

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 Technologie
Département de Génie Civil et Hydraulique



N° Ref :

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Spécialité : Hydraulique Urbaine

THEME

**Détection spatio-temporelle de changement brutal
des tendances des pluies et des périodes sèches et
humides à différentes échelles de temps : cas du
bassin de la Medjerda (Nord-Est de l'Algérie)**

Réalisé par :

- **BOUALITA Ammar**
- **BEN CHEIKH Le hocine Samer**
- **KHELFATNI Marwa**

Soutenu devant le jury :

M. KEBLOUTI Mehdi
M. KABOUR Abdesselam
M. BERHAIL Sabri

Président
Examinateur
Promoteur

Année universitaire : 2022/2023

Remerciements

Nous commençons par remercier Dieu le Tout-Puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et l'amour du savoir pour pouvoir réaliser ce modeste travail.

*Nos plus vifs remerciements vont à **M. BERHAIL Sabri** pour avoir accepté de nous encadrer et de nous diriger tout au long de la réalisation de ce projet, ainsi que pour tous ses conseils instructifs et judicieux, ainsi que sa disponibilité.*

*Nous tenons également à exprimer notre gratitude envers les membres du jury : **M. KEBLOUTI Mehdi**, Président du jury, pour avoir accepté de diriger notre soutenance, ainsi que Monsieur **KABOUR Abdesselem**, pour l'honneur qu'il nous a fait en acceptant d'examiner ce modeste travail.*

Enfin, nous souhaitons exprimer notre gratitude envers tous les enseignants du département d'Hydraulique et de Génie civil qui ont contribué à notre formation.

Dédicaces

Je dédie mon diplôme à :

À celui dont je porte le nom avec fierté, à celui qui a surmonté les obstacles sur mon chemin pour ouvrir la voie à la connaissance, à mon cher père. Après la grâce de Dieu, ce que je suis aujourd'hui appartient à mon père, l'homme qui n'a jamais obtenu une part équitable de ce que nous avons reçu, et qui s'est efforcé toute sa vie d'être meilleur que lui-même.

À cette personne exceptionnelle qui a choisi d'avoir le ciel sous ses pieds, qui a prié pour moi chaque jour, me guidant et souhaitant constamment que je vive un jour comme celui-ci auprès de ma mère bien-aimée.

À ceux dont les sourcils se sont fatigués de sueur et dont les corps sont épuisés pour moi, à ceux qui m'ont enseigné que le succès ne vient qu'avec patience, persévérance et travail acharné, à mes frères Muhammad, Faris et Hamza, vous êtes au sommet de ma tête.

À mon âme, la première à attendre ces moments pour être fière de moi, à mon soutien et à mes partenaires dans la vie, mes chères sœurs Firouz, Loubna et Ramla, ainsi qu'à l'épouse de mon frère, Maryam.

Aux petits miracles de notre maison, les fleurs qui illuminent notre vie et le secret de notre bonheur, les petits bourgeons Mayar, Anas, Wail et Miral.

À ceux qui m'ont soutenu pendant les moments difficiles, mes amis et compagnons, je vous remercie pour chaque mot de soutien, chaque éclat de rire du cœur et votre amour inconditionnel. Dounia, Malak, Samer et Romaissa, vous occupez une place spéciale dans mon cœur.

À mon compagnon de travail, Ammar, et à mon mentor, BERHAIL Sabri, que Dieu les récompense.

Enfin, je prie Dieu d'accorder à cette personne spéciale, dont le nom n'est pas mentionné ici, acceptation et encore plus de succès.

Marwa

Dédicaces

À ma très chère mère : Quoi que je fasse ou que je dise, je sais que je ne pourrai jamais te remercier comme il se doit. Ton affection m'enveloppe, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour surmonter les divers obstacles.

À mon très cher père : Tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager.

À mes très chers frères : Younes, Rami, Moutia.

À ma famille, mes proches et à tous ceux qui me donnent de l'amour et de la vivacité.

À tous mes amis, en particulier Marwa, Dounia et Malak, qui m'ont toujours encouragé. Je vous souhaite encore plus de succès.

Et enfin, à tous ceux que j'aime.

Samer

Dédicaces

À ma très chère mère : Quoi que je fasse ou que je dise, je sais que je ne pourrai jamais te remercier comme il se doit. Ton affection couvre, ta bienveillance guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.

À mon très cher père : Tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager.

À ma chère sœur : Tu as toujours été ma plus grande supportrice et source d'encouragement. Merci pour tout.

À mes chers frères : Aissa, Youcef, vous êtes des frères formidables et je vous remercie pour votre soutien.

À tous mes amis : Merci d'avoir été présents dans ma vie, de m'avoir soutenu et partagé de merveilleux moments avec moi.

Ammar

Table des matières

Remerciements.....	I
Dédicaces.....	II
Table des matières.....	V
Liste des tableaux.....	VII
Liste des figures.....	VIII
Résumé.....	IX
Abstract.....	X
ملخص.....	XI

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

CHAPITRE 1 : Synthèse bibliographique

1.Introduction.....	2
2.Changement climatique.....	2
3.Secheresse.....	3
4.Secheresse en Algérie.....	5

CHAPITRE 2 : Présentation de la zone d'étude

1.Présentation de la zone d'étude.....	8
1.1. Situation géographique de bassin versant de Medjerda.....	8
1.2. La topographie.....	9
2.Climatologie et occupation du sol.....	10
2.1. Les ensembles morphologique.....	10
2.2. Couvert végétal.....	10
2.3. Agriculture.....	10
2.4. Climat.....	11
3.Analyse de la pluviométrie.....	11
3.1. Analyse statistique des données pluviométriques.....	11
3.2. Caractéristique des postes pluviométrique.....	12

CHAPITRE 3 : Matériels et méthodes

1. Introduction.....15

2. Etude de la tendance par le test de Mann-Kendal.....15

 2.1. Estimation de l'ampleur du changement (Sen's Slope Estimator).....16

3. Indice standardise de précipitations SPI.....16

4. Les différentes interprétations de l'indice SPI.....17

 4.1. Indice SPI sur 6 mois (moyen terme).....18

 4.2. Indice spi sur 12 mois (long terme).....18

5. Méthode de calcul.....18

6. Analyse de tendance de l'indice de précipitations normalise (SPI).....20

CHAPITRE 4 : Etude de la variabilité de l'évolution de la pluviométrie

1. Introduction.....22

2. Etude de la tendance des précipitation.....22

 2.1. Tendance des précipitation annuelle.....22

 2.2. Tendance de précipitation saisonnière.....26

 2.2.1. Saison automnale.....26

 2.2.2. Saison hivernale.....27

 2.2.3. Saison printanière.....28

 2.2.4. Saison estivale.....29

3. Analyse de la tendance de sécheresse par l'indice SPI.....29

 3.1. Tendance de la sécheresse à court terme.....29

 3.2. Tendance de la sécheresse à long terme.....32

CONCLUSION GENERALE.....36

BIBLIOGRAPHIE38

Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristique des stations pluviométriques.....	13
Tableau 2 : Catégories de sécheresse et d'humidité définies par les valeurs de SPI.....	17
Tableau 3 : Valeurs de Z (direction) de Mann-Kendall et ampleur de changement (1966-2017).....	22
Tableau 4 : Nombre et pourcentage des stations pour chaque type de tendance saisonnière.....	23
Tableau 5 : Tendances des valeurs de SPI pour des condition sèches et humides sévères et extrêmes à différentes échelles de temps (3 , 6 , 12 et 24 mois).....	30

Liste des Figures

Figure 1 : Situation géographique et réseau hydrographique du bassin versant de Medjerda.....	8
Figure 2 : Carte hypsométrique du bassin versant de la Medjerda.....	9
Figure 3 : Carte d'occupation du sol du bassin versant de la Medjerda.....	11
Figure 4 : Localisation des stations pluviométrique dans le bassin de la Medjerda.....	12
Figure 5 : Répartition spatiale des précipitations moyennes annuelle du bassin versant de la Medjerda (1966-2017)	14
Figure 6 : Répartition spatiale du coefficient de variation des précipitations moyennes annuelle du bassin versant de la Medjerda (1966-2017)	14
Figure 7 : Interface du logiciel MDM.....	19
Figure 8 : Modèle de la méthode innovante d'analyse de tendance (ITA) montre la zone de tendance à la hausse et à la baisse.....	20
Figure 9 : Carte de la tendance annuelle des stations étudiées.....	25
Figure 10 : Carte de l'ampleur de la tendance des précipitations annuelles.....	25
Figure 11 : Cartes des tendances de la pluviométrie de la saison de l'automne.....	27
Figure 12 : Carte des tendances de la pluviométrie de la saison d'hiver.....	27
Figure 13 : Carte des tendances de la pluviométrie de la saison du printemps.....	28
Figure 14 : Carte des tendances de la pluviométrie de la saison du l'été.....	29
Figure 15 : Résultats de la méthode ITA appliquée à l'indice SPI-3 (a) et SPI-6(b).....	31
Figure 16 : Résultats de la méthode ITA appliquée à l'indice SPI-12(c) et SPI-24(d).....	32
Figure 17 : Tendance spatial des conditions de sécheresse sévères et extrêmes à différentes échelles de temps (3 , 6 ,12 et 24 mois) pour les valeurs de l'indice $SPI < -1.5$	35
Figure 18 : Tendance spatial des conditions de sécheresse sévères et extrêmes à différentes échelles de temps (6 mois) pour les valeurs de l'indice $SPI < -1.5$	34
Figure 19 : Tendance spatial des conditions de sécheresse sévères et extrêmes à différentes échelles de temps (12mois) pour les valeurs de l'indice $SPI < -1.5$	34
Figure 20 : Tendance spatial des conditions de sécheresse sévères et extrêmes à différentes échelles de temps (24 mois) pour les valeurs de l'indice $SPI < -1.5$	35

Résumé

Cette étude analyse les tendances potentielles des précipitations et de la sécheresse dans le bassin versant de la Medjerda, en utilisant des données provenant de 38 stations de pluviométrie sur une période de 1966 à 2017. Le test de Mann-Kendall a été utilisé pour identifier les tendances positives ou négatives des précipitations, et la méthode de la pente de Sen a été utilisée pour évaluer l'ampleur de ces tendances. Les résultats de l'analyse révèlent une diminution des précipitations au printemps, avec une augmentation maximale (ou une diminution minimale) de l'ampleur des précipitations de 2,14 mm/saison (-4,41 mm/saison) en hiver (printemps). L'ampleur de la tendance des précipitations par an varie entre 6,26 mm/an et 2,54 mm/an, avec une réduction moyenne de 39% pour l'ensemble du bassin versant. L'analyse des tendances de la sécheresse indique une tendance négative à court terme, tant pour les valeurs minimales que maximales de l'indice SPI. La sévérité de la sécheresse a été observée en augmentation (53% et 55% pour les SPI sur 3 mois et 6 mois, respectivement) lors des épisodes de fortes précipitations. Ces résultats ont un impact direct sur les régions agricoles souvent touchées par la sécheresse, telles que la plaine de la Merdja et les périmètres irrigués de Sedrata et Zouabi. À plus long terme, une augmentation de la sévérité de la sécheresse et une diminution lors des épisodes de fortes précipitations ont été détectées. Ces résultats indiquent que les ressources en eau à long terme des parties sud-est et centrale du bassin versant ont été sévèrement affectées, ce qui a un impact négatif sur le nouveau barrage d'Ouldjet Mellegue dans la province de Tébessa.

Mots-clés : Changement climatique, Sécheresse, Précipitations, Analyse des tendances, Indice de Précipitation Standardisé (SPI), Bassin versant de la Medjerda

Abstract

This study examines the possible trends in rainfall and drought using data from 38 rainfall stations in the Medjerda basin (northeast Algeria) over a period of 1966 to 2017. The Mann-Kendall test was employed to identify positive or negative precipitation trends, and Sen's slope method was used to calculate the magnitude of these trends. The analysis reveals a decrease in spring precipitation, with a maximum increase (decrease) in precipitation magnitude of 2.14 mm/season (-4.41 mm/season) in winter (spring). Furthermore, the magnitude of the precipitation trend per year ranges from 6.26 mm/year to 2.54 mm/year, with an average reduction of 39% for the entire basin. The results of the drought trend analysis indicate a negative trend for both the minimum and maximum SPI values in the short term. Drought severity was observed to increase (53% and 55% for 3-month SPI and 6-month SPI, respectively) during episodes of heavy precipitation. These findings have a direct impact on drought-prone agricultural regions such as the Merdja plain and the irrigated perimeters of Sedrata and Zouabi. For longer time scales, an increase in drought severity and a decrease during episodes of heavy precipitation were detected. These results suggest that long-term water resources in the southeastern and central parts of the basin have been severely affected, negatively impacting the newly-constructed Ouldjet Mellegue dam in the Tébessa Province.

Keywords: Climate Change, Drought; Precipitation, Trend analysis, Standardized Precipitation Index (SPI), Medjerda Basin

ملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تحليل الاتجاهات المحتملة في هطول الأمطار والجفاف في مستجمعات مياه مجردة باستخدام بيانات من 38 محطة هطول الأمطار على مدى فترة زمنية تمتد من عام 1966 إلى عام 2017. استخدم اختبار مان-كيندال لتحديد الاتجاهات الإيجابية أو السلبية في هطول الأمطار، واستخدمت طريقة سين المنحدرة لتقييم حجم هذه الاتجاهات.

أظهرت نتائج التحليل انخفاضًا في هطول الأمطار في فصل الربيع، مع زيادة قصوى أو انخفاض أدنى في حجم هطول الأمطار في فصل الشتاء. كما تباين حجم اتجاه هطول الأمطار سنويًا بين القيم العليا والدنيا، مع متوسط انخفاض بنسبة 39٪ للحوض بأكمله.

وأشارت تحليلات الجفاف إلى وجود اتجاه سلبي قصير الأجل في قيم مؤشر الجفاف (SPI (Standardized Precipitation Index) الدنيا والعليا. ولاحظ أن شدة الجفاف تزداد خلال فترات هطول الأمطار الغزيرة.

تترتب على هذه النتائج تأثيرات مباشرة على المناطق الزراعية التي تتأثر غالبًا بالجفاف، مثل سهل المردجا والمناطق المروية لسدراتة والزوابي. وعلى المدى الطويل، يتم رصد زيادة في شدة الجفاف وانخفاض في فترات هطول الأمطار الغزيرة، مما يؤثر سلبيًا على الموارد المائية للأجزاء الجنوبية الشرقية والوسطى من الحوض، بما في ذلك سد Ouldjet Mellegue الجديد في محافظة تبسة.

الكلمات المفتاحية: تغير المناخ، الجفاف، هطول الأمطار، تحليل الاتجاهات، المؤشر المعياري للهطول (SPI)، مستجمعات المياه مجردة.

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Le bassin versant de la Medjerda, situé dans les régions du nord-est de l'Algérie, revêt une grande importance pour la gestion des ressources en eau et l'agriculture dans la région. Les précipitations et la sécheresse jouent un rôle crucial dans l'équilibre hydrique de cette zone, et leur compréhension est essentielle pour une gestion efficace des ressources en eau et la prise de décisions éclairées.

Au cours des dernières décennies, le bassin versant de la Medjerda a fait face à des fluctuations significatives des précipitations, avec des périodes de sécheresse prolongées et des événements pluvieux intenses. Ces variations climatiques ont des implications directes sur les ressources en eau, l'agriculture, les écosystèmes et les communautés locales qui dépendent de ces ressources.

Dans cette étude, nous nous sommes concentrés sur l'analyse des tendances spatio-temporelles des précipitations et de la sécheresse dans le bassin versant de la Medjerda. Nous avons utilisé des données pluviométriques mensuelles provenant de 38 stations couvrant une période de 1966 à 2017. L'objectif était de déterminer si des tendances significatives à la hausse ou à la baisse des précipitations peuvent être observées, ainsi que d'évaluer l'ampleur de ces tendances et leur impact sur les ressources en eau.

Notre travail s'articule autour de 4 chapitre comme suit :

Dans le **premier chapitre**, nous procéderons à une synthèse bibliographique approfondie sur le changement climatique et la sécheresse du régime pluviométrique à travers le monde, en mettant l'accent sur la région méditerranéenne et l'Algérie en particulier. Nous présenterons les principales conclusions des études antérieures menées sur ce sujet.

Le **deuxième chapitre** se concentrera sur une description détaillée de la zone d'étude, en mettant en évidence les caractéristiques climatiques, géographiques et environnementales spécifiques du bassin versant de la Medjerda. Nous examinerons les conditions climatiques dominantes, les variations topographiques, les caractéristiques hydrologiques et d'autres facteurs qui influencent le régime des précipitations et la sécheresse dans la région.

Dans le **troisième chapitre**, nous détaillerons les matériaux et les méthodes utilisés dans notre étude. Cela comprendra la description des données pluviométriques que nous avons utilisées, ainsi que les techniques d'analyse statistique que nous avons appliquées pour évaluer les tendances des précipitations et de la sécheresse. Nous expliquerons également les procédures de calcul de l'indice SPI à différentes échelles de temps, ce qui nous permettra de caractériser les périodes humides et sèches dans le bassin versant de la Medjerda.

Le **quatrième chapitre** constituera la partie principale de notre travail, où nous présenterons les résultats obtenus et les discussions qui en découlent. Nous examinerons les tendances des précipitations à la fois saisonnières et annuelles, en analysant les données pluviométriques sur une période de 54 ans. De plus, nous analyserons les tendances des valeurs de l'indice SPI pour différentes échelles de temps, en mettant en évidence les tendances observées et leur signification statistique.

