

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 sciences et Technologie**



N° Ref : .....

**Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de**

**MASTER**

**Spécialité : Hydraulique Urbaine**

**THEME**

**Évaluation spatiale et temporelle des précipitations  
et de la sécheresse dans le bassin versant de la  
Macta (Nord-Ouest de l'Algérie)**

**Réalisé par :**

- **BENDEKKICHE Hayat**
- **MERROUCHE Imane**

**Soutenu devant le jury :**

**M. TOURKI Mahmoud**  
**M. BERHAIL Sabri**  
**M. KEBLOUTI Mehdi**

**Président**  
**Promoteur**  
**Examineur**

**Année universitaire : 2019/2020**



# Remerciement

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

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

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

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

## *Dédicace*

*Je dédie ce travail :*

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

À mon frère **wahid** qui m'a toujours indiqué la bonne voie et qui a su m'aider,

À mon frère **Hamza** qui m'a toujours encouragé pour avancer et progresser d'avantage,

Sans oublier mon frère **Bilal**,

À mon binôme: **Imane** qui était pour moi une amie et une sœur qui était présente tout au long du chemin à mes côtés,

À toutes mes copines.

# Hayat



## *Dédicace*

*Je dédie ce travail :*

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

À mon frère **Youcef** qui m'a toujours indiqué la bonne voie et qui a su m'aider,

À mon frère **Walid** qui m'a toujours encouragé pour avancer et progresser d'avantage,

Sans oublier mon frère **Abderrahim**, et ma sœur **Nesrine**.

À mon binôme: **Hayat** qui était pour moi une amie et une sœur qui était présente tout au long du chemin à mes côtés,

À toutes mes copines.

**Imane**



## Sommaire

Remerciements.....	I
Dédicaces.....	II
Sommaire.....	IV
Liste des tableaux.....	VIII
Liste des figures.....	X
Résumé.....	XII
Abstract.....	XIII
ملخص.....	XIV
<b>INTRODUCTION GENERALE.....</b>	<b>1</b>

### CHAPITRE 1 : Synthèse bibliographique

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

### CHAPITRE 2 : Présentation de la zone d'Etude

1. Présentation de la zone d'étude .....	11
1.1. Situation géographique de bassin versant de Macta .....	11
2. Caractéristiques topographiques.....	13
2.1 Reliefs .....	13
3. Caractéristiques Morphométriques du bassin .....	14
3.1. Indice de Gravilius (ou compacité).....	14
3.2. Rectangle équivalent.....	14
3.3. Tableau récapitulatif.....	15
4. Sol.....	16
5. Occupation du sol ..	16
6. Hydro-climatologie .....	16
6.1. Caractéristiques hydrologiques.....	16

6.1.1. Précipitation .....	16
6.1.2. Température .....	18
6.1.3. Climat .....	20
6.1.4 Diagramme ombrothermique.....	21
7. Analyse de la pluviométrie .....	22
7.1. Analyse statistique des données pluviométriques .....	22
7.2. Caractéristiques des postes pluviométriques .....	22
7.3. Variation des précipitations annuelles dans le temps et dans l'espace.....	24
7.3.1. Variation temporelle .....	24
5.3.1.1. la méthode de la moyenne arithmétique .....	24
5.3.1.2. Variation spatiale .....	25
7.4. Variation des précipitations mensuelle et le régime saisonnier .....	26
7.4.1. Variation des précipitations mensuelles .....	26
7.4.2. Variation des précipitations saisonnières .....	28

### **CHAPITRE 3 : Etude de la variabilité et de l'évolution de la pluviométrie**

1.Introduction .....	32
2.Etude de la tendance par le test de mann-kendall .....	32
2.1. Estimation de l'ampleur du changement (Sen's slope estimator) .....	33
2.2. Pourcentage de changement .....	34
2.3. Etude de la tendance mensuelle .....	34
2.4. Etude de la tendance saisonnière .....	36
2.5. Etude de la tendance annuelle .....	42
2.6. Estimation de l'ampleur du changement .....	43
2.7. Conclusion.....	43
3.Etude des tendances par l'analyse innovante de la tendance de la pluviométrie .....	45
3.1. Principe de la méthode .....	45
3.2. Résultats et discussion .....	46
3.3.Conclusion.....	51

