

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf - Mila
Institut des Sciences et de la Technologie
Département de génie civil et hydraulique



N° Ref :

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Spécialité : Hydraulique Urbaine

THEME

Variabilité et tendances observées sur les débits moyens mensuels, saisonniers et annuels dans le bassin de la Tafna (Nord-Ouest de l'Algérie)

Réalisé par :

- *BENCHAOUI Fatima*
- *BOUABDALLAH Wissame*

Soutenu devant le jury :

M. KEBLOUTI Mehdi
M. BERHAIL Sabri
M. KOUSSA Miloud

Président
Promoteur
Examineur

Année universitaire : 2020/2021

Remerciement

Au terme de ce travail, je remercie d'abord dieu le tout puissant, de nous avoir accordé le courage, la volonté et la patience pour l'accomplir.

Un remerciement chaleureux est adressé à Mr BERHAIL Sabri responsable de la filière Hydraulique Urbaine ainsi qu'à l'ensemble des enseignants de département des sciences et techniques et particulièrement à ceux qui nous ont enseigné cette année.

Nous tenons à remercier profondément notre encadreur de mémoire : Dr. BERHAIL Sabri.

Nos vifs remerciements vont aussi aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail

Dédicace

Je dédie ce travail :

*À mes très chers parents : mémoire à ma mère **Hadda** que j'ai souhaité être présente à mes côtés aujourd'hui, mon père **Rachid**, dont son amour et sa patience m'ont accompagné tout au long de ce travail.*

*À ma sœur **Souhila** qui toujours encourage-moi à étudier et à ma sœur **Zineb** qui est toujours à côté de moi et à mon frère **Zouhir** et sans oublier poussin **Meriem** et aux amis **Athar** et **Zineb***

*À mon binôme **Wissam** et à tous ceux qui me soutiennent dans ce travail et à tous mes amis*

Fatima

Dédicace

Je dédie ce travail :

*À mes chers parents : À mon bon père **Tiyabe** et ma mère **Samiaa**,
dont l'amour et la patience m'accompagner tout au long de ce
travail,*

*À mon frère qui m'a toujours montré le bon chemin et qui a su
m'aider,*

À mon petit frère que j'aime tant,

*Sans oublier ma sœur **Aya** et mon mari qui m'ont toujours
encouragé à avancer et progresser d'avantage,*

*À ma compagne : **Fatima** qui pour moi était une amie et une
sœur,*

À toutes mes copines.

Wissam

Sommaire

Remerciements.....	I
Dédicaces.....	II
Sommaire.....	IV
Liste des tableaux.....	VIII
Liste des figures.....	X
Résumé.....	XII
Abstract.....	XIII
ملخص.....	XIV

INTRODUCTION GENERALE.....	1
-----------------------------------	----------

CHAPITRE 1 : Synthèse bibliographique

1. Introduction.....	3
2. Changement climatique.....	4
3. Sècheresse.....	6
4. Sécheresse en Algérie	7

CHAPITRE 2 : Présentation de la zone d'Etude

1. Présentation de la zone d'étude.....	10
1.1. Situation géographique de bassin versant de Tafna	10
2. Caractéristique Morphométrique du Bassin.....	11
2.1 Indice de Gravilius (ou compacité).....	11
2.2. Rectangle équivalent.....	12
3. Réseau hydrographique	12
3.1. Oued Isser	12
3.2. Oued Tafna.....	13
4. Etude de Relief.....	13
4.1. Courbe Hypsométrique	13
5. Hydrographie.....	18
5.1. Haute Tafna.....	18

5.2. Moyenne Tafna.....	18
5.3. Basse Tafna.....	19
6. Géologie du bassin de la Tafna.....	19
6.1. Le Primaire.....	20
6.2. Le Secondaire.....	20
6.3. Le Tertiaire.....	20
6.3.1. L'écène.....	20
6.3.2. Le Miocène.....	20
6.4. Le Plio Quaternaire.....	21
7. Hydroclimatologie.....	22
7.1.1. Précipitation.....	22
7.1.2. Température.....	23
7.1.3. Climat.....	24
7.1.4. Diagramme Ombrothermique.....	26
CHAPITRE 3 : Etude de la variabilité et de l'évolution de la pluviométrie	
1. Introduction.....	30
2. Etude de la Tendance par le test de Mann Kendnll.....	30
2.1. Estimation de l'ampleur du changement (Sen's slope estimator).....	31
3. Analyse de la pluviométrie.....	32
3.1. Analyse statistiques des données pluviométrique.....	32
3.2. Caractéristique des postes pluviométrique.....	32
3.3. Etude de la tendance mensuelle.....	33
3.4. Etude de la tendance Saisonnière.....	35
4. Conclusion.....	37
CHAPITRE 4 : Eude de la variabilité et de l'évolution de l'écoulement	
1. Introduction.....	39
2. Tendances de l'écoulement mensuel.....	40
3. Tendances de l'écoulement Saisonnier.....	41
4. Conclusion.....	42
CONCLUSION GENERALE	43
BIBLIOGRAPHIE	44

Liste des tableaux

Tableau 1 : Répartition hypsométrique du bassin d’oued Khemis.....	13
Tableau 2 : Répartition hypsométrique du bassin d’oued Sebdou (haute Tafna).....	14
Tableau 3 : Répartition hypsométrique du bassin d’oued Mouillah (moyenne Tafna).....	14
Tableau 4 : Répartition hypsométrique du bassin versant d’Oued Zitoun (Moyenne Tafna).....	15
Tableau 5 : Répartition hypsométrique du bassin versant d’Oued Boumessaoud (Moyenne Tafna).....	15
Tableau 6 : Répartition hypsométrique du bassin versant d’Oued Sikkak (Moyenne Tafna).....	16
Tableau 7 : Répartition hypsométrique du bassin versant d’Oued Lakhder (Moyenne Tafna).....	17
Tableau 8 : Répartition hypsométrique du bassin d’oued Isser.....	17
Tableau 9 : Répartition hypsométrique du bassin d’oued Boukiou.....	18
Tableau 10 : Précipitation moyennes mensuelles de l’Oued Sebdou (1970-2011).....	22
Tableau 11 : Précipitation moyennes mensuelles de l’Oued Mouillah (1970-2011).....	22
Tableau 12 : Températures moyennes mensuelles d’Oued Sebdou (1970-2011).....	23
Tableau 13 : Indice mensuel d’aridité à Oued Sebdou.....	25
Tableau 14 : Indice mensuel d’aridité à d’Oued Mouillah.....	25
Tableau 15 : Caractéristiques des stations pluviométriques.....	33
Tableau 16 . Valeurs Z (direction) selon le test de Mann – Kendall pour la période (1970–2011).	33
Tableau 17 . Valeurs S (Ampleur de la tendance) selon le test de Mann – Kendall pour la période (1970–2011).....	34
Tableau 18 : Nombre et pourcentage des stations et pour chaque type de tendance mensuelle...	35
Tableau 19 : Valeurs de Z (direction) de Mann–Kendall et ampleur de tendance saisonnière et annuel (1970-2011).....	35
Tableau 20 : Nombre et pourcentage des stations pour chaque type de tendance saisonnière....	36
Tableau 21 . Caractéristiques des stations hydrométriques retenues dans l’étude.....	39
Tableau 22 . Valeurs Z (direction) selon le test de Mann – Kendall de débits moyen mensuels pour la période (1952–2004).....	40
Tableau 23 : Nombre et pourcentage des stations et pour chaque type de tendance mensuelle...	41
Tableau 24 : Valeurs de Z (direction) de Mann–Kendall Z et pourcentage de changement (1952-2004).....	41
Tableau 25 : Nombre et pourcentage des stations pour chaque type de tendance saisonnière....	42

Liste des figures

Figure 1 : Situation géographique du bassin versant de la Tafna.....	10
Figure 2 : Bassin et sous bassins de la Tafna.....	11
Figure 3 : Réseau hydrographique du bassin versant de la Tafna.....	19
Figure 4 : Cadre géologique du bassin versant de la Tafna.....	21
Figure 5 : Variations des précipitations moyennes mensuelles à Oued Sebdou et Oued Mouillah (1970-2011).....	23
Figure 6 : Variations des températures moyennes mensuelles d'Oued Sebdou (1970-2011)..	23
Figure 7 : Variations des températures moyennes mensuelles d'Oued Mouillah (1970-2011).	24
Figure 8 : Diagramme Ombrothermique à Oued Sebdou (1970-2011).....	26
Figure 9 : Diagramme Ombrothermique à Oued Mouillah (1970-2011).....	26
Figure 10 : Localisation des stations pluviométriques dans le bassin de la Tafna.....	32
Figure 11 : Nombre de stations pour chaque type de tendance mensuelle.....	34
Figure 12 : Nombre de stations pour chaque type de tendance saisonnière.....	36
Figure 13 : localisation des stations hydrométriques du bassin versant de la Tafna.....	39
Figure 14 : Nombre de stations pour chaque type de tendance mensuelle.....	40
Figure 15 : Nombre de stations pour chaque type de tendance saisonnière.....	42

Résumé

Le changement climatique, lié au réchauffement de la Terre, agit directement sur notre milieu naturel en le transformant et s'accompagne de modifications dans le cycle hydrologique. Il s'en suit une baisse drastique des ressources en eau disponibles du fait de la forte diminution des totaux pluviométriques reçus. Dans cette étude, nous utilisons le test de Mann-Kendall pour caractériser la variabilité et les tendances des pluies et débits dans le bassin de la Tafna. Les résultats de l'analyse révèlent une tendance à la baisse statistiquement significative sur pratiquement tous les mois et sur les périodes de hautes et de basses eaux. Une tendance a été observée aussi sur les années de faible hydraulicité durant lesquelles l'écoulement des périodes de hautes et basses eaux est moins important. Le test de Mann-Kendall s'est donc avéré efficace pour indiquer les tendances négatives de la pluviométrie et l'écoulement dans le bassin de la Tafna.

Mots-clés : Changement climatique, Débits, Tendances, Test statistique, Bassin versant de la Tafna, Algérie

Abstract

Climate change, linked to global warming, acts directly on our natural environment, transforming it, and is accompanied by changes in the hydrological cycle. As a consequence, there is drastic reduction in available water resources due to the marked decrease in rainfall. In this study, we use the Mann-Kendall test to characterize the variability and trends of rainfall and runoff in the Tafna basin. The results of the analysis reveal a statistically significant downward trend in practically every month and in periods of high and of low flows. A trend was observed also in the years with low flow during which the periods of high and low flow were less noticeable. The Mann-Kendall test thus proved effective in identifying the negative trends in rainfall and runoff in the Tafna basin.

Keywords: Climate change, discharges; Trends, Statistical test; Discharge; Tafna basin, Algeria

ملخص:

تغير المناخ، المرتبط بارتفاع درجة حرارة الأرض، يعمل بشكل مباشر على بيئتنا الطبيعية عن طريق تحويلها ويصاحبها تعديلات في الدورة الهيدرولوجية. والنتيجة هي انخفاض حاد في الموارد المائية المتاحة بسبب الانخفاض الحاد في مجاميع هطول الأمطار المتلقاة. في هذه الدراسة، نستخدم اختبار Mann-Kendall لتوصيف تباين واتجاهات هطول الأمطار والتصريف في الحوض الهيدروغرافي تافنا. تظهر نتائج التحليل اتجاهاً تنازلياً ذا دلالة إحصائية خلال كل شهر تقريباً وخلال فترات ارتفاع وانخفاض المياه. كما لوحظ وجود اتجاه في سنوات انخفاض الهيدروليكي حيث يكون تدفق فترات ارتفاع وانخفاض المياه أقل أهمية. لذلك ثبت أن اختبار Mann-Kendall فعال في الإشارة إلى الاتجاهات السلبية في هطول الأمطار والجريان السطحي في الحوض الهيدروغرافي تافنا.

الكلمات المفتاحية: تغير المناخ، اتجاهات الأمطار، المؤشر الإحصائي، الحوض الهيدروغرافي تافنا، الجزائر.

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE :

Depuis ces dernières décennies, les différents États accordent un intérêt croissant au changement climatique qui demeure une notion très vaste (réduction de la pluviométrie, augmentation de la température, effet de serre, ...etc.

Plusieurs manifestations climatiques récentes de grande ampleur ont poussé la communauté mondiale à s'intéresser aux changements climatiques et à leurs impacts sur les ressources en eau. Parmi elles, on peut citer la sécheresse qui a affecté les pays du Maghreb, l'Algérie en particulier, depuis les années 1970. L'Algérie a connu durant son histoire de nombreuses périodes de sécheresses d'ampleur variable. Certaines ont eu des répercussions parfois dramatiques sur les conditions de vie de la population, notamment rurale ; les sécheresses les plus sévères et les plus persistantes sont celles relevées durant les années 1980 à 90 où le déficit pluviométrique a été estimé à 50% pour les régions du centre et de l'Ouest de l'Algérie. Et à 30% à l'est.

Les précipitations représentent le facteur le plus important du climat tant pour les populations que pour les écosystèmes. Elles sont faciles à mesurer. Autant de raisons qui font que la plupart des études et analyses portent sur les précipitations bien plus que sur d'autres paramètres du climat. Toutes les ressources sont conditionnées par les précipitations très irrégulières dans l'espace et dans le temps. La caractérisation de la tendance de la variabilité annuelle des précipitations est importante pour la prévision, la gestion des ressources hydriques, et l'étude des changements climatiques.

Dans ce contexte, l'objectif de cette étude est basé sur une méthode statistique (bien connue et utilisée par divers auteurs) pour la détection de tendance largement utilisée en hydrologie. Elle a examiné la variabilité hydrologique dans le bassin de la Tafna à l'échelle mensuelle, saisonnière et annuelle sur la base de débits moyens écoulés aux 06 stations.

Notre travail s'organise autour de quatre chapitres :

- **Le premier chapitre** : propose une synthèse bibliographique sur le changement climatique, la sécheresse du régime pluviométrique dans le monde, en méditerranée et en Algérie. Nous y résumons les principales conclusions des nombreuses études ayant traité cette thématique.
- **Le deuxième chapitre** présente le bassin versant de la Tafna en traitant ses principales caractéristiques (situation, géologie, morphologie, etc), et collecte de données.
- **Dans le troisième chapitre**, les séries de la pluviométrie mensuelles de 11 stations sont ainsi formées pour étudier les tendances temporelles (mensuelles, saisonnières et annuelles).
- **Et le quatrième chapitre** : porte sur les détails et la caractérisation des tendances temporelles (mensuelles, saisonnières et annuelles) de débits moyens écoulés aux 06 stations hydrométriques.

CHAPITRE 1 :

Synthèse bibliographique

1. INTRODUCTION

A la fin de ce siècle, le changement climatique est devenu l'un des sujets d'actualité. On lit souvent dans la presse les titres comme : "Le climat change-t-il" ? "La terre se réchauffera-t-elle" ? ...etc.

Ce genre de questions est souvent posé, vu l'impact de ces changements sur le plan socio-économique de plusieurs pays, en particulier ceux du globe les moins développés au plan technique, et où l'économie est fondée sur l'agriculture, généralement non irriguée. Dans certains pays en développement, en Asie par exemple les inondations comptent parmi les événements météorologiques les plus dommageables aux communautés. Quant à la sécheresse, c'est un phénomène qui s'est produit en de nombreux endroits du globe, avec des ampleurs et du durées variables. Au-delà de la grande polémique sur les causes réelles des dérèglements climatiques contemporaines [1,2], l'augmentation des températures qui est observée par une grande majorité de stations dans le monde, constitue un fait indéniable et confirme ainsi la réalité du réchauffement climatique global [3]. Ainsi la décennie 2001-2010 et l'année 2010, à égalité avec 2005 et 1998, sont-elles considérées par [4] comme les plus chaudes à l'échelle mondiale depuis que l'on dispose de relevés météorologiques.

Parallèlement à cette hausse, une augmentation probable des précipitations est attendue [5]. Ces dernières années, les pluies ont occasionné de violentes inondations un peu partout dans le monde. En juillet 2007, la Grande-Bretagne a fait face à ses plus graves inondations depuis plus de soixante ans. En 2008, les pluies de mousson ont été extrêmement fortes en Inde. En 2009, dans cette même région du monde, c'est au Pakistan que les pluies de mousson ont été particulièrement dévastatrices. En 2010, l'Australie a connu les plus grandes inondations de son histoire, avec près de quarante villes du Nord-est du pays touchées et plus de 200000 personnes affectées [6]. En 2011, la Thaïlande a subi les plus graves inondations jamais observées dans cette partie du monde. Enfin, en 2013, l'Inde a fait face une nouvelle fois à une mousson exceptionnelle [7], par sa rapidité de déplacement et par sa violence (plus de 5000 personnes ont péri dans des inondations meurtrières), tandis que l'Europe centrale était touchée par des inondations d'une ampleur jamais observée depuis près 500 ans (La Chaîne Météo, 2013), conséquences des très fortes pluies tombées sur l'Autriche, l'Allemagne, la Hongrie et la Tchéquie.

Si la recrudescence de tels évènements est bien réelle, ces épisodes peuvent cependant, suivant le degré de leurs intensités, être ressentis d'une manière tout à fait différente d'une région à une autre du globe [8-11].

L'Afrique du Nord a connu plusieurs grandes sécheresses durant ce siècle, tels que ceux des années 40 et les années 80 jusqu'à nos jours. Ainsi, l'évolution des températures (hausse des minima et des maxima) est conforme à la situation mondiale [12,13]. Les pluies enregistrées dans cette partie du monde s'inscrivent aussi dans les évolutions générales [14,15].

En plus, après deux décennies de sécheresses observées dans les années quatre-vingt et quatre-vingt-dix, l'amorce de périodes beaucoup plus humides est notée en Algérie et dans tout le Maghreb [16]. Le retour des pluies de la dernière décennie est une chance pour les

agricultures, il n'en est pas de même pour les citoyens. En effet, les fortes averses provoquent des inondations et causent de gros dégâts matériels, voire des pertes humaines. Les pluies, qui avaient été tant attendues, sont ainsi devenues de plus en plus redoutées.

La sécheresse des années 80 jusqu'à nos jours a été caractérisée par son ampleur spatiale, son intensité et par son impact majeur et sensible qui est la diminution des ressources en eau [17-23]. Etudier l'impact négatif de la variabilité climatique sur les ressources en eau est devenue un impératif de plus en plus pressant en Algérie.

2. CHANGEMENT CLIMATIQUE

Il est maintenant largement reconnu que le climat de la terre change comme en témoigne la décennie 1990, la plus chaude depuis dix siècles [24]. Plusieurs manifestations climatiques récentes de grande ampleur ont poussé la communauté scientifique à s'intéresser aux changements climatiques et à leurs conséquences socio-économiques.

Parmi ces manifestations on peut citer :

- La sécheresse qui a touché les deux bandes tropicales de notre planète, surtout les régions sahéliennes d'Afrique de l'Ouest, depuis les années 70. [25]
- Les constatations de l'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM) sur le réchauffement de la planète évalué à 0.5 °C depuis la moitié du siècle dernier [26] La moyenne décennale des températures (2001 – 2010) représente la moyenne la plus élevée depuis le début des relevés des instruments météorologiques.

