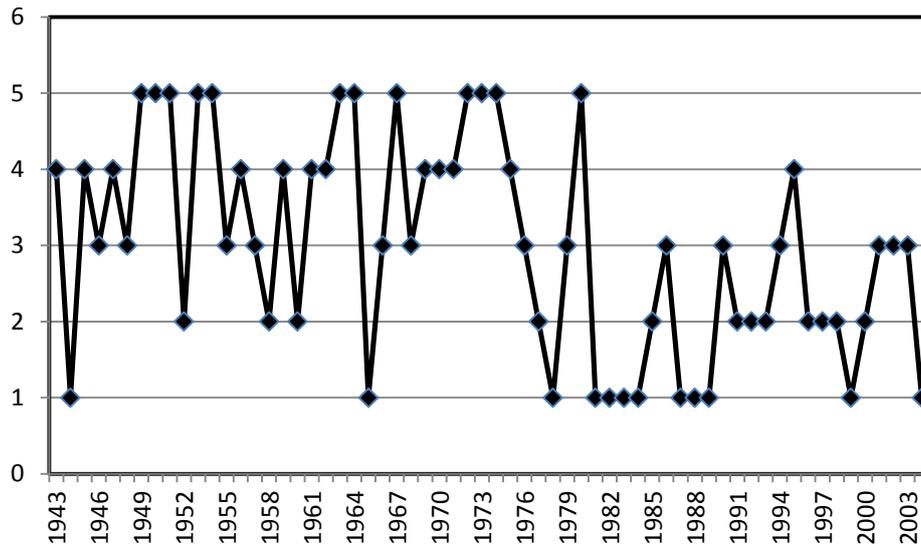


Figure IV. 15. Analyse fréquentielle appliquée à la pluie moyenne du bassin versant du barrage Hammam Bouhrara.

IV. 2. 6. L'Indice standard des précipitations

L'indice standard des précipitations IPS est calculé de la manière suivante:

$$IPS = \frac{P_i - P_m}{\sigma}$$

P_i , P_m et σ représentent respectivement la pluie de l'année i , la moyenne interannuelle de la série et l'écart type. En fait, cet indice consiste à diviser la série en 9 classes comme indiqué sur le tableau ci-dessous:

Valeurs du IPS		Degré d'humidité ou de sécheresse
	≥ 2	Humidité extrême
1,5	à 1,99	Humidité forte
1	à 1,49	Humidité modérée
0	à 0,99	Humidité légère
0		Humidité normale
0	-0,99	Sécheresse légère
-1	à -1,49	Sécheresse modérée
-1,5	à -1,99	Sécheresse forte
-2	\leq	Sécheresse extrême

Tableau IV. 1. Valeurs de l'indice standard des précipitations et degré de sécheresse ou d'humidité.

Cet indice est semblable à l'analyse fréquentielle que nous avons effectuée, seul le nombre de classe et les qualificatifs utilisés pour caractériser le degré d'humidité ou de sécheresse changent. En effet, au lieu de cinq classes de notre analyse fréquentielle, il y'a ici neuf classes.

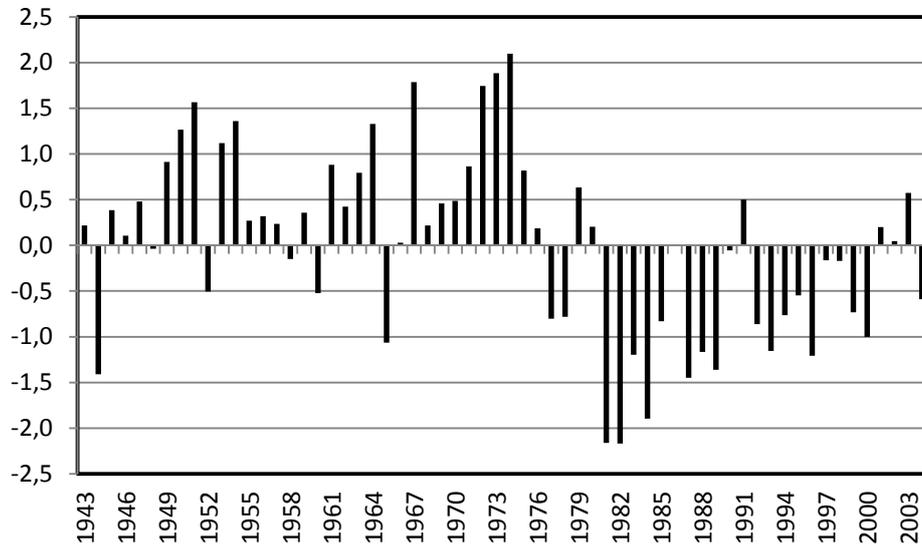


Figure IV. 16. Indice standard des précipitations de la station Hammam Bouhrara.