CHAPITRE 1 :

Synthèse bibliographique

1. INTRODUCTION

Le changement climatique est devenu un sujet d'actualité majeur au cours de ce siècle. Les médias se demandent régulièrement si le climat change et si la Terre se réchauffera. Les pays moins développés, dépendant de l'agriculture non irriguée, sont particulièrement affectés. Les inondations et les sécheresses sont parmi les événements les plus dévastateurs, avec des exemples de catastrophes dans différents pays. Malgré les débats sur les causes, l'augmentation des températures est un fait indéniable, confirmant le réchauffement climatique global.

Les précipitations ont provoqué de violentes inondations ces dernières années, touchant divers pays. Les sécheresses ont également eu lieu dans plusieurs régions du globe. L'impact de ces événements peut varier considérablement selon leur intensité et leur localisation.

L'Afrique du Nord a connu de grandes sécheresses, notamment dans les années 40 et 80 jusqu'à nos jours. Les températures et les précipitations dans la région suivent la tendance mondiale. Après deux décennies de sécheresse, l'Algérie et le Maghreb ont récemment connu des périodes plus humides. Cependant, ces pluies ont entraîné des inondations et des dégâts matériels importants dans les zones urbaines. La diminution des ressources en eau due à la sécheresse est devenue une préoccupation urgente en Algérie.

2. CHANGEMENT CLIMATIQUE

Il est largement admis que le climat de la Terre est en train de changer, comme en témoigne la décennie 1990 qui a été la plus chaude des dix derniers siècles. Les récents événements climatiques d'envergure ont poussé la communauté scientifique à se pencher sur les changements climatiques et leurs conséquences socio-économiques.

Parmi ces manifestations, on peut citer la sécheresse qui a affecté les deux bandes tropicales de notre planète, en particulier les régions sahéliennes d'Afrique de l'Ouest, depuis les années 70. L'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM) a également constaté un réchauffement de la planète évalué à 0,5 °C depuis la moitié du siècle dernier. La décennie 2001-2010 a enregistré la moyenne décennale de température la plus élevée depuis le début des relevés météorologiques.

Parmi les résolutions communes des études menées par la communauté scientifique, il y a la mesure précise des fluctuations et leur interprétation statistique. À cette fin, plusieurs méthodes de détection des changements climatiques ont été développées.

Les changements climatiques impliquent des variations à long terme des valeurs moyennes des caractéristiques statistiques des variables étudiées sur de longues périodes. Cette notion diffère de la variabilité climatique, qui suppose une stationnarité et décrit les fluctuations des valeurs saisonnières ou annuelles par rapport à des valeurs de référence temporelles. Le suivi du cycle climatique de l'eau, reconnu comme l'une des manifestations majeures du climat, permet de comprendre certains aspects de son évolution. Ainsi, les variables les plus appropriées pour surveiller le climat sont les suivantes :

- Le débit des rivières.
- Le niveau des lacs.

- Les précipitations.
- Les températures de l'air et de l'eau.
- La date de formation et la durée de la couverture de glace.
- Le niveau des eaux souterraines.

De nombreuses études à travers le monde ont été menées pour détecter ces changements. En Afrique, notamment dans la région sahélienne, de nombreux auteurs ont mis en évidence, à partir des données hydro-pluviométriques, une phase de sécheresse qui a commencé dans les années 1970 et perdure jusqu'à présent. Dans cette région, les constatations suivantes ont été faites :

- 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 et raccourcissement de la saison des pluies.

L'étude de l'évolution des précipitations par rapport à l'indice de normalité dans plusieurs pays méditerranéens tels que l'Italie, l'Algérie, la France, la Grèce, l'Espagne, le Maroc, le Portugal et le Moyen-Orient a révélé les conclusions suivantes :

Des déficits de précipitations ont été observés dans une vaste zone lors des années 1944, 1945, 1970, 1973, 1980, 1981, 1989 et 1990, touchant au moins 4 à 6 des huit sous-régions étudiées. Certaines zones sont plus touchées 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.

En général, la sécheresse s'est manifestée dans la majorité des pays du bassin méditerranéen depuis le début des années 80.

Les études sur les changements climatiques dans les pays du bassin méditerranéen prévoient :

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

Ces changements se caractérisent notamment par une modification de l'intensité et de la répartition des précipitations, ainsi qu'une augmentation des phénomènes extrêmes tels que les inondations et les sécheresses. La rapidité et la persistance de ces phénomènes, à la fois dans le temps et dans l'espace, indiquent que cette tendance est en train de devenir structurelle en lien 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 [1]. 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 Registrant 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 [2].

En ce qui concerne l'Afrique, des changements significatifs dans les précipitations ont été observés dans différentes régions. En Afrique centrale, une augmentation de la pluviométrie annuelle a été observée au cours de la première moitié du XXe siècle. En revanche, en Afrique de l'Ouest, une diminution marquée de la pluviométrie a été détectée depuis la fin des années 1960, sans précédent au cours du siècle précédent. Certains pays de la région, tels que le Ghana, le Togo, le Bénin et la partie côtière du Nigeria, n'ont pas connu de changements notables dans leurs schémas de précipitations. En revanche, l'Afrique sahélienne a subi des fluctuations importantes au cours du siècle, avec une augmentation de la pluviométrie vers 1940 suivie d'une diminution vers 1970. La partie centrale de la région a connu une augmentation de la pluviométrie vers 1919, suivie d'une diminution vers 1970. Ces variations soulignent la complexité des schémas de précipitations en Afrique, avec des régions connaissant des augmentations et des diminutions distinctes au cours du siècle.

Ces changements dans les schémas de précipitations peuvent avoir des conséquences majeures sur l'agriculture, la disponibilité de l'eau et la sécurité alimentaire des populations concernées.

Les travaux de Paturel [3], ont utilisé le test de PETTIT pour détecter des ruptures dans les grands cours d'eau de la Côte d'Ivoire, ainsi que dans le débit de la rivière Bani à Douna au Mali. Ces études ont révélé une rupture préférentielle autour des années 1970, avec une diminution significative de 68% du débit du Bani à Douna. Les chercheurs ont également constaté que ces ruptures hydrologiques étaient en phase avec les ruptures pluviométriques, ce qui démontre un lien étroit entre le régime des cours d'eau et les précipitations.

De plus, l'année 1970 a été identifiée comme une année de rupture dans le découpage effectué par le filtre passe-bas de Hanning de la station de Grand-Lahou en Côte d'Ivoire. Ces années de rupture correspondent également à la période de rupture observée dans la plupart des stations pluviométriques en Côte d'Ivoire, qui s'étend de 1966 à 1971 [4]. Ces ruptures indiquent que la région de Grand-Lahou est globalement affectée par la fluctuation du régime pluviométrique observée à la fin des années 1960 et au début des années 1970 en Afrique de l'Ouest et en Afrique centrale, conformément aux références [5, 6].

Mahé et al. [7], ont identifié une tendance à la hausse des coefficients de tarissement dans le bassin versant du N'zo à l'ouest de la Côte d'Ivoire à partir de la rupture de 1970. Les volumes d'eau mobilisés ont évolué de manière inverse aux coefficients de tarissement. Ces volumes ont régulièrement diminué depuis 1986, une année caractérisée par une très faible pluviométrie et une sécheresse intense dans la région de Soubré. Cette sécheresse a entraîné une réduction des réserves d'eau dans la région et a affecté la recharge souterraine, ce qui a conduit à une diminution des volumes d'eau mobilisés dans les différents bassins versants de la région.

Assani [5], a également observé une augmentation des coefficients de tarissement à partir de 1969 dans cinq sous-bassins du fleuve Niger.

En ce qui concerne l'Afrique du Nord, comme l'Afrique de l'Ouest et centrale, elle n'échappe pas à la variabilité climatique. Une étude menée dans la région de Siliana en Tunisie, référencée dans [8], a examiné la sécheresse météorologique et hydrologique en utilisant plusieurs indices. Les résultats ont montré que la méthode des écarts à la moyenne a révélé un pourcentage de 60% d'années sèches, avec une sécheresse de classe modérée (35%). La fréquence d'années sèches successives est relativement élevée, avec 55% des années sèches étant constituées de deux, trois ou cinq années consécutives de sécheresse. En ce qui concerne la sécheresse hydrologique, elle est encore plus marquée, ce qui indique une asymétrie des apports et une tendance générale des phénomènes hydrologiques vers une faible hydraulicité.

Une autre étude menée par Benzart [9], a examiné la persistance de la sécheresse en Tunisie en utilisant des chaînes de Markov sur des séries de pluviométrie annuelle. Cette méthode a démontré 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%, avec une croissance du sud-ouest au nord-ouest.

Des études ont également signalé une baisse significative de la pluviométrie et des apports dans l'oued Merguellil au cours des dernières décennies, avec l'année 1988-1989 apparaissant comme une année de rupture dans plusieurs variables [10].

4. SECHERESSE EN ALGERIE :

Les travaux sur la pluviométrie en Algérie ont connu un développement plus approfondi à partir du XXe siècle. Avant cela, la plupart des analyses se limitaient à une approche superficielle basée sur le calcul des moyennes. Ce n'est qu'en 1946, grâce aux travaux de Seltzer sur le climat de l'Algérie, qu'une analyse détaillée de la pluviométrie a été établie.

Dans le cadre de ces études, en se basant sur la méthode comparative des moyennes (1974-1992 par rapport à celle de Chaumont 1913-1963) et à la moyenne de longue durée (1922-1992) pour les stations du nord de l'Algérie, des constatations ont été faites.

- 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.

Matari [11] donnent l'évolution d'un indice de sévérité de la sécheresse sur la même région et relèvent l'occurrence de sécheresse 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, Laborde [12] 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.

Khalidi [13] 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.

Meddi [14] 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...).

Mebarki [15] 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 hydraulicité) suivie par les années 1993-1994 et 2001-2002. Khoualdia et al. [16, 17] 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 Kettab [18] 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.

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, la prédiction des sécheresses par les indices de la circulation atmosphérique, et la mitigation des effets de la sécheresse. 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 [19].

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. 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.

CHAPITRE 2 :

Présentation de la zone d'étude

1. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE :

1.1. Situation géographique de bassin versant de Medjerda :

Dans notre étude, nous nous intéressons au bassin Medjerda-Mellegue. Cette zone est située aux frontières Algéro-Tunisiennes et couvre une superficie de 7841 km² (partie algérienne). Le bassin Medjerda-Mellégue (Figure 1) est limité au nord par le bassin des Côtiers Constantinois, à l'est par la Tunisie, à l'ouest par les bassins de la Seybouse et des Hauts Plateaux constantinois, et au sud par le bassin du Chott Melrhir.

La confluence de l'Oued Medjerda (Souk-Ahras) et de l'Oued Mellégue donne naissance à l'Oued Medjerda (cours d'eau principal). L'Oued Mellégue est le résultat de la jonction de deux oueds : le premier Oued Mellégue Amont, qui a une direction SO-NE, et le deuxième Oued Mellégue Aval, qui est le résultat de la confluence de l'Oued Kseub, de l'Oued Horiher, de l'Oued El Baiad et de l'Oued El Harcha. Par ailleurs, la jonction de l'Oued Meskiana et de l'Oued Chabro donne naissance à l'Oued Mellégue amont [20].

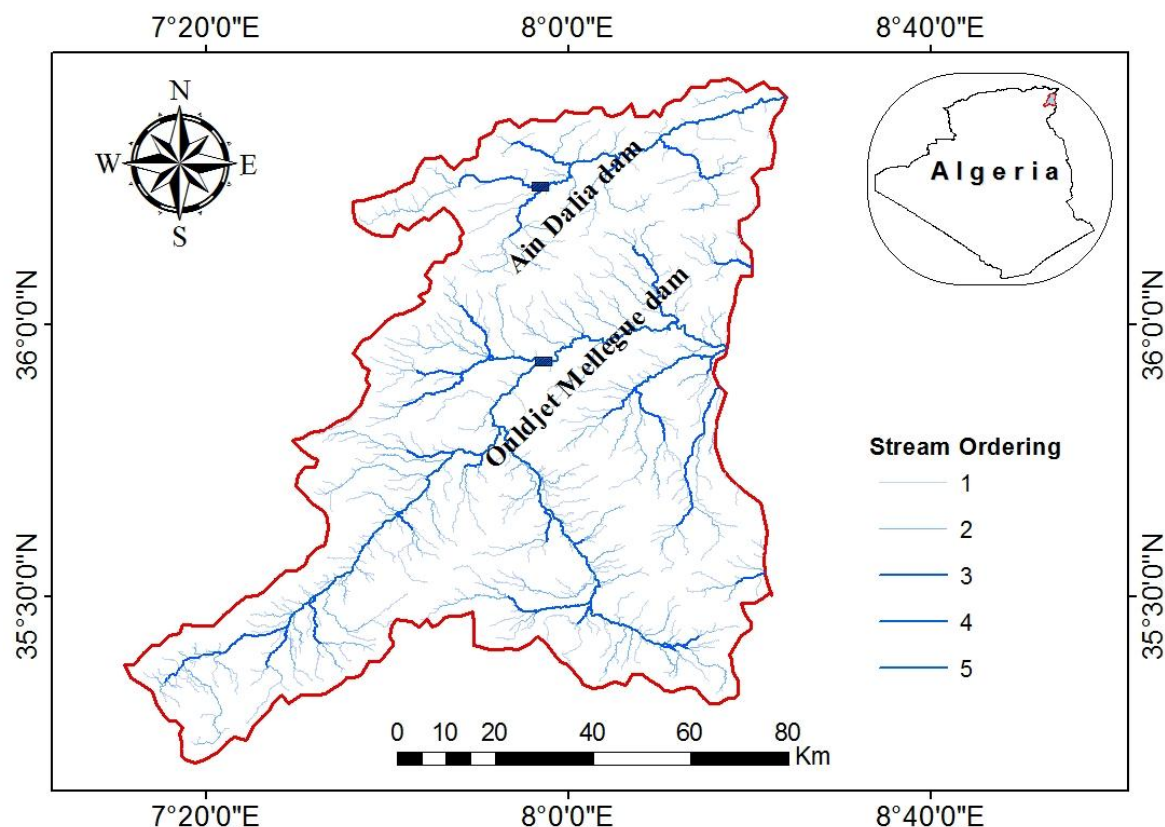


Figure 1 : Situation géographique et réseau hydrographique du bassin versant de Medjerda

Le réseau hydrographique du bassin versant de la Medjerda est constitué de plusieurs cours d'eau qui alimentent le fleuve Medjerda. Les principaux cours d'eau de ce bassin versant incluent l'Oued Medjerda, l'Oued Mellégue, l'Oued Kseub, l'Oued Horiher, l'Oued El Baiad, l'Oued El Harcha, l'Oued Meskiana et l'Oued Chabro. Ces cours d'eau se rejoignent et forment

un réseau complexe qui draine les eaux de pluie et les écoulements vers le fleuve Medjerda. Ce dernier est le cours d'eau principal du bassin versant et traverse plusieurs régions de l'Algérie et de la Tunisie avant de se jeter dans la mer Méditerranée.

1.2. La topographie :

La topographie ou le relief est un élément qui influe considérablement sur les différents paramètres hydroclimatiques d'une région donnée. Il joue un rôle très important dans la détermination du comportement hydrologique du bassin versant.

En se référant à la Figure 2, on peut constater que le bassin versant de la Medjerda se subdivise en deux parties :

La partie nord englobe le bassin versant de la Medjerda (Souk Ahras) et draine un ensemble de régions hétérogènes avec des altitudes élevées au nord, caractérisé par un relief accidenté où les écoulements ont un régime torrentiel.

La partie sud se situe au nord de l'Atlas tellien, dans la zone des hautes plaines (bassin versant de Mellégue). Cette partie est caractérisée par un relief principalement plat, avec des altitudes moyennes atteignant 800 mètres, entouré par un massif montagneux qui suit la ligne de partage des eaux de surface.