Parmi les résolutions communes aux études effectuées par la communauté scientifique [24], il y a la mesure précise des fluctuations et leur interprétation statistique. Dans ce cadre plusieurs méthodes de détection des changements climatiques ont été mises au point [27-29]

Les changements climatiques supposent la variation à long terme des valeurs moyennes des caractéristiques statistiques des variables étudiées sur des périodes de longue durée. Cette notion diffère de la variabilité climatique qui suppose la stationnarité et décrit la fluctuation des valeurs saisonnières ou annuelles par rapport aux valeurs temporelles de référence. Le suivi du cycle climatique de l'eau, reconnu comme l'un des manifestations majeures du climat, permet d'appréhender certains aspects de l'évolution de ce dernier. Ainsi, [30] ont indiqué que les variables les plus adaptées pour le suivi du climat sont :

- Le débit des rivières,
- Le niveau des lacs,
- Les précipitations,
- Les températures de l'air et de l'eau,
- La date de rupture du couvert de glace et sa durée et,
- Le niveau des eaux souterraines.

Les évolutions possibles de ces variables climatiques peuvent être ramenées à deux types de modifications à analyser [30] :

- Le changement de la moyenne
- Le changement de la variance.

De nombreuses études à travers le monde ont été menées pour la détection de ces changements. En Afrique sahélienne et non sahélienne beaucoup d'auteurs ont mis en évidence, à partir des séries hydro-pluviométriques, une phase sèche qui a débuté vers les années 1970 et qui perdure jusqu'à présent. Dans cette région, il a été constaté :

- Diminution de la pluviométrie annuelle ;
- Diminution du nombre de jours de pluie ;
- Diminution des débits des rivières ;
- Diminution des niveaux des lacs ;
- Fortes intensités de pluies ainsi qu'un raccourcissement de la saison pluvieuse.

[31] a mis en évidence, à l'aide du filtre récursif passe-bas de Hanning d'ordre 2 :

- La succession de phases sèches et humides à Lubumbashi (Congo-Kinshasa) ;
- La dernière phase sèche en date a commencé vers les années 1980 et se prolonge jusqu'à nos jours ;
- Malgré cela, avec les tests il n'a pas détecté de rupture de la stationnarité dans la série chronologique étudiée alors que ;
- Les précipitations sont significativement corrélées aux indices d'oscillation australe pendant la saison de pluies.

[32] a étudié aussi l'évolution pluviométrique par rapport à l'indice de normalité sur quelques pays méditerranéens (Italie, Algérie, France, Grèce, Espagne Maroc, Portugal et Moyen-Orient) et a montré que :

- L'occurrence du déficit en précipitations dans une très vaste zone durant les années 1944, 1945, 1970, 1973, 1980, 1981, 1989 et 1990, où au moins entre 4 et 6 des huit sous régions traitées ont été touchés ;
- Certaines zones sont plus affectées que d'autres, par exemple l'Algérie et l'Espagne dans la partie occidentale et la Grèce et le Moyen-Orient dans la partie orientale ;
- Généralement, la sécheresse est apparue sur la majorité des pays du bassin méditerranéen depuis les débuts des années 80.

Les études effectuées par [24] sur le changement climatique des pays du bassin méditerranéen, prévoient :

- Une augmentation des températures et ;
- Une accentuation de la variabilité climatique.

Cela s'est particulièrement caractérisé par une modification de l'intensité, de la répartition des précipitations, et une amplification des phénomènes extrêmes tels que l'inondation et la sécheresse. La rapidité et la persistance de ces phénomènes, dans le temps et dans l'espace, présagent que cette tendance est en passe de devenir structurelle en relation avec le réchauffement climatique.

3. SECHERESSE :

Selon l'Organisation météorologique mondiale (OMM), de 1967 à 1991, 1,4 milliards de personnes ont été affectées par les sécheresses. Selon certains scénarios des changements planétaires, l'occurrence et l'impact des sécheresses risquent d'augmenter dans les années à venir [33]. En 2000, la perte de bétail due à une sécheresse grave en Asie méridionale et au Proche-Orient a causé la mort de nombreuses personnes. Au sud de l'Afghanistan, la population entière (300 000 familles) du désert du Registan a fui lorsque leurs sources d'eau se sont asséchées. Au Pakistan, la sécheresse dans les provinces du Baloutchistan et de Sindh a été signalée comme étant l'une des pires de l'histoire du pays. En Iran, 18 des comtés et 28 provinces ont été confrontés également à une sécheresse grave. Le Tigre et l'Euphrate en Iraq ont également connu une baisse de leur niveau pour atteindre environ 20% de leur débit moyen [34].

[35] montrent, suite à une analyse d'un indice des précipitations annuelles au Sahel ouest africain, que la sécheresse n'est pas encore terminée en fin de l'année 2000. Cependant, les modifications climatiques subies par l'Afrique durant le XX^{ème} siècle sont très nombreuses et n'ont pas les mêmes emprises [36]. En effet, pour l'Afrique Centrale, les modifications les plus importantes sont survenues au cours de la première moitié du siècle avec une augmentation de la pluviométrie annuelle. Quant à l'Afrique de l'Ouest, une diminution très marquée de la pluviométrie depuis la fin des années 1960 a été détectée. Elle a de plus une étendue qui ne semble pas avoir eu d'équivalent au cours du XX^{ème} siècle. Les pays comme le Ghana, le Togo, le Bénin et la partie maritime du Nigeria n'ont connu aucun changement notable. L'Afrique sahélienne a été la plus sujette à de nombreux changements au cours du siècle: dans son ensemble, elle a subi une augmentation de la pluviométrie vers 1940 puis une diminution vers 1970; sa partie centrale a subi une augmentation de la pluviométrie vers 1919 puis une diminution vers 1970.

Les travaux de [37] ont signalé par le test de PETTIT, l'existence d'une rupture préférentielle autour des années 1970 au niveau des grands cours d'eau du Côte d'Ivoire. L'année 1970 a été aussi relevée comme année de rupture par [38] sur les débits du Bani à Douna au Mali, avec une diminution de 68 %. Ils mettent aussi, en évidence que les ruptures hydrologiques sont en phase avec les ruptures pluviométriques. Cette concordance des dates de rupture montre que le régime des cours d'eau est fortement lié à celui des précipitations.

Ces années de rupture sont aussi en phase avec le découpage donné par le filtre passe-bas de Hanning de la station de Grand-Lahou. Ces années s'insèrent dans la période de rupture de la plupart des stations pluviométriques en Côte d'Ivoire, à savoir 1966-1971 [36]. Ces ruptures montrent aussi que la région de Grand-Lahou s'inscrit globalement dans la fluctuation du régime pluviométrique observée entre la fin des années 1960 et le début des années 1970 en Afrique de l'Ouest et Centrale [31-33]

[39] a signalé une tendance des coefficients de tarissement à la hausse à partir de la rupture de 1970 dans le bassin versant du N'zo à l'Ouest du Côte d'Ivoire. Les volumes mobilisés ont évolué inversement aux coefficients de tarissement. Ces volumes ont régulièrement baissés depuis l'année 1986 qui est caractérisée par une très faible pluviométrie. En effet,

l'année 1986 est l'année qui a été marquée par une sécheresse particulièrement intense dans la région de Soubré. Cette sécheresse a contribué à la réduction des réserves d'eau de la région et a même affecté la recharge souterraine, ce qui a contribué à rendre les volumes mobilisés dans les différents bassins versants de la région. Les études de [31] ont également observé une augmentation des coefficients de tarissement dès 1969 sur cinq sous-bassins du fleuve Niger. Ces constatations ont également été faites par [40] qui a signalé ce phénomène sur les bassins versants du Tchad. [41] a fait ce même constat dans le bassin béninois du fleuve Niger.

Tout comme l'Afrique de l'Ouest et centrale, les pays d'Afrique du Nord n'échappent pas non plus à cette variabilité climatique. Les travaux sur la Tunisie, dans le même ordre d'idée, [42] ont mis en évidence une baisse significative (sans rupture de stationnarité des séries) des précipitations annuelles en Tunisie centrale, entre 1976 et 1989.

Une étude de la sécheresse météorologique et hydrologique dans la région de Siliana en Tunisie a été effectuée en se basant sur plusieurs indices [43]. Les résultats obtenus montrent que la méthode des écarts à la moyenne donne un pourcentage de 60 % d'années sèches. L'analyse fréquentielle révèle que la sécheresse est de classe modérée (35 %). La fréquence d'apparition d'années successives sèches est relativement élevée : 55 % d'années sèches sont formées de deux, trois ou cinq années sèches consécutives. Quant à la sécheresse hydrologique, elle est plus accentuée, prouvant la dissymétrie des apports et la tendance générale des phénomènes hydrologiques à la faible hydraulité. Simultanément, [44] a étudié la persistance de la sécheresse en Tunisie par utilisation des chaînes de Markov sur des séries de pluviométrie annuelle. Cette méthode a été déjà appliquée à l'échelle journalière et saisonnière [45]. L'auteur prouve que la persistance des années sèches est plus fréquente dans les régions du nord et du centre du pays. De plus, la probabilité d'avoir deux années sèches consécutives varie de 23 à 40 % suivant une croissance du sud-ouest au nord-ouest.

Les études effectuées sur la pluviométrie et les apports de l'oued Merguellil ont connu une baisse assez significative ces dernières décennies [46], et l'année 1988-1989 est aussi apparue dans plusieurs variables comme une année de rupture [46,47]

4. SECHERESSE EN ALGERIE :

Plusieurs travaux sur la pluviométrie en Algérie ont été menés depuis le dernier siècle, mais la plupart d'entre eux en font une analyse superficielle sur quelques stations en se basant sur le calcul de la moyenne. Ce n'est qu'en 1946 grâce aux travaux de Seltzer sur le climat de l'Algérie qu'une analyse détaillée sur la pluviométrie est établie.

En Algérie, en considérant les stations du nord par une méthode comparative des moyennes (1974-1992 par rapport à celle de Chaumont 1913-1963) et à la moyenne de longue durée (1922-1992), ont constaté que :

- L'ampleur du déficit pluviométrique de la dernière période 1974-1992 s'intensifie d'Est en Ouest ;
- Ils mettent en évidence la tendance à la sécheresse des vingt dernières années et font apparaître des sécheresses analogues durant les années 1913 et 1940.

[48] donnent l'évolution d'un indice de sévérité de la sécheresse sur la même région et relèvent l'occurrence de sécheresses sévères et généralisées durant des années très isolées : 1937, 1961, 1970.

En étudiant aussi les données de 120 postes pluviométriques du Nord de l'Algérie, [19] a mis en évidence par une analyse en composante principale une succession de quatre phases pluviométriques :

- Une longue phase où la pluviométrie est supérieure à la moyenne de 6 %, de 1922 à 1938.
- Une courte phase sèche débutant en 1939 et s'arrêtant en 1946 à l'ouest et au centre du pays avec un déficit de l'ordre de 11 %.
- Une phase pluvieuse qui dure jusqu'en 1972 environ.
- Une longue phase sèche qui s'affirme dès la fin de 1973.

[47] appliquent une analyse en composantes principales avec rotation Varimax sur deux réseaux et sur deux périodes différentes ; ils ont abouti à une division régionale de l'ouest Algérien pour une analyse spatio-temporelle de la pluviométrie. Les auteurs ont remarqué que :

- La sécheresse des années 40 est principalement due à une baisse de pluie de printemps et que;
- Celles des années 80 à une baisse de pluie d'hiver.

[17] a étudié la sécheresse sur les stations pluviométriques du nord-ouest algérien. Il aboutit aux résultats suivants :

- A partir des variables centrées réduites des totaux annuels, l'analyse a mis en évidence la succession de deux phases, un long épisode globalement pluvieux qui s'est étendu entre le début des années 50 et la fin des années 70, une période globalement déficitaire, qui aurait commencé au début des années 80 et qui persiste jusqu'à son étude ;
- Les pluies d'hiver durant la décennie 1990-2000 ont connu généralement une baisse pour les stations d'étude ;
- Les résultats obtenus par l'étude de la sévérité de la sécheresse, en utilisant différentes méthodes comme celles des quintiles et des Terciles, confirment la persistance et l'abondance des années déficitaires durant les deux décennies 1980-1990-2000 pour la région d'étude ;
- Il montre aussi, que le modèle Markovien ajuste bien les séquences pluvieuses, par contre l'ajustement des séquences sèches par ce modèle montre qu'il existe une grande différence entre les fréquences calculées et les fréquences théoriques surtout lorsque nous allons vers des seuils plus grands ;
- L'analyse de l'étude de la relation entre l'ONA et la pluviométrie à partir de la corrélation montre qu'il y a un lien entre cette oscillation et la pluviométrie dans cette région d'étude.

[22] mettent, par des études de la sécheresse aux stations du nord de l'Algérie, en évidence une diminution pluviométrique au cours des dernières décennies. Ce déficit génère un grave

problème d'ordre économique et social, compte tenu de la pression croissante qui exerce sur la ressource en eau (alimentation en eau potable, irrigation...).

[23] signale par une étude sur les apports des cours d'eau de l'est algérien que 1987-1988 est l'année la plus marquée par la sécheresse hydrologique (faible hydraulité) suivie par les années 1993-1994 et 2001-2002.

[48-53] mettent en évidence par des études de la sécheresse aux stations du nord-est de l'Algérie (région de la Medjerda) le suivant :

- Diminution pluviométrique au cours des dernières décennies (1970-1980-1990-2000) ;
- Diminution des débits de la rivière de la Medjerda durant ces mêmes décennies ;
- Augmentation de la température et de l'évapotranspiration durant ces mêmes décennies ;
- Fortes intensités de pluies ;
- Diminution des apports liquides au niveau du barrage d'Ain Dalia, et les années 1988-1989, 1993-1994 et 2001-2002 ont connu une baisse jamais atteinte depuis sa mise en service.

D'autres études menées par [54] sur la sécheresse en Algérie montrent que, durant l'année 1988-1989 les barrages de l'Ouest et du Centre se sont asséchés. Ceci est moins ressenti à l'Est de l'Algérie. C'est ainsi que, la situation de l'approvisionnement en eau potable est devenue de plus en plus difficile à gérer. L'année 1988-1989 a été classée comme année sèche pour l'Algérie.

Récemment, [55] ont montrés que, suite à une étude des chaînes de Markov appliquée sur les stations pluviométriques de l'Algérie du Nord,

- pour avoir une année non sèche après une année sèche, la probabilité est plus importante au centre du pays qu'elle est à l'ouest et,
- pour avoir deux années sèches successives, la probabilité est plus importante à l'ouest qu'au centre.

Ces résultats des différentes approches méthodologiques des principaux indices de la sécheresse aident à une description d'état de préparation de gestion de la sécheresse en Algérie. Par ailleurs, plusieurs efforts pour le développement de nouvelles méthodologies d'estimation et de quantification des différents aspects liés à la sécheresse ont été déployés, tel que les différences spatiales de la sécheresse [56], la prédiction des sécheresses par les indices de la circulation atmosphérique [57], et la mitigation des effets de la sécheresse [58] Cependant, plus d'efforts ont été fournis pour développer des indices de la sécheresse, permettant une identification précoce de son intensité et son ampleur. Ces indices sont primordiaux pour l'analyse et la planification continue des sécheresses dans le temps et dans l'espace [59]

Depuis 1994, prenant conscience des dégâts provoqués par les événements de sécheresse répétés dans l'État du Chihuahua au Mexique, les décideurs, les politiques, les scientifiques et les universitaires se sont concertés et leurs efforts ont abouti à la création du Centre de recherche sur la Sécheresse [60]. Le but du centre NDMC (National drought mitigation center) développé aux Etats-Unis d'Amérique est de rassembler, mesurer, et cartographier les impacts de la sécheresse et fournir aux rapporteurs un accès aux résultats à travers des outils de recherche

faciles et interactifs. Les utilisateurs peuvent soumettre leurs propres rapports des impacts de la sécheresse. Dans le même contexte, d'autres pays tels que le Canada, l'Italie, l'Espagne, ..., ont développés des centres de mitigation et de planning semblables pour une meilleure compréhension et analyse du phénomène.

Récemment, le programme « MEDROPLAN » *Mediterranean Drought Preparedness and Mitigation Planning* a été développé par l'Europe Aid Co-operation Office avec la collaboration de scientifiques et d'acteurs de l'eau de Chypre, Espagne, Grèce, Italie, Maroc et Tunisie, comme initiative pour la préparation de directives de gestion et de mitigation des sécheresses dans les pays méditerranéens. Le guide permet de fournir une approche efficace et systématique pour mettre au point des plans de gestion de la sécheresse alliant science et politique.

Donc préparer un guide pratique de gestion de la sécheresse, en adaptant une méthodologie basée essentiellement sur l'expérience Algérienne, et celle des autres pays, tout en prenant en considération les connaissances scientifiques, techniques et socio-économiques acquises dans ce domaine est nécessaire. Or, la sécheresse fait partie du climat, et les statistiques communément disponibles pour analyser les variables qui sont à l'origine des sécheresses, telles que, les précipitations ou les séries de débits, sont basées sur l'étude fréquentielle des étiages, l'étude des séries temporelles, la genèse de données synthétiques, la théorie des séquences, la régression multiple, etc. Cependant, on trouve dans la littérature toute une pléthore d'ouvrages sur le sujet. Si depuis des décennies, les lois statistiques classiques ont fait le bonheur des hydrologues statisticiens, aménageurs, concepteurs et autres, aujourd'hui, un constat amer se pose : toutes ces lois classiques, souvent utilisées abusivement, trouvent des limites dans l'étude des événements d'occurrence rare. Des études récentes [31] ont montré que la loi de Laplace-Gauss qui est la plus utilisée pour la modélisation statistique des pluies annuelles, mais aussi toutes les autres lois à décroissance exponentielle, ne permettent pas d'ajuster d'une façon satisfaisante les queues de distribution des séries longues. Donc, il est important de modéliser les précipitations maximales probables afin de les utiliser dans la prévision des crues extrêmes telle que dans la gestion des inondations.

CHAPITRE 2 :

Présentation de la zone d'étude

1. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE :

1.1. Situation géographique de bassin versant de la Tafna :

L'Oued Tafna est caractérisé par une longueur de 228 km. Son bassin-versant, situé au nord-ouest de l'Algérie, s'étend sur une superficie de 7 254 km² (figure 1). Il est constitué de huit sous-bassins, dont deux se trouvent en amont dans le territoire marocain. Cette partie marocaine représente une superficie de 2 007 km², soit 27,7 % de la surface totale [61].

Le bassin-versant de la Tafna possède un relief très accidenté, avec une altitude moyenne de 780 m et une altitude maximale dépassant les 1800 m [62].