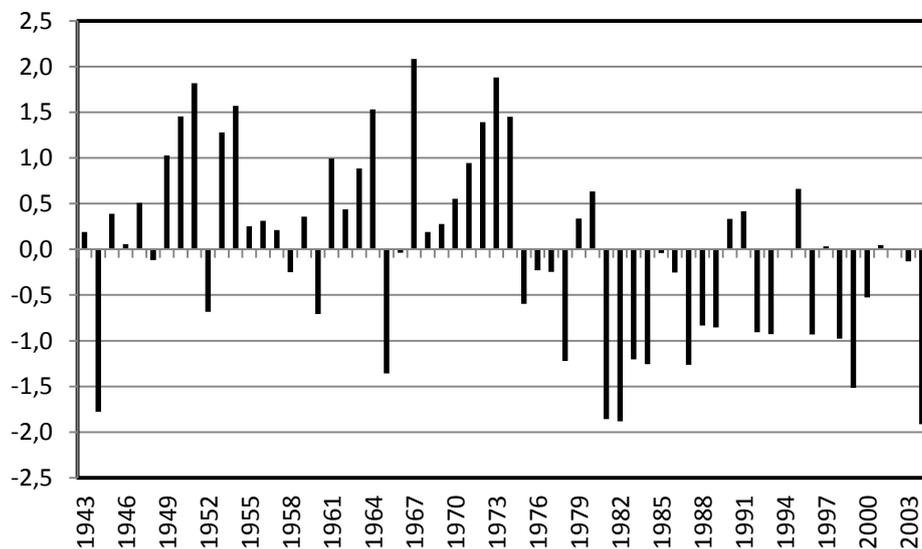


Figure IV. 17. Indice standard des précipitations de la station Béni Bahdel.

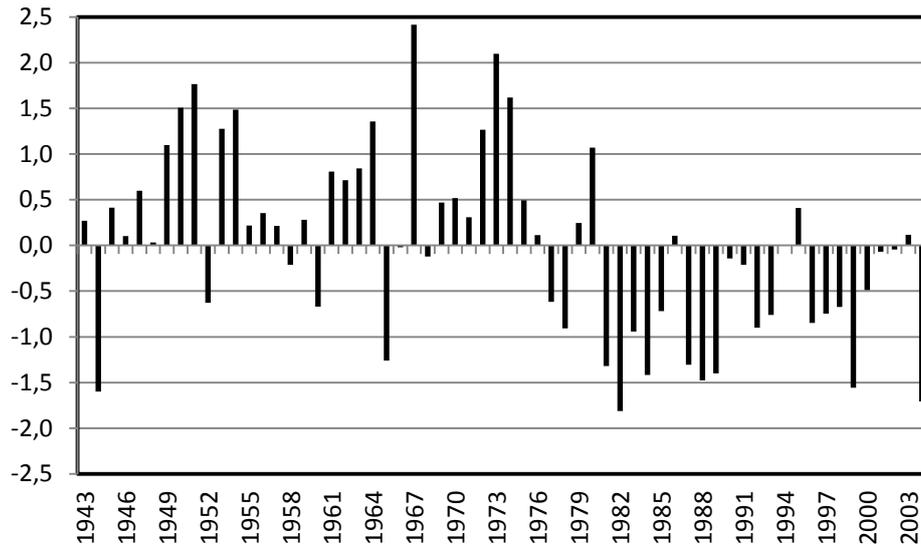


Figure IV. 18. Indice standard des précipitations du bassin du barrage Hammam Boughrara.

IV. 3. Interprétation des résultats

Dans ce chapitre, nous nous sommes concentrés sur l'application de méthodes simples qui ne demandent pas d'outils complexes (théoriques ou matérielles) et qui permettent de mettre en évidence l'existence et/ou la persistance des sécheresses dans un bassin versant, ceci en utilisant comme matériel les séries hydrologiques (pluviométriques).