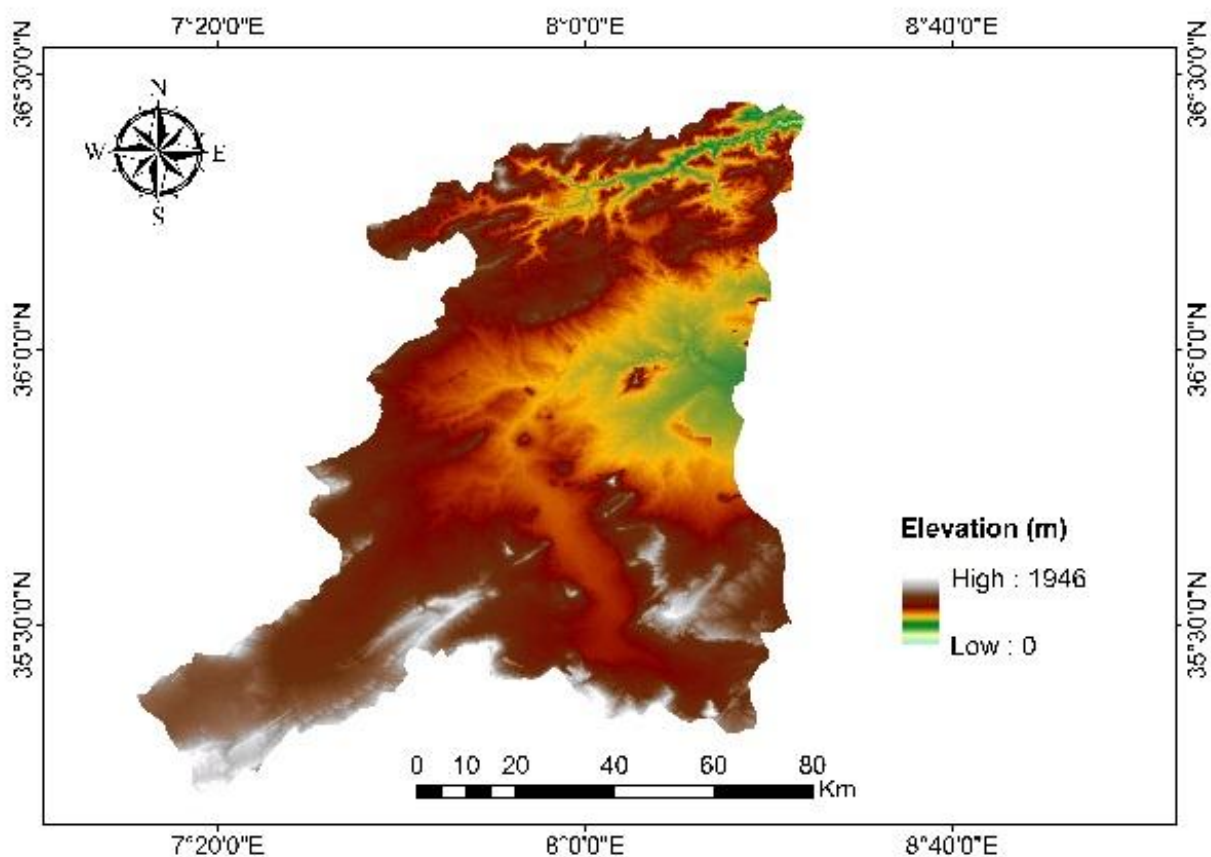


Figure 2 : Carte hypsométrique du Bassin Versant de la Medjerda

2. CLIMATOLOGIE ET OCCUPATION DU SOL :

2.1. Les ensembles morphologiques :

L'analyse orographique du bassin d'Oued Mellegue et Medjerda fait apparaître trois grands ensembles morphologiques :

a) Les zones de plaine :

C'est la partie la plus dominante, elle est caractérisée par une grande plénitude qui s'étend au Nord et à l'Est des piémonts entrent (600-1000 m) d'altitude, comme plaine de Tiffech, et M'Daourouch).

b) Les zones de montagnes :

Nous avons considéré que la zone de montagnes se situe au-delà de 1400m d'altitude. Le secteur montagneux orienté sensiblement NE-SO est composé des unités suivantes : Mont de Zoui, Mont d'Ouenza Dj Doukhane, Dj Dyr, Dj Metloug, Dj Ragouba, Dj Boubakouch aussi massifs de ras el alia, Tiffech...etc. Ces reliefs dont les continuités spatiales jouent le rôle d'une barrière entre un milieu semi-aride au Nord et les influences franchement Sahariennes au Sud.

c) Les zones de piedmonts :

Les piedmonts correspondent à des zones de transition entre les montagnes et les plaines à des altitudes moyennes qui varient entre (1000-1400m). Ils montrent un développement différent d'un secteur à un autre. Ces piedmonts correspondent en général à un ensemble de glacis d'ablation couverts sous forme de lanières résiduelles, le plus souvent scellés par une croûte calcaire [20].

2.2. Couvert végétal :

La végétation joue le rôle d'écran qui conditionne la rapidité du ruissellement superficiel et amortit son agressivité. Ainsi, les formes et l'importance de l'érosion hydrique sont directement liées, en plus d'autres facteurs, à la répartition de la couverture végétale dans le bassin.

La configuration géographique de la zone d'étude laisse apparaître 3 grands ensembles nettement distincts :

- ✓ Nord-est : zone montagneuse faisant partie de la chaîne Tellienne et qui constitue le patrimoine forestier de la région ;
- ✓ Sud-est : zone constituée de plaines agricoles et de pâturages ;
- ✓ Sud : zone des hauts plateaux

La superficie forestière de la zone d'intérêt est estimée à 114341,03 Hectares soit 44.41 % de la superficie totale des communes et elle est concentrée essentiellement au niveau des communes de Mechroha (75,48 %), Ouled-Moumen (50,01 %), Ain-Zana (52,98 %) et Zaarouria (49,53 %) [20].

2.3. Agriculture

On constate dans notre bassin que les céréales représentent 87 % des cultures herbacées et que ces derniers représentent 62 % de la superficie agricole utile. Par contre les sols agricoles utiles (S.A.U) représente 86 % de la superficie agricole totale et 55 % de la superficie totale de la région, tandis que les sols agricoles totaux (S.A.T) représente environ de 65 % de la superficie totale (Figure 3).

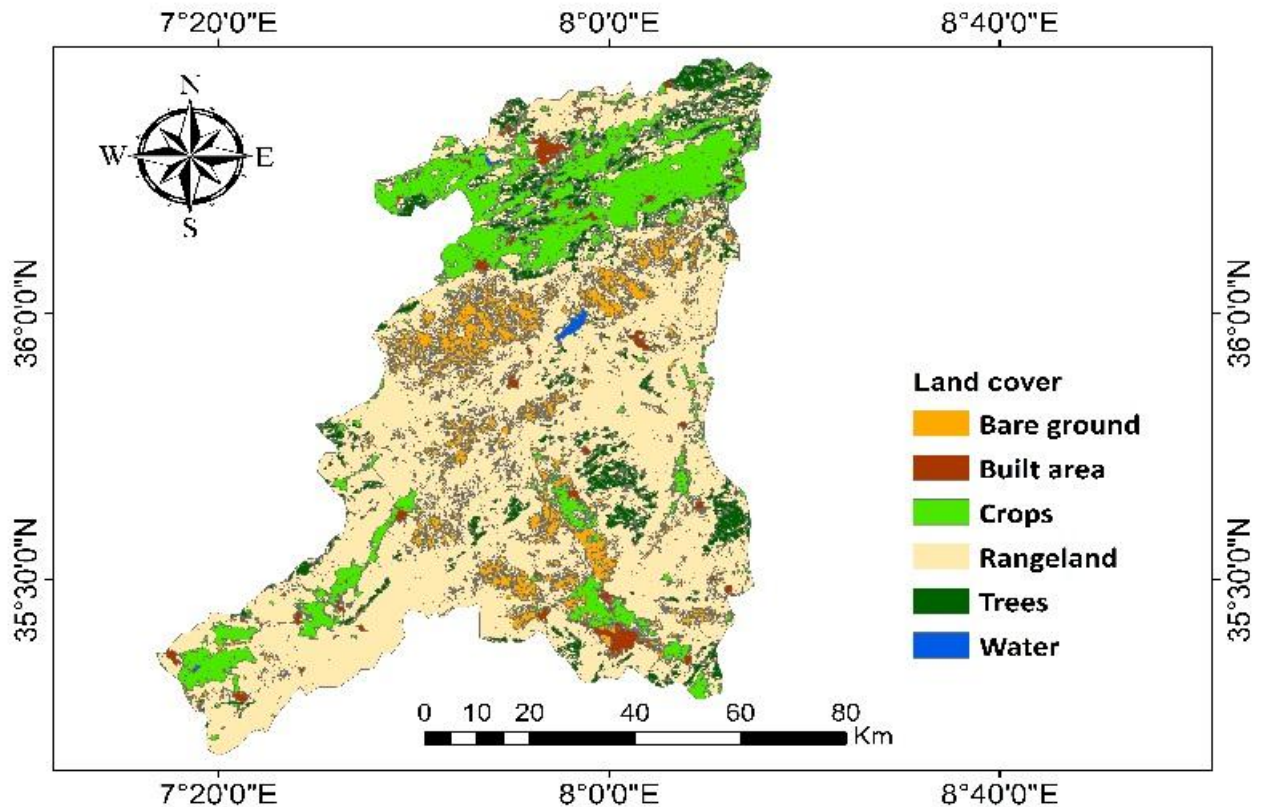


Figure 3 : Carte d'occupation du sol du bassin versant de la Medjerda

2.4. Climat :

Le climat de la Medjerda se caractérise par un climat continental à influence méditerranéenne et désertique avec une pluviométrie variant entre 300 et 950 mm/an. Le maximum des jours de fortes pluies hivernales et du vent violent rencontré en décembre, janvier, est provoqué par le passage successif des dépressions d'Ouest, de quelques dépressions méditerranéennes [21].

3. Analyse de la pluviométrie :

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 38 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 4).

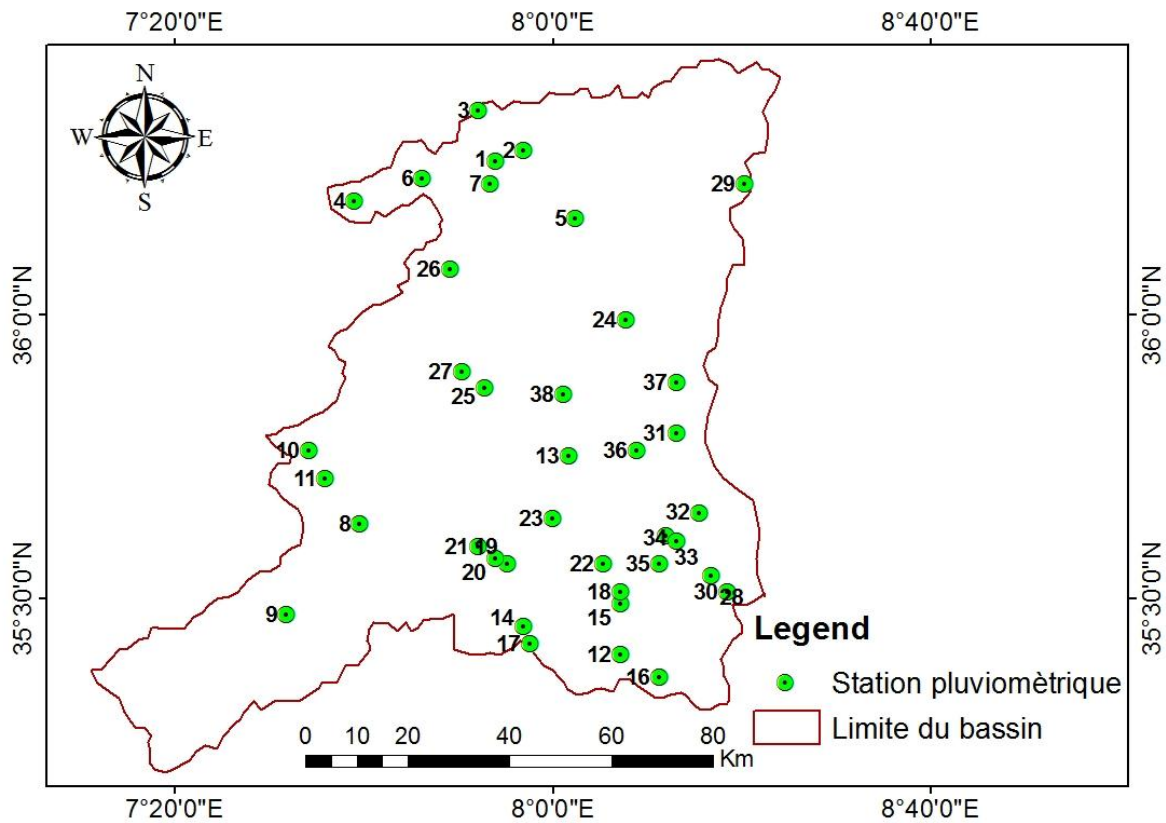


Figure 4 : Localisation des stations pluviométriques dans le bassin de la Medjerda

3.2. Caractéristiques des postes pluviométriques :

Les caractéristiques des stations pluviométriques étudiées sont empilées dans le tableau 1. Ces stations présentent une longue période d'enregistrement de données allant de 1966 à 2017.

L'analyse de la distribution spatiale des valeurs du coefficient de variation (CV) revêt une grande importance, car elle permet non seulement de calculer les valeurs moyennes du CV, mais aussi de fournir une vue d'ensemble des risques associés aux événements climatiques extrêmes, tels que les inondations et les sécheresses.

Selon les résultats obtenus, on observe un schéma spatial inversé en ce qui concerne les précipitations annuelles et leur coefficient de variation. Les régions où la variabilité interannuelle des précipitations est élevée présentent des valeurs de CV plus élevées, tandis que les régions où la variabilité est faible affichent des valeurs de CV plus basses.

Plus précisément, les zones montagneuses du sud de la région étudiée présentent la plus grande variabilité des précipitations, avec des valeurs de CV atteignant 57 %. Ces régions enregistrent également les niveaux de précipitations annuelles les plus faibles. En revanche, les régions situées au nord du bassin ont les valeurs de CV les plus faibles, indiquant une variabilité interannuelle plus faible, mais elles affichent également les niveaux de précipitations annuelles les plus élevés.

Tableau 1 : Caractéristiques des stations pluviométriques

N°	Nom de la station	Code	Latitude (°)	Longitude (°)	P moy (mm)	σ (mm)	CV (%)
1	Souk Ahras	120101	36.27	7.90	608.5	178.3	29
2	Ouillen	120102	36.29	7.95	712.6	184.4	26
3	Ain Senour	120103	36.36	7.87	926.5	251.9	27
4	Khemissa	120104	36.20	7.65	552.2	181.4	33
5	Taoura	120105	36.17	8.04	461	182.3	32
6	Hennancha	120113	36.24	7.77	696.2	260.7	37
7	Ain Dalia	120115	36.23	7.89	740.7	164.9	22
8	Meskiana	120201	35.63	7.66	355.5	203.3	57
9	Dhalaa	120202	35.47	7.53	433.3	237.4	55
10	Ain Sadjra	120203	35.76	7.57	423	193.9	46
11	Rehia	120208	35.71	7.60	380.6	193.4	51
12	Tebessa	120301	35.40	8.12	388.4	144.5	37
13	Boukhadra	120302	35.75	8.03	347.4	138.3	40
14	Hammamet	120304	35.45	7.95	351.7	136.9	39
15	Ain Kissa	120306	35.49	8.12	364.2	173.3	48
16	Bekkaria	120307	35.36	8.19	270.6	147.9	55
17	Bir Mokade	120310	35.42	7.96	316.9	128.2	40
18	Ain el Kebira	120311	35.51	8.12	360.5	178.3	49
19	Bir Dhab	120313	35.56	7.92	355.5	174.7	49
20	Toualbia	120314	35.57	7.90	326.5	138.7	42
21	El Balala	120316	35.59	7.87	274	141	51
22	Ouled Hamza	120317	35.56	8.09	304.4	146.2	48
23	Morsott	120318	35.64	8.00	279.4	124.5	45
24	Ouenza	120401	35.99	8.13	283.8	109.2	38
25	El Aouinet	120402	35.87	7.88	309.9	124	40
26	Mdaourouch	120403	36.08	7.82	402.1	188.5	47
27	Messloulou	120405	35.90	7.84	263	149.9	57
28	Ras el Aioun	120501	35.54	8.28	385.3	163.4	42
29	Sakiet Youcef	120503	36.23	8.34	491.3	183.7	37
30	El Kouif	120504	35.51	8.31	312.7	119.2	38
31	El Meridj	120505	35.79	8.22	258.6	115.4	45
32	Ain Zerga	120510	35.65	8.26	342.3	129.7	38
33	Gastel	120511	35.61	8.20	347.5	191.7	55
34	Boulhaf Dir	120512	35.60	8.22	260.3	114.2	44
35	Ain Erkel	120514	35.56	8.19	426.2	131.5	31
36	El Azreg	120517	35.76	8.15	307.2	146.4	48
37	Dyr Djemaa	120519	35.88	8.22	364.1	153.6	42
38	Dzeroua	120521	35.86	8.02	300.3	135.9	45

σ . et CV indiquent respectivement l'écart-type et le coefficient de variation.

Ces résultats suggèrent l'existence d'un gradient spatial de variabilité des précipitations entre les côtés nord et sud du bassin étudié. Les régions montagneuses du sud se caractérisent par une variabilité plus élevée et des niveaux de précipitations annuelles plus faibles, tandis que les

régions du nord présentent une variabilité plus faible mais des niveaux de précipitations annuelles plus élevés.