- Sous bassin de l'Oued Isser (Bensekrane)
- Sous bassin de l'Oued Isser (Remchi)
- Sous bassin de l'Oued Lakhdar (Chouly)
- Sous bassin de l'Oued Sikkak
- Sous bassin de l'Oued Enachef
- Sous bassin de l'Oued Ouardefou
- Sous bassin de l'Oued Boukiou
- Sous bassin l'Oued Mouillah

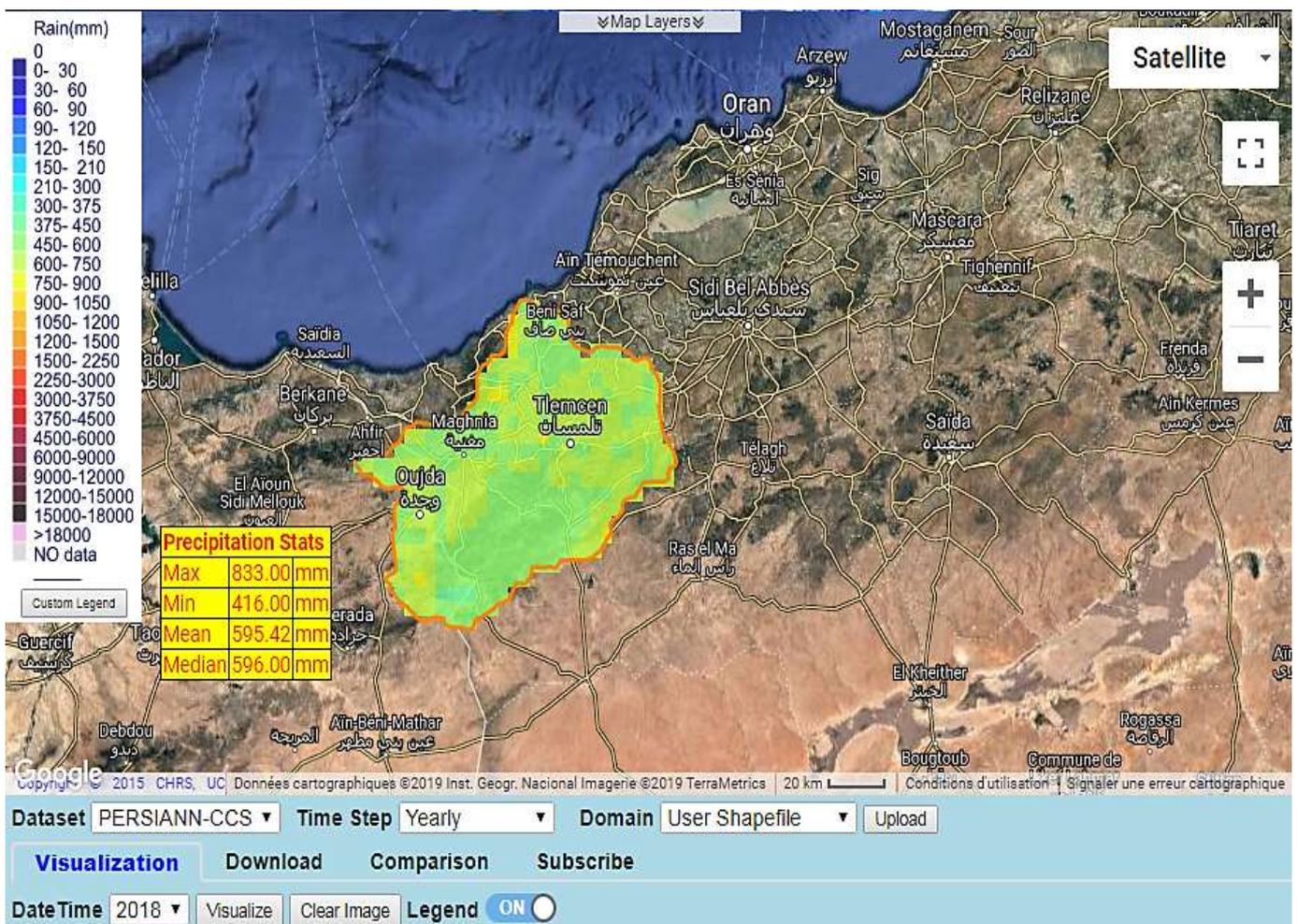


Figure 1 : Situation géographique du bassin versant de la Tafna

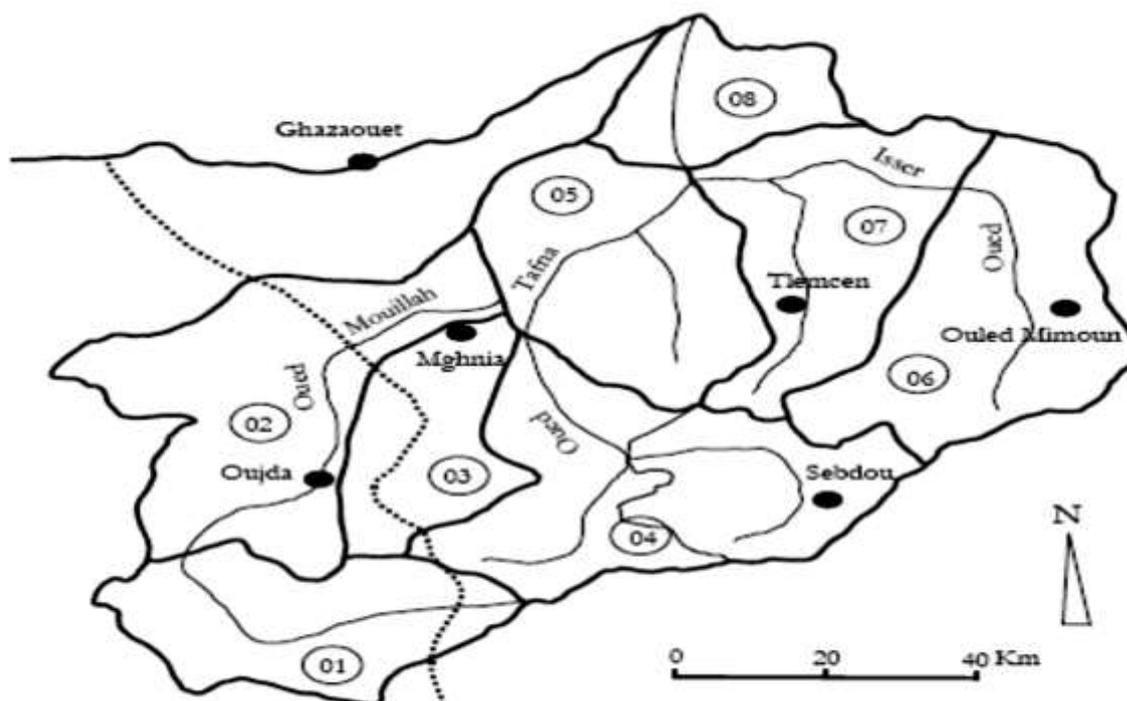


Figure 2 : Bassin et sous bassins de la Tafna [61]

2. CARACTERISTIQUES MORPHOMETRIQUES DU BASSIN :

Pour mieux comprendre le comportement hydrologique du bassin versant de l'Oued Tafna, il est impératif de connaître ces caractéristiques morphométriques (forme, relief, altitude, pente, densité de drainage) qui expliquent le cycle de transformation des pluies en écoulements et s'appêtent à une analyse quantifiée.

➤ **Superficie du bassin versant :**

La surface du bassin égale à 7254 Km².

➤ **Périmètre du bassin versant :**

Le périmètre du bassin versant estimé à 354,80 Km.

2.1 Indice de Gravilius (ou compacité) :

Cet indice est un paramètre de forme, son utilisation pour caractériser la forme du bassin est très réponde en hydrologie. L'idée la plus simple est de comparer le bassin étudié à un bassin de forme standard. C'est ainsi que Gravilius (1861-1939), a proposé en 1914 le coefficient de compacité (compactes coefficient) défini comme le rapport du périmètre du bassin à celui d'un cercle de même surface.

$$C = 0.28 P / \sqrt{S}$$

P : le périmètre du bassin versant (Km).

S: la surface du bassin versant (Km²).

Ce coefficient est égal 1 lorsque le bassin versant est parfaitement circulaire. Il est égal à 1.12 dans le cas d'un bassin versant carré, et il peut atteindre la valeur 3 pour des bassins versants allongés.

Le bassin versant de la Tafna a un coefficient de compacité égal à 1.16, ce qui traduit son allongement et un développement de l'érosion linéaire.

2.2 Rectangle équivalent :

Le rectangle équivalent est défini comme étant le rectangle de longueur (L) et de largeur (B) qui a la même surface (S) même périmètre (P), même indice de compacité (C) et même hypsométrie que le bassin versant étudié.

Ce paramètre facilite la comparaison entre les bassins versants du point de vue de leur influence sur l'écoulement.

$$L = \frac{C \cdot \sqrt{S}}{1.128} \cdot \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.128}{C} \right)^2} \right]$$

Avec :

C : indice de compacité ;

S : Superficie du bassin versant en km² ;

L : longueur du rectangle équivalent en km.

La largeur du rectangle "B" est déterminée en fonction de la surface du bassin versant "S" et la longueur du rectangle "L"

$$B = \frac{C \cdot \sqrt{S}}{1.128} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.128}{C} \right)^2} \right]$$

Ce qui donne : L=113.7 km et B= 63.7 km

3. RESEAU HYDROGRAPHIQUE :

Le bassin de la TAFNA dispose d'un réseau hydrographique qui s'organise autour de deux oueds principaux ; Isser à l'Est et la Tafna à l'Ouest recevant chacun des affluents descendant des reliefs;

3.1 Oued Isser :

C'est le plus grand affluent de la Tafna. Il draine la partie la plus arrosée du bassin. Une station de contrôle implantée à Remchi permet l'évaluation des débits de cet effluent il est alimenté par deux (02) principaux oueds ; l'oued Sikkak qui draine les eaux du djebel Benian (1100 m) et la plaine de Hennaya, l'oued Chouly draine la partie la plus haute du sous bassin et les eaux du Djebel Dar Chikh (1616 m). Une station hydrométrique implantée à Chouly contrôle les eaux de cet oued.

3.2 Oued Tafna :

Il draine le mont de Tlemcen, les monts des Traras et une partie du moyen Atlas (Maroc). Il est alimenté par l'oued Boukiou et l'oued Mouillah au Nord-Ouest, l'oued Sebdou et l'oued Khemis au Sud, drainant la partie Ouest du bassin. Les eaux de oued Tafna sont contrôlées par la station de la pierre du chat. L'oued Boukiou et l'oued Mouillah drainent les eaux de la chaîne Traras, l'oued Sebdou et l'oued Khemis drainent les eaux de la partie la plus haute du bassin à savoir les monts de Tlemcen.

4. ETUDE DU RELIEF :

Le relief est un facteur essentiel, il détermine en grande partie l'aptitude au ruissellement des terrains, l'infiltration et l'évaporation. C'est un élément très important qui caractérise le comportement hydrologique d'un bassin. Partant de la répartition par tranches d'altitudes des bassins, nous avons établi les courbes hypsométriques.

4.1. Courbe hypsométrique :

La plupart des facteurs météorologiques et hydrologique (précipitations, débits,...est) étant en fonction de l'altitude. Plus l'altitude est importante plus les précipitations sont importantes. La courbe hypsométrique a une grande influence sur les écoulements et la réception de la pluviosité elle permet de nous donner une idée sur les pentes du bassin et leur répartition en altitude.

La courbe hypsométrique est obtenue par le calcul planimétrique de la surface comprise entre différente tranche d'altitude, limitées par les courbes de niveau du terrain du bassin versant.

Les valeurs obtenues permettent de tracer cette courbe qui est déduite par la superficie du bassin en fonction des classes d'altitude.

a) Oued Khemis :

Le bassin d'Oued Khemis, d'une superficie de 350 km² est caractérisé par des pentes assez abruptes dépassant généralement 25% aux abords de l'oued. A l'Est et l'Ouest du bassin les pentes sont fortes à moyennes (de 3% à 25%).

Tableau 1: Répartition hypsométrique du bassin d'oued Khemis [62]

Tranches d'altitudes	Ai (Km ²)	Ai cumulées (Km ²)	Ai (%)	% Ai cumulés	% altitudes cumulées
1700 - 155	28.3	28.3	8.08	8.08	100
1550-1400	98	126.3	28	36.08	85.74
1400 -1250	134	260.3	38.28	74.36	71.45
1250 – 1100	29.6	289.9	8.45	82.81	57.16
1100 – 950	26.5	316.47	7.57	90.38	42.87
950 - 800	25.2	341.6	7.2	97.58	28.58
800 - 650	8.4	350	2.4	100	14.29

b) Oued Sebdou :

Le bassin versant occupe une superficie de 255,5 km² avec une altitude maximale de 1465 m. La longueur du thalweg principal est de 78 km. Le bassin est caractérisé par deux ensembles distincts :

- au Nord et au Nord-Ouest par un Horst,
- au Sud et à l'Est par un graben rempli de sédiments plio - quaternaires correspondant au fossé de Sebdou.

Tableau 2: Répartition hypsométrique du bassin d'oued Sebdou (haute Tafna) [62]

Tranches d'altitudes	Ai (Km ²)	Ai cumulées (Km ²)	Ai (%)	% Ai cumulés	% altitudes cumulées
1465 - 1400	1.40	1.40	0.55	0.55	100
1400-1300	13.975	15.375	5.47	6.02	91.63
1300 - 1200	31.725	47.12	12.42	18.44	78.76
1200 – 1100	52.50	99.6	20. 55	38.99	65.89
1100 – 900	70.50	170.1	27.59	66.58	53.02
900 -800	16.30	245.7	6.38	96.17	27.28
800-700	9.60	255.3	3.76	99.93	14.41
700-688	0.20	255.5	0.08	100	1.54

Les pentes au niveau du bassin sont en majorité très fortes, 49.0% de la superficie est à pente supérieure à 25%. Cette classe de pente est localisée principalement au Nord et au Sud du bassin correspondant à la zone montagneuse. Au niveau du fossé de Sebdou, les pentes s'adoucissent et oscillent entre 0 et 3% occupant 10.50% de la superficie du bassin. A partir de cette zone, les pentes augmentent pour atteindre des valeurs de 3 à 12% s'étalant sur une superficie de 31.20% du bassin et de 12 à 25% sur une superficie de 9.30% de la surface totale du bassin.

c) Oued Mouillah :

Le bassin de l'oued Mouillah occupe une superficie de 2650 km². Dont la majeure partie se trouve sur le territoire marocain couvrant la plaine de Maghnia. Le relief assez varié est constitué de zones de montagnes, de plaines et de vallées. La longueur du thalweg principal est de 124 km.

Tableau 3: Répartition hypsométrique du bassin d'oued Mouillah (moyenne Tafna) [62]

Tranches d'altitudes	Ai (Km ²)	Ai cumulées (Km ²)	Ai %	% Ai cumulés	% altitudes cumulées
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	56.7	44.98
600-400	904.00	2406.5	34.11	90.81	27.51
400-285	243.50	2650	9.16	100	10.01

d) Oued Zitoun :

La région est caractérisée par deux ensembles :

- au Nord, des affleurements miocènes au relief peu accusé et au réseau hydrographique lâche.
- au Sud, des affleurements jurassiques fortement entaillés et affectés de quelques grandes fractures

Le bassin d'oued Zitoun représente de fortes pentes à l'amont et se termine par une vallée encaissée à son point de confluence.

Tableau 4: Répartition hypsométrique du bassin versant d'Oued Zitoun (Moyenne Tafna) [62]

Tranches d'altitudes	Ai (Km ²)	Ai cumulées (Km ²)	Ai %	% Ai cumulés	% altitudes cumulées
1326 - 1300	1.05	1.05	0.75	0.75	100
1300-1200	4.05	5.10	2.90	3.651	97.75
1200 - 1100	5.30	10.40	3.79	7.44	89.25
1100 –1000	7.15	17.55	5.11	12.55	80.75
1000– 900	6.15	23.70	4.39	16.94	72.25
900 - 800	7.53	31.23	5.38	22.32	63.75
800 – 700	8.83	40.06	6.31	28.63	55.25
700-600	10.45	50.51	7.46	36.09	46.75
600 -500	16.15	66.66	11.54	47.63	38.25
500 -400	29.17	95.83	20.84	68.47	29.75
400 - 300	27.47	123.30	19.62	88.09	21.25
300-200	13.15	136.45	9.39	97.48	12.75
200 - 150	03.55	140	2.54	100	4.25

e) Oued Boumessaoud :

On y distingue trois secteurs :

- au Sud, une zone montagneuse caractérisée par les massifs calcaires et dolomitiques,
- au Nord, une dépression remplie de sédiments tertiaires et quaternaires, formant le plateau de Zenata.
- au centre, une zone intermédiaire où le relief s'accroît brusquement donnant une limite nette entre les terrains calcaréo-dolomitiques du Jurassique et les formations marneuses du Miocène.

Tableau 5 : Répartition hypsométrique du bassin versant d'Oued Boumessaoud (Moyenne Tafna) [62]

Tranches d'altitudes	Ai (Km ²)	Ai cumulées (Km ²)	Ai %	% Ai cumulés	% altitudes cumulées
1246-1200	1.725	1.725	1.46	1.46	100
1200-1100	5.125	6.85	4.34	5.8	.80
1100-1000	5.175	12.025	4.39	10.19	86.68
1000– 900	4.625	16.65	3.92	14.11	77.56
900 - 800	14.40	31.05	12.20	26.31	68.44
800 – 700	20.125	51.175	17.05	43.36	59.32

700-600	9.80	60.975	8.30	51.66	50.20
600 -500	9.325	70.3	7.90	59.56	41.04
500 -400	16.125	86.425	13.67	73.23	31.92
400 - 300	18.675	105.1	15.83	89.06	22.80
300-200	18.675	105.1	15.83	89.06	22.80
200 - 150	2.35	118	1.99	100	4.56

f) Oued Sikkak :

C'est un affluent rive gauche de l'oued Isser (lui-même affluent rive droite de la Tafna) avec lequel il conflue au Nord d'Ain Youssef, prend naissance sur le plateau de Terny au Sud de Tlemcen à la source d'Ain Rhannous. Le bassin de l'oued Sikkak comprend deux secteurs bien distincts :

- au Nord et au centre, des dépressions remplies de sédiments tertiaires et quaternaires.

La zone montagneuse comprend :

- au Sud, le plateau de Terny entouré de plusieurs massifs élevés culminant au Djebel Nador (1579m).

Tableau 6: Répartition hypsométrique du bassin versant d'Oued Sikkak (Moyenne Tafna) [62]

Tranches d'altitudes	Ai (Km ²)	Ai cumulées (Km ²)	Ai %	% Ai cumulés	% altitudes cumulées
1500-1400	7.675	7.675	1.66	1.66	100
1400 – 1300	11.750	19.425	2.54	4.2	92.62
1300 – 1200	20.95	40.375	4.52	8.72	85.24
1200 – 1100	63.25	103.625	13.66	22.38	77.86
1100 – 1000	10.75	114.375	2.32	24.7	70.48
1000 – 900	12.65	127.025	2.73	27.43	63.10
900 – 800	20.975	148	4.53	31.96	55.72
800 – 700	28	176	6.15	38.01	48.34
700 – 600	45.150	221.15	9.75	47.76	40.96
600 - 500	58.975	58.975	58.975	58.975	58.975
500 – 400	67.025	347.15	14.48	74.98	26.20
400 – 300	72.075	419.225	15.57	900.55	18.82
300 – 200	38.075	457.3	8.22	98.77	11.44
200 - 145	5.7	463	1.23	100	4.06

g) Oued Lakhder :

C'est un cours d'eau a régime permanent, il doit sa pérennité aux nombreuses sources qui l'alimentent telle que : Ain Tot Hammam, Ain Ouissert. Il se jette plus bas dans Oued Isser constituant ainsi son principal affluent Il prend sa source dans les monts de Tlemcen à environ 900 m d'altitude.