Concernant les moyens utilisés pour caractériser la sécheresse du bassin versant du barrage Hammam Boughrara, nous pouvons dire :

- L'écart à la moyenne, l'indice de pluviosité et l'écart proportionnel à la moyenne fournissent les mêmes indications, seule l'échelle de représentation change. En effet, ces trois paramètres caractérisent le degré de diminution ou d'augmentation de la pluie en une année donnée par rapport à la moyenne interannuelle.
- Par contre, le cumul des écarts proportionnels à la moyenne et la moyenne mobile fournissent la (ou les) tendances de la série. Le cumul des écarts fournit une meilleure indication sur l'évolution générale de la série. Par contre, la moyenne mobile doit rester un outil qualitatif car elle possède deux inconvénients principaux : quel est le nombre d'année à prendre en compte et quel type de pondération introduire dans le calcul de cette moyenne. Il faut savoir que la technique de la moyenne mobile est une technique de lissage, si on augmente le nombre d'année, on fait disparaître les cycles.

- Pour l'analyse fréquentielle, elle n'est valable que si la série de données disponibles est assez longues pour que cette dernière puisse être considérée comme représentative du comportement hydrologique du bassin. Cette présente aussi plusieurs variantes, terciles (on divise la série en trois : Humide, normale et sèche), quintile (on divise la série en cinq comme notre cas), déciles (on divise la série en dix), etc. Quelle est la division la plus adéquate ? L'indice standard des précipitations peut être considéré comme une variante de cette méthode.

Concernant la variabilité climatique du bassin versant du barrage Hama Boughrara et ceci sur la base des résultats des différentes méthodes, on peut affirmer que :

- Le bassin connaît a connu plusieurs périodes de sécheresse (ou de déficit pluviométrique) mais c'est le déficit qui durent depuis les années 1974/1975 qui est le plus long et le plus sévère.
- La date du début de la sécheresse semble coïncider avec l'année 1974/1975. Cette remarque est appuyée par l'ensemble des résultats et particulièrement par la courbe des cumuls des écarts proportionnels à la moyenne.
- Le calcul de la moyenne interannuelle des années sèches et des années humides donnent un déficit global de l'ordre de 25%.
- Parmi l'ensemble des méthodes, celle des quintiles fait coïncider le début de la période sèche vers les années 1978/1979.
- La comparaison des pronostics donnés par la méthode des quintiles sur la persistance de la sécheresse entre les différentes stations montre que généralement c'est les mêmes qualificatifs se retrouvent en fonction des années. Ceci prouve d'abord que les séries pluviométriques caractérisent plus ou moins le bassin. Cette coïncidence peut aussi avoir comme origine le fait que c'est la station Béni Bahdel qui a été utilisée pour combler les données manquantes des différentes stations.
- Enfin, nous remarquons que les précipitations moyennes tombées (calculées par la méthode des éléments finis) sur le bassin du barrage sont supérieur à ceux enregistrées par la station installée sur le site du barrage. Ceci provient du fait que le bassin est plus arrosé dans sa partie Sud que sur le site du barrage lui-même.

Station Corrélée		code	Droite de régression	Coefficient de corrélation	Nombre d'années d'observation	Nombre d'années comblées
1	Maghnia	160 302	$Y = 0,630x + 28,70$	$R = 0,887$	32	30
2	Sidi Medjahed	160 407	$Y = 0,740x - 16,90$	$R = 0,877$	32	30
3	Sabra	160 502	$Y = 0,652x + 118,9$	$R = 0,889$	31	31
4	H.Bouhrara	160 501	$Y = 0,595x + 15,53$	$R = 0,849$	36	26
5	Khemis	160 406	$Y = 0,986x - 21,40$	$R = 0,884$	41	21
6	Beni Ouassine	160 303	$Y = 0,4851x + 31,53$	$R = 0,869$	47	15
7	Beni Boussaid	160 315	$Y = 0,6749x + 79,166$	$R = 0,846$	20	42
8	Sidi Boudjenane	40103	$Y = 0,7404x + 60,766$	$R = 0,845$	42	20
9	Sidi Djilali	80101	$Y = 0,633x + 69,22$	$R = 0,835$	28	34

Tableau II. 4. Equations des régressions linéaires, coefficient de corrélation des différentes stations.