## **CHAPITRE 4 : Caractérisation des séquences de sécheresse météorologique**

1.Introduction .....	52
2.Caractérisation de la sécheresse météorologique .....	52
2.1.Indice standardisé de précipitation SPI .....	52
2.2. Paramètres descriptifs des séquences de sécheresse .....	53
3. les différentes interprétations de l'indice SPI .....	54
3.1. Indice SPI sur 6 mois (moyen terme) .....	55
3.2.Indice SPI sur 12 mois (long terme) .....	55
4. Méthode de calcul .....	55
5. Valeurs annuelles moyennes de l'indice SPI .....	55
6. Evolution de d'indice SPI par décennie .....	60
7. Analyse de la sécheresse météorologique à moyen terme .....	63
8. Analyse de la sécheresse météorologique à long terme .....	64
9. Caractérisation des séquence de la sécheresse.....	66
10.Conclusion .....	72
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>73</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>75</b>

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1 :</b> Récapitulatif des caractéristiques morpho métriques et hydrographiques de sous bassin versant de l’oued Mekkerà.....	15
<b>Tableau 2 :</b> Précipitation moyennes mensuelles de l’Oued Mekkerà (1970-2011).....	17
<b>Tableau 3:</b> Précipitation moyennes mensuelles de l’Oued Fekan (1970-2011).....	17
<b>Tableau 4 :</b> Températures moyennes mensuelles d’Oued Mekkerà (1970-2011).....	18
<b>Tableau 5 :</b> Températures moyennes mensuelles d’Oued Fekan (1970-2011).....	18
<b>Tableau 6:</b> Indice mensuel d’aridité à Oued Mekkerà.....	20
<b>Tableau 7 :</b> Indice mensuel d’aridité à d’Oued Fekane.....	20
<b>Tableau 8:</b> Caractéristiques des stations pluviométriques.....	23
<b>Tableau 9:</b> Paramètres statistique des pluies moyennes annuelles de 17 stations (1970-2011).....	25
<b>Tableau 10:</b> Valeurs Z (direction) selon le test de Mann – Kendall pour la période (1970–2011).....	34
<b>Tableau 11:</b> Nombre et pourcentage des stations et pour chaque type de tendance mensuelle.....	36
<b>Tableau 12:</b> Valeurs de Z (direction) de Mann–Kendall Z et pourcentage de changement (1970-2011).....	37
<b>Tableau 13:</b> Nombre et pourcentage des stations pour chaque type de tendance saisonnière.....	38
<b>Tableau 14:</b> résultats des paramètres de l'analyse de tendance innovante .....	49
<b>Tableau 15:</b> Catégories de sécheresse et d'humidité définies par les valeurs du SPI.....	52
<b>Tableau 16:</b> les caractéristiques des différentes périodes de l’indice Standardisé des Précipitations (SPI) sur la période (1970 2011).....	57

**Tableau 17:** Fréquences (en %) des classes de l'Indice SPI dans le bassin de la Macta (1970/2011).....60

**Tableau 18:** Caractéristiques de la sécheresse sur une échelle de temps de 6 mois pour les stations utilisées dans cette étude.....61

**Tableau 19 :** Caractéristiques de la sécheresse sur une échelle de temps de 12 mois pour les stations utilisées dans cette étude.....62

## Liste des figures

<b>Figure 1 :</b> Situation administrative du bassin versant de Macta [67].....	12
<b>Figure 2 :</b> Bassins versants hydrographiques « Oranie - Tafna - Chott Cherguie- Macta » .....	12
<b>Figure 3 :</b> Modèle numérique du terrain et réseau hydrographique du bassin versant de la Macta [68].....	13
<b>Figure 4 :</b> Variations des précipitations moyennes mensuelles à Oued Mekkerà (1970- 2011).....	17
<b>Figure 5 :</b> Variations des précipitations moyennes mensuelles à Oued Fekan (1970 2011).....	17
<b>Figure 6 :</b> Variations des températures moyennes mensuelles d'Oued Mekkerà (1970- 2011).....	18
<b>Figure 7 :</b> Variations des températures moyennes mensuelles d'Oued Fekan (1970- 2011).....	19
<b>Figure 8 :</b> Diagramme Ombrothermique à Oued Mekkerà (1970-2011).....	21
<b>Figure 9 :</b> Diagramme Ombrothermique à Oued Fekane (1970-2011).....	21
<b>Figure 10 :</b> Localisation des stations pluviométriques dans le bassin de la Macta .....	22
<b>Figure 11 :</b> Carte de la pluie moyenne interannuelle du bassin versant de la Macta (1970- 2011).....	24
<b>Figure 12 :</b> Variation annuelle des précipitations moyenne de quelques stations (1970- 2011).....	25
<b>Figure 13:</b> Précipitation moyennes mensuelles (1970-2011).....	26
<b>Figure 14 :</b> Précipitation moyennes mensuelles (1970-2011).....	26
<b>Figure 15 :</b> Précipitation moyennes mensuelles (1970-2011).....	27
<b>Figure 16 :</b> Précipitation moyennes mensuelles (1970-2011).....	27