Tableau 7: Répartition hypsométrique du bassin versant d'Oued Lakhder (Moyenne Tafna)
[62]

Tranches d'altitudes	Ai (Km ²)	Ai cumulées (Km ²)	Ai %	% Ai cumulés	% altitudes cumulées
1616 -1500	2.06	2.06	0.71	0.71	100
1500 – 1400	20.41	22.47	7.06	7.77	89.62
1400 – 1300	54.35	76.82	18.81	26.58	80.64
1300 – 1200	37.49	114.31	12.98	39.56	71.66
1200 –1100	24.58	138.89	8.51	48.07	62.68
1100 – 1000	25.58	164.74	8.95	57.02	53.7
1000 – 900	23.29	188.03	8.06	65.08	44.72
900 –800	31.82	219.85	11.01	76.09	35.74
800 – 700	38.84	258.69	13.44	89.53	26.76
700 -600	26.26	284.95	9.09	98.62	17.78
600 –502	3.96	288.91	1.37	100	8.80

h) Oued Isser:

Son bassin versant à une superficie de 1140 km² avec une altitude maximale de 1625 m de la longueur du talweg principal est de 81 km. Cet oued prend sa source au niveau d'Ain Isser au sud d'Ouled el Mimoun. Sa confluence avec l'Oued Tafna a lieu dans la plaine de Remchi à 80 m d'altitude. Au nord-ouest du bassin les pentes s'accroissent (15-30%).

Le bassin versant de l'oued Isser est caractérisé par deux zones :

- Au sud une zone montagneuse a forte pente.
- Au nord une zone de colline a pente douce

Au sud du bassin les pentes sont très fortes elles dépassent les 30% ; cette classe de pente est la plus fréquente au niveau du bassin versant de la Tafna., elle occupe une superficie de 365 km² La zone médiane correspond aux plaines et plateaux où les pentes sont douces (10%).

Tableau 8: Répartition hypsométrique du bassin d'oued Isser [62]

Tranches d'altitudes	Ai (Km ²)	Ai cumulées (Km ²)	Ai %	% Ai cumulés	% altitudes cumulée
1652-1200	203.68	203.68	17.87	17.87	100
1200 - 1000	182.45	386.13	16.00	33.87	68.50
1000 – 800	176.07	562.6	15.45	49.32	53.69
800 – 600	279.8	842	24.55	73.87	38.88
600-400	257.8	1099.16	22.56	96.43	24.07
400-285	40.58	1137.74	3.656	100	9.26

i) Oued Boukiou:

Le bassin versant de Boukiou présente une pente assez forte en descendant du Djebel Fillaoucène.

Tableau 9 : Répartition hypsométrique du bassin d'oued Boukiou [62]

Tranches d'altitudes	Ai (Km ²)	Ai cumulées (Km ²)	Ai %	% Ai cumulés	% altitudes cumulées
1338 - 1100	0.3	0.3	0.26	0.26	100
1100-100	4.0.725	1.025	0.62	0.88	96.3
1000– 900	0.875	1.6	0.49	1.37	86.67
900 - 800	1.05	2.65	0.90	2.27	77.04
800 – 700	2.375	5.025	2.02	4.29	67.41
700-600	6.225	11.25	5.31	9.6	57.78
600 -500	15.65	26.9	13.34	22.94	48.15
500 -400	20.325	47.225	17.33	40.27	38.52
400 - 300	24.45	71.675	20.84	61.11	28.89
300-200	33.47	105.15	28.54	89.65	19.26
200 - 100	12.14	117.3	10.36	100	9.63

5. HYDROGRAPHIE :

L'extrême Ouest du bassin se situe dans le territoire Algérien. Le cours d'eau de cet oued est divisé en trois (03) parties :

- La haute Tafna
- La moyenne Tafna
- La basse Tafna

5.1. Haute Tafna :

L'oued prend naissance dans les Ouled Ouriach et se dessine après la jonction d'un grand nombre de ramifications creusées dans les terrains Jurassiques et descendant de crêtes atteignant les 1500m ou ils se réunissent aux environs de Sebdou à une altitude de 900 m . A partir de là et jusqu'à Sidi Mdjahed, l'oued suit un cours dans une vallée encaissée, creusée dans les terrains Jurassiques.

5.2. Moyenne Tafna :

En partant de Sidi Mdjahed, l'oued pénètre dans le bassin tertiaire et coule dans une vallée peu profonde dans des terrains plus au moins argileux. La Tafna suit une direction Nord-Sud jusqu'à Bled chaaba, puis se dirige vers le Nord – Est. Cette partie du bassin qui forme le tertiaire sillonnée par plusieurs affluents.

Notant que sur la rive gauche, les affluents sont moins importants que sur la rive droite. Seul l'oued Mouileh, qui prend naissance au Maroc.

Entre Bled chaaba et les gorges de Lahouret, la Tafna reçoit de nombreux affluents qui prennent naissance dans les Traras. Nous citerons l'oued El Malha, l'oued Dick Chetibia, l'oued El Habalat, l'oued Boukiou et l'oued Dahmane.

Concernant la rive droite, la Tafna reçoit les oueds Ksob, Siouf El Nirouf, Roumana, Zitoun et l'oued Isser qui est l'un des plus importants affluents.

L'oued Isser prend naissance dans les terrains jurassiques sur les territoires de Beni Smiel et s'étend vers l'Est de la haute Tafna. Celui-ci suit une direction Nord-Sud et grossi, au Nord de Ouled Mimmoune, par l'oued Chouly (rive gauche) et l'oued de Ain Tallout (rive droite). A l'extrémité occidentale de cette plaine il reçoit sur la gauche un cours d'eau assez important, l'oued Sikkak qui descend du massif de la haute Tafna sous le nom de l'oued Meffrouche et pénètre dans le bassin tertiaire sous le nom de l'oued Saf-Saf.

5.3. Basse Tafna :

Le cours d'eau s'étend des gorges de Lahouret jusqu'à la mer, sur une longueur de 20 km. Il reçoit des affluents beaucoup moins importants, de direction Est-ouest qui sont l'oued Lemba et l'oued Fed El Atouch sur la rive droite et l'oued Ben-Djelloul sur la rive gauche.

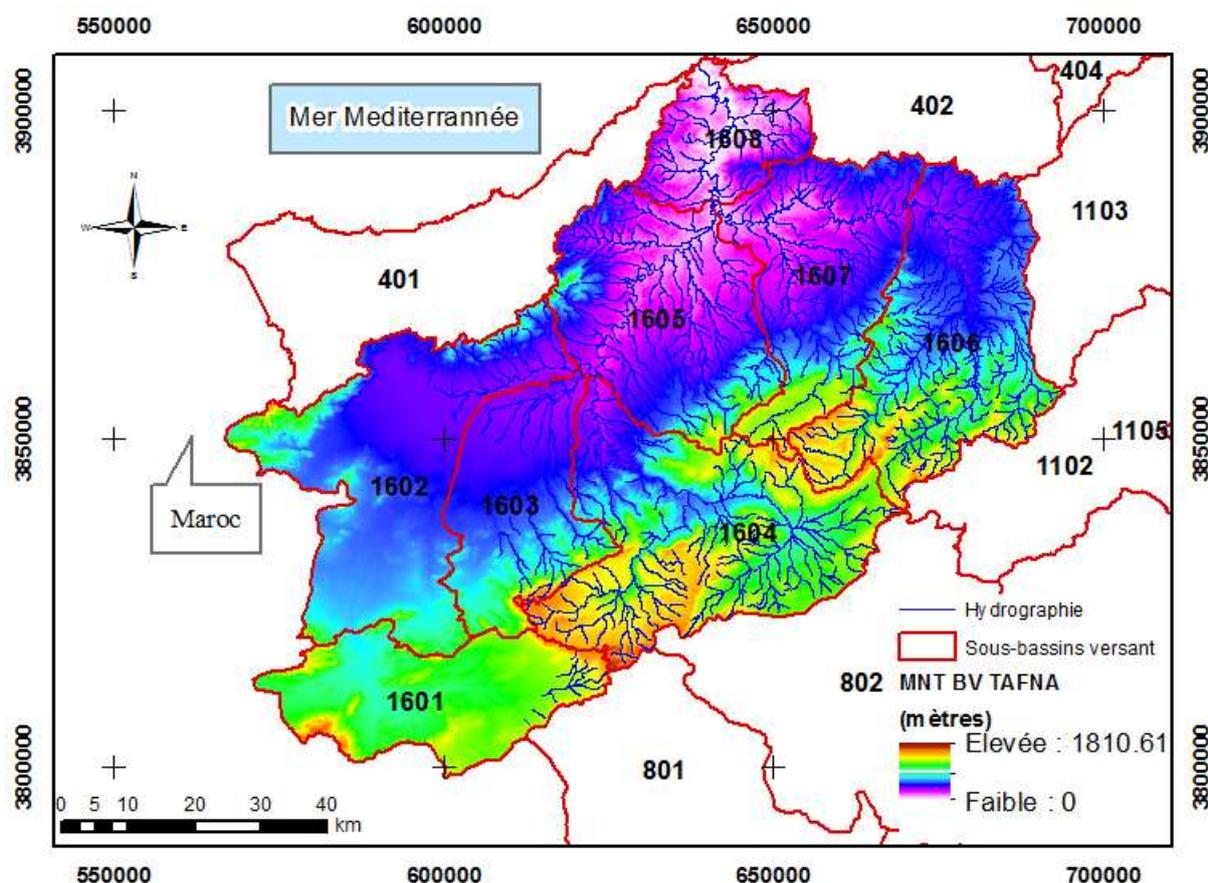


Figure 3 : Réseau hydrographique du bassin versant de la Tafna [62].

6. GEOLOGIE DU BASSIN DE LA TAFNA :

La géologie d'un bassin versant a une influence directe dans l'étude hydrologique d'un bassin versant notamment sur la répartition des écoulements superficiels. En effet, une formation de matériaux très perméables avec une couverture végétale continue engendre une densité de drainage faible assurant une meilleure infiltration des eaux superficielles. Par ailleurs, une formation de roches imperméables mais meubles et érodables, comme des marnes et des argiles, avec une végétation moyenne, présente souvent une densité de drainage élevée, ce qui favorise un ruissellement des eaux superficielles aux dépend de l'infiltration. Le bassin versant de la

Tafna est caractérisé par une géologie complexe et diversifiée. L'évolution des terrains au niveau de ce dernier va du primaire au plio-quadernaire.

Nous distinguons :

La partie sud du bassin est constituée des monts de Tlemcen qui sont formées par des affleurements calcaires très Karstifiés. Ceci favorise l'infiltration des précipitations intense ou l'eau ressort par des résurgences situées sur les pourtours.

La partie orientale est formée par des argiles dont les affleurements sont apparents dans le noyau de l'anticlinal érodé de la haut Isser.

Au nord, les dépôts alluvionnaires constitués de marnes sableuses ou d'argile peu perméables ou les chenaux, ces sédimentations ont donné des conglomérats très rocheux, présentant les principaux aquifères actuellement exploités (nappe de Maghnia et Hennaya).

A l'échelle régionale, le bassin présente un pendage d'ensemble faible vers l'Est. Tout le long de la frontière marocaine, les grés affleurent en couches ayant un pendage Est, et les écoulements souterrains se font comme les écoulements superficiels, vers la vallée de la Tafna.

6.1. Le primaire :

Il affleure dans la région des Traras, il est caractérisé par des dépôts d'argiles et des sables siliceux. Ces sédiments ont donnés des schistes et des quartzites puissants qui ont été fortement modifiés par des masses granitiques (granite de Nedrouma) .Ces dépôts primaires ont subi des plissements intenses, qui ont donnés lieu à l'enchaînement du massif Tellien des Traras.

6.2. Le secondaire :

Il est représenté par le jurassique supérieur. On reconnaît les grés de boumedienne. Il s'agit de grés blanc a ciment calcaire et dolomitique. Se presente en bancs massifs entrecoupés par de nombreux passes marneux .cette formation présente de grandes surfaces d'affleurements. Dont les plus importantes sont celle du ; plateau de Terny et l'anticlinale de l'Ouled Mimoun. Notant aussi les calcaires de Zarifet bien exposé dans la région de Tlemcen cette formation se trouve à la base de successions carbonatées du jurassique supérieur. Il s'agit de calcaire bleus a géoïde dont les bancs occupent une position intermédiaire entre les dcgrés de Boumediene et les dolomies de Tlemcen.

6.3. le tertiaire :

6.3.1 L'éocène :

La formation affleure en très faible surface au niveau de Ain Berkouk ; c'est un ensemble gréseux avec passage de bancs de Poudingues ; dans la vallée de oued Isser près de la confluence avec oued Tafna, le massif de Sbaa - chioukh est constitue de grés siliceux, jaune a rougeâtre, assez friable a ciment argileux alternant avec des marnes argileuses verdâtres.

6.3.2 Le Miocène :

Le miocène inférieur (burdigalien) : il débute par un niveau de poudingue très dure a blocs bien roulés hétérométriques et polygéniques, formé par des éléments calcaires, dolomitiques à ciment calcaire- gréseux très résistant. La partie supérieur est constituée par des argiles marneux de teinte verdâtre au sein des quelle s'intercalent des bancs décimétriques des grés ferrugineux friables.

6.4 Le plio quaternaire :

Représenté par des sédiments continentaux d'âge comparable et de nature variable. Il s'agit d'une série complexe de dépôts discontinus formé d'éléments hétérométriques et hétérogène. On y rencontre les faciès suivants :

- Les travertins villafranchien : situés en bordure des monts de Tlemcen, ils sont représentés par des travertins fortement consolidés et calcaire lacustres.
- Le complexe de sédiment plio-villafranchien : la bordure des massifs secondaires est soulignée par des éboulis de piémont plus ou moins écaillés et remaniés d'épaisseur très variables mais toujours assez faible
- Des marnes rouges avec peu ou pas de galets, plus ou moins tufeuses, parfois très épaisses surtout au niveau du bassin de l'oued Abbés.
- Des anciennes alluvions allant des marnes alluvionnaires verdâtres aux galets en passant par les limons et les graviers.
- Les limons, sables et graviers récents qui s'étendent entre Oued Mihaguène et chaabat El Arnab au nord-est des frontières Algero-Marocaine. Les limons sont jaunes en général avec des couches rougeâtres. Les galets se trouvent surtout en lits à la base des limons.

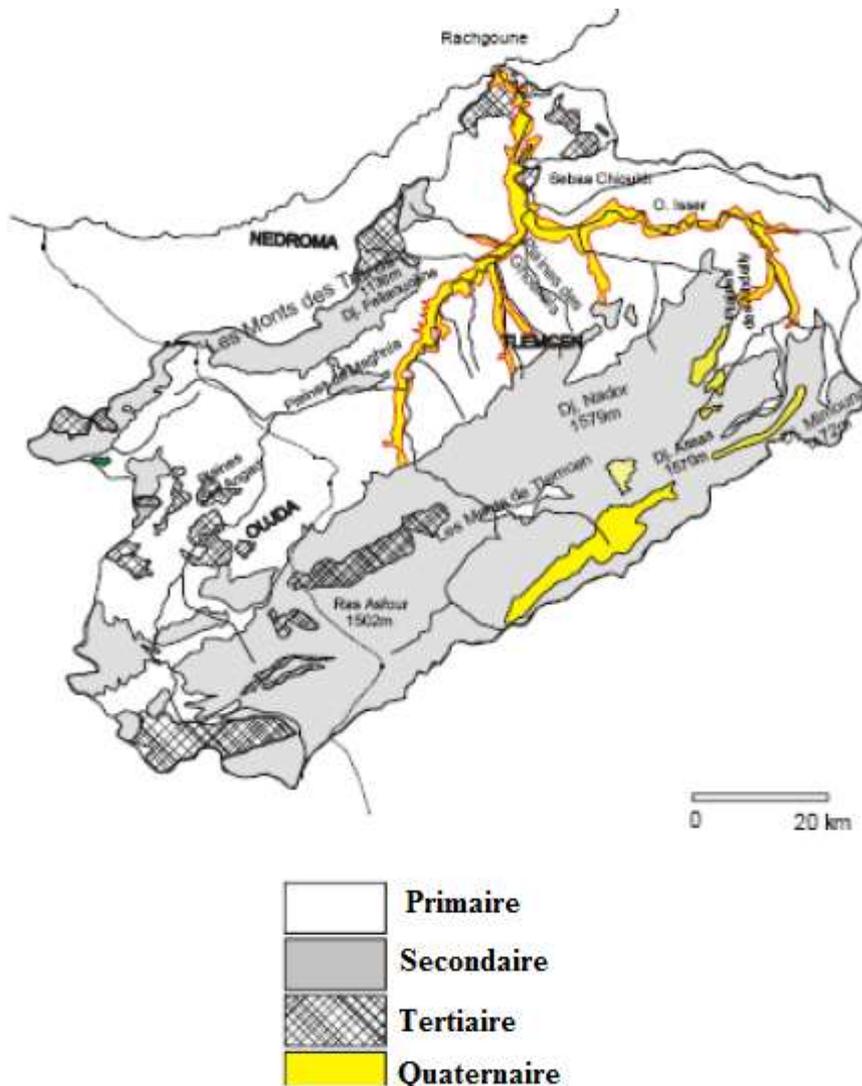


Figure 4 : Cadre géologique du bassin versant de la Tafna [62]

7. HYDRO-CLIMATOLOGIE :

Toute étude hydrogéologique passe principalement par un traitement détaillé des mesures hydroclimatique permettant d'établir le bilan hydrique et par conséquent de comprendre les mécanismes d'alimentation et circulation des eaux de surfaces et souterraines. Ayant déterminé les caractéristiques du complexe physique du bassin versant de la Tafna, nous essayons d'étudier les facteurs climatiques de cette région. De ce fait, l'analyse des facteurs climatiques s'impose. Elle permet de mettre à jour les facteurs les plus importants qui régissent le climat.

7.1. Caractéristiques hydrologiques :

7.1.1 Précipitation :

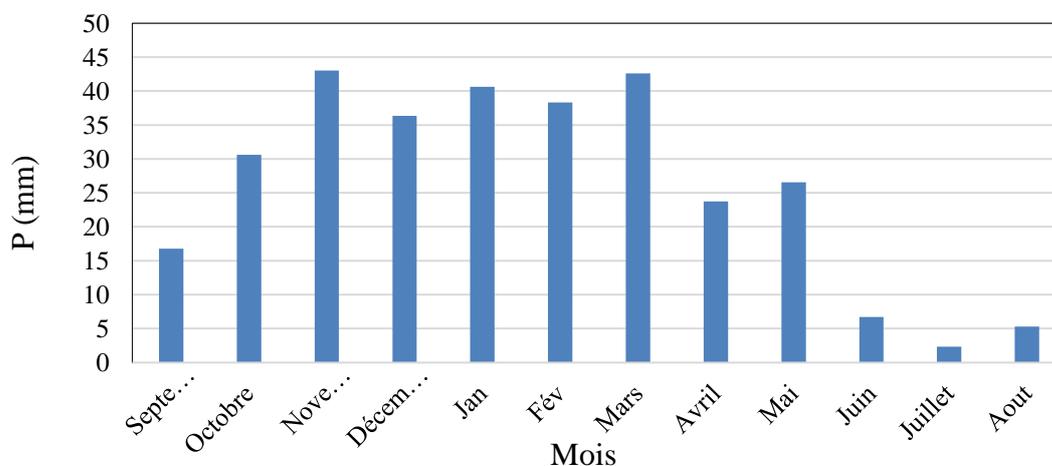
Les précipitations constituent une composante essentielle du cycle de l'eau. Elles permettent le renouvellement total ou partiel des nappes par le biais des infiltrations et elles conditionnent l'écoulement saisonnier et le régime des cours d'eaux.