Conclusion générale

A travers ce mémoire de fin de cycle, nous nous sommes intéressés à l'analyse de la variabilité climatique à travers les séries hydrologiques. Nous nous sommes limités aux séries pluviométriques faute de séries de débits. L'analyse de la variabilité a été traitée uniquement sous l'effet temporel. Ainsi, la problématique développée posait la question : est-ce que les précipitations dans la région Nord-Ouest du pays ont diminué ou pas ?

Pour cela, nous avons pris comme exemple d'étude le bassin du barrage Hammam Boughrara. Cet exemple a été pris pour compléter le volet « formation » de ce mémoire. Ainsi, huit stations pluviométriques internes au bassin du barrage et deux autres limitrophes ont été sélectionnées. Seule la station Béni Bahdel est continue sur la durée des enregistrements. Le test de Wilcoxon a montré que cette dernière est homogène, ce qui a permis d'homogénéiser les séries des autres stations et en même temps de les étendre. Après ces opérations, l'évaluation de la pluie moyenne tombée sur le bassin a été évaluée par trois méthodes : Moyenne arithmétique, méthode de Thiessen et la méthode des éléments finis. Les résultats se sont avérés très proches. Ce qui a permis de valider les méthodes les unes par rapports aux autres et montrant surtout que les stations encadrent bien le bassin (la zone concernée par l'évaluation). L'étude de la variabilité climatique a été abordée sous le volet temporel, nous avons put montrer que les précipitations ont diminué ces dernières années. Nous avons utilisé des paramètres très simples qui se calculent uniquement à l'aide des séries pluviométriques. Les paramètres que nous avons utilisés peuvent être classés en trois catégories, ceux qui caractérisent le déficit pluviométrique de l'année par rapport à une moyenne. On range dans cette catégorie l'écart à la moyenne, l'indice de pluviosité et l'écart proportionnel. Les paramètres qui donnent la tendance générale, le cumul de l'écart proportionnel à la moyenne et la moyenne mobile rentrent dans cette catégorie. Enfin, les méthodes de l'analyse fréquentielle, qui pour être valables demandent des séries très longues. L'ensemble de ces méthodes ont donné pour les stations analysées deux périodes : une humide et une sèche. La date de début de la période sèche coïncide à peu près vers l'année 1975/1976 selon l'ensemble des méthodes sauf pour les méthodes de l'analyse fréquentielle qui donnent des dates différentes selon les divisions adoptées. Le déficit pluviométrique global tourne autour de 25%.

Résumé

Le manque d'eau qui a sévit dans le bassin versant de la Tafna pendant des années nous incite à analyser la situation dans ce bassin afin de voir les changements qui se sont produits en terme de quantité de pluie qui tombe dans le bassin.

A cet effet, nous avons pris le bassin versant de Hammam Boughrara comme cas d'étude. Dans un premier chapitre, on donne une présentation du bassin versant, on présente ensuite dans le deuxième chapitre les stations retenues pour l'étude, l'analyse et le traitement des données pluviométriques.

Le troisième chapitre comporte une évaluation de la pluie moyenne interannuelle dans le bassin réalisée avec trois méthodes différentes (moyenne arithmétique, méthode de Thiessen et méthode des éléments finis). Dans ce chapitre, une évaluation de la pluie moyenne année par année du bassin a aussi été faite pour la période d'étude (1943 /1944 à 2004/2005), ceci par la méthode des éléments finis.

Dans le quatrième chapitre, une étude de la variabilité climatique avec des méthodes simples est effectuée, ceci en se basant sur les résultats du chapitre précédent.

Dans la conclusion générale, on met en relief à travers les séries pluviométriques que le bassin subit une période de sécheresse depuis les années 1974/1975.

Mots clés: Variabilité climatique, série pluviométrique, Hammam Boughrara, sécheresse.

Summary

The water lake that has plagued the TAFNA watershed for years incites us to analyze its situation in order to notice the changes that have occurred in terms of rain amount that fall in the watershed.

For this purpose we took the HAMMAM BOUGHRARA watershed as a case study. In the first chapter, we give an overview of the watershed. The selected stations for the study, analysis and processing of rainfall data is then presented in the second chapter.