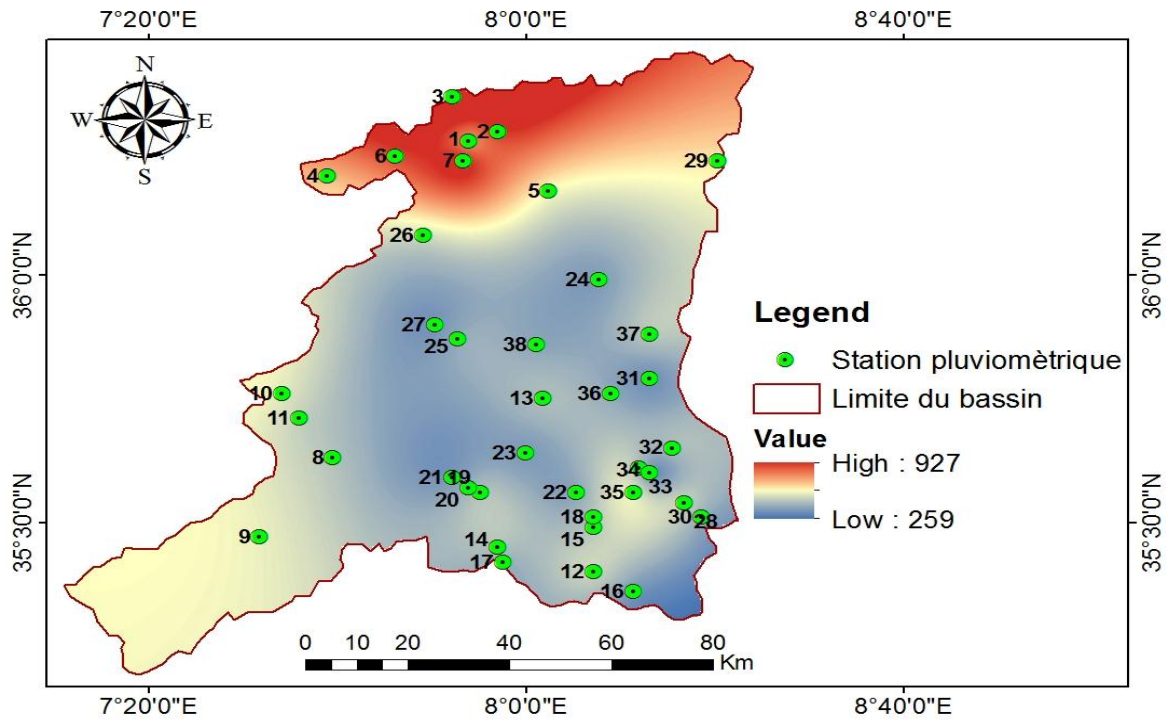


Figure 5 : Répartition spatiale des précipitations moyennes annuelles du bassin versant de la Medjerda (1966-2017)

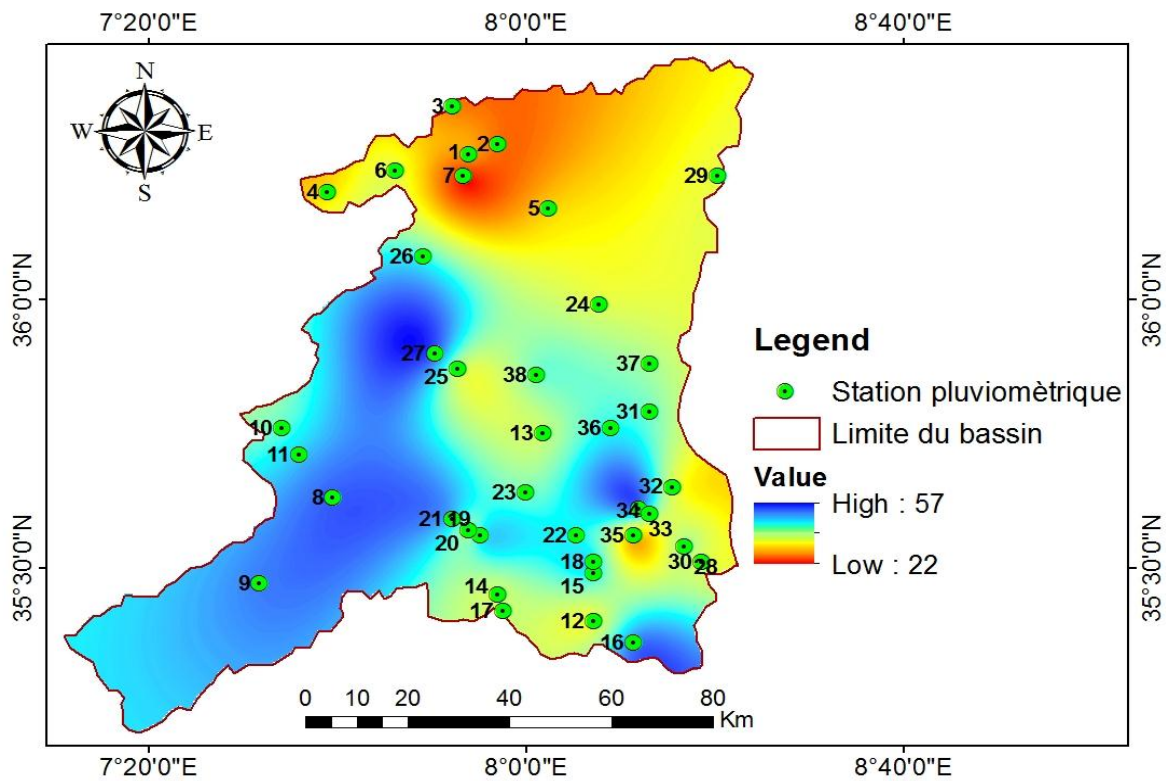


Figure 6 : Répartition spatiale du coefficient de variation des précipitations moyennes annuelles du bassin versant de la Medjerda (1966-2017)

CHAPITRE 3 :

Matériels et méthodes

1. INTRODUCTION :

La compréhension des variations des précipitations à différentes échelles de temps est cruciale pour une gestion durable de l'eau et une planification efficace. Les variations saisonnières et les composantes tendancielle des précipitations sont examinées, et des méthodes telles que l'analyse de Mann-Kendall sont utilisées pour identifier les tendances. Les chercheurs de différentes disciplines se concentrent sur la détection et l'évaluation des tendances liées aux changements climatiques. Enfin, il est souligné que l'étude de la variabilité spatiale des précipitations et la cartographie des changements observés sont essentielles pour mieux comprendre l'évolution du climat.

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

Le test de Mann-Kendall [22, 23] 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 :

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

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

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 :

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

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

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

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 $Z < -1.96$.

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 Sen [24]. La pente de Sen est donnée par l'expression suivante :

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

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. INDICE STANDARDISE DE PRECIPITATIONS SPI :

Le SPI (Indice Standardisé de Précipitation) a été développé par McKee et al. [25] pour déterminer la quantité de déficit de précipitations à différentes échelles de temps, telles que 1 mois, 48 mois, et ainsi de suite. Le SPI est fortement recommandé par l'Organisation météorologique mondiale (OMM) pour caractériser les conditions de sécheresse sévère [26]. Dans cette étude, les conditions de sécheresse et d'humidité ont été évaluées à l'aide du SPI à des échelles de temps variables telles que 3, 6, 12 et 24 mois. Cependant, il est approprié d'utiliser le SPI pour une échelle de temps courte, comme 3 ou 6 mois, afin de détecter les événements de sécheresse qui peuvent avoir un impact négatif sur les pratiques agricoles. Une échelle de temps plus longue, comme 12 à 24 mois, est plus adaptée à la gestion des ressources en eau. Angelidis et al. [27] ont fourni une analyse détaillée de la méthode pour déterminer la valeur du SPI. Une fonction de densité de probabilité (PDF) appropriée doit être ajustée pour chaque échelle de temps à la distribution de fréquence empirique des précipitations cumulées afin de déterminer l'indice. Une fonction Gamma est considérée comme spécifique. Pour chaque mois de l'année et pour chaque agrégation temporelle, les paramètres de forme et d'échelle doivent être déterminés, par exemple, l'approximation de Thom [28].

Étant donné que la distribution Gamma n'est pas définie dans le cas où la quantité de précipitations $x = 0$, une fonction de distribution cumulative (CDF) modifiée doit être prise en compte pour tenir compte des valeurs nulles dans l'ensemble des échantillons.

$$H(x) = q + (1 - q)G(x) \quad (6)$$

En plus de $G(x)$, la fonction de distribution cumulative (CDF) et q représentent la probabilité de précipitations nulles. Cette valeur est déterminée à l'aide du rapport entre le nombre de zéros dans les données de précipitations (m) et le nombre total d'observations (n). Finalement, la CDF

est modifiée en une distribution SD (Distribution Statistique) à l'aide d'une conversion approximative, comme recommandé par Abramowitz and Stegun [29].

$$SPI = \begin{cases} -\left(t - \frac{c_0 + c_1t + c_2t^2}{1 + d_1t + d_2t^2 + d_3t^3}\right), & 0 < H(x) < 0.5 \\ +\left(t - \frac{c_0 + c_1t + c_2t^2}{1 + d_1t + d_2t^2 + d_3t^3}\right), & 0.5 < H(x) < 1.0 \end{cases} \quad (7)$$

Où, $c_0 = 2,515517$; $c_1 = 0,802853$; $c_2 = 0,010328$; et $d_1 = 1,432788$; $d_2 = 0,189269$; $d_3 = 0,001308$. La valeur de t peut être calculée comme suit :

$$t = \begin{cases} \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(H(x))^2}\right)}, & 0 < H(x) < 0.5 \\ \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(1-H(x))^2}\right)}, & 0.5 < H(x) < 1.0 \end{cases} \quad (8)$$

McKee et al. [25] ont divisé l'indice SPI en trois catégories pour les conditions de sécheresse et d'humidité, à savoir les classes modérées, sévères et extrêmes, comme indiqué dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Catégories de sécheresse et d'humidité définies par les valeurs du SPI

Valeurs du SPI	Degré d'humidité ou de sécheresse.
$\geq + 2,0$	Humidité extrême
$+ 1,5$ à $+ 1,99$	Humidité forte
$+ 1,0$ à $+ 1,49$	Humidité modérée
$+ 0$ à $+ 0,99$	Humidité légère
0	Normalité absolue
0 à $- 0,99$	Sécheresse légère
$-1,0$ à $- 1,49$	Sécheresse modérée
$-1,5$ à $- 1,99$	Sécheresse forte
$\leq -2,0$	Sécheresse extrême

4. LES DIFFERENTES INTERPRETATIONS DE L'INDICE SPI :

Comme cela a déjà été précisé, l'indice SPI a été conçu pour quantifier le déficit de précipitations à de multiples échelles de temps, soit un calcul de moyenne sur une fenêtre glissante. Ces échelles de temps traduisent les incidences de la sécheresse sur les différents types de ressources en eau et répondent aux besoins de différents décideurs. Les conditions météorologiques et l'humidité du sol (agriculture) réagissent relativement vite aux anomalies de précipitations, à une échelle temporelle de 1 à 6 mois par exemple, tandis que les eaux souterraines, le débit des cours d'eau et les volumes stockés dans les réservoirs sont sensibles aux anomalies de précipitations à plus long terme, c'est-à-dire à des échelles de temps de l'ordre

de 6 à 24 mois voire plus. La période sur laquelle porte l'indice SPI variera donc en fonction du type de sécheresse faisant l'objet des analyses et applications envisagées : on prendra par exemple l'indice SPI sur 1 à 2 mois pour une sécheresse météorologique, sur 1 à 6 mois pour une sécheresse agricole et sur 6 à 24 mois, voire plus, pour une sécheresse hydrologique

4.1. Indice SPI sur 6 mois (moyen terme)

L'indice SPI sur 6 mois établit la comparaison entre les précipitations sur la période de six mois examinée et les totaux des précipitations pour cette même période de six mois de toutes les années pour lesquelles on dispose de relevés. À titre d'exemple, un indice SPI sur 6 mois se terminant fin mars fournirait une très bonne indication des quantités de précipitations observées au cours de la saison humide allant d'octobre à mars, qui revêt une grande importance pour certaines zones méditerranéennes. À partir de 6 mois, on peut aussi commencer à associer l'information que fournit un indice SPI avec les anomalies du débit des cours d'eau et des niveaux des réservoirs, selon la région et la période de l'année considérées.

4.2. Indice SPI sur 12 mois (long terme)

À ces échelles de temps, l'indice SPI fournit une représentation des régimes de précipitations à longue échéance. L'indice SPI sur 12 mois établit la comparaison entre les précipitations sur une période de 12 mois consécutifs et celles enregistrées sur la même série de 12 mois consécutifs de toutes les années pour lesquelles on dispose de relevés. Étant donné que ces échelles de temps constituent le cumul de périodes plus courtes pouvant se situer au-dessus ou au-dessous de la normale, les valeurs des indices SPI établis pour une période relativement longue tendent à graviter autour de zéro, à moins qu'une tendance humide ou sèche bien distincte ne se soit installée. Les indices SPI pour ces échelles de temps sont en général associés au débit des cours d'eau, au niveau des réservoirs et au niveau des eaux souterraines à relativement long terme.

5. MÉTHODE DE CALCUL

- ✓ L'indice SPI d'un lieu donné se calcule, pour la période choisie, à partir des relevés à long terme des précipitations. La série des données de longue durée est ajustée à une distribution de probabilité que l'on transforme ensuite en une distribution normale pour que l'indice SPI moyen, du lieu considéré et pour le laps de temps étudié.
- ✓ Les valeurs positives de l'indice SPI indiquent des précipitations supérieures à la médiane et les valeurs négatives, des précipitations inférieures à la médiane.
- ✓ L'indice SPI indique qu'une sécheresse débute quand sa valeur est inférieure ou égale à -1,0 et qu'une sécheresse se termine quand sa valeur devient positive.

L'indice de précipitations normalisé (SPI) a été évalué en utilisant le logiciel MDM (*Meteorological Drought Monitor*), développé par le laboratoire des travaux de récupération et de gestion des ressources en eau de l'Université technique nationale d'Athènes, en Grèce. L'indice de sécheresse a été estimé pour la période 1966-2017 pour les 38 stations pluviométriques du bassin versant de la Medjerda, à différentes échelles de temps telles que 3, 6, 12 et 24 mois.

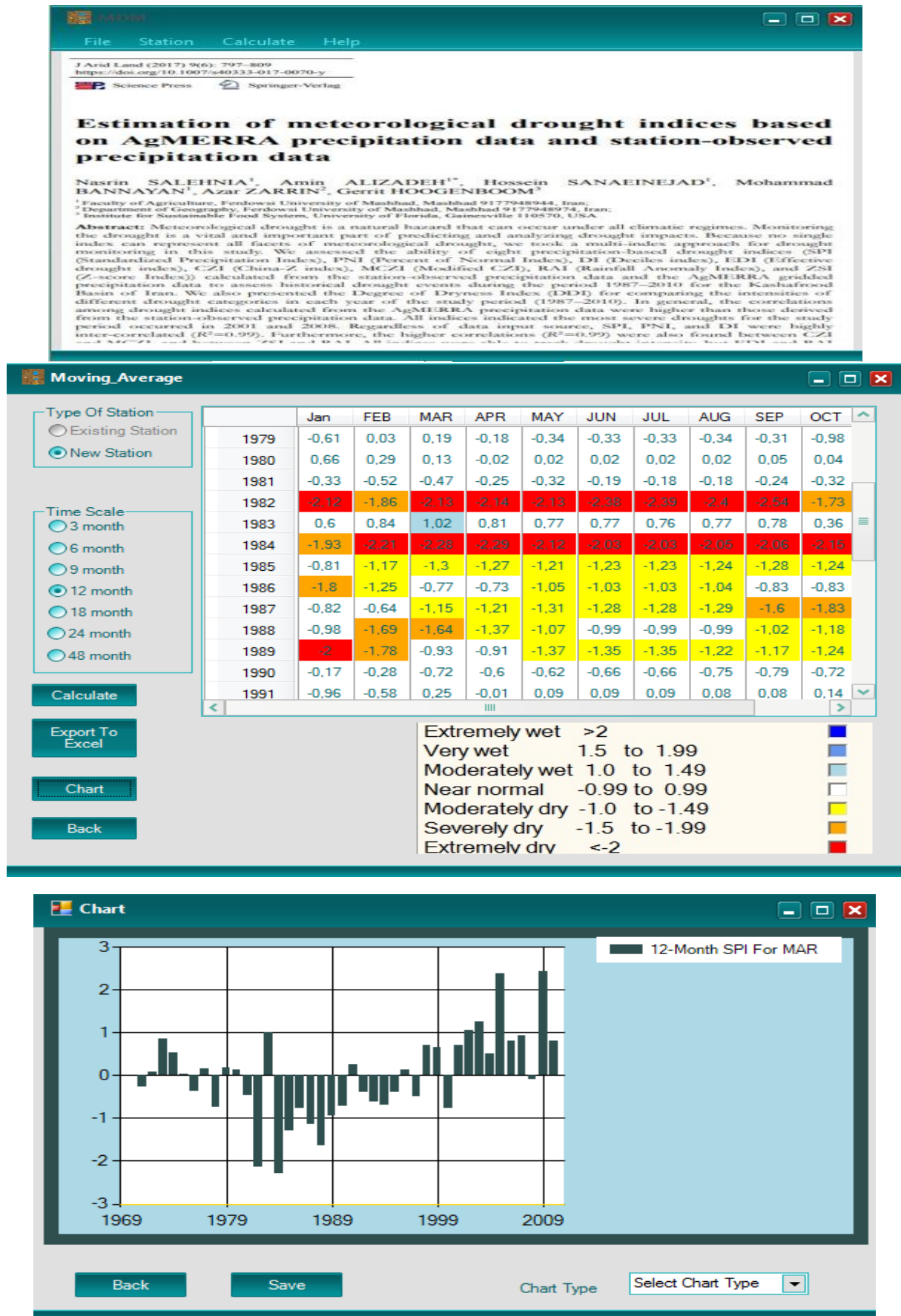


Figure 7 : Interface du logiciel MDM

6. ANALYSE DE TENDANCE DE L'INDICE DE PRECIPITATIONS NORMALISE (SPI) :

Şen [30] a présenté l'ITA (Innovative Trend Analysis) comme une méthode permettant d'identifier les tendances dans différentes variables météorologiques, hydrologiques et environnementales. L'ITA a été comparée à d'autres méthodes statistiques et s'est révélée réalisable et efficace pour l'analyse des tendances. Cette méthode peut être appliquée de manière universelle, indépendamment de la corrélation entre les séries, de la taille des séries temporelles, de la période saisonnière et de la distribution hypothétique. De plus, l'ITA est capable d'identifier certaines tendances non détectées par le test de Mann-Kendall (MK). Elle permet également de visualiser les sous-tendances cachées importantes sur un graphique. Pour ce faire, la série temporelle est divisée en deux parties égales et triées séparément par ordre croissant. Ensuite, la première moitié de la série est représentée sur l'axe X et la deuxième moitié sur l'axe Y.

La figure 8 illustre la méthode ITA sur le système de coordonnées cartésiennes de manière graphique.