Tableau 10 : Précipitation moyennes mensuelles de l'Oued Sebdou (1970-2011).

Mois	Sép	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev
P (mm)	16.77	30.62	43.05	36.33	40.65	38.32
Mois	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou
P (mm)	42.62	23.73	26.54	6.71	2.32	5.30

Tableau 11 : Précipitation moyennes mensuelles de l'Oued Mouillah (1970-2011).

Mois	Sép	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev
P (mm)	15.7	26.8	45.2	40.8	41.5	38.7
Mois	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou
P (mm)	36.4	28.7	27	5	2.33	3.7



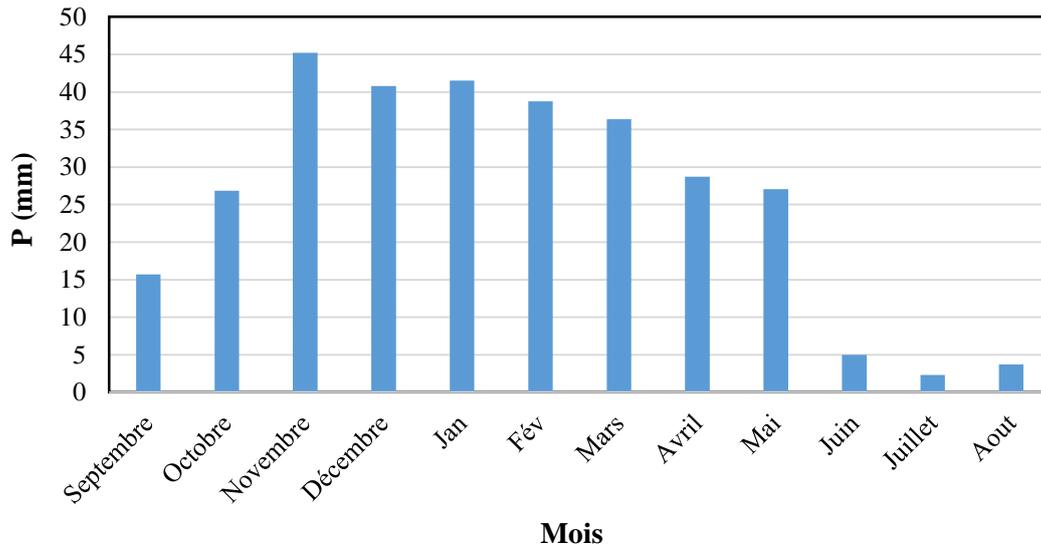


Figure 5 : Variations des précipitations moyennes mensuelles à Oued Sebdu et Oued Mouillah (1970-2011).

7.1.2 Température :

Les températures ont une grande influence sur l'écoulement ainsi que les données relatives à l'évaporation favorisant le déficit d'écoulement.

Tableau 12 : Températures moyennes mensuelles d'Oued Sebdu (1970-2011).

Mois	Sép	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev
T (°C)	21.97	18.15	12.76	10.03	9.38	10.22
Mois	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Août
T (°C)	12.83	14.27	18.85	22.7	25.63	26.05

Selon le tableau 12, on remarque le mois le plus froid est celui de janvier avec une température moyenne de l'ordre de 9.38 °C, et le mois le plus chaud est celui d'Août avec une température moyenne de 26.05 °C.

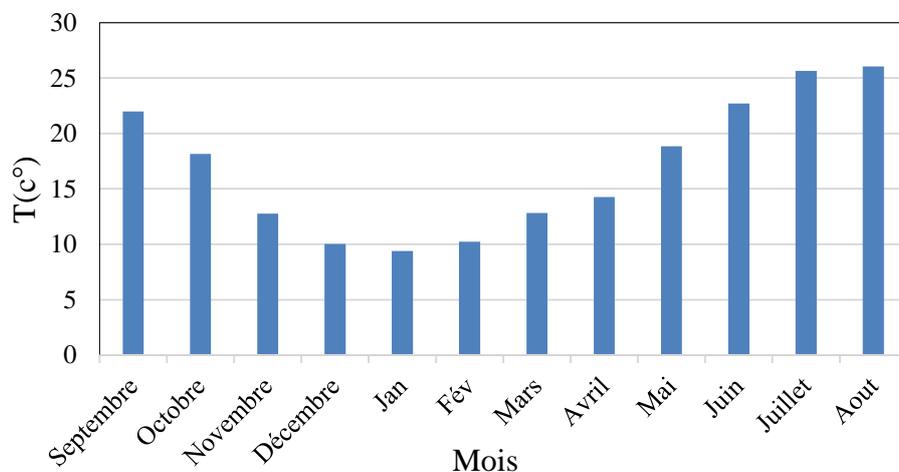


Figure 6 : Variations des températures moyennes mensuelles d'Oued Sebdu (1970-2011)

Tableau 12 : Températures moyennes mensuelles d'Oued Mouillah (1970-2011).

Mois	Sép	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev
T (°C)	22.6	17.9	12.4	9.6	8.4	9.7
Mois	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou
T (°C)	12	14	17.4	22.8	26.3	26.5

Selon le tableau 12, on remarque le mois le plus froid est celui de janvier avec une température moyenne de l'ordre de 8.4 °C, et le mois le plus chaud est celui d'Août avec une température moyenne de 26.5 °C.

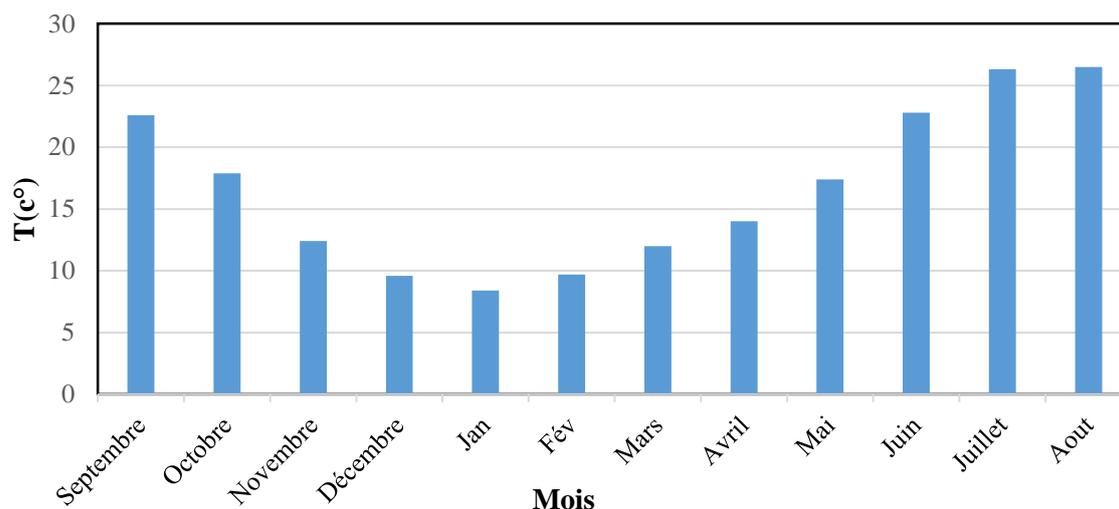


Figure 7 : Variations des températures moyennes mensuelles d'Oued Mouillah (1970-2011)

7.1.3 Climat :

Joue un rôle capital dans le fonctionnement hydrologique du bassin versant. En plus des paramètres morphogéniques de la connaissance des facteurs hydro climatologiques s'avère indispensable pour mieux comprendre les phénomènes d'écoulement superficiel et par là, le rôle régulateur du bassin versant des divers éléments du bilan hydrologique.

- **L'indice d'aridité annuelle :**

Pour déterminer le type du climat utilisant l'indice d'aridité " I " de Demartone qui donne les caractéristiques du climat régional.

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

Avec :

P : Précipitation moyenne annuelle en mm;

T : Température moyenne annuelle (C°). (T = 16.90 °C).

I : Indice d'aridité annuelle.

Selon Demartonne :

I < 5 : le climat est hyper-aride.

5 < I < 7.5 : le climat est désertique.

7.5 < I < 10 : le climat est steppique.

10 < I < 20 : le climat est semi-aride.

20 < I < 30 : le climat est tempéré.

I > 30 : le climat est humide.

La valeur obtenue pour le paramètre I est de 11.63 et 11.56 pour les deux sous bassin ce qui implique que le climat de la région est classé en régime semi-aride avec écoulement temporaire.

• **L'indice d'aridité mensuel :**

L'indice mensuel (i), donné par la formule :

$$i = \frac{12P}{T + 10}$$

Avec :

P : Précipitation moyenne mensuel (mm).

T : Température moyenne mensuel (C°).

i : Indice d'aridité mensuel.

Tableau 13 : Indice mensuel d'aridité à Oued Sebdou

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév
T (°C)	21.97	18.15	12.76	10.03	9.38	10.22
P (mm)	16.77	30.62	43.05	36.33	40.65	38.32
I	6.29	2.02	22.70	21.76	25.17	22.74
Mois	Mars	Avril	Mai	Juin	Juit	Aout
T (°C)	12.83	14.27	18.85	22.7	25.63	26.05
P (mm)	42.62	23.73	26.54	6.71	2.32	5.30
I	22.40	11.73	11.04	2.46	0.78	1.76

Le tableau 13 et 14 montre une répartition mensuelle du climat.

- Le mois de septembre présente un climat désertique.
- Les mois de Juin, Juillet, Août, et octobre présentent un climat hyper-aride.
- Les mois avril et mai jouissent d'un climat semi-aride.
- Les mois de Novembre, Décembre, Janvier, Février, et Mars présentent un climat tempéré.

Tableau 14 : Indice mensuel d'aridité à d'Oued Mouillah.

Mois	Sép	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev
T (°C)	22.6	17.9	12.4	9.6	8.4	9.7
P (mm)	15.7	26.8	45.2	40.8	41.5	38.7
i	5.77	11.53	24.21	24.96	27.06	23.6
Mois	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou
T (°C)	12	14	17.4	22.8	26.3	26.5
P (mm)	36.4	28.7	27	5	2.33	3.7
i	19.83	14.34	11.84	1.82	0.75	1.21

7.1.4 Diagramme Ombrothermique :

Le Diagramme Ombrothermique est la combinaison des températures et des précipitations mensuelles moyennes

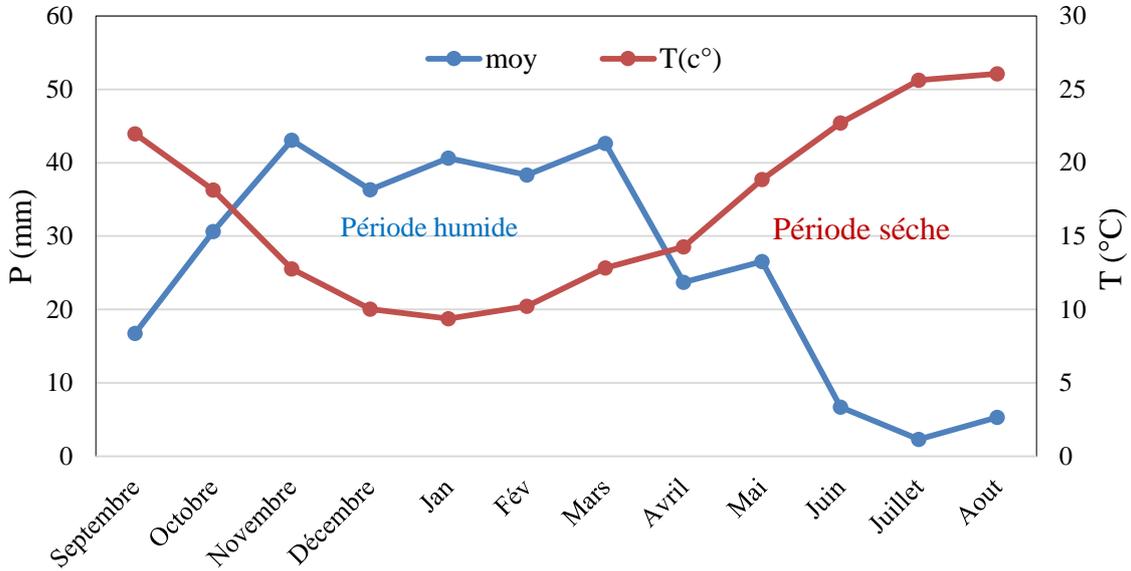


Figure 8 : Diagramme Ombrothermique à Oued Sebdou (1970-2011).

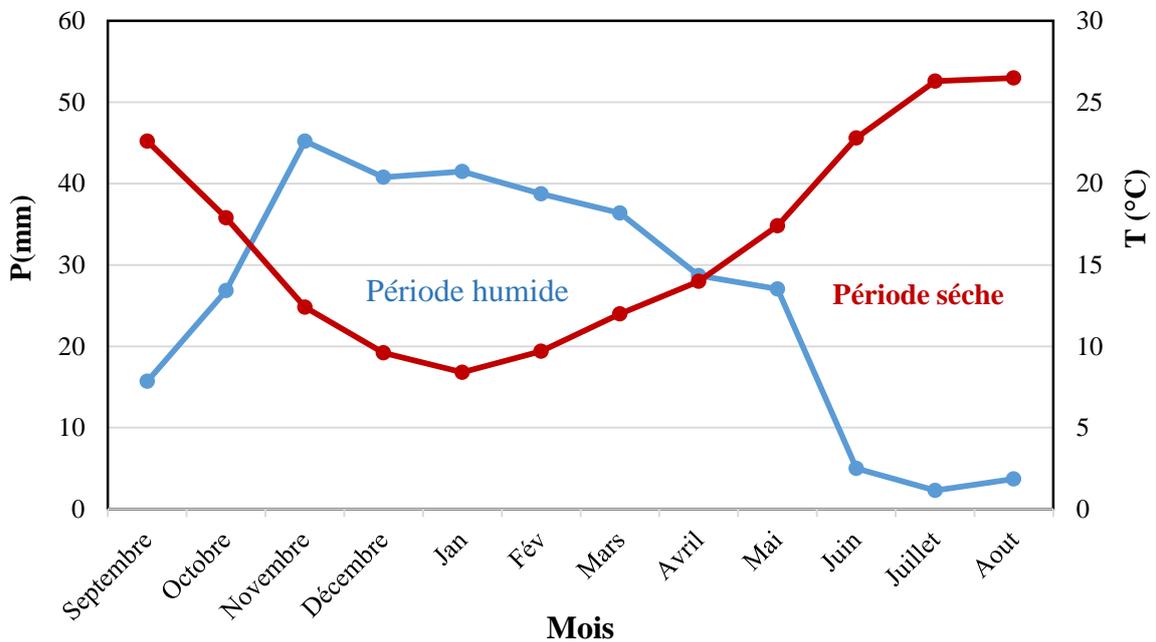


Figure 9 : Diagramme Ombrothermique à Oued Mouillah (1970-2011).

Les deux diagrammes illustrés dans la figure 8 et 9 fait ressortir deux périodes :

- Une période sèche qui s'étend entre le mois de Mai jusqu'au mois d'Octobre.
- Une période humide qui dure six mois donc du mois de Novembre jusqu'au mois de Avril.

CHAPITRE 3 :

Etude de la variabilité et de l'évolution de la
pluviométrie

1. INTRODUCTION

Le domaine de l'eau est le premier à subir les impacts du changement climatique. Le paramètre qui semble plus jouer un rôle important concernant le volet offre est la modification des précipitations. La température semblerait plus influencer la demande.

Les ressources en eau sont de première importance et leurs demandes à l'avenir augmentent de façon constante. Les changements climatiques et l'utilisation des terres peuvent causer des effets de réduction des précipitations dans de nombreux pays tels que l'Algérie. La demande de l'eau supplémentaire due à l'augmentation de la population peut aggraver le problème. Pour ces raisons, la connaissance de la tendance du changement (que ce soit de manière croissante ou décroissante) est primordiale pour toute gestion et planification des ressources en eau pour soutenir les possibilités d'échanges d'eau et d'aliment dans un contexte de développement durable d'une société.

Les éléments les plus importants dans une série de précipitation temporelle sont les variations saisonnières et systématiques à l'écart de la composante stochastique. La saisonnalité est une composante beaucoup plus connue selon l'emplacement de la zone d'étude et les caractéristiques climatologiques, mais la composante tendancielle à besoin de soins supplémentaires pour son identification [63]. Durant les trois dernières décennies, le nombre de recherche sur les tendances dans la littérature est de plus en plus élevé. La plupart des œuvres sont basées sur l'approche de Mann-Kendal [64, 65] pour l'identification des tendances et sa détermination.

[66] a déclaré qu'en raison de l'impact des changements climatiques, l'identification, la détection et l'évaluation des tendances sont devenus des sujets importants dans les différentes disciplines. Les chercheurs de diverses disciplines ont obtenu des informations importantes sur la détection, l'identification et les questions d'évaluation des tendances [67-72].

Dans un contexte de paramètres climatiques modifiés il apparaît nécessaire d'étudier la variabilité spatio-temporelle de la pluviométrie et de quantifier les changements observés. Le but de ce chapitre est de détecter les tendances de la pluviométrie au niveau mensuel, saisonnier et annuel. L'étude de la géographie précise des changements, tels que la frontière de l'augmentation ou de la diminution des précipitations est très importante. L'élaboration de cartes aiderait à donner un aperçu spatial de ce changement.

2. ETUDE DE LA TENDANCE PAR LE TEST DE MANN-KENDALL

Le test de Mann-Kendall [66, 69] permet de tester la stabilité de la moyenne et de la variance des séries d'indices climatiques sur une période donnée. Ainsi, ce test non paramétrique est utilisé pour détecter d'éventuelles tendances dans les séries d'indices climatiques. Il s'agit d'une procédure dans laquelle on compare chaque indice de la série de base avec les indices précédents. Soit (x_1, \dots, x_n) un échantillon de valeurs indépendantes issu d'une variable aléatoire x dont on cherche à évaluer la stationnarité. L'hypothèse nulle H_0 est l'hypothèse de stationnarité de la série (absence de tendance). L'hypothèse alternative H_1 correspond au non stationnarité de la série. La statistique de Mann-Kendall est définie comme suit :

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(x_i - x_j) \quad (1)$$

$$\text{sign}(x_i - x_j) = \begin{cases} 1 & \text{if } (x_i - x_j) > 0 \\ 0 & \text{if } (x_i - x_j) = 0 \\ -1 & \text{if } (x_i - x_j) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

Où x_i et x_j sont les valeurs séquentielles des données et n la longueur de l'ensemble des données. La statistique du test est calculée en dénombrant, pour tous les couples (x_i, x_j) $i < j$, le nombre de cas où la seconde valeur est supérieure à la première et le nombre de cas où la seconde est inférieure, puis en faisant la différence entre ces deux quantités.

La présence d'une tendance statistiquement significative est évaluée en utilisant la valeur de Z :

$$Z_{MK} = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

En présence de valeurs identiques dans la série, la variance de S peut être définie comme suit :

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18} \quad (4)$$

Où t_i désigne le nombre d'égalités impliquant k valeurs. Une valeur positive (négative) de Z indique une tendance ascendante (descendante) et sa significativité est comparée à la valeur critique α ou seuil de significativité de 5%.