The third chapter includes an assessment of inter-average rainfall in the watershed performed using three different methods (mean, THIESSEN method and finite element method). In this chapter, an evaluation of the average rainfall for each year of the watershed has also been performed for the study period (1943/1944 to 2004/2005) using finite element method.

In the fourth chapter, a climate variability study using simple methods is performed based on the results of the previous chapter.

In general conclusion, we highlights throughout the rainfall series that the watershed undergoes a period of drought in the years 1974/1975.

Key word: climate variability, rainfall series, HAMMAM BOUGHRARA, drought.

ملخص

نقص المياه في مستجمعات المياه تافنة لسنوات يقودنا إلى تحليل الوضع في هذا المجال من أجل أن نرى التغييرات التي حدثت من حيث كمية الأمطار التي تسقط في الحوض.

وتحقيقاً لهذه الغاية أخذنا مستجمعات المياه حمام بوغراة كدراسة لهذه حالة. في الفصل الأول أعطينا لمحة عامة عن مستجمعات المياه، ثم عرضنا المحطات المختارة لدراسة وتحليل ومعالجة البيانات هطول الأمطار في الفصل الثاني.

ويشمل الفصل الثالث تقييماً لمتوسط هطول الأمطار في حوض المصنوع بثلاثة طرق مختلفة (طريقة المتوسط الحسابي وطريقة تيسين وطريقة العناصر المحدودة). كما أجرينا تقييم لمعدل هطول الأمطار عن كل سنة من الحوض لفترة الدراسة (1943/1944 -

2004/2005)، وهذا بواسطة طريقة العناصر المحدودة

أما في الفصل الرابع، أجرينا دراسة تقلبيه المناخ مع أساليب بسيطة، وهذا استناداً من نتائج الفصل السابق. وفي الاستنتاج العام، لاحظنا أن سلسلة هطول الأمطار على جميع أنحاء حوض تمر بفترة من الجفاف وهذا ابتداء من سنة 1974/1975.

الكلمات المفتاحية: التقلبات المناخية، سلسلة هطول الأمطار، حمام بوغراة، الجفاف.

Table des matières

Liste des Figures	1
Liste des tableaux	3
Introduction générale	5

Chapitre I : Présentation du bassin et leur étude climatique

I. 1. Situation géographique de la zone étudiée	7
I. 2. Présentation du site du bassin versant	9
I. 3. Etude climatique	10
a) Indice de DEMARTONE	12
b) Climagramme de L'EMBERGER	14
c) Conclusion	14

Chapitre II : Présentation et analyse des données pluviométriques

II. 1. Introduction	17
II. 2. Présentation et examen des données pluviométriques	17
II. 2. 1. Examen des données pluviométriques	17
II. 2. 2. Choix de la station de référence	19
II. 2. 3. Le test de Wilcoxon	20
II. 3. Homogénéisation des séries et comblement de lacunes	23

II. 3. 1. Généralités	23
II. 3. 2. Comblement de lacunes	23
II. 3. 2. 1. Nature des lacunes.....	23
A. Le comblement de lacunes ponctuelles mensuelles.....	24
B. Le comblement de lacunes ponctuelles annuelles.....	24
C. Le comblement des lacunes longues.....	25
II. 3. 2. 2. Comblement de lacunes ponctuelles.....	25
II. 3. 2. 3. Comblement de lacunes longues.....	25
II. 3. 2. 4. Méthode du double cumul et homogénéisation des séries	26
II. 4. Extension des séries hydrologiques	35
II. 4. 1. Généralités	35
II. 4. 2. Méthode des régressions linéaires	35
II. 4. 3. Extension des séries hydrologiques	36

Chapitre III : Evaluation de la pluie moyenne tombée

III. 1. Généralités.....	44
III. 2. Méthodes d'évaluation	44
III. 3. Période sèche et période humide.....	44
III. 4. Evaluation de la pluie moyenne tombée.....	50
III. 4. 1. Méthode de la moyenne arithmétique	50
III. 4. 2. Méthode de Thiessen	53
III. 4. 3. Méthode des éléments finis.....	53
III. 5. Interprétation des résultats	56
III. 6. Calcul de la pluie moyenne tombée sur le bassin versant année par année	57