<b>Figure 17 :</b> Précipitation moyennes mensuelles (1970-2011).....	28
<b>Figure 18 :</b> Evolution de la pluviométrie saisonnière dans le bassin versant de l’oued Mekerra (1970-2011).....	28
<b>Figure 19 :</b> Précipitation saisonnière dans le bassin versant de l’oued Mekerra (1970-2011).....	29
<b>Figure 20 :</b> Evolution de la pluviométrie saisonnière dans le bassin versant de l’oued Fekan (1970-2011).....	29
<b>Figure 21:</b> Précipitation saisonnière dans le bassin versant de l’oued Fekan (1970-2011).....	30
<b>Figure22 :</b> Nombre de stations pour chaque type de tendance mensuelle.....	36
<b>Figure 23 :</b> Nombre de stations pour chaque type de tendance saisonnière.....	38
<b>Figure 24 :</b> Carte des tendances de la pluviométrie de la saison de l'automne .....	39
<b>Figure25 :</b> Carte des tendances de la pluviométrie de la saison de l'hiver.....	40
<b>Figure 26:</b> Carte des tendances de la pluviométrie de la saison du printemps.....	41
<b>Figure 27:</b> Carte des tendances de la pluviométrie de la saison de l’été.....	42
<b>Figure 28 :</b> Carte de la tendance annuelle des stations étudiées.....	43
<b>Figure 29 :</b> Carte de l’ampleur de la tendance des précipitations annuelles.....	44
<b>Figure 30:</b> Modèle de la méthode innovante d'analyse de tendance (ITA) montre le zone de tendance à la hausse et à la baisse.....	45
<b>Figure 31:</b> Résultats de la méthode ITA pour les précipitations annuelles : (a) Tendance généralement à la hausse, (b) Tendance généralement à la baisse, (c) Tendance à la hausse aux valeurs de précipitations élevées, (d) Tendance à la baisse aux valeurs de précipitations élevées.....	48
<b>Figure32 :</b> Répartition spatiale de la tendance de la pluviométrie mensuelle.....	50
<b>Figure 33 :</b> Eléments descriptive des séquences de sécheresse.....	54
<b>Figure 34 :</b> Interface du logiciel MDM .....	56

**Figure 35:** Indice de Précipitations Standardisé (SPI) pour quelques stations étudiées durant la période 1970-2011.....58

**Figure 36 :** Indice de Précipitations Standardisé (SPI) dans le bassin versant de la Macta durant la période 1970-2011.....59

**Figure 37 :** Evolution du SPI sur la décennie (1970-1979).....60

**Figure 38 :** Evolution du SPI sur la décennie (1980-1989).....61

**Figure 39 :** Evolution du SPI sur la décennie (1990-1999).....62

**Figure 40 :** Evolution du SPI sur la décennie (2000-2011).....62

**Figure 41 :** Carte de l'intensité maximale observée à (a) 6 mois.....66

**Figure 42 :** Carte de l'intensité maximale observée à (b) 12 mois.....67

**Figure 43 :** Carte de la durée de sécheresse les plus longue à (a) 6 mois.....67

**Figure 44 :** Carte de la durée de sécheresse les plus longue à (b) 12 mois .....68

**Figure 45 :** Ampleur des sécheresses les plus longues (a) sur un pas de temps de 12 mois....68

**Figure 46 :** Ampleur des sécheresses les plus intenses (b) sur un pas de temps de 12 mois..69

**Figure 47 :** Fréquences des séquences de sécheresse durant la période 1970-2011 à moyen termes (a) dans le bassin de la Macta.....70