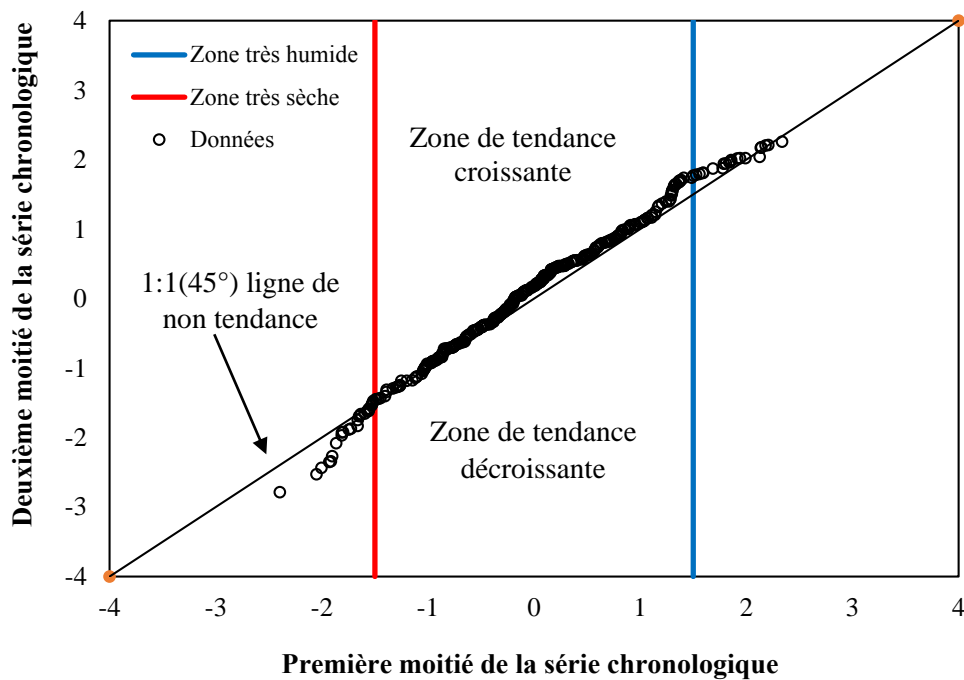


Figure 8 : Modèle de la méthode innovante d'analyse de tendance (ITA) montre la zone de tendance à la hausse et à la baisse.

Dans le cas où les données se trouvent sur une ligne droite 1:1 (45°), la série temporelle n'a pas de tendance. Cependant, lorsque les données sont présentes dans la zone triangulaire supérieure (inférieure) de la ligne droite, la tendance de la série temporelle est croissante. De cette manière, cette méthode peut trouver de manière appropriée les tendances à faible, moyenne et haute valeur de toute série temporelle hydro-météorologique ou hydro-climatique. Par exemple, la figure 8 montre les résultats d'une tendance négative pour les valeurs les plus faibles, tandis que les valeurs les plus élevées montrent une tendance positive. Aucune tendance n'a été observée pour les valeurs moyennes près de la ligne idéale 1:1.

Dans la présente étude, afin d'identifier facilement les tendances possibles pour les conditions extrêmement sèches et humides, deux bandes verticales ont été ajoutées en rouge sur la figure 3, correspondant à la sécheresse extrême ($SPI = -1,5$). La bande bleue représente la condition extrêmement humide ($SPI = +1,5$). Ainsi, le terme "gravité de la sécheresse" signifie les valeurs de SPI inférieures à $-1,50$.

CHAPITRE 4 :

Résultats et discussion

1. INTRODUCTION :

L'étude de la variabilité saisonnière et annuelle 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. La présente étude 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 signification de 0.05.

2. ETUDE DE LA TENDANCE DES PRECIPITATION :

2.1 Tendance des précipitations annuelle :

Selon le test MK, les valeurs Z et les pentes des précipitations saisonnières et annuelles de Sen ont été calculées sur une période de 52 ans entre 1966 et 2017 dans le bassin de la Medjerda. Les résultats sont présentés dans le Tableau 3. La tendance à la hausse est indiquée par une valeur Z positive, tandis que la tendance à la baisse est représentée par une valeur Z négative.

Tableau 3 : Valeurs de Z (direction) de Mann-Kendall Z et ampleur de changement (1966-2017)

N°	Code de station	Automne		Hiver		Printemps		Eté		Annuelle	
		Z value	Sen's slope	Z value	Sen's slope	Z value	Sen's slope	Z value	Sen's slope	Z value	Sen's slope
1	120101	0.30	0.24	1.48	2.14	-0.71	-0.68	1.31	0.35	0.78	1.46
2	120102	1.15	1.06	1.34	1.63	-1.61	-1.25	0.51	0.09	0.78	1.34
3	120103	-0.11	-0.05	-0.61	-1.03	-4.77	-4.41	0.73	0.18	-2.52	-6.26
4	120104	-0.13	-0.08	0.21	0.23	-0.09	-0.07	0.75	0.16	0.61	1.10
5	120105	-1.28	-0.42	-1.40	-0.57	-1.61	-0.59	1.02	0.12	-1.93	-5.54
6	120113	1.15	0.81	0.89	1.15	-0.28	-0.14	1.58	0.41	1.20	2.54
7	120115	-0.64	-0.50	0.73	0.81	-1.82	-1.12	1.11	0.29	-0.34	-0.52
8	120201	0.93	0.63	-1.04	-0.48	-0.86	-0.47	-0.59	-0.17	-0.86	-1.35
9	120202	-0.62	-0.43	-0.13	-0.12	-1.07	-0.70	-0.46	-0.13	-0.70	-1.85
10	120203	0.84	0.50	0.81	0.67	-0.31	-0.23	-0.13	-0.03	0.42	0.66
11	120208	1.17	0.75	0.31	0.18	-0.05	-0.06	0.17	0.05	0.78	1.58
12	120301	1.19	0.75	-0.90	-0.45	-1.62	-0.92	0.36	0.12	-0.28	-0.40
13	120302	0.91	0.58	-0.75	-0.46	-0.36	-0.22	1.14	0.33	-0.15	-0.55
14	120304	-0.65	-0.36	-1.15	-0.62	-2.39	-1.29	0.31	0.08	-2.01	-2.40
15	120306	-1.52	-0.82	-1.82	-1.13	-2.52	-1.18	-1.16	-0.36	-2.31	-3.81
16	120307	0.51	0.30	-0.61	-0.21	-0.67	-0.30	-0.22	-0.06	-0.39	-0.40
17	120310	1.00	0.51	-1.19	-0.51	-0.83	-0.49	0.23	0.04	-0.19	-0.23
18	120311	-0.39	-0.19	-0.21	-0.13	-1.79	-1.04	-0.61	-0.21	-0.78	-1.87
19	120313	0.42	0.23	0.26	0.22	-0.37	-0.17	-0.18	-0.04	0.01	0.07
20	120314	-1.59	-0.68	-1.70	-0.79	-1.30	-0.62	1.93	0.67	-1.35	-1.72
21	120316	-1.18	-0.53	-2.34	-0.99	-2.93	-1.31	-1.11	-0.30	-3.26	-3.59

22	120317	0.13	0.11	-1.24	-0.61	-1.07	-0.62	-0.54	-0.17	-0.78	-1.22
23	120318	-1.44	-0.71	-2.07	-0.82	-2.60	-1.25	-0.21	-0.07	-2.60	-3.20
24	120401	0.27	0.10	-2.20	-0.73	-2.17	-1.04	0.45	0.12	-1.92	-2.07
25	120402	0.70	0.34	-1.85	-0.82	-1.46	-0.83	-0.09	-0.03	-1.40	-1.94
26	120403	1.89	1.00	0.75	0.53	-0.07	-0.04	2.61	0.63	1.13	2.14
27	120405	-1.72	-0.83	-2.49	-1.22	-3.21	-1.31	-0.74	-0.21	-3.05	-3.51
28	120501	-0.59	-0.29	-1.78	-1.12	-2.34	-1.16	-0.39	-0.14	-1.81	-3.17
29	120503	-0.92	-0.53	-1.62	-1.21	-2.71	-1.47	0.62	0.11	-1.92	-3.43
30	120504	0.40	0.18	-0.45	-0.19	-1.93	-0.95	0.20	0.05	-1.11	-1.55
31	120505	-0.13	-0.01	-0.36	-0.12	-0.62	-0.28	1.08	0.23	-0.34	-0.41
32	120510	-0.32	-0.13	-0.21	-0.12	-0.81	-0.62	0.06	0.01	-0.99	-1.11
33	120511	-1.92	-0.91	-2.23	-0.96	-1.84	-0.81	-1.24	-0.33	-2.09	-3.31
34	120512	-1.41	-0.71	-1.11	-0.45	-1.48	-0.62	1.05	0.21	-1.78	-1.97
35	120514	-0.67	-0.35	-1.78	-0.92	-1.38	-0.71	-0.26	-0.08	-2.09	-2.17
36	120517	-1.95	-0.90	-2.65	-1.44	-3.16	-1.33	-1.39	-0.18	-3.42	-5.24
37	120519	-0.73	-0.39	-1.08	-0.52	-1.01	-0.51	-0.60	-0.20	-1.25	-1.68
38	120521	0.33	0.16	-1.16	-0.61	-1.32	-0.66	0.82	0.21	-0.59	-1.06

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

Tableau 4 : Nombre et pourcentage des stations pour chaque type de tendance saisonnière

Nombre de stations					
	Automne	Hiver	Printemps	Eté	Annuel
Tendance positive	17	9	0	21	8
Tendance négative	21	29	38	17	30
Tendance significative positive	0	0	0	1	0
Tendance significative négative	0	6	10	0	9
Pourcentages d'occurrence de tendance					
	Automne	Hiver	Printemps	Eté	Annuel
Tendance positive	44.74	23.68	0	55.26	21.05
Tendance négative	55.26	76.32	100	44.74	78.95
Tendance significative positive	0	0	0	2.63	0
Tendance significative négative	0	15.79	26.32	0	23.68

D'après le tableau 4, il est clair qu'il y a une variation dans les tendances des précipitations observées dans différentes saisons et sur l'ensemble de l'année.

En automne, près de la moitié des stations (44,74%) ont montré une tendance positive, ce qui indique une augmentation des précipitations. Cependant, plus de la moitié des stations (55,26%) ont montré une tendance négative, indiquant une diminution des précipitations.

En hiver, un peu moins d'un quart des stations (23,68%) ont montré une tendance positive, tandis que la majorité des stations (76,32%) ont montré une tendance négative. De plus, environ

15,79% des stations ont montré une tendance significative négative, ce qui suggère une diminution significative des précipitations pendant la saison hivernale.

Au printemps, toutes les stations ont montré une tendance négative, indiquant une diminution des précipitations dans cette saison. De plus, environ un quart des stations (26,32%) ont montré une tendance significative négative, soulignant une diminution significative des précipitations.

En été, un peu plus de la moitié des stations (55,26%) ont montré une tendance positive, ce qui suggère une augmentation des précipitations. En revanche, environ 45% des stations ont montré une tendance négative. De plus, un faible pourcentage des stations (2,63%) ont montré une tendance significative positive, indiquant une augmentation significative des précipitations en été.

Pour l'ensemble de l'année, environ (21,05%) des stations ont montré une tendance positive, tandis que près de 80% des stations ont montré une tendance négative. De plus, environ 24 % des stations ont montré une tendance significative négative, mettant en évidence une diminution significative des précipitations sur l'année.

Ces informations soulignent la variabilité des tendances des précipitations dans différentes saisons. Les tendances positives indiquent une augmentation des précipitations, tandis que les tendances négatives indiquent une diminution. Les tendances significatives positives et négatives soulignent des changements plus marqués dans les niveaux de précipitations.

Dans la section suivante, nous avons élaboré des cartes qui affichent les tendances des stations pluviométriques avec leurs positions géographiques. Chaque carte représente les tendances pour une saison spécifique ainsi que pour l'ensemble de l'année.

Dans les cartes que nous avons élaborées, les stations avec une tendance positive sont symbolisées par un $Z > 0$, les stations avec une tendance négative sont symbolisées par un $Z < 0$, et les tendances significatives positives ou négatives sont symbolisées par un $Z > +1.96$ ou $Z < -1.96$.

En utilisant ces symboles, les stations pluviométriques sont représentées de la manière suivante :

- ✓ Les stations avec une **tendance positive** (augmentation des précipitations) sont indiquées par un $Z > 0$.
- ✓ Les stations avec une **tendance négative** (diminution des précipitations) sont indiquées par un $Z < 0$.
- ✓ Les **tendances significatives positives ou négatives** sont symbolisées par un $Z > +1.96$ ou $Z < -1.96$. Cela indique une augmentation ou une diminution significative des précipitations.

Ces cartes permettent de visualiser les tendances des stations pluviométriques dans différentes saisons et sur l'ensemble de l'année, en mettant l'accent sur les variations spatiales. Elles peuvent fournir des informations précieuses sur la répartition géographique des tendances et aider à mieux comprendre les schémas et les risques liés aux précipitations dans la région étudiée.

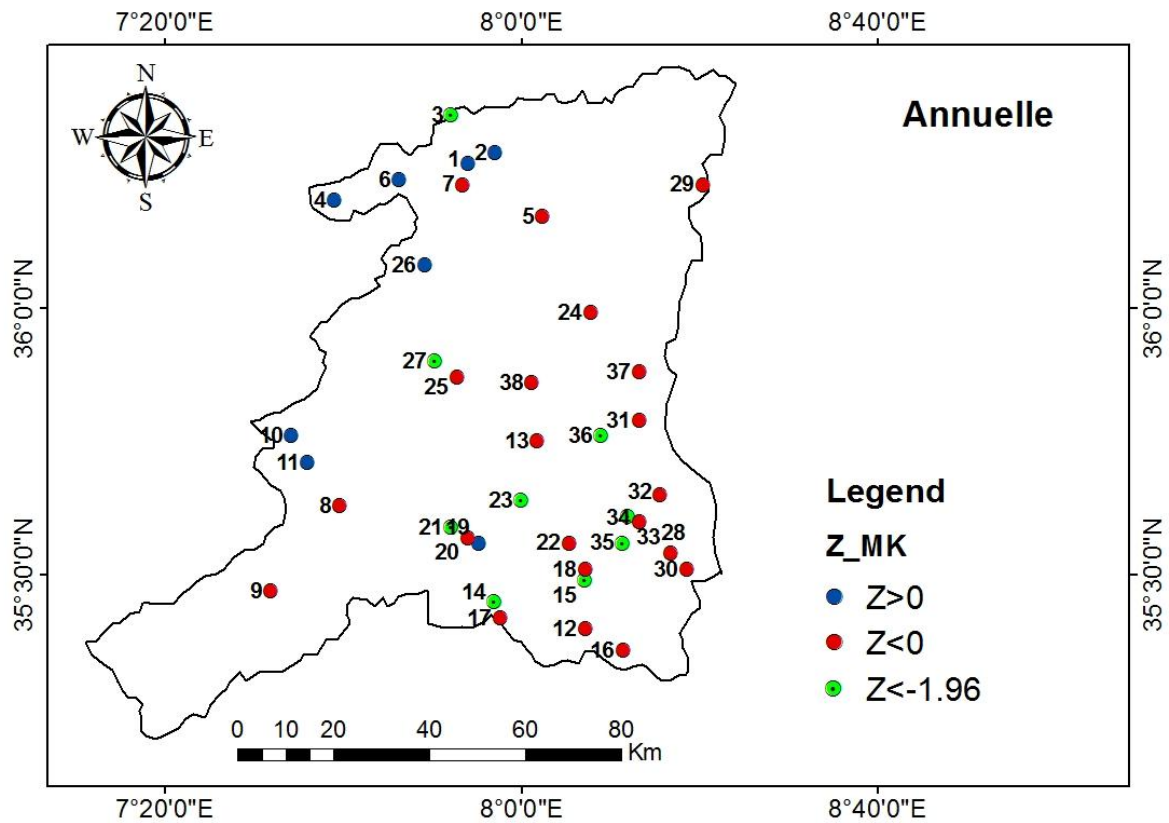


Figure 9 : Carte de la tendance annuelle des stations étudiées

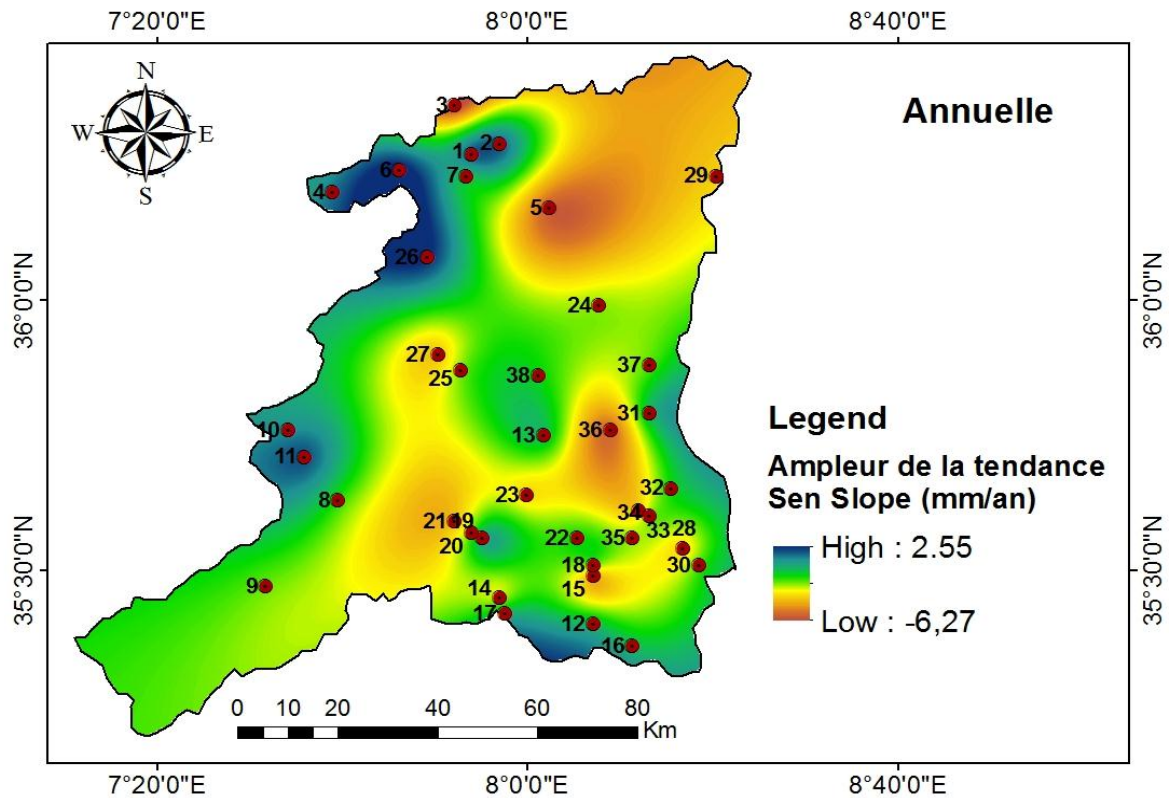


Figure 10 : Carte de l'ampleur de la tendance des précipitations annuelles

Selon les résultats du test MK pour l'analyse des séries chronologiques des précipitations annuelles, une tendance positive a été observée dans 21 % des stations, soit 8 sur 38. De plus, une tendance négative a été observée dans 30 stations (79 %) et est illustrée dans la Figure 9. De plus, une tendance significative à la baisse a été observée dans 9 stations avec un niveau de confiance de 95 %. Cette tendance s'est produite dans la région sud du bassin. L'amplitude des tendances des précipitations annuelles (exprimée en mm par an) est présentée dans la Figure 10. Une réduction progressive de l'amplitude de la tendance du sud-est au nord-ouest a été observé. Cette réduction a varié de -6,26 mm par an à 2,54 mm par an pendant la période d'étude.