Chapitre IV : Etude de la variabilité climatique

IV. 1. Introduction	59
IV. 2. Caractérisation de la sécheresse	59
IV. 2. 1. Généralités.....	59
IV. 2. 2. Indice de l'écart à la moyenne (Em).....	60
IV. 2. 3. Indice de pluviosité (Ip)	61
IV. 2. 4. La moyenne mobile.....	65
IV. 2. 5. Analyse fréquentielle	67
IV. 2. 6. L'Indice standard des précipitations.....	69
IV. 3. Interprétation des résultats	71
Conclusion générale	74
Références bibliographiques	76

	Nom de la station	Code	Moyenne Totale	Moyenne des années humides	Moyenne des années sèches	Déficit entre années humides et sèches (%)	Déficit entre période totale et années sèches (%)
1	Maghnia	160 302	324,7	370,6	275,7	25,6	15,09
2	Beni Ouassine	160 303	277,9	308,3	245,6	20,33	11,62
3	Beni Boussaid	160 315	379,3	446	308,3	30,87	18,71
4	Beni Bahdel	160 403	469,7	543,5	391,1	28	16,73
5	Khemis	160 406	459,1	545,7	366,7	32,8	20,12
6	Sidi Medjahed	160 407	330,8	384,9	273,0	29	17,47
7	H .Bouhrara	160 501	289	344,4	229,8	33,27	20,48
8	Sabra	160 502	422,9	472,3	370,1	21,63	12,48
9	Sidi Boudjenane	40103	409,3	457,2	358,2	21,65	12,48
10	Sidi Djilali	80101	352,1	400,4	300,5	24,96	14,65
moyenne			371,5	427,3	311,9	27	16

Tableau III. 1. Moyennes interannuelles au niveau du bassin du barrage Hammam Bouhrara – Données corrigées et étendues.

Liste des Tableaux

- Tableau I. 1. Les caractéristiques des bassins versants considérés.
- Tableau I. 2. Les paramètres de courbe hypsométrique du bassin versant du barrage H.Bouhrara.
- Tableau I. 3. Les paramètres de courbe hypsométrique du bassin versant d'Oued Mouillah.
- Tableau I. 4. Les paramètres de courbe hypsométrique du bassin versant d'Oued Tafna.
- Tableau I. 5. Classification selon l'O.R.S. T. O.M du relief
- Tableau I. 6. Moyennes mensuelles des précipitations et températures maximales et minimales (période 1980-1994).
- Tableau I. 7. Répartition saisonnière des précipitations (1980-1994).
-
- Tableau II. 1. Stations de mesures et périodes d'observations des stations utilisées dans cette étude.
- Tableau II. 2. Application de la méthode de Wilcoxon.
- Tableau II. 3. Résultats du test de Wilcoxon.
- Tableau II. 4. Equations des régressions linéaires, coefficient de corrélation des différentes stations
-
- Tableau III. 1. Moyennes interannuelles au niveau du bassin du barrage Hammam Bouhrara – Données corrigées et étendues.
- Tableau III. 2. Moyennes interannuelles des précipitations du bassin de Hammam Bouhrara par la méthode de Thiessen.
- Tableau III. 3. Moyennes interannuelles des précipitations du bassin de Hammam Bouhrara par la méthode des éléments finis.
- Tableau III. 4. Comparaison des moyennes interannuelles des précipitations par méthodes – valeurs corrigées et étendues –
-
- Tableau IV. 1. Valeurs de l'indice standard des précipitations et degré de sécheresse ou d'humidité.