À ce niveau, une tendance positive est significative lorsque la valeur $Z > +1.96$, et une tendance négative est significative lorsque sa valeur $p < -1.96$ [70].

2.1. Estimation de l'ampleur du changement (Sen's slope estimator) :

L'ampleur de la tendance est estimée à l'aide d'un estimateur de pente basé sur la médiane non paramétrique proposé par [85]. La pente de Sen est donnée par l'expression suivante [71] :

$$\beta = \text{median} \left(\frac{x_j - x_k}{j - k} \right) \quad (5)$$

Où β est la pente entre les points de données x_j et x_k mesuré au temps j et i respectivement. Pour évaluer la signification statistique des tendances citées auparavant, le test de Mann Kendall a été appliqué avec un niveau de confiance de 95 %.

3. ANALYSE DE LA PLUVIOMETRIE :

3.1 Analyse statistique des données pluviométriques :

Les données pluviométriques ont été mises à notre disposition par l'Agence Nationale des Ressources Hydraulique (A.N.R.H). Ces données sont disponibles pour 11 stations pluviométriques qui représentent des totaux pluviométriques mensuels dans notre bassin versant.

La localisation géographique de toutes les stations pluviométriques est présentée sur une carte à partir de leurs coordonnées Lambert (figure 10).

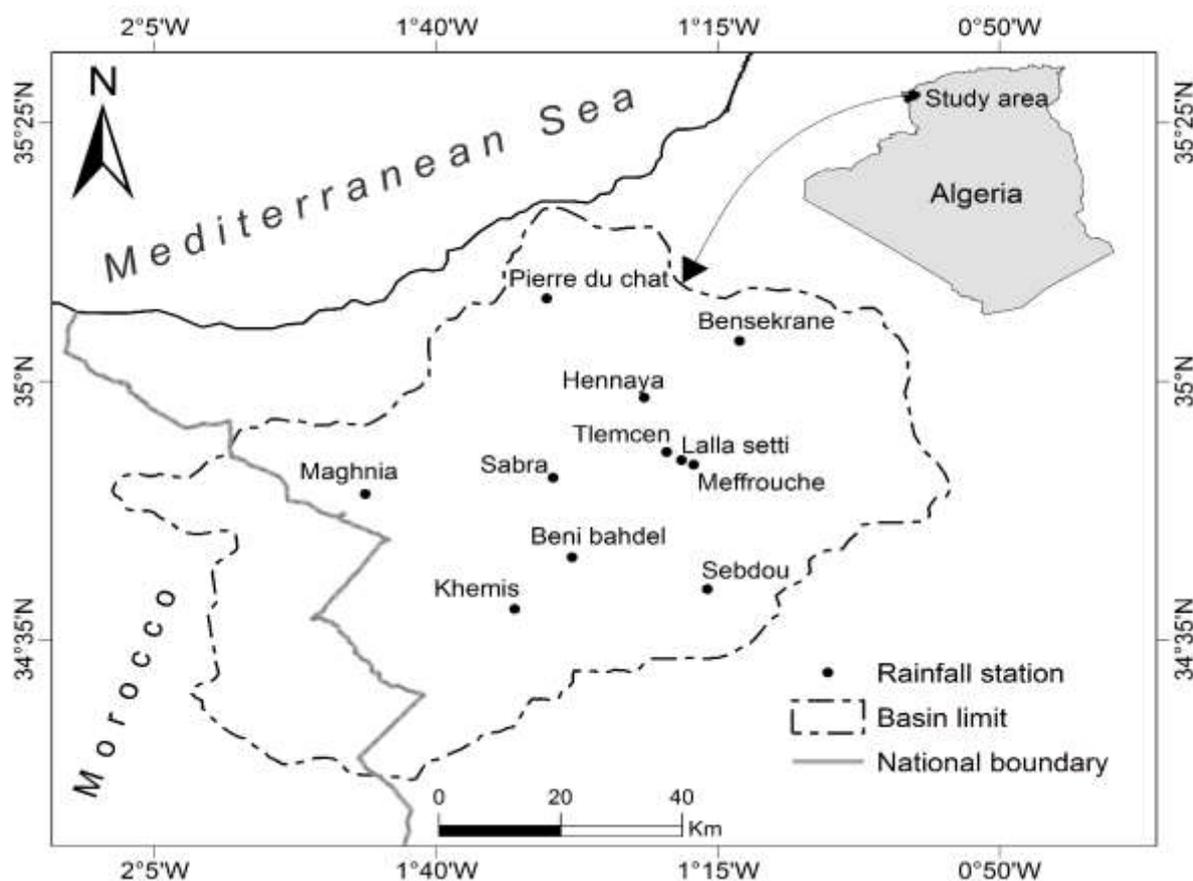


Figure 10 : Localisation des stations pluviométriques dans le bassin de la Tafna

3.2. Caractéristiques des postes pluviométriques :

Les caractéristiques des stations pluviométriques étudiées sont empilées dans le tableau 15. Ces stations présentent une longue période d'enregistrement de données allant de 1970 à 2011.

Pour le traitement de ces données pluviométriques, nous avons choisi de travailler à différents pas de temps pour aboutir à une comparaison aux échelles mensuels, saisonnière et annuels.

Tableau 15 : Caractéristiques des stations pluviométriques

Nom de la Station	Code de la station	Longitude	Latitude	Altitude
Beni behdel	16 04 03	34°42'	01°29'	666
Bensekrane	16 07 02	35°04'	01°13'	247
Meffrouche	16 07 01	34°51'	01°17'	1110
Maghnia	16 03 02	34°48'	01°48'	435
Lalla Setti	16 07 05	34°51'	01°19'	1007
Tlemcen	16 07 24	34°52'	01°19'	810
Sebdou	16 04 01	34°38'	01°19'	875
Hennaya	16 05 16	34°55'	01°23'	515
Sabra	16 05 02	34°49'	01°32'	608
Pierre du chat	16 08 02	35°08'	01°26'	60
Khemis	16 04 06	34°38'	01°33'	1000

Pour le traitement de ces données pluviométriques, nous avons choisi de travailler à différents pas de temps pour aboutir à une comparaison aux échelles mensuels, saisonnière et annuels.

3.3. Etude de la tendance mensuelle

Nous avons appliqué le test de Kendall sur les données de la pluviométrie mensuelle pour chaque station et chaque mois. Nous avons calculé le S de Kendall et la valeur du Z . Nous avons déterminé les cas où l'hypothèse H_0 peut être rejetée (valeurs de la statistique du test appartient à la région critique). Ces cas dévoilent l'existence de tendance positive ou négative selon le signe du S . Le Tableau 16 indique le signe de la tendance des stations pour chaque mois.

Tableau 16. Valeurs Z (direction) selon le test de Mann – Kendall pour la période (1970–2011)

Stations	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Dec
Lalla Setti	0.84	0.26	-0.88	1.63	0.82	0.06	0.57	2.29	2.08	3.04	1.24	-0.91
Bensekrane	0.81	0.50	-0.85	1.08	-0.28	-0.21	0.43	1.58	1.94	2.73	0.67	-0.98
Hannaya	1.27	-1.05	-0.56	0.67	-0.48	0.48	0.79	-1.21	1.36	2.53	1.27	-0.67
Khemis	0.37	0.06	-0.29	1.27	0.96	0.29	0.81	0.53	2.93	2.59	0.11	-0.48
Beni Bahdel	0.71	-0.91	-0.29	0.90	-0.05	0.74	1.02	0.36	2.19	1.92	0.19	-0.71
Maghnia	-0.26	0.96	0.22	-0.56	1.32	0.00	-1.70	0.22	1.16	0.00	0.60	-0.39
Pierre du chat	0.20	0.11	-2.24	0.35	-1.76	-1.71	-1.66	0.76	1.32	0.00	1.45	-0.38
Meffrouche	0.99	0.02	-0.15	1.10	0.23	0.03	0.31	1.55	1.63	1.77	0.08	-0.88
Sabra	-0.27	0.04	-2.62	-0.93	-0.15	-1.64	-1.52	0.00	1.61	1.26	1.50	0.96
Sebdou	0.39	0.00	-0.71	0.88	-0.51	-0.03	0.14	1.71	2.56	2.17	-0.64	-1.53

Explications : les valeurs de Z en gras indiquent une **tendance significative**.

Tableau 17. Valeurs *S* (Ampleur de la tendance) selon le test de Mann – Kendall pour la période (1970–2011)

Stations	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Dec
Lalla Setti	0.42	0.13	-0.48	0.80	0.26	0.00	0.00	0.18	0.65	1.53	0.70	-0.43
Bensekrane	0.44	0.31	-0.27	0.48	-0.08	0.00	0.00	0.01	0.46	0.96	0.27	-0.46
Hannaya	0.51	-0.60	-0.33	0.38	-0.22	0.01	0.00	-0.02	0.39	1.24	0.74	-0.36
Khemis	0.18	0.06	-0.17	0.66	0.32	0.00	0.00	0.00	0.63	1.12	0.08	-0.19
Beni Bahdel	0.39	-0.53	-0.16	0.52	-0.02	0.02	0.00	0.00	0.77	1.01	0.15	-0.34
Maghnia	-0.06	0.65	0.11	-0.14	0.40	0.00	-1.74	1.52	0.00	2.66	0.15	-0.66
Pierre du chot	0.15	0.00	-0.43	0.21	-0.71	-0.70	-0.33	0.20	0.11	0.22	0.48	0.03
Meffrouche	0.62	0.00	-0.12	0.59	0.10	0.00	0.00	0.02	0.42	0.81	0.07	-0.07
Sabra	-0.07	0.00	-0.68	-0.19	-0.03	0.00	0.00	0.00	0.20	0.33	0.45	0.19
Sebdou	0.21	0.01	-0.40	0.27	-0.13	0.00	0.00	0.20	0.68	1.12	-0.34	-0.70

Les résultats du test de Mann-Kendall des précipitations mensuelles au cours de la période 1970-2011 sont présentés dans le tableau 16. À partir du tableau 16, il a été observé que les précipitations mensuelles de certains mois montraient une tendance à la hausse tandis qu'une tendance à la baisse de certains autres mois. La tendance à la hausse a été observée au cours des mois d'août, septembre, octobre et novembre, tandis que la tendance à la baisse a été observée en mars, avril, juin et décembre, ce qui est similaire aux résultats de Zeroual et al. [73] La tendance significative a été observée lorsque la valeur statistique *Z* calculée est supérieure à la valeur *Z* correspondant au niveau de signification de 5 % ($Z > |1.96|$) et si la valeur statistique *Z* calculée est inférieure à la valeur *Z* correspondant au niveau de signification de 5% ($Z < -1.96$), alors il n'y avait pas de tendance significative. En conséquence, une tendance à la baisse significative a été observée en mars pour 02 stations pluviométriques.

Pour obtenir une image plus claire, nous avons compté les stations ayant la même tendance pour chaque mois comme le montre le Tableau 18 et la Figure 11.

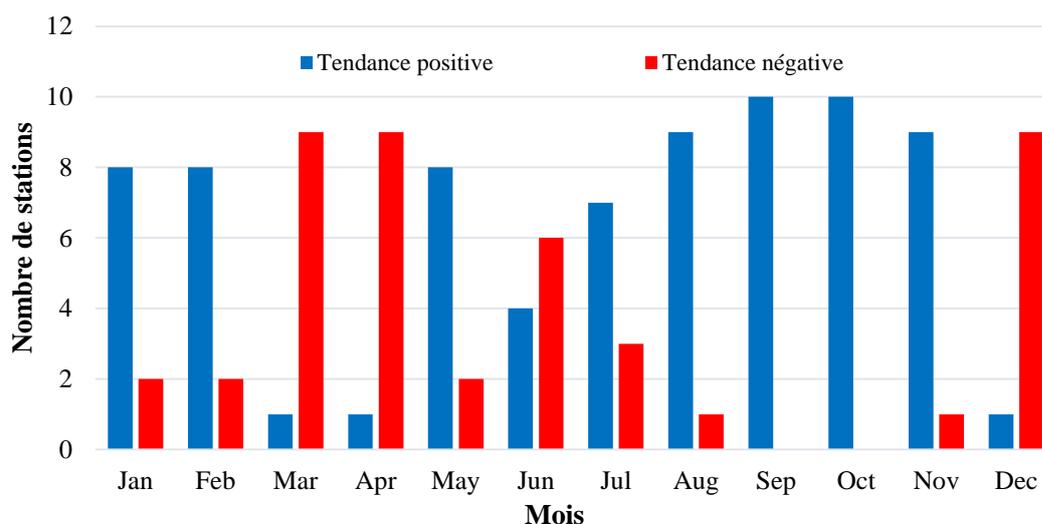


Figure 11 : Nombre de stations pour chaque type de tendance mensuelle

L'examen du Tableau 11 met en exergue les mois de mars, avril et décembre où la plus part des tendances sont décroissantes. Cela montre que les mois de mars, avril et décembre sont le mois le plus touché par les changements climatiques. Le mois de juin présente aussi la même tendance pour un nombre de stations non négligeable. Par contre la tendance des mois d'aout, septembre, octobre et novembre sont majoritairement croissante. Pour avoir une vision plus claire, nous avons dénombré les stations ayant la même tendance pour chaque mois (Figure 22).

Tableau 18 : Nombre et pourcentage des stations et pour chaque type de tendance mensuelle

	Nombre de stations											
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Tendance positive	8	8	1	1	8	4	7	9	10	10	9	1
Tendance négative	2	2	9	9	2	6	3	1	0	0	1	9
Pourcentages d'occurrence de tendance												
Tendance positive	80	80	10	10	80	40	70	90	100	100	90	10
Tendance négative	20	20	90	90	20	60	30	10	00	00	10	90

3.4. Etude de la tendance saisonnière :

L'étude de la variabilité saisonnière est indispensable, pour voir si la baisse ou la hausse de la pluviométrie est spécifique à une saison particulière ou à plusieurs saisons, cela permet de mieux visualiser la chronologie des totaux de pluies saisonnières dans le temps. Le présent chapitre consiste à rechercher des tendances des cumuls pluviométriques saisonniers.

Suivant le même principe nous avons appliqué le test de Mann-Kendall sur les pluviométries saisonnières. Puisque c'est des échantillons assez grand ($n > 10$) l'approximation à la loi normale a été utilisée. L'appartenance, ou non, de la valeur du Z à la zone de rejet détermine l'existence, ou non, d'une tendance. Nous avons appliqué un test unilatéral avec un seuil de significati 1 on de 0.05. Le nombre de stations ayant une tendance particulière est résumé dans le tableau 19 et la Figure 12.

Tableau 19 : Valeurs de Z (direction) de Mann–Kendall et ampleur de tendance saisonnière et annuel (1970-2011)

Stations	Automne		Hiver		Printemps		Eté		Annuel	
	Z	S	Z	S	Z	S	Z	S	Z	S
Lalla Setti	2.76	0.89	-0.45	-0.18	0.43	0.10	0.48	0.03	1.26	0.19
Bensekrane	2.25	0.61	0.00	-0.01	-0.54	-0.11	0.25	0.01	0.54	0.09
Hannaya	2.68	0.96	-0.51	-0.23	-0.67	-0.35	0.03	0.00	0.26	0.05
Khemis	2.43	0.86	-0.17	-0.12	0.85	0.43	0.30	0.00	1.35	0.40
Beni Bahdel	1.97	0.73	-0.26	-0.26	-0.09	-0.02	0.53	0.02	0.42	0.11
Maghnia	0.21	0.37	-1.34	-1.36	-1.47	-2.55	-1.21	-0.11	-1.25	-3.92
Pierre du chot	0.81	0.86	0.03	-0.13	-1.52	-0.93	-1.19	-0.01	-1.46	-0.61
Meffrouche	2.06	0.57	-0.26	-0.08	0.26	0.07	-0.03	0.00	0.39	0.06
Sabra	1.29	0.73	0.31	0.20	-0.95	-0.95	-0.40	0.00	0.09	0.11
Sebdou	0.85	0.32	-0.45	-0.27	-0.61	-0.27	0.61	0.06	-0.21	-0.04

Explications : les valeurs de **Z** en gras indiquent une **tendance significative**.

Tableau 20 : Nombre et pourcentage des stations pour chaque type de tendance saisonnière

Nombre de stations					
	Automne	Hiver	Printemps	Eté	Annuel
Tendance positive	10	3	3	6	7
Tendance négative	0	7	7	4	3
Tendance significative	6	0	0	0	1

Pourcentages d'occurrence de tendance					
	Automne	Hiver	Printemps	Eté	Annuel
Tendance positive	100	30	30	60	70
Tendance négative	00	70	70	40	30
Tendance significative	60	00	00	00	10

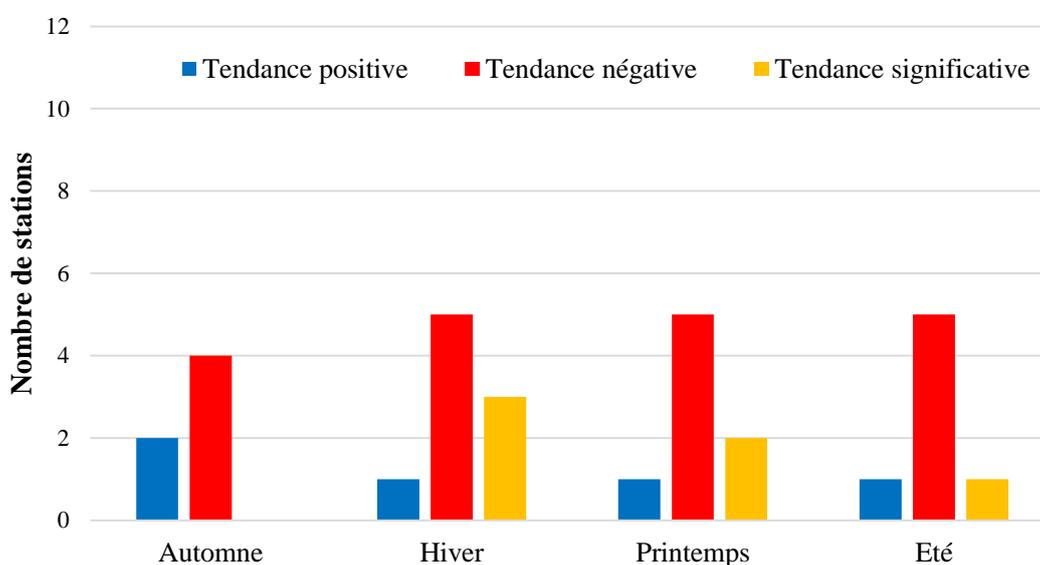


Figure 12 : Nombre de stations pour chaque type de tendance saisonnière

D'après nos résultats, nous pouvons distinguer que la série de précipitations d'automne a montré une tendance à la hausse dans la zone d'étude pour toutes les stations (10 stations soit 100%) et l'été (06 stations soit 60%). La saison printanière et hivernale attire l'attention avec 07 stations (70%) ayant une diminution de leurs pluviométries. Il y avait une tendance significative dans la saison d'automne car la valeur statistique Z calculée est supérieure à la valeur Z correspondant au niveau de signification de 5% (1.96).