De nombreuses recherches ont également abouti à la conclusion que les niveaux de précipitations diminuent dans les pays du Maghreb. En appliquant le test MK et la pente de Sen aux précipitations dans le même bassin, Mrad et al. [31] et Khedimallah et al. [32] ont également mis en évidence une tendance significative à la baisse des précipitations annuelles. Au cours de la période d'étude, une diminution drastique et généralisée des niveaux de précipitations annuelles a été observée, représentant 39 % de la pluviométrie annuelle moyenne. Ces résultats corroborent ceux obtenus par d'autres études menées dans le nord de l'Algérie. Par exemple, Berhail et al. [33] ont démontré une réduction des précipitations de 25 % dans le bassin de la Macta (nord-ouest) et dans le bassin de la Tafna (extrême nord-ouest) ; Berhail [34] a constaté une diminution de 20 % des précipitations annuelles totales, tout comme dans le bassin du Cheliff (nord-ouest), où Derdous et al. [35] ont estimé une réduction de 20 %.

2.2 Tendances des précipitations saisonnière :

2.2.1 Saison automnale :

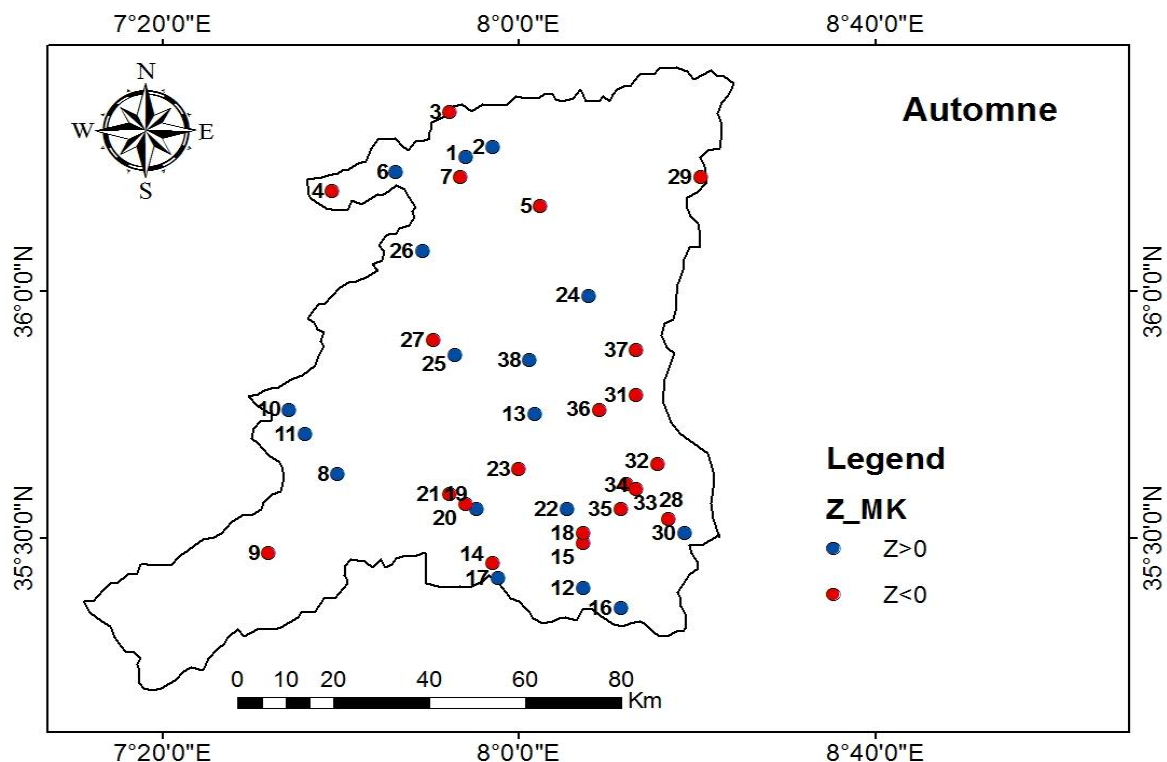


Figure 11 : Carte des tendances de la pluviométrie de la saison de l'automne

En effet, aucune variation significative n'a été observée dans les séries chronologiques de précipitations automnales sur la période allant de 1966 à 2017. Parmi les 38 stations, 17 d'entre elles, soit 45 %, ont enregistré une tendance à la hausse, tandis que les 21 autres stations, soit 55 %, ont observé une tendance à la baisse (figure 11). L'amplitude de la tendance variait entre -0,91 et 1,1 mm/saison par an, selon les données du tableau 1.

2.2.2 Saison hivernale :

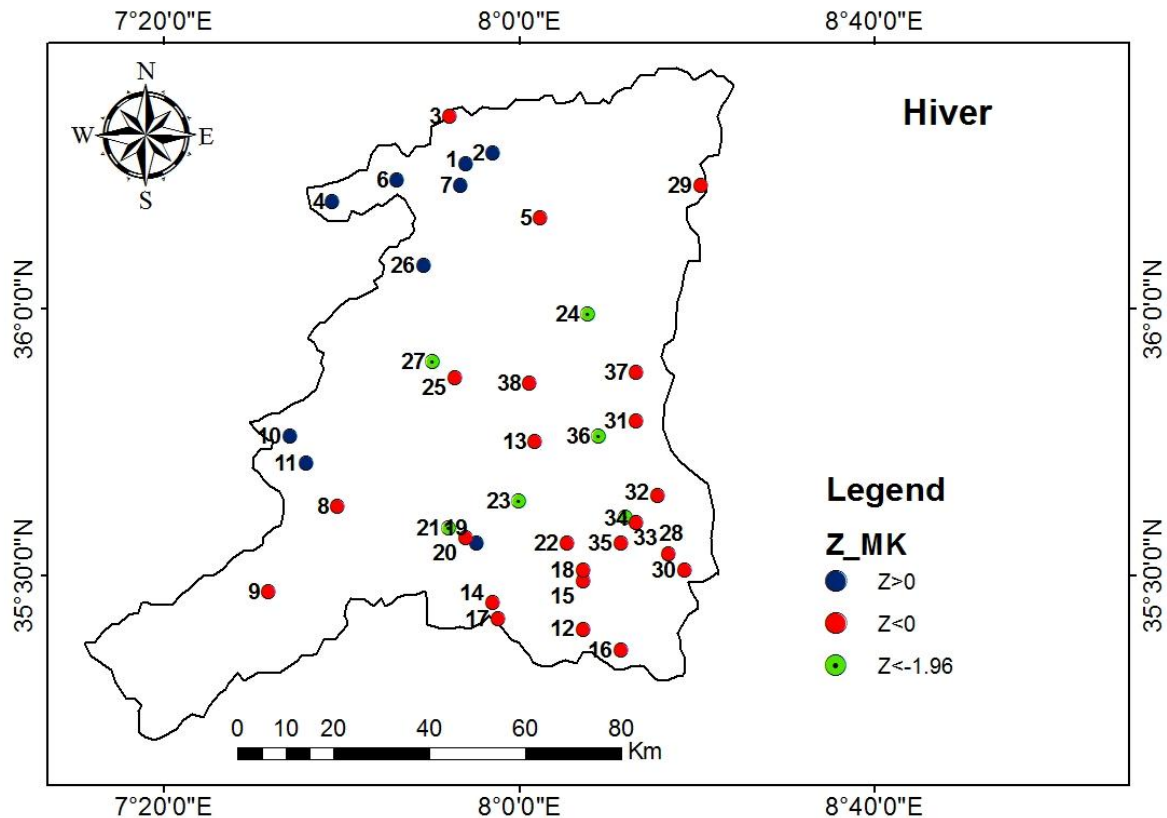


Figure 12 : Carte des tendances de la pluviométrie de la saison de l'hiver

Par rapport aux résultats de l'analyse MK, 76% des stations (29 sur 38) ont montré des tendances négatives pour la saison hivernale. Les résultats sont présentés dans la figure 12. De plus, six stations ont montré une tendance significative à la baisse, tandis qu'aucune tendance significative à la hausse n'a été observée. Les tendances négatives sont principalement concentrées dans la région centrale-sud-est des montagnes de l'Atlas. Ces résultats confirment les conclusions de l'étude réalisée par Mrad et al. [31], qui ont également identifié une tendance significative à la baisse des précipitations hivernales dans le même bassin. La baisse des précipitations observée dans le sous-bassin de Mellegue a eu un impact important, notamment dans la partie centrale du bassin. Cette situation a des conséquences négatives sur le nouveau barrage d'Ouldjet Mellegue dans la province de Tébessa.

2.2.3 Saison printanière :

D'après les résultats, toutes les stations de la région d'étude ont enregistré une tendance dominante à la baisse des précipitations pendant la saison du printemps. Les valeurs Z, qui mesurent la significativité de cette tendance, varient de -4,77 à -0,05, comme le montre la figure 13. La station Ain Senour (120103) a enregistré la plus forte baisse dans la région nord du bassin. De plus, une tendance négative significative a été observée dans dix (10) stations avec un niveau de confiance de 95%. L'amplitude des tendances des précipitations au printemps varie entre -4,41 et -0,04 mm/saison par an, ce qui suggère une diminution des précipitations au fil des années.

Cette tendance à la baisse des précipitations pendant la saison du printemps a un impact négatif sur le remplissage des réservoirs pendant la saison estivale suivante. Cela peut entraîner des perturbations dans l'approvisionnement en eau pendant les périodes de sécheresse. Les barrages sont principalement remplis par quelques crues qui se produisent pendant les saisons pluvieuses, tandis que les infiltrations pendant les saisons d'hiver et de printemps sont essentielles pour recharger les nappes phréatiques.

Ces résultats sont cohérents avec les études antérieures et suggèrent une tendance générale à la baisse des précipitations pendant la saison du printemps dans la région d'étude [36, 37].

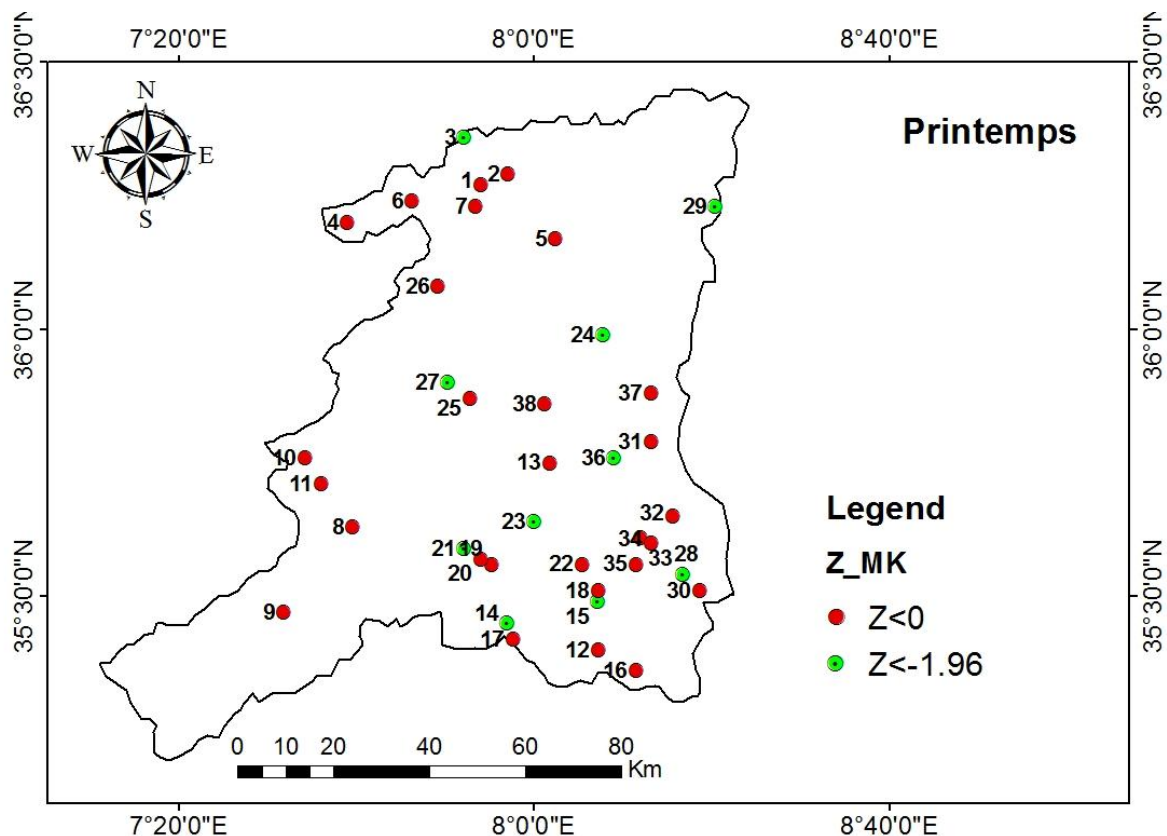


Figure 13 : Carte des tendances de la pluviométrie de la saison du printemps

2.2.4 Saison estivale :

En comparaison avec les tendances des précipitations estivales et automnales, les tendances observées pendant l'été ont montré une nature opposée. Plus précisément, d'après la figure 14, on a observé des tendances positives dans un total de 20 stations, soit 53 %, tandis que 18 stations, soit 47 %, ont montré des tendances négatives. Une tendance positive significative a été observée dans une seule station, tandis qu'aucune station n'a enregistré de tendance négative significative. De plus, une tendance positive significative a été observée dans la région nord-est du bassin. Certaines régions du bassin central-sud ont montré une légère tendance négative.

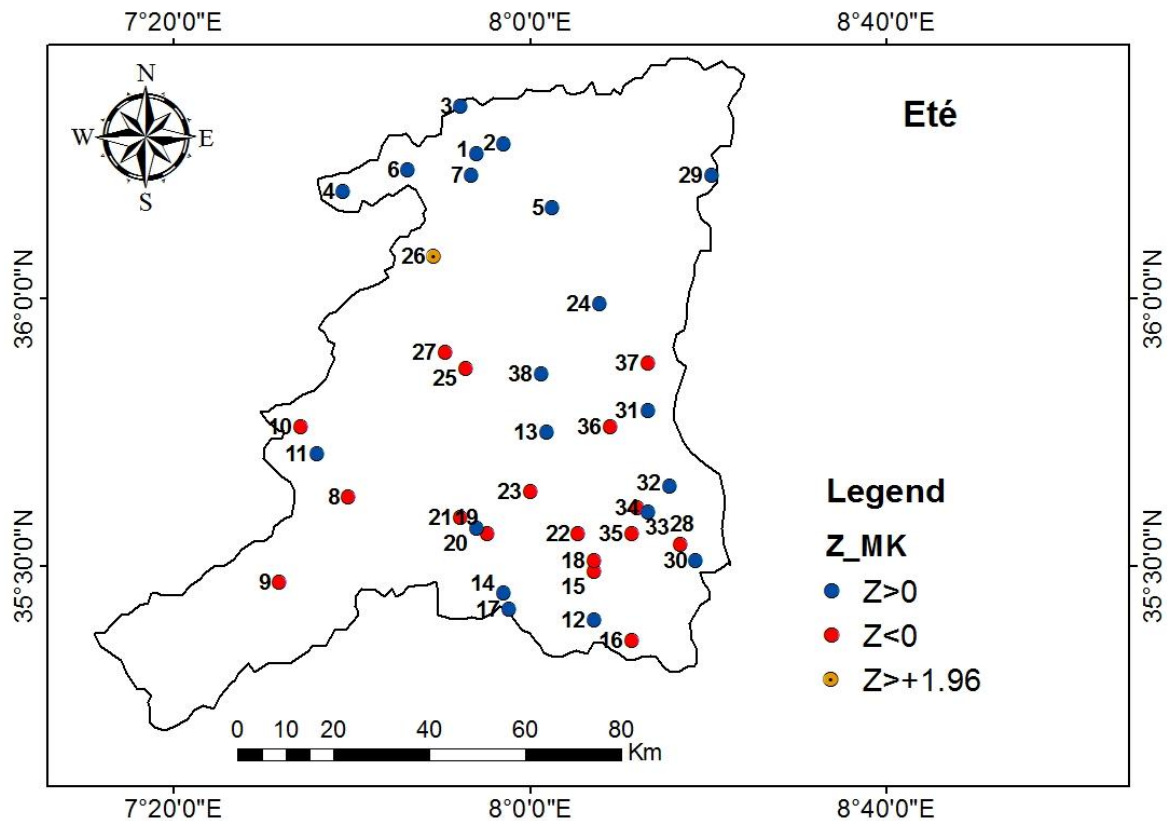


Figure 14 : Carte des tendances de la pluviométrie de la saison de l'été

3. ANALYSE DE LA TENDANCE DE SECHRESSE PAR L'INDICE SPI

3.1 Tendance de la sécheresse à court terme :

Dans cette étude, la méthode ITA a été utilisée pour analyser les tendances des valeurs du SPI sur différentes périodes (3, 6, 12 et 24 mois) pour chaque station. Les séries mensuelles du SPI ont été divisées en deux sous-périodes, de 1966 à 1991 et de 1992 à 2017. Pour chaque station, la tendance du SPI a été indiquée en utilisant les symboles "+" pour une tendance croissante, "-" pour une tendance décroissante et "0" pour l'absence de tendance.