Liste des figures

- Figure I. 1. Bassin et sous bassin de Tafna.
- Figure I. 2. Réseau hydrographique du bassin versant de H.BOUGHRARA.
- Figure I. 3. Courbe hypsométrique du bassin versant du barrage H.Boughrara.
- Figure I. 4. Courbe hypsométrique du bassin versant d'Oued Mouillah.
- Figure I. 5. Courbe hypsométrique du bassin versant d'Oued Tafna.
- Figure I. 6. Abaque pour classier le climat d'après DEMARTONE.
- Figure I. 7. Climagramme d'EMBERGER (actualisé par SAUVAGE).
- Figure II. 1. Position des stations pluviométriques utilisées.
- Figure II. 2. Test du double cumul entre la station Beni Bahdel et la station de Maghnia.
- Figure II. 3. Test du double cumul entre la station Beni Bahdel et la station de Sidi Medjahed.
- Figure II. 4. Test du double cumul entre la station Beni Bahdel et la station de Sabra.
- Figure II. 5. Test du double cumul entre la station Beni Bahdel et la station de Sidi Boudjenane.
- Figure II. 6. Test du double cumul entre la station Beni Bahdel et la station de Khemis.
- Figure II. 7. Test du double cumul entre la station Beni Bahdel et la station de Khemis corrigée.
- Figure II. 8. Test du double cumul entre la station Beni Bahdel et la station de Beni Boussaid.
- Figure II. 9. Test du double cumul entre la station Beni Bahdel et la station de Beni Boussaid corrigée.
- Figure II. 10. Test du double cumul entre la station Beni Bahdel et la station de H.Boughrara.
- Figure II. 11. Test du double cumul entre la station Beni Bahdel et la station de H.Boughrara corrigée.
- Figure II. 12. Test du double cumul entre la station Beni Bahdel et la station de Beni Ouassine.
- Figure II. 13. Test du double cumul entre la station Beni Bahdel et la station de Beni Ouassine corrigée.
- Figure II. 14. Test du double cumul entre la station Beni Bahdel et la station de Sidi Djilali
- Figure II. 15. Test du double cumul entre la station Beni Bahdel et la station de Sidi Djilali corrigé.
- Figure II. 16. Droite de régression de la station de Maghnia.
- Figure II. 17. Droite de régression de la station de Sidi Medjahed.
- Figure II. 18. Droite de régression de la station de Sabra.
- Figure II. 19. Droite de régression de la station de H.Boughrara.
- Figure II. 20. Droite de régression de la station de Khemis.
- Figure II. 21. Droite de régression de la station de Beni Ouassine

Figure II. 22. Droite de régression de la station de Beni Boussaid.

Figure II. 23. Droite de régression de la station de Sidi Boudjenane.

Figure II. 24. Droite de régression de la station de Sidi Djilali.

Figure III. 1. Moyenne annuelle des précipitations de la station Beni Bahdel

Figure III. 2. Moyenne annuelle des précipitations de la station Maghnia.

Figure III. 3. Moyenne annuelle des précipitations de la station Beni Ouassine

Figure III. 4. Moyenne annuelle des précipitations de la station Beni Boussaid.

Figure III. 5. Moyenne annuelle des précipitations de la station Khemis.

Figure III. 6. Moyenne annuelle des précipitations de la station Sidi Medjahed.

Figure III. 7. Moyenne annuelle des précipitations de la station H.Boughrara

Figure III. 8. Moyenne annuelle des précipitations de la station Sabra

Figure III. 9. Moyenne annuelle des précipitations de la station Sidi Djilali.

Figure III. 10. Moyenne annuelle des précipitations de la station Sidi Boudjenane.

Figure III. 11. Maillage du bassin pour la méthode des éléments finis

Figure IV. 1. Écarts par rapport à la moyenne station H.Boughrara

Figure IV. 2. Écarts par rapport à la moyenne de la station Beni Bahdel.

Figure IV. 3. Écarts par rapport à la moyenne du bassin versant du Barrage Hammam Boughrara.

Figure IV. 4. L'écart proportionnel à la moyenne de la station Hammam Boughrara.

Figure IV. 5. L'écart proportionnel à la moyenne de la station Béni Bahdel.

Figure IV. 6. L'écart proportionnel à la moyenne du bassin du barrage Hammam Boughrara.

Figure IV. 7. Le cumul des écarts proportionnels à la moyenne de la station Hammam Boughrara.

Figure IV. 8. Le cumul des écarts proportionnels à la moyenne de la station Béni Bahdel.

Figure IV. 9. Le cumul des écarts proportionnels à la moyenne du bassin du barrage Hammam Boughrara.

Figure IV. 10. Moyenne mobile de la station Hammam Boughrara.

Figure IV. 11. Moyenne mobile de la station Béni Bahdel.

Figure IV. 12. Moyenne mobile du bassin du barrage Hammam Boughrara.

Figure IV. 13. Analyse fréquentielle appliquée à la station Hammam Boughrara.

Figure IV. 14. Analyse fréquentielle appliquée à la station Béni Bahdel.