L'apparition d'une tendance positive des précipitations en automne peut s'expliquer par les anomalies positives de la quantité de précipitations qui ont été enregistrées dans les régions d'Afrique du Nord [70-73]. Cette augmentation est due à l'influence d'une tendance négative de l'indice d'oscillation nord-atlantique (NAO). Cette phase négative est liée aux traces de tempête représentées dans la pression associée à la hauteur inférieure par rapport à la valeur normale [74]. Ceci est décrit par une augmentation de la quantité de précipitations. Cela correspond aux températures extrêmes, qui se révèlent fortement liées à l'indice NAO, où la période négative de cet indice est associée à des températures extrêmes plus élevées [72,75], et qui, en général, affectent l'Afrique de l'Ouest dans la région méditerranéenne.

Les fortes crues du bassin de la Tafna situé dans l'ouest Algérien se produisent généralement en automne et au printemps. Cela est dû aux vents pluvieux du nord-ouest chargés d'humidité en provenance de la Méditerranée. Depuis les années 1980, l'indice NAO montre un signe opposé indiquant que la phase négative de cet indice est associée à l'augmentation du nombre de jours de pluie (la probabilité pour les mois humides est d'environ 42-52% pour un NAO négatif) [76], qui peut être compris comme le résultat du réchauffement de l'océan Atlantique Nord, qui attire les pluies, en particulier pendant la saison des pluies dans la région (octobre-mars) [71]. Les corrélations significativement négatives entre l'indice NAO et les jours de pluie n'apparaissent qu'en Méditerranée occidentale. Ceci est conforme à l'étude de Ketrouti et al. [77] qui a signalé que la plupart des crues saisonnières enregistrées dans le sous-bassin de Sebdo en amont se sont produites pendant les saisons d'automne et de printemps avec la plus grande enregistrement de ces crues en septembre de 22%. Les archives du sous-bassin de l'Isser révèlent que plus de 55% de ses crues à l'automne et au printemps sont concentrées sur les deux mois, c'est-à-dire septembre et mars, respectivement. Les caractéristiques topographiques constituées de fortes pentes et d'une couverture végétale discontinue créent un environnement propice aux fortes crues par des pluies intenses en automne pour chasser les sédiments accumulés sur les sols exposés après une saison estivale sèche [78].

Les études précédentes sur la variabilité des précipitations dans le nord-ouest de l'Algérie ont signalé la sécheresse dans les années quarante du siècle dernier et ont révélé une diminution des pluies printanières comme raison potentielle [7,78]. 1944 est caractérisée comme une année humide et les deux décennies les plus humides suivent dans les années 1950 et 1960 [11]. La décennie de sécheresse dans les années 1970 a été détectée par les références [7,11,47] dans le bassin de la Tafna. Cette tendance à la baisse est également évidente dans la région méditerranéenne du nord du Maroc [11,13] et peut s'expliquer par un changement dans la circulation atmosphérique [11,79]. La situation évolue avec une année pluvieuse en 1975. Elle est suivie d'une année sèche en 1976 [47], puis de l'apparition des deux décennies les plus sèches dans les années 1980 et 1990 [7,11,80]. Surtout dans les années 1980, un niveau sec est dû à une diminution des précipitations hivernales [7,78] et à la fluctuation vers les années humides après la date de rupture en 2007, qui est entraînée par une augmentation de la tendance des précipitations à l'automne. Ceci génère des ruissellements conduisant à de fortes crues, que l'on peut qualifier de modérées à fortes par rapport aux résultats trouvés dans les grands fleuves d'Europe et d'Afrique [52]. Ceci est confirmé par les résultats de notre étude avec le test de Mann-Kendall et de Sen, qui ont indiqué une tendance significative à la hausse des précipitations en septembre et octobre (représentant la saison d'automne). En revanche, la station de Lalla Setti, située à haute altitude (1100 m), a montré une tendance significative à la hausse des précipitations mensuelles en août, septembre et octobre et a présenté une tendance à la hausse de la moyenne totale des précipitations.

4. Conclusion :

Nous avons étudié les tendances de la pluviométrie mensuelle, saisonnière et annuelle en utilisant le test de Kendall. 10 stations ont été retenues situées dans le bassin versant de la Tafna. Concernant la tendance mensuelle les mois de mars, avril et décembre sont celles les plus touchés par la diminution de la pluviométrie (09 stations, soit 90%). Le mois de juin présente

aussi un bon nombre de stations ayant cette tendance (06 stations, soit 60%). A l'opposé, Les mois septembre, octobre et novembre sont caractérisés par un régime pluviométrique à la hausse avec un nombre de stations respectif de 10 (100%), 10 (100%) et 09 (90%).

L'étude des tendances de la pluviométrie saisonnière par le test de Kendall a contribué à déterminer le sens de la variabilité. La saison hivernale et printanière montre une décroissance de la pluviométrie dans 07 stations (soit 70%) situées essentiellement dans la partie Centre-Nord du bassin de la Tafna. La partie Nord-Ouest semble être épargnée par cette tendance. Cependant, la saison de l'automne affiche une augmentation de la pluviométrie dans toutes les stations (100%).

La tendance annuelle décroissante est installée essentiellement dans la zone Centre-Nord. Elle touche 03 stations, soit un pourcentage de 30%.

CHAPITRE 4 :

Etude de la variabilité et de l'évolution de
l'écoulement

1. INTRODUCTION :

Le bassin versant de la Tafna possède 17 stations hydrométriques réparties de façon plus ou moins homogène, mais notre travail n'a porté que sur six d'entre elles, pour lesquelles les données étaient disponibles, représentatives et validées sur une durée suffisante (figure 13 et tableau 21). Les données concernent en partie des périodes différentes, mais l'étude a été réalisée sur les années 1952-2004.

Les chroniques de débit étudiées proviennent essentiellement des antennes d'Oran, Tlemcen et Alger de l'Agence nationale des ressources hydriques (ANRH).

Tableau 21. Caractéristiques des stations hydrométriques retenues dans l'étude.

Station de jaugeage	Longitude (Km)	Latitude (Km)	Altitude (m)	Surface drainé (km ²)
Beni Behdel	115	164.60	666	255.5
Bensekrane	143.40	205.35	260	1139.74
Pierre du Chat	123.10	213.35	80	6908
Remchi	133.95	185.80	430	1245
Sidi Aissa	157.35	199.50	380	745
Hennaya	114.65	161.50	760	343

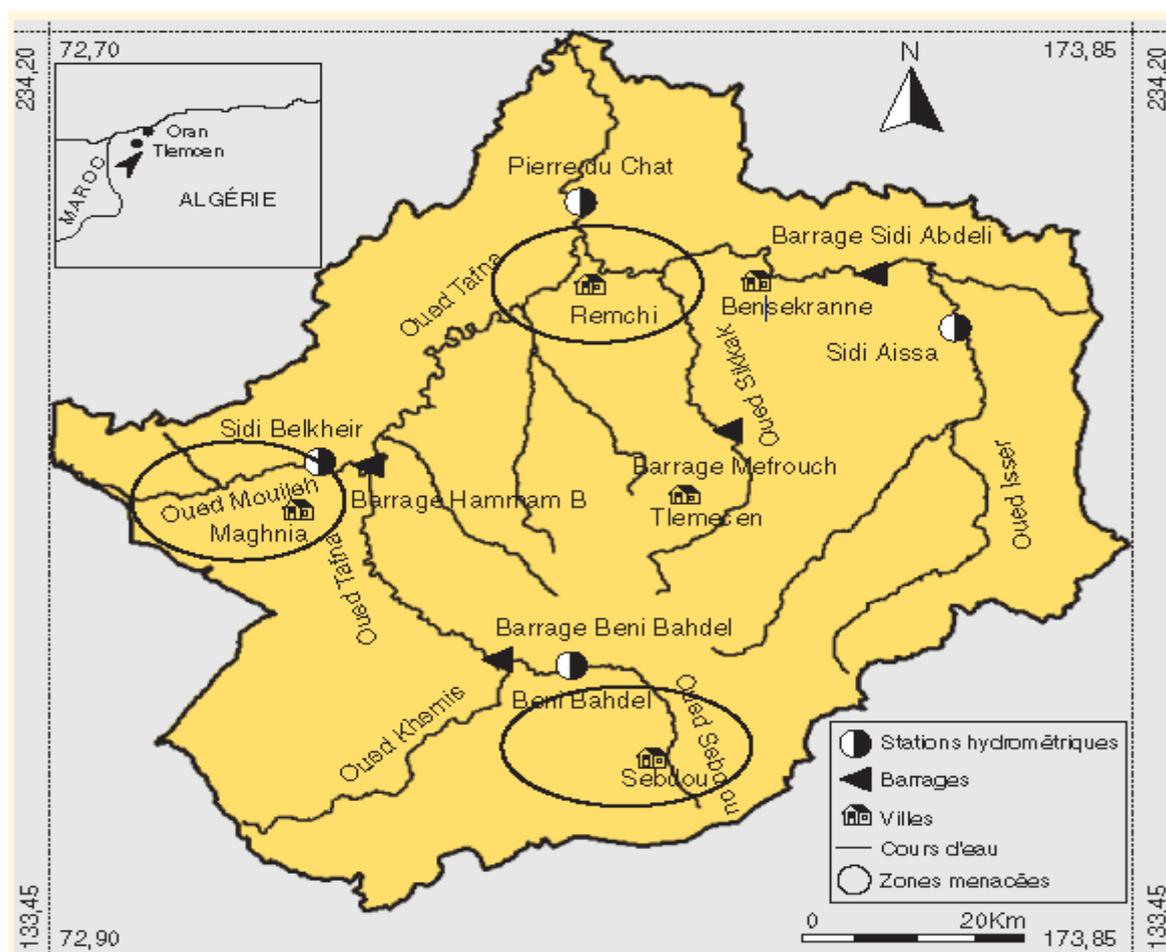


Figure 13 : localisation des stations hydrométriques du bassin versant de la Tafna [62]

2. Tendances de l'écoulement mensuel :

Cette section revient encore sur la méthodologie à travers la présentation des paramètres statistiques du test de Mann-Kendall relatives aux débits sont données dans le Tableau 22. Dans ce travail, le seuil de signification 0,05 a été appliqué. Les différents paramètres calculés avec ce test sont la valeur du Z de Kendall et l'ampleur de la tendance S.

Tableau 22. Valeurs Z (direction) selon le test de Mann – Kendall de débits moyen mensuels pour la période (1952–2004)

N°	Code de station	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Dec
1	160402	-2.86	-3.23	-2.29	-3.59	-1.64	-4.56	-1.00	-0.36	-1.24	-1.29	-1.11	-1.78
2	160702	-3.29	-3.07	-1.76	-1.87	-2.13	-5.51	-0.72	-0.56	-0.53	-2.33	-3.44	-2.36
3	160509	1.49	-0.53	0.71	-0.71	-0.71	-1.42	-1.73	-0.89	0.04	1.55	1.97	0.50
4	160801	-4.14	-4.55	-1.51	-1.25	-3.20	-1.78	-2.34	-4.15	-4.05	-3.90	-3.04	-4.50
5	160703	-4.49	-2.58	-1.05	-1.56	-0.17	-0.53	-0.02	1.01	-3.40	-2.61	-2.57	-1.50
6	160614	1.56	-0.91	-0.27	0.11	-0.61	-0.32	-1.21	0.47	-0.12	0.64	2.20	0.46

Explications : les valeurs de **Z** en **gras** indiquent une **tendance significative**.

Les résultats du test de Mann-Kendall sur les débits moyens mensuels au cours de la période 1952-2004 sont présentés dans le tableau 22. À partir du tableau 22, il a été observé que les débits mensuels analysés montrent des tendances significatives pratiquement pour tous les mois de la série analysée. La tendance à la baisse a été observée en février, mars, avril mai et juin. La tendance significative a été observée lorsque la valeur statistique Z calculée est supérieure à la valeur Z correspondant au niveau de signification de 5 % ($Z > |1.96|$) et si la valeur statistique Z calculée est inférieure à la valeur Z correspondant au niveau de signification de 5% ($Z < -1.96$), alors il n'y avait pas de tendance significative. En conséquence, une tendance à la baisse significative a été observée pratiquement pour toutes les stations hygrométriques.

Pour obtenir une image plus claire, nous avons compté les stations ayant la même tendance pour chaque mois comme le montre le tableau 23 et la figure 14.

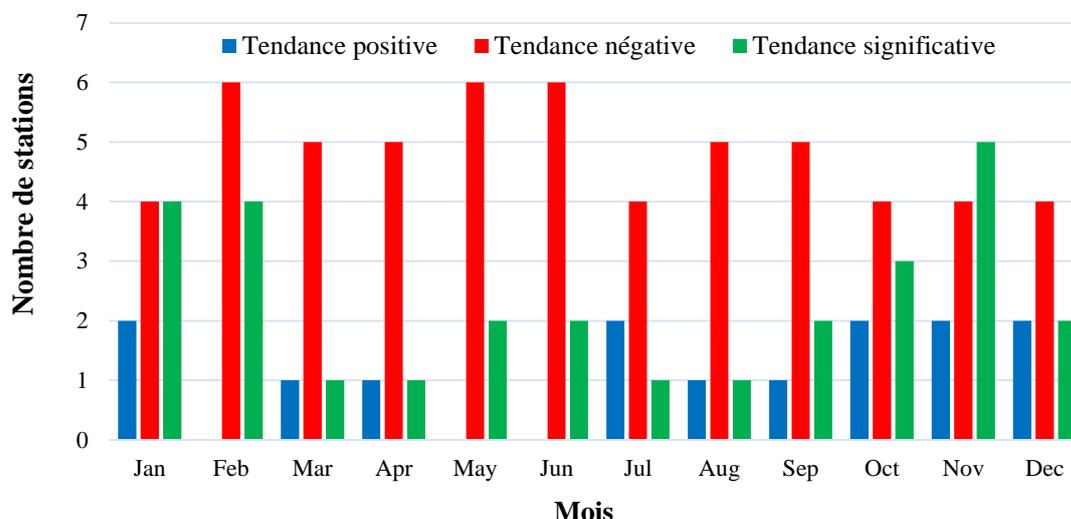


Figure 14 : Nombre de stations pour chaque type de tendance mensuelle

Tableau 23 : Nombre et pourcentage des stations et pour chaque type de tendance mensuelle

	Nombre de stations											
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Tendance positive	2	0	1	1	0	0	2	1	1	2	2	2
Tendance négative	4	6	5	5	6	6	4	5	5	4	4	4
Tendance significative	4	4	1	1	2	2	1	1	2	3	5	2

Le tableau 23 montre clairement la tendance négative du mois de février, mai et juin (100% des stations). Le mois de mars, avril, août, septembre (90%) présente aussi un bon nombre de stations ayant cette tendance.

Ainsi, les mois de novembre, janvier et février qui sont respectivement les mois les plus humides des séries montrent respectivement les tendances à la baisse les plus significatives.

3. Tendances de l'écoulement saisonnier :

L'étude de la variabilité saisonnière est indispensable, pour voir si la baisse ou la hausse de l'écoulement est spécifique à une saison particulière ou à plusieurs saisons, cela permet de mieux visualiser la chronologie des totaux de débits saisonniers dans le temps. La présente étude consiste à rechercher des tendances des cumuls hygrométriques saisonniers.

Suivant le même principe nous avons appliqué le test de Mann-Kendall sur les débits saisonniers. Puisque c'est des échantillons assez grand ($n > 10$) l'approximation à la loi normale a été utilisée. L'appartenance, ou non, de la valeur du Z à la zone de rejet détermine l'existence, ou non, d'une tendance. Nous avons appliqué un test unilatéral avec un seuil de signification de 0.05. Le nombre de stations ayant une tendance particulière est résumé dans le tableau 24 et la Figure 15.

Tableau 24 : Valeurs de Z (direction) de Mann-Kendall Z et pourcentage de changement (1952-2004)

N°	Code de station	Automne		Hiver		Printemps		Été		Annuel	
		Z - value	Sen slope	Z - value	Sen slope						
1	160402	-0.88	-0.02	-1.61	-0.12	-2.92	-0.12	-1.36	-0.06	-0.86	-0.03
2	160702	-2.27	-0.09	-1.59	-0.26	-0.40	-0.34	-3.07	-0.08	-0.26	-0.07
3	160509	2.27	0.03	0.12	0.00	0.34	-0.01	-1.27	0.00	1.55	0.00
4	160801	-3.83	-0.21	-2.77	-0.69	-1.20	-0.56	-2.28	-0.13	-1.56	-0.13
5	160703	-1.50	-0.11	-2.07	-0.43	-0.03	-0.56	0.36	-0.05	0.07	-0.11
6	160614	1.93	0.05	-0.80	-0.03	-0.27	-0.02	-0.78	0.00	-0.61	-0.01

Tableau 25 : Nombre et pourcentage des stations pour chaque type de tendance saisonnière

	Nombre de stations				
	Automne	Hiver	Printemps	Eté	Annuel
Tendance positive	2	1	1	1	2
Tendance négative	4	5	5	5	4
Tendance significative	3	2	1	2	0

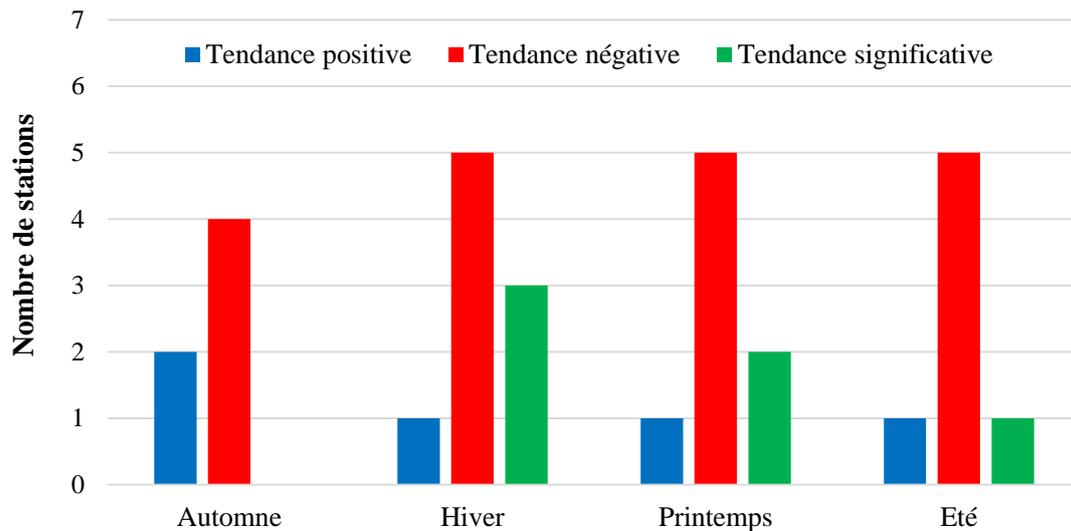


Figure 15 : Nombre de stations pour chaque type de tendance saisonnière

D'après nos résultats, nous pouvons distinguer un nombre élevé de stations ayant une diminution de l'écoulement durant tous les saisons. La saison printanière et hivernale attire l'attention avec 05 stations (90%) ayant une diminution de leurs débits. Il y avait une tendance significative dans les saisons d'automne, de printemps et d'été car la valeur statistique Z calculée est supérieure à la valeur Z correspondant au niveau de signification de 5% (1.96) et aucune tendance significative n'a été observée à l'échelle annuelle.