Tableau 5 : Tendances des valeurs de SPI pour des conditions sèches et humides sévères et extrêmes à différentes échelles de temps (3, 6, 12 et 24 mois)

N°	Code de Station	SPI 3 mois		SPI 6 mois		SPI 12 mois		SPI 24 mois	
		S/E Sèche	S/E Humide	S/E Sèche	S/E Humide	S/E Sèche	S/E Humide	S/E Sèche	S/E Humide
1	120101	+	+	+	+	+	+	+	+
2	120102	-	-	-	-	o	+	+	o
3	120103	+	-	-	-	-	-	-	+
4	120104	-	+	-	-	o	o	+	-
5	120105	-	-	-	-	-	+	-	+
6	120113	-	+	-	+	o	+	+	+
7	120115	-	+	-	+	-	+	-	+
8	120201	-	-	+	+	o	+	+	o
9	120202	-	-	-	-	-	o	-	-
10	120203	-	-	-	+	o	+	-	-
11	120208	-	-	-	+	o	+	o	-
12	120301	+	-	+	-	-	-	-	-
13	120302	+	-	+	-	+	-	+	-
14	120304	-	-	-	-	-	-	-	-
15	120306	-	-	-	-	-	-	-	-
16	120307	+	-	+	-	+	-	+	-
17	120310	+	-	o	-	o	-	o	-
18	120311	+	-	+	-	+	-	+	-
19	120313	o	-	o	-	-	o	-	-
20	120314	+	-	+	-	+	-	+	-
21	120316	o	-	+	-	-	-	-	-
22	120317	+	-	+	-	+	-	+	-
23	120318	+	-	+	-	+	-	+	-
24	120401	-	-	-	-	-	-	-	-
25	120402	-	-	-	-	-	-	-	-
26	120403	+	+	+	+	+	+	+	+
27	120405	-	-	-	-	-	-	-	-
28	120501	-	-	-	-	-	-	-	-
29	120503	-	+	-	+	-	+	-	o
30	120504	+	-	-	-	-	-	-	-
31	120505	-	-	-	-	-	o	-	+
32	120510	+	o	+	+	+	+	o	+
33	120511	+	-	+	-	+	-	o	-
34	120512	-	-	-	-	-	-	o	-
35	120514	-	-	-	-	-	-	o	-
36	120517	-	-	-	-	-	-	-	-
37	120519	o	-	o	-	+	-	-	-
38	120521	+	-	+	-	+	-	+	-

S/E indique sévère et extrême

Les résultats ont montré qu'il était généralement possible de détecter une augmentation de la sévérité de la sécheresse (53 %) associée à une réduction des épisodes humides (83 %) pour les valeurs du SPI sur 3 mois (Tableau 5 et Figure 15). Pour les valeurs les plus faibles du SPI (sécheresses sévères et extrêmes), aucune tendance n'a été trouvée dans trois stations (8 %), tandis que 15 stations (39 %) ont montré une tendance croissante et 20 stations (53 %) ont montré une tendance décroissante. Cela indique une répartition uniforme des sécheresses graves dans l'ensemble de la région du bassin. En ce qui concerne les valeurs les plus élevées du SPI (conditions humides sévères et extrêmes), une station (3 %) n'a montré aucune tendance, 6 stations (16 %) ont montré une tendance croissante et 31 stations (82 %) ont montré une tendance décroissante, ce qui correspond à des périodes humides moins intenses.

Ces résultats ont été confirmés pour les valeurs du SPI sur 6 mois, montrant une augmentation de la sévérité de la sécheresse (55 %) associée à une diminution des épisodes humides (76 %). En d'autres termes, les tendances observées étaient similaires pour les conditions humides sévères et extrêmes ainsi que pour les valeurs du SPI les plus faibles et les plus élevées.

L'étude a également souligné que les régions agricoles telles que la plaine de Merdja et les périmètres cultivés de Sedrata et Zouabi demeurent les zones les plus vulnérables à la sécheresse. De plus, le secteur agricole en Algérie consomme une quantité importante d'eau, représentant jusqu'à 70 % de la consommation totale du pays. Une étude antérieure réalisée dans le bassin de la Medjerda a également identifié une augmentation significative de la consommation d'eau pour l'irrigation, principalement due à l'exploitation excessive des ressources en eau souterraine. Malgré cela, les activités agricoles menées dans les zones locales restent insuffisantes pour faire face aux défis de la sécheresse [38].

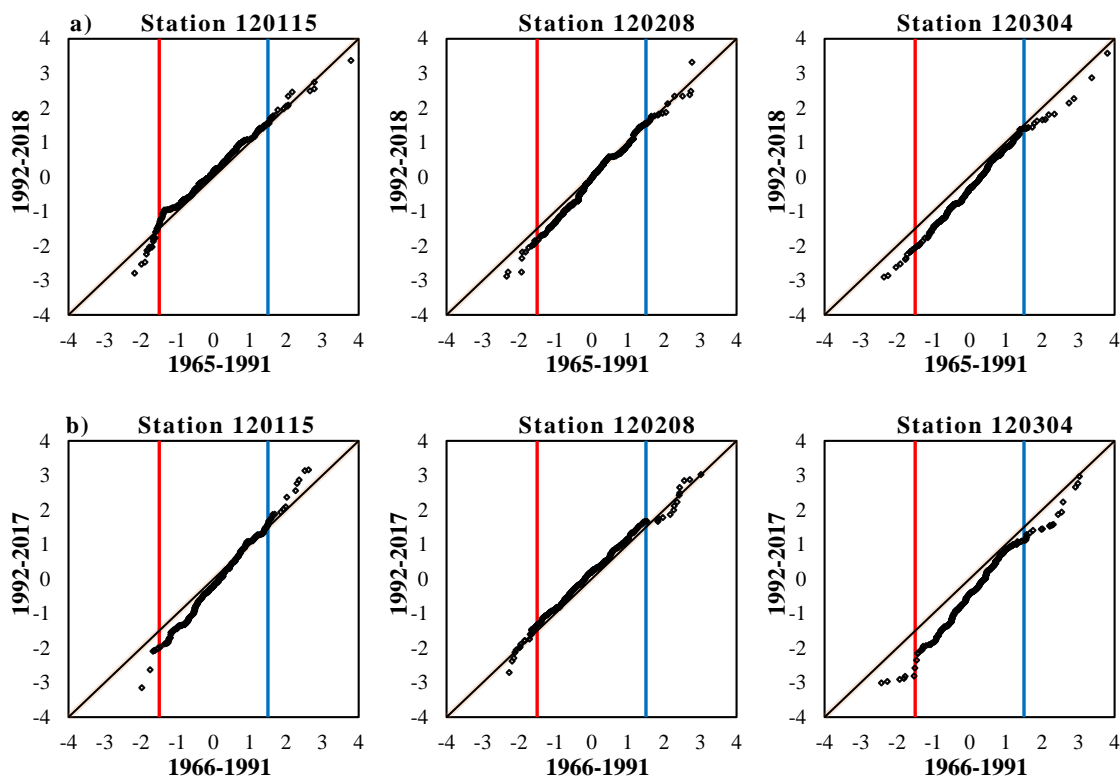


Figure 15 : Résultats de la méthode ITA appliquée à l'indice SPI-3 (a) et SPI-6 (b)

3.2 Tendance de la sécheresse à long terme :

Les résultats de l'analyse des tendances du SPI sur 12 mois, c'est-à-dire à long terme, en suivant la méthode ITA sont illustrés dans la figure 16c. Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus pour les SPI sur 3 et 6 mois dans la majorité des stations. De plus, les résultats ont également montré une diminution négligeable de la tendance négative des valeurs d'indice les plus élevées, ce qui est associé à des périodes humides plus faibles. Cependant, la sévérité de la sécheresse a augmenté dans 19 stations (50 %), tandis que les conditions humides se sont réduites dans 23 stations (61 %).

La détermination du SPI sur 24 mois est directement liée à l'état des ressources en eau dans la zone d'étude. Par conséquent, cela aide également à élaborer des plans de gestion pour la conservation de l'eau. La Figure 16d montre les tendances pour le SPI sur 24 mois, analysées à l'aide de la méthode graphique ITA pour la zone d'étude. Les résultats indiquent que 19 stations sur les 38 au total, soit 50 %, montrent une diminution apparente des valeurs les plus faibles du SPI (sécheresses sévères) comme indiqué dans le tableau 5. De même, 71 % des stations, soit 27 sur 38 stations, ont enregistré une tendance négative pour les valeurs les plus élevées (périodes humides élevées).

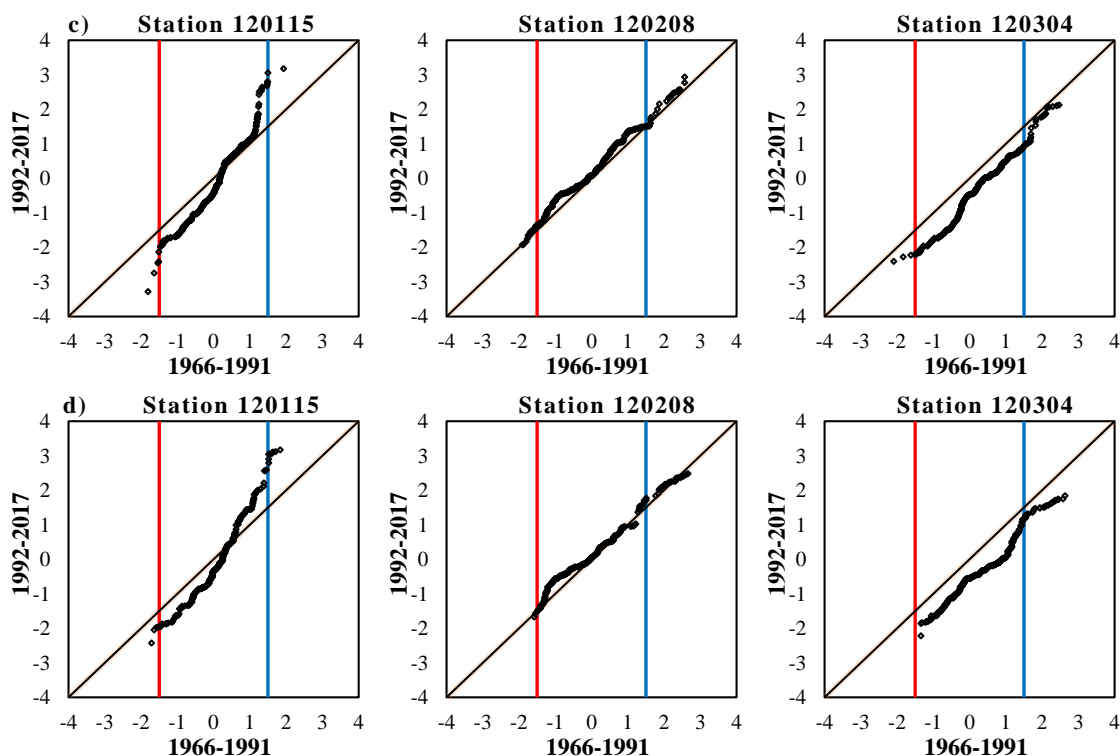


Figure 16 : Résultats de la méthode ITA appliquée à l'indice SPI-12 (c) et SPI-24 (d)

Dans l'étude de Kadir et al. [38], une diminution significative du débit annuel des cours d'eau a été observée dans le bassin de la Medjerda, avec une amplitude de $-0,02 \text{ m}^3/\text{s}/\text{an}$ entre 1981 et 2012. Cette diminution du débit des cours d'eau indique une réduction des ressources en eau

disponibles dans la région. Rajosoa et al. [39] ont utilisé le modèle WEAP avec quatre scénarios pour évaluer l'approvisionnement en eau actuel et futur et les besoins du bassin de la Medjerda pour les pays de la Tunisie et de l'Algérie sur la période 2000-2019. Leurs résultats suggèrent que la demande en eau et les pénuries d'eau augmentent en temps réel. Cela signifie que la demande en eau dépasse l'offre disponible dans la région, entraînant des pénuries d'eau.

Dans une autre étude, Rajosoa et al. [40] a utilisé le modèle WEAP pour analyser l'impact du changement climatique sur le bassin de la Medjerda en utilisant les scénarios RCP 2.6 et RCP 6.0 pour la période de projection future de 2020 à 2050. Les résultats ont confirmé l'impact négatif du changement climatique sur les ressources en eau de surface et souterraines disponibles dans le bassin. Cela indique que le changement climatique entraîne une diminution des ressources en eau dans la région.

Enfin, il est important de noter que la combinaison du changement climatique et des pratiques agricoles non durables a également un effet négatif sur la qualité de l'eau du bassin de la Medjerda. Ces facteurs contribuent à la dégradation de la qualité de l'eau, ce qui pose des défis supplémentaires pour la gestion des ressources en eau dans la région.

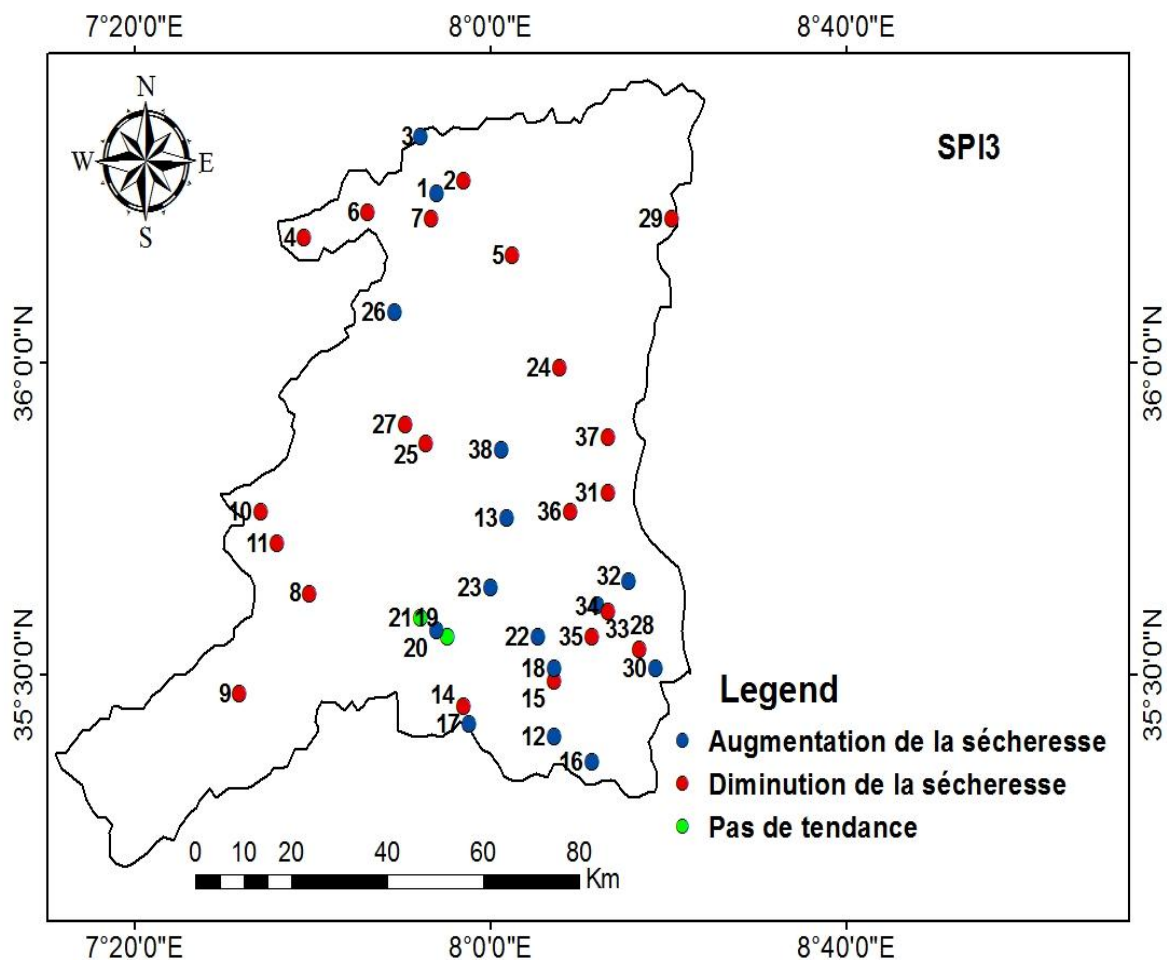


Figure 17 : Tendence spatiale des conditions de sécheresse sévères et extrêmes à différentes échelles de temps (3 mois) pour les valeurs de l'indice SPI $\leq -1,5$.