Figure IV. 15. Analyse fréquentielle appliquée à la pluie moyenne du bassin versant du barrage Hammam Boughrara.

Figure IV. 16. Indice standard des précipitations de la station Hammam Boughrara.

Figure IV. 17. Indice standard des précipitations de la station Béni Bahdel.

Figure IV. 18. Indice standard des précipitations du bassin du barrage Hammam Boughrara.

Résumé

Le manque d'eau qui a sévit dans le bassin versant de la Tafna pendant des années nous incite à analyser la situation dans ce bassin afin de voir les changements qui se sont produits en terme de quantité de pluie qui tombe dans le bassin.

A cet effet, nous avons pris le bassin versant de Hammam Boughrara comme cas d'étude. Dans un premier chapitre, on donne une présentation du bassin versant, on présente ensuite dans le deuxième chapitre les stations retenues pour l'étude, l'analyse et le traitement des données pluviométriques.

Le troisième chapitre comporte une évaluation de la pluie moyenne interannuelle dans le bassin réalisée avec trois méthodes différentes (moyenne arithmétique, méthode de Thiessen et méthode des éléments finis). Dans ce chapitre, une évaluation de la pluie moyenne année par année du bassin a aussi été faite pour la période d'étude (1943 /1944 à 2004/2005), ceci par la méthode des éléments finis.

Dans le quatrième chapitre, une étude de la variabilité climatique avec des méthodes simples est effectuée, ceci en se basant sur les résultats du chapitre précédent.

Dans la conclusion générale, on met en relief à travers les séries pluviométriques que le bassin subit une période de sécheresse depuis les années 1974/1975.

Mots clés: Variabilité climatique, série pluviométrique, Hammam Boughrara, sécheresse.

Références Bibliographiques

- [1] **Achati, Ghabia (1998)**, "Etude du phénomène de transport solide dans le bassin versant du Barrage de Hammam Boughrara". Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'état en hydraulique, Département d'hydraulique, Faculté des sciences, Université Aboubekr Belkaid Tlemcen, 1998.
- [2] **Adjim. H (2004)**, "Evaluation et affectation des ressources hydriques superficielles du bassin versant de la Tafna – approche pluviométrique –". Mémoire de magister en Aménagement hydrique, Université AbouBekr Belkaid Tlemcen, 2004.
- [3] **Agence Nationale des Ressources Hydrique.**
- [4] **Benmoussat. F (1997)**, "Contribution à l'étude d'impact du Barrage de Hammam Boughrara sur son milieu environnant par approche cartographique". P.F.E Ingénieur Institut de Biologie. Université de Tlemcen, 1997.
- [5] **Bergaoui. M**, "Caractérisation de la sécheresse météorologique et hydrologique: cas du bassin versant de Siliana en Tunisie". Science et changements planétaires / Sécheresse. Volume 12, Numéro 4.205-13. Décembre 2001. Note méthodologiques.
- [6] **Bouabdallah.N (2006)**, "Etude des apports au niveau du bassin versant de Barrage de Hammam Boughrara". Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'état en hydraulique, Département hydraulique. Faculté des sciences, Université Aboubekr Belkaid Tlemcen, 2005.
- [7] **Dubreuil. P (1974)**, "Initiation à l'analyse hydrologie ". Masson&Cie Editeur, Paris VI.
- [8] **Ghenim. A (2001)**, "Contribution à l'étude des écoulements liquides et des dégradations du bassin versant de la Tafna: cas de Oued Isser, Oued Mouillah et la haute Tafna". Mémoire de Magister, Département hydraulique, Faculté des sciences de l'Ingénieur, Université Boubekr Belkaid, Tlemcen, 2001.
- [9] **Khaldi. Abd**, "Impact de la sécheresse sur le régime des écoulements souterrains dans les massifs calcaires de l'Ouest Algérien "Monts de Tlemcen – Saida" ". Mémoire de doctorat en hydrogéologie. Université d'Oran.
- [10] **Llamas. J (1993)**, "Hydrologie générale: Principes et application". 2ieme Edition, Gaetan Mrin Edition, Quebec, Canada, ISBN 2-89105-7.
- [11] **Sari Ahmed. Abd (2002)**, "Initiation A: L'hydrologie de surface". Edition, distribution Houma, Bouzaréah, Alger, Algérie. ISBN 9961-66-636-4.