4. Conclusion :

Cette étude s'est basée sur une méthode statistique (bien connue et utilisé par divers auteurs) pour la détection de tendance largement utilisée en hydrologie. Elle a examiné la variabilité hydrologique dans le bassin de la Tafna à l'échelle mensuelle, saisonnière et annuelle sur la base de débits moyens écoulés aux 06 stations. Les principaux résultats confirment la forte tendance à la baisse des lames d'eau écoulées par les cours d'eau.

Cette tendance à la baisse de l'écoulement moyen dans le bassin de la Tafna est constatée sur tous les mois, toutes les saisons (périodes de hautes et de basses eaux) et à l'échelle annuelle. La tendance à la baisse a coïncidé avec la sécheresse qui s'est installée dans la zone depuis les années 1970 [63]. On note aux stations analysées une baisse significative de la puissance des

crues. Toutefois, la tendance à la baisse des périodes de hautes eaux est statistiquement plus significative. Dans le bassin, il existe une corrélation entre le niveau de la tendance et le débit écoulé : plus le débit est important, plus la pente de la tendance augmente. Cette tendance de baisse globale des débits du cours d'eau est doublée d'une baisse dramatique d'une ressource à partager et reste problématique du fait de la hausse de la demande en eau de tous les secteurs et de l'aggravation des conflits d'usage.

Les résultats obtenus confirment la variabilité climatique notée dans le bassin et indiquent la nécessité de faire une analyse complète de l'évolution de l'ensemble des facteurs de l'écoulement.

En dépit des limites notées par rapport au test montrant parfois son incapacité à détecter une tendance significative bien qu'elle soit réelle, l'excellente cohérence de l'évolution observée sur les débits fait du bassin de la Tafna un terrain d'étude prometteur potentiel pour mieux comprendre les relations entre les variabilités climatique et hydrologique.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

Cette étude a été effectuée dans le but de visualiser les différents changements du climat qui jouent un rôle sur les variations climatiques et son impact sur les ressources en eau.

L'analyse de la variabilité hydrométéorologique a permis de caractériser les principales modifications que le bassin versant de la Tafna a pu subir. Sur l'ensemble du bassin, le déficit pluviométrique entamé depuis 1980/1981 se prolonge à nos jours, même si la sévérité varie d'une année à l'autre. Toutefois, la répercussion de cette diminution des lames d'eau précipitées a été repérable sur les lames d'eau écoulées suite à une tendance nette à la baisse décelée au début des années quatre-vingts. L'analyse des variations pluviométriques saisonnières a pu mettre en évidence des tendances à la baisse identifiées sur les totaux pluviométriques hivernaux avec une diminution notable au mois de décembre de -25.22 mm, et printaniers au mois de mars où est enregistrée une réduction de -30.08 mm. Durant une période de 50 ans, les écoulements saisonniers au sein du bassin sont caractérisés par des baisses observables sur les quatre saisons suite à des ruptures décelées durant les années quatre-vingts. De février jusqu'à août, la réduction dans les lames d'eau écoulées dépasse les -50%. Une non-stationnarité a été observée sur la relation pluie-débit caractérisée par une tendance à la baisse dans le comportement hydrométrique du bassin versant de la Tafna. Cette baisse est due, d'un côté à la modification du régime pluviométrique qu'a connu le bassin durant les 40 dernières années, d'un autre côté, au changement d'occupation du sol suite aux modifications géographiques et morphologiques du bassin. Cette modification dans la relation pluie-débit caractérisée par une tendance à la baisse, constitue une faiblesse dans le potentiel des ressources en eau. La prise en compte de cette faiblesse dans la gestion de l'eau dans le bassin de la Tafna permettra de faire face à la sécheresse persistante de la région.

Ce modeste travail ne peut être qualifié de parfait dans le domaine d'études de la variabilité météorologique et son impact sur le cycle hydrologiques. Nous espérons le compléter par d'autres études plus poussées, en se basant sur des données sur un nombre plus importants des stations pour une meilleure représentativité de la région, et sur des périodes d'observations très importantes.

Références Bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] Duplessy J.C., 2001 : État des connaissances et incertitudes sur le changement climatique induit par les activités humaines. *Compte Rendu de l'Académie des Sciences, Paris, Sciences de la Terre et des planètes*, vol. 333, p. 765-773.
- [2] Leroux M., 2007 : Les échanges méridiens commandent les changements climatiques. Séminaire de travail "Évolution du climat", Académie des sciences, Paris, 12 p.
- [3] Christensen JH., Hewitson B., Busuijac A., Chen A., Gao X., Held I., Jones R., Kollir.K., Kwon W.T., Laprise R., Magaña Rueda V., Mears L., Menéndez C.G., J. Räisänen J., Rinke A., Sarr A. et Whetton P., 2007: Chapter 11: Regional climate projections. In : *Climate change 2007: the physical sciences basis, contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, Tignor M et H.L. Miller édit., Édit. Cambridge University Press, Cambridge/New York, p. 847-940.
- [4] OMM (2013), 2001-2010 : une décennie d'extrême climatique. Organisation Météorologique Mondiale, communiqué de presse n° 976.
- [5] Trenberth K.E., Jones P.D., Ambenje P., Bojariu R., Easterling D., Klein T A., Parker D., Rahimzadeh F., Renwick J.A., Rusticucci M., Soden B. et Zhai P., 2007 : Chapter 3: Regional climate projections. In : *Climate change 2007 : the physical sciences basis, contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, Tignor M et H.L. Miller édit., Édit. Cambridge University Press, Cambridge/New York, p. 235-336.
- [6] Le Monde, 2011 : Inondations : l'Australie s'attend à une facture record. URL : http://www.lemonde.fr/asiе-pacifique/article/inondations-l-australie-s-attend-a-une-facture-record_1466392_3216.html. (Date de consultation 17/01/2011)
- [7] Bossy D., 2013 : La mousson en Inde est-elle exceptionnelle en 2013. *Futur a Sciences*, URL <http://www.futurasciences.com/magazines/environnement/infos/actu/d/meteorologiemousson-inde-elle-exceptionnelle-2013-47361/>
- [8] Norrant C., 2004 : Tendances pluviométriques indicatrices d'un changement climatique dans le bassin méditerranéen de 1950 à 2000. Étude diagnostique. Thèse de l'Université de Provence (Aix Marseille I), 266 p.
- [9] Douguédroit A. et Bridier S., 2007 : Réchauffement climatique et évolution de l'environnement des stations en région méditerranéenne française (1951-2000). In : *Climat, tourisme, environnement, Actes du XXème colloque de l'Association Internationale de Climatologie (Carthage, Tunisie)*, H. BEN BOUBAKER édit., p. 204-209.
- [10] Rothschild E. et Beltrando G., 2007 : Évolution des températures observées en Suisse durant les dernières décennies. In : *Risques et changements climatiques, Actes du*

- XXème colloque de l'Association Internationale de Climatologie (Carthage, Tunisie), H. Ben Boubaker édit., p. 489-494.
- [11] Lamarre D., 2008 : Climats et risque : changements d'approches. Édit. LAVOISIER, Paris, 170 p.
- [12] Sebbar A., Hsaine M., Foughrach H. et Badri W., 2012 : Étude des variations climatiques de la région centre du Maroc. In : Les climats régionaux : observation et modélisation, Actes du XXVème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie (Grenoble), S. Bigot et S. Rome édit., p. 709-714.
- [13] Amraoui L., AdamaSarr M. et Soto D., 2011 : Analyse rétrospective de l'évolution climatique récente en Afrique du Nord-Ouest. *Physio-Géo - Géographie Physique et Environnement*, vol. V, p. 125-142. URL :<http://physio-geo.revues.org>.
- [14] Sebbar A., Badri W., Foughrach H., Hsain M. et Saloui A., 2011 : Étude de la variabilité du régime pluviométrique au Maroc septentrional (1935-2004). *Sécheresse*, vol. 22, n° 3, p. 139-148.
- [15] Nouaceur Z., 2010 : Évaluation des changements climatiques au Maghreb. Étude du cas des régions du quart nord-est algérien. In : Risques et changements climatiques, Actes du XXIIIème colloque de l'Association Internationale de Climatologie (Rennes), p. 463-468.
- [16] Amyay M., Nouaceur Z., Tribak A., Obdak.H. et Taous A., 2012 : Caractérisation des évènements pluviométriques extrêmes dans le moyen Atlas marocain et ses marges. In : Actes du XXVème colloque international de climatologie (Grenoble), p. 75-80.
- [17] Khaldi A., 2005 : Impacts de la sécheresse sur le régime des écoulements souterrains dans les massifs calcaires de l'Ouest Algérien " Monts de Tlemcen - Saida". Thèse présentée pour obtenir le titre de Docteur d'Etat à la faculté des Sciences de la terre, de Géographie et l'Aménagement du Territoire, Université d'Oran, Mai 2005.
- [18] Djellouli Y., &Daget P., 1993 : Conséquences de la sécheresse des deux dernières décennies sur les écosystèmes naturels algériens, Publication Association International Climatologique, 6, pp105-14.
- [19] Laborde J.P., 1993 : Carte pluviométrique de l'Algérie du Nord à l'échelle du 1/500000. Agence Nationale des Ressources Hydrauliques, projet PNUD/ALG/88/021, une carte avec notice explicative, 44 p.
- [20] Meddi H. & Meddi M., 2007 : Variabilité spatiale et temporelle des précipitations du Nord-Ouest de l'Algérie. *Geographia Technica*, n° 2, 49-55.
- [21] Hirche A., Boughani A. & Salamani M., 2007 : Évolution de la pluviosité dans quelques stations arides algériennes. *Sécheresse*, Vol. 18 (4), 314-320.
- [22] Meddi M. et Hubert P., 2003 : Impact de la modification du régime pluviométrique sur les ressources en eau du Nord-Ouest de l'Algérie. *Hydrology of the Mediterranean and semiarid Regions*. IAHS publication N° 278.
- [23] Mebarki A., 2010: Surface flows and hydrologic balance mapping: The case of the Eastern Algerian basins. *Science et changements planétaires / Sécheresse*, Vol 21, I 4. P. 3-10.
- [24] GIEC, 2008 : Changements climatiques et impacts dans les Alpes. Résultats du WP5 duprojet Clim Ch Alp. Rapport Technique N°1 de l'ONERC, France.

- [25] Sircoulon, I. (1976). Les doublées hydro pluviométriques de la sécheresse récente en Afrique intertropicale. Comparaison avec les sécheresses " 1913" et "1940". *Cah. ORSTOM, SerieHydrot.* XIII(2).
- [26] CANTAT O. (1995) - Variabilité et variation climatiques en Normandie. L'évolution récente des températures à Caen-Carpiquet. *Sécheresse*, vol. 6, n° 3, p. 273-279.
- [27] WMO, 1966: Climatic change. Report of a working group of the commission for climatology - Technical Note N° 79. Secretariat of World Meteorological Organization -Geneva - Switzerland, 79p.
- [28] Lubes H., Masson J-M., Servat E. et Paturel J-E., et Boyer J-F 1994 : Caractérisation des fluctuations dans une série chronologique par application de tests statistiques. Etude bibliographique, rapport 3, Programme ICCARE. ORSTOM, Montpellier, France.
- [29] Cavadias Georges, 1994 : Detection and Modelling of the impact of climatic change on river flows. Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands, pp 207-218.
- [30] Ouarda Taha B.M.J., Rasmussen P.F., Cantin J.F., Bobée B., Laurence R., Hoang V.D. et Barabé G., 1999 : Identification d'un réseau hydrométrique pour le suivi des modifications climatiques dans la province du Québec. *Revue des sciences de l'eau*, 12(2), pp 425-448.
- [31] Assani A., 1999: Analyse de la variabilité temporelle des précipitations (1916-1996) à Lubumbashi (Congo-Kinshasa) en relation avec certains indicateurs de la circulation atmosphérique (oscillation australe) et océanique (El Niño/La Niña). *Sécheresse*, 10(4), pp 245- 252.
- [32] Kadi D., 1995 : Contribution à l'étude de la sécheresse sur le littoral algérien par le biais de traitement des données pluviométriques et la simulation, Thèse de Magister, Ecole nationale polytechnique d'Alger.
- [33] Obassi G.O. (1994). WMO's Role in the International Decade for Natural Disaster Reduction. *Bulletin of American Meteorological Society*, 75-9.
- [34] Watson, R.T., Zinyowera, M.C. et Moss, R.H., 1997: The Regional Impacts of Climate Change : An Assessment of Vulnerability. - Intergovernmental panel in Climate Change (IPCC), Working Group II, Special Report, November 1977. Consulté en ligne : <http://www.grida.no/climate/ipcc/>.
- [35] The Nation, 25 Mai 2000: <http://www.africanews.org/east/kenya/stories>.
- [36] L'Hôte Y., Mahé G., Somé B. et Triboulet J.P., 2002 : Analysis of a Sahelian annual rainfall index from 1896 to 2000 ; the drought continues. *Journal des sciences Hydrologiques*, 47(4), 563-572.
- [37] Paturel J.E., Boubacar I. et L'Aour A., 2004 : Evolution de la pluviométrie annuelle en Afrique de l'Ouest et centrale au XXème siècle. *Sud Sciences and Technologies*. N°13, pp 40 – 46.
- [38] Ardoin-Bardin S., 2004 : Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone Soudano-sahélienne. Thèse de doctorat, Université de Montpellier II, 440p.
- [39] Mahé G., L'Hôte Y., Olivry J., Wotling G., 2001 : "Trends and discontinuities in regional rainfall of west and central Africa," *J. Sci. Hydrol.*, vol. 46, n° 2, pp.211–226.

- [40] Olivry, J. C. (1997) Long term effects of rain shortage: the ill rivers of Western and Central Africa. *FRIEND General Reponl UNESCO IHP V. UNESCO*, IS8-162. Paris, France.
- [41] Kouame KF., 2011 : “Influences de la variabilité climatique et de la dégradation environnementale sur le fonctionnement de l’hydrosystème du N’zo dans la région guinéenne humide et semi-montagneuse de la Côte d’Ivoire. Contribution de la télédétection, des Systèmes d’Informations Géographiques et du modèle hydrologique HYDROTEL,” Thèse d’Etat sciences naturelles. Université de Cocody, Abidjan. 379 p.
- [42] Nicholson. E. (1994). Recent rainfall fluctuations in Africa and their relationship to past conditions over the continent, *The Holocène*, Vol.4, N°2, 121-131.
- [43] Vissin E- W., 2007 : “Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger,” Thèse de Doctorat. Hydroclimatologie. Université de Bourgogne Centre de Recherches de Climatologie - CNRS -UMR 5210. tel-00456097, version 1 - 11 Feb 2010. 285 p.
- [44] Kingumbi A., 2006 : Modélisation hydrologique d'un bassin affecté par des changements d'occupation. Cas du Merguellil en Tunisie Centrale. Thèse de Doctorat, Université de Tunis El Manar, 300 p.
- [45] Bergaoui. M et al., 2001: Caractérisation de la sécheresse météorologique: cas du bassin versant de Siliana en Tunisie. *Rev. Sécheresse*. Vol. 12 n°4. p. 205-213.
- [46] Benzarti Z., Hbaieb H. (2001): Etude de la persistance de la sécheresse en Tunisie par utilisation des chaînes de Markov (1909-1996), *Sécheresse*, 4(12): 215-220.
- [47] Bergaoui Z., 1983 : Contribution à l’étude statistique de la pluie dans la région de Tunis. Thèse présentée à l’institut nationale polytechnique de Toulouse. 134 pp.
- [48] Kingumbi A. (2006). Modelisation hydrologique d’un bassin versant affecte par des changements d’occupation. Cas du Merguellil en Tunisie centrale. Thèse de l’Ecole Nationale d’Ingenieurs de Tunis, Tunisie, 199p.
- [49] Lahache RG., et Pillet G., 2008 : Projection des ressources en eau de la Tunisie sous leffets des changements climatiques globaux. XIIIth World Water Congress (Montpellier,2008), 12 p.
- [50] Matari A., Kerrouche M., Bousid H., Douguedroit A., 1999 : Sécheresse dans l’ouest algérien. Publications de l’association internationale de climatologie, volume 12, 1999.
- [51] Khettab A., 2001. Les ressources en eau en Algérie : stratégies, enjeux et vision. *Desalinisation* 136 (2001) 25–33.
- [52] Khoualdia W., Mrad D., Djebbar Y., et Abida H., 2008 : Cycle, Tendance ou Changement Climatique Analyse Statistique de la Pluviométrie de la Région de Souk-Ahras, Algérie. 4ème conférence internationale sur Les Ressources en Eau dans le BassinMéditerranéen, Alger, Algérie, 22-23 Mars 2008
- [53] KhoualdiaW.,etDjebbar Y., 2010: « sécheresse et gestion des ressources en eau dans le bassin versant Nord de la Medjerda, Algérie». Colloque international CIEAU, 25-27 octobre2010 Annaba.
- [54] KhoualdiaW.,et Djebbar Y., 2011 : « Changement de la variabilité de pluie et concepts de modèles probabilistes pour la gestion des ressources hydriques du bassin versant d’oued Medjerda : Est Algérien». Colloque international sur les ressources en eau et le développement durable CIRED’4 : ENSH/22 et 23 février 2011 Alger.

- [55] Khoualdia W., et Djebbar Y., 2012 : « Contribution à l'étude de la sécheresse et son impact sur les ressources en eau de surface du bassin versant nord de la Medjerda (Nord Est de l'Algérie) ». Colloque international «Géomatique et gestion des risques naturels» : 6-8 Mars 2012 université Oujda (Maroc).
- [56] Khoualdia W., et Djebbar Y., 2013: Caractérisation de la variabilité climatique dans le bassin versant de la Medjerda (Nord Est de l'Algérie). Colloque international «Hazards and Géomatics» : 17-20 Mai 2013 Hammamet - Tunisie.
- [57] Khoualdia W., Djebbar Y., et Hammar Y., 2014: Caractérisation de la variabilité climatique « cas du bassin versant de Medjerda » Nord- Est de l'Algérie. Rev. Sci. Technol., Synthèse 29: 6-23 (2014) (REVUE. SYNTHÈSE ANNABA)
- [58] Kettab A., Ait Mouhoub D., Ouarda T., Bobbee B., 2002 : Contribution à l'étude du phénomène de la sécheresse sur les régions littorales de l'Algérie » Laboratoire de recherche en Sciences de l'eau – LRS – EAU/ENP Ecole Nationale Polytechnique (E.N.P) – Alger; Colloque international sur l'eau, Chelef, 05/06/février, Algérie.
- [59] Meddi H. & Meddi M., 2009 : Variabilité des précipitations annuelles du Nord-Ouest de l'Algérie. Sécheresse, Vol 20, 57-67.
- [60] Beersma, J. J., and T. A. Buishand (2004), Joint probability of precipitation and discharge deficits in the Netherlands, *Water Resour. Res.*, 40, W12508, doi: 10.1029/2004WR003265.
- [61] Bouanani A (2004), Hydrologie, transport solide et modélisation, Etude de quelques sous bassins de la Tafna (NW-Algérie), Thèse de Doctorat, U.A.B.B. Tlemcen, 250pp.
- [62] Khadidja Ketrouci, Mohamed Meddi, Boucif Abdesselam, (2012), Étude des crues extrêmes en Algérie : cas du bassin-versant de la Tafna. *Science et changements planétaires / Sécheresse*. 23(4) : 297-305.
- [63] S. Berhail, 2019. The impact of climate change on groundwater resources in northwestern Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, Vol 12, Issue 24, pp 770.