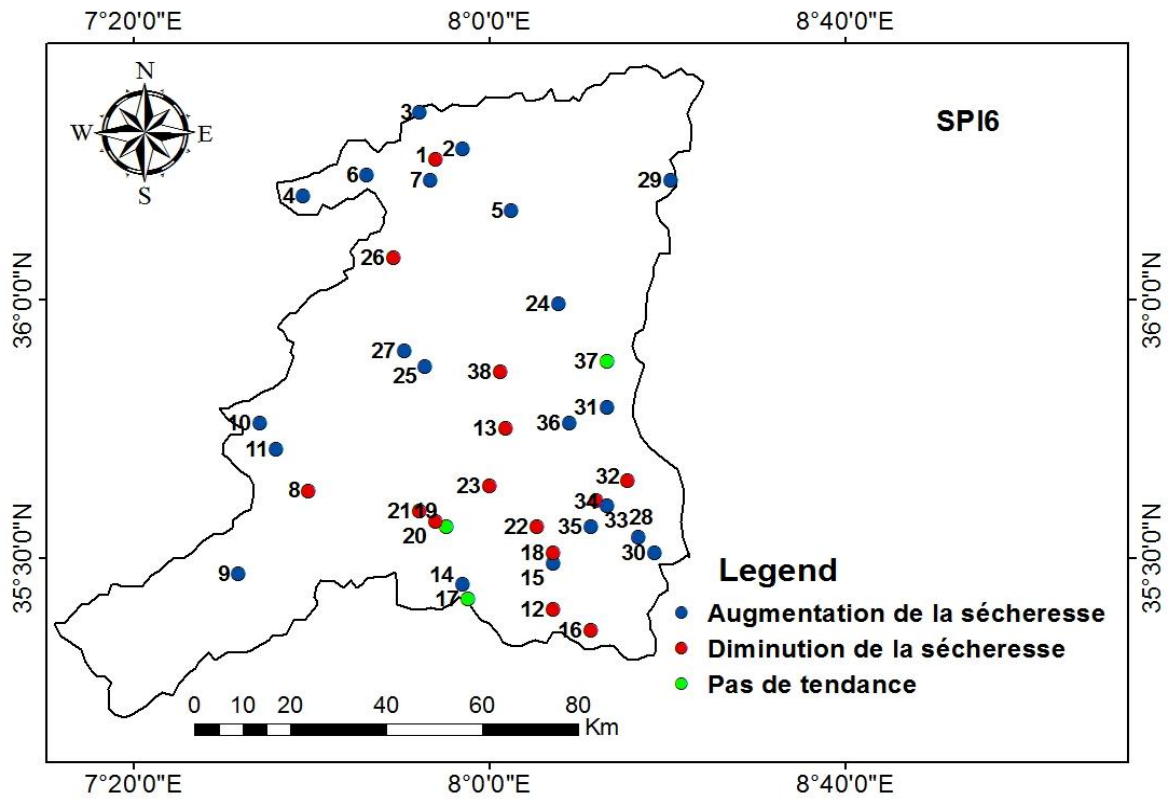


Figure 18 : Tendence spatiale des conditions de sécheresse sévères et extrêmes à différentes échelles de temps (6mois) pour les valeurs de l'indice $SPI \leq -1,5$.

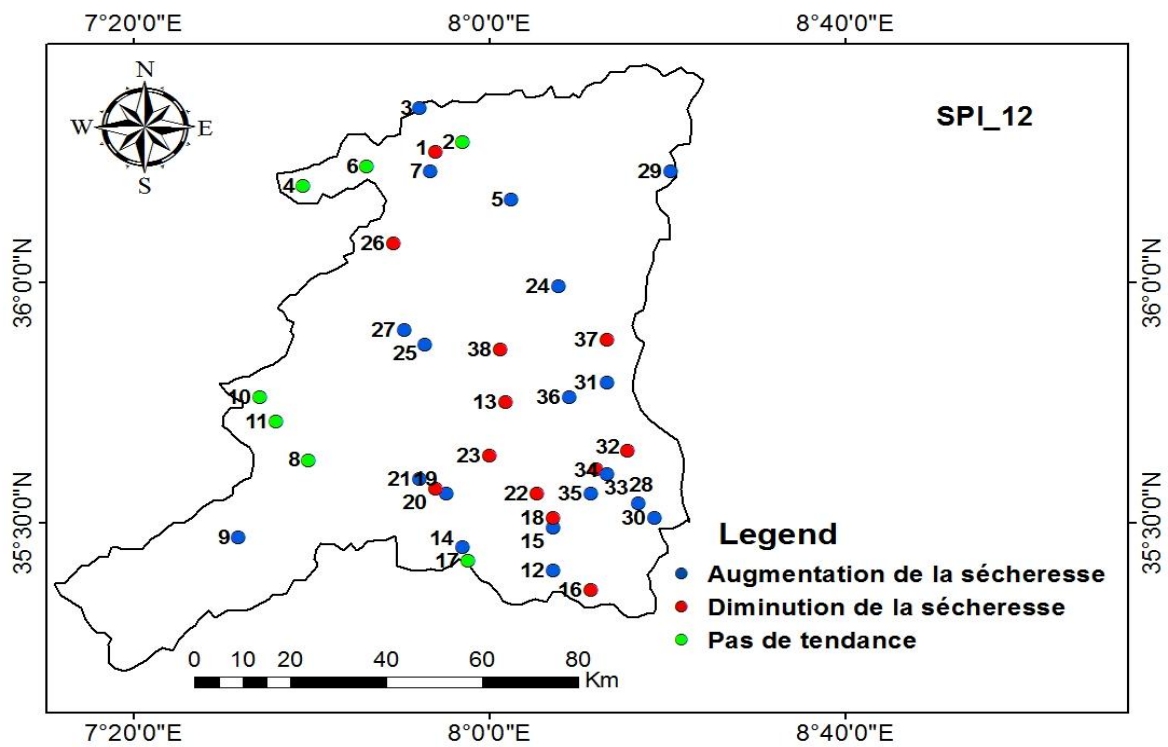


Figure 19 : Tendence spatiale des conditions de sécheresse sévères et extrêmes à différentes échelles de temps (12mois) pour les valeurs de l'indice $SPI \leq -1,5$.

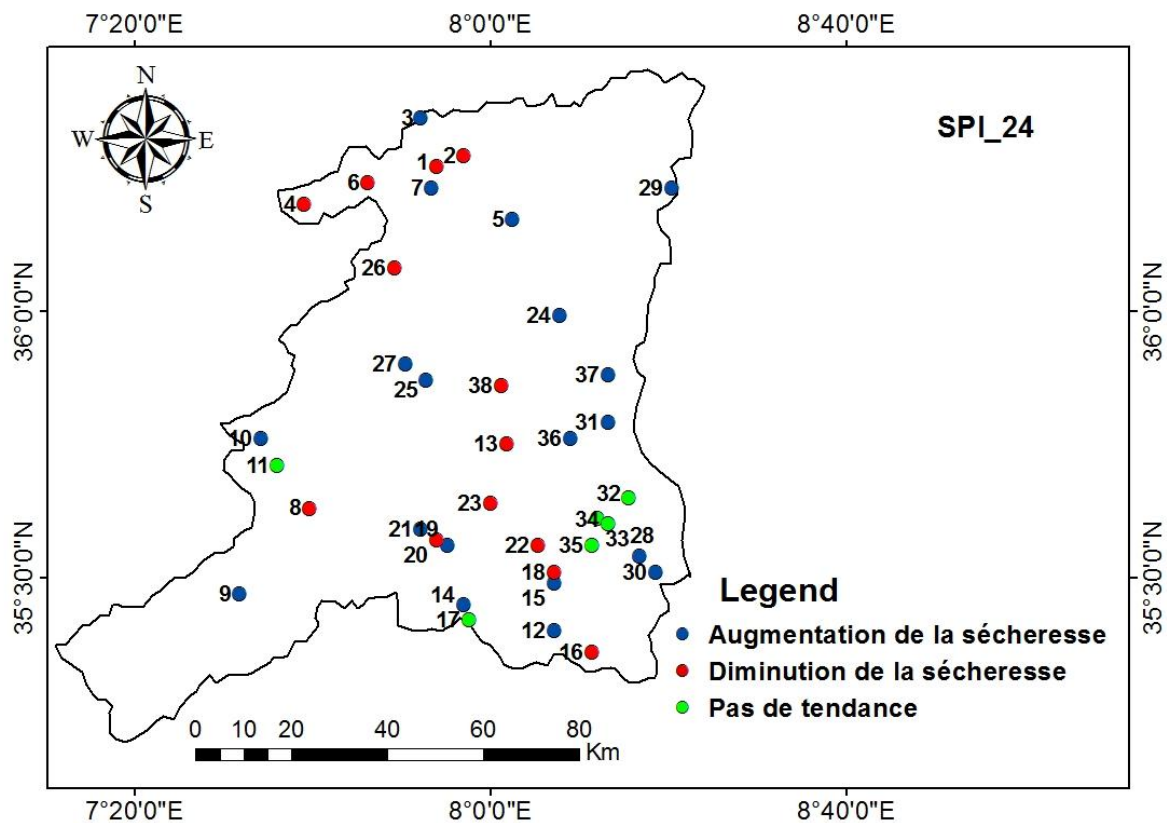


Figure 20 : Tendence spatiale des conditions de sécheresse sévères et extrêmes à différentes échelles de temps (24 mois) pour les valeurs de l'indice $SPI \leq -1,5$.

La Figure 17 présente quatre cartes supplémentaires permettant de définir la tendance spatiale des conditions de sécheresse sévère et extrême à différentes échelles de temps, telles que 3 mois, 6 mois, 12 mois et 24 mois, pour les valeurs de SPI. Comme illustré précédemment, la tendance à la diminution (à l'augmentation) de la sévérité de la sécheresse correspond à des valeurs de SPI inférieures ou égales à -1,5. Enfin, les conditions de sécheresse sévère et extrême sont plus répandues dans les parties sud-est et centrales du bassin que dans les autres parties, à n'importe quelle échelle de temps durant la période d'étude.

Dans les études précédentes menées dans la région du nord-ouest de l'Algérie, il a été constaté que la sécheresse s'est produite au cours des 50 dernières années en raison d'une diminution possible des précipitations au printemps [41]. Les résultats de la présente étude confirment cette conclusion en utilisant les tests MK et la méthode de Sen. Les résultats indiquent une tendance significative à la baisse des précipitations au printemps dans l'ensemble du bassin. Cette diminution des précipitations printanières peut contribuer à expliquer la fréquence croissante et la sévérité des périodes de sécheresse observées dans la région. Cela souligne l'importance de prendre des mesures pour gérer les ressources en eau et atténuer les effets de la sécheresse dans la région.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

Dans le cadre de cette étude, nous avons analysé les données sur les précipitations et la sécheresse dans le bassin versant de la Medjerda, en utilisant des données pluviométriques mensuelle de 38 stations couvrant la période de 1966 à 2017. Le test de Mann-Kendall (MK) a été appliqué pour déterminer si les séries de précipitations présentaient une tendance positive ou négative, et pour évaluer leur signification statistique. Ensuite, nous avons utilisé la méthode de la pente de Sen pour quantifier l'ampleur de la tendance observée dans les séries de données. Cette méthode permet d'estimer le taux de changement au fil du temps. Les périodes humides et sèches ont été représentées à l'aide des valeurs de l'indice SPI pour les périodes à court terme (3 et 6 mois) et à long terme (12 et 24 mois). Enfin, la méthode ITA récemment développée a été utilisée pour détecter les tendances, qui ont ensuite été classées en valeurs faibles, moyennes et élevées dans la série de données.

Les résultats du test de MK ont révélé la présence de tendances de précipitations en diminution significative chaque année. Cependant, la plus grande réduction possible du niveau de précipitations a été observée au printemps dans les 38 stations. La plus grande diminution était de -4,41 mm/saison par an et pourrait avoir un impact négatif sur le fonctionnement des écosystèmes et de l'agriculture en général. Ce changement dans le schéma des précipitations indique une adaptation de la gestion des réservoirs et des barrages avec une capacité de remplissage moindre pendant la saison printanière.

En ce qui concerne l'analyse de la tendance de la sécheresse, les résultats de la méthode ITA ont montré une tendance négative avec les valeurs les plus faibles et les plus élevées de l'indice SPI à court terme. Cela se traduit par des tendances montrant des sécheresses sévères et des périodes humides plus faibles. La gravité de la sécheresse devrait augmenter en général dans plus de la moitié des stations (53 % et 55 % pour l'indice SPI sur 3 mois et 6 mois, respectivement), accompagnée d'une diminution des épisodes de pluies sévères et extrêmes dans la plupart des stations (82 % et 76 % pour l'indice SPI sur 3 mois et 6 mois, respectivement). Ces résultats ont un impact direct sur les régions agricoles telles que la plaine de Merdja et les périmètres irrigués de Sedrata et Zouabi, qui sont des zones très vulnérables à la sécheresse dans la zone d'étude.

À plus long terme, on observe une augmentation de la gravité de la sécheresse (50% pour les indices SPI sur 12 mois et 24 mois) et une diminution des épisodes de pluies sévères et extrêmes (61% et 71% pour les indices SPI sur 12 mois et 24 mois, respectivement). Cela indique que les ressources en eau à long terme dans les parties centrales et sud-est subissent un impact négatif. Ce schéma peut avoir un impact négatif sur le nouveau barrage d'Ouldjet Mellegue dans la province de Tébessa.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] Obassi G.O. (1994). WMO's Role in the International Decade for Natural Disaster Reduction. *Bulletin of American Meteorological Society*, 75-9.
- [2] 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 1997.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Kingumbi A. (2006). Modélisation hydrologique d'un bassin versant affecté par des changements d'occupation. Cas du Merguellil en Tunisie centrale. Thèse de l'Ecole Nationale d'Ingenieurs de Tunis, Tunisie, 199p.
- [11] Matari A., Kerrouche M., Bousid H., Douguedroit A., (1999). Sécheresse dans l'ouest algérien. Publications de l'association internationale de climatologie, volume 12, 1999.

- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Khoualdia W., Mrad D., Djebbar Y., et Abida H., (2008). Cycle, Tendence ou Changement Climatique Analyse Statistique de la Pluviométrie de la Région de Souk-Ahras, Algérie. 4^{ème} conférence internationale sur Les Ressources en Eau dans le Bassin Méditerranéen, Alger, Algérie, 22-23 Mars 2008
- [17] Khoualdia W., 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.
- [18] 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, Chef, 05/06/février, Algérie.
- [19] Meddi H. & Meddi M., (2009). Variabilité des précipitations annuelles du Nord-Ouest de l'Algérie. Sécheresse, Vol 20, 57-67.
- [20] Belloula M. (2017). Evaluation de l'aptitude aux écoulements et risque d'érosion dans le haut cours de la Medjerda par Modélisation. Thèse de doctorat, université Mostafa Benboulaïd Batna 2, 151p.
- [21] Khoualdia W. (2015). Contribution à l'étude de la variabilité climatique et son impact sur les ressources hydriques « cas d'oued Medjerda nord-est Algérie » Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar – Annaba, 179p.
- [22] Mann HB (1945) Nonparametric tests against trend. *Econometrica* 13:245–259.

- [23] Kendall MG (1975) Rank correlation methods. 4th ed. London, UK. Charles Griffin. ISBN 0852641990 pp. 202.
- [24] Şen PK (1968) Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau. *J Am Stat Assoc* 63:1379–1389.
- [25] McKee TB, Doesken NJ, Kleist J (1993) The relation of drought frequency and duration to time scales, Proceeding of the eight conference on applied climatology. 17-22 January, Anaheim, California, 179–184. Boston, Massachusetts: American Meteorological Society.
- [26] Hayes MJ, Svoboda MD, Wall N, Widhalm M (2011) The Lincoln declaration on drought indices: universal meteorological drought index recommended. *Bulletin of the American Meteorological Society* 92:485–488.
- [27] Angelidis P, Maris F, Kotsovinos N, Hrisanthou V (2012) Computation of drought index SPI with Alternative Distribution Functions. *Water Resour. Manag.* 26:2453–2473.
- [28] Thom HCS (1958) A note on the gamma distribution. *Mon. Weather Rev.* 86:117–122.
- [29] Abramowitz M, Stegun IA (1970) *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*; Dover Publications, INC.: New York, NY, USA.
- [30] Şen Z (2012) Innovative trend analysis methodology. *J Hydrol Eng* 17:1042–1046.
- [31] Mrad D, Djebbar Y, Hammar Y (2017) Analysis of trend rainfall: Case of Northeastern Algeria. *J. Water Land Dev.* 36:1429–7426.
- [32] Khedimallah A, Meddi M, Mahé G (2020) Characterization of the interannual variability of precipitation and runoff in the Cheliff and Medjerda basins (Algeria). *J. Earth Syst. Sci.* 129:134.
- [33] Berhail S, Tourki M, Merrouche I, Bendekiche H (2021) Geostatistical assessment of meteorological drought in the context of climate change: case of the Macta basin (Northwest of Algeria). *Modeling Earth Systems and Environment* 8:81-101.
- [34] Berhail S (2019) The impact of climate change on groundwater resources in northwestern Algeria. *Arabian Journal of Geosciences* 12:770.
- [35] Derdous O, Bouamrane A, Mrad D (2021) Spatiotemporal analysis of meteorological drought in a Mediterranean dry land: case of the Cheliff basin–Algeria. *Modeling Earth Systems and Environment.* 7:135-43.
- [36] Hallouz F, Meddi M and Mahe G (2013) Analyse des ruptures dans les séries pluviométriques dans le bassin de l'oued Mina (Nord-Ouest d'Algérie) ; *Revue des Sciences de l'Eau* 26:33–38.

-
- [37] Zeroual A, Assani AA, Meddi M (2017) Combined analysis of temperature and rainfall variability as they relate to climate indices in northern Algeria over the 1972–2013 period. *Hydrol Res* 48:584–595.
- [38] Kadir M Fehri R Souag D Vanclooster M (2020) Exploring causes of streamflow alteration in the Medjerda river, Algeria. *J. Hydrol. Reg. Stud.* 32, 100750.
- [39] Rajosoa AS, Abdelbaki C, Mourad KA (2021) Water assessment in transboundary river basins: the case of the Medjerda River Basin. *Sustainable Water Resources Management.* 7:88.2–13.
- [40] Rajosoa AS, Abdelbaki C, Mourad KA (2022) Assessing the impact of climate change on the Medjerda River Basin. *Arabian Journal of Geosciences* 15:1052.
- [41] Belarbi H, Touaibia B, Boumechra N, Amiar S, Baghli N (2017) Drought and modification of the rainfall–runoff relation: case of Wadi Sebdo basin (western Algeria). *Hydrol Sci J* 62:124–136.