**Figure 48 :** Fréquences des séquences de sécheresse durant la période 1970-2011 à long termes (b) dans le bassin de la Macta.....70

**Figure 49 :** Occurrences de sécheresse sévère au pas de 12 mois.....71

**Figure 50 :** Occurrences de sécheresse extrême au pas de 12 mois.....71

## ***Résumé***

L'Algérie est l'une des régions les plus vulnérables face aux impacts et changement climatique au cours du 21<sup>ème</sup> siècle. Le nord de l'Algérie a connu une variabilité à la baisse de la pluviométrie annuelle au cours du 20<sup>ème</sup> siècle. Cette variabilité s'est accentuée à partir des années quatre-vingt et a eu des impacts importants sur la ressource en eau superficielle et souterraine. Ce travail décrit l'étude des tendances de la pluviométrie mensuelle dans le bassin versant de la Macta, situé au Nord-Ouest de l'Algérie. L'étude est basée sur les données de la pluviométrie mensuelle comprenant 42 stations météorologiques ayant chacune 42 années d'observations (de 1970 à 2011). Le test de Mann- Kendall et le test d'estimation de pente de Sen sont utilisées pour détecter les tendances mensuelles, saisonnières et annuelles. L'étude mensuelle montre la décroissance du mois de mars. L'étude saisonnière détermine la réduction de la pluviométrie de la saison d'hiver et printemps contre l'augmentation de celle de l'été. D'un point de vue annuel, les deux méthodes s'harmonisent sur la tendance à la baisse des stations situées au Centre-Nord du bassin de la Macta et la tendance à la hausse des stations situées au Sud de la Macta. Ce dernier résultat est confirmé en utilisant la méthode innovante de Şen. Enfin, pour visualiser l'extension régionale de la variabilité climatique, nous avons allié représentations cartographiques aux procédures statistiques. L'analyse a utilisé les valeurs de l'indice standardisé des précipitations calculé pour des laps de temps de 6 et 12 mois. Les résultats indiquent que les sécheresses les plus remarquables de par leur intensité, leur durée et leur fréquence se sont produites durant la décennie 1980-1989 et cela quelle que soit l'échelle de temps considéré. Ces épisodes secs ont atteint leur paroxysme en 1983 et 1987 avec des sécheresses de type extrêmement sévères. La sécheresse de 1984, d'une durée de vingt-trois mois, a connu une intensité maximale de -3,72 (sécheresse extrême) et une intensité moyenne de -1,96, a eu un impact plus important sur la région. L'intensité maximale du SPI (-3,72) s'est produite en février 1984 et sa fréquence relative était d'environ 46%. En outre, il ressort des analyses que l'échelle de temps à long terme semble le mieux approprié pour décrire avec plus précisions les épisodes secs.

**Mots-clés :** Changement climatique, Sécheresse, Tendances, Indice statistique, Bassin versant de la Macta, Algérie

## **Abstract**

Algeria lies in one of the most vulnerable regions facing climate change impacts during the twenty-first century. Northwestern Algeria has experienced a persistent decline in annual rainfall associated with the significant increase in temperature during the twentieth century. This variability has been accentuated since the 1980s and has had a significant impact on water resources. This work describes the study of monthly rainfall trends in the Macta watershed, located in the north-west of Algeria. The study is based on monthly rainfall data including 42 stations, each with 42 years of observations from 1970 to 2011. The Mann-Kendall test and the Sen slope estimator test are used to detect monthly, seasonal and annual trends. The monthly rainfall shows the decrease in March. The seasonal study determines the decrease in rainfall in the winter and spring season against the increase in summer. From an annual point of view, the two methods harmonize on the decreasing trend of stations located in the North-Central part of the Macta basin and the increasing trend of stations located southern area. This last result is confirmed using the innovative trend method of Şen. Finally, to visualize the regional extension of climate variability, we have combined cartographic representations with statistical procedures. The analysis used the values of the standardized precipitation index calculated for 6 and 12 months periods. The results indicate that the most remarkable droughts in terms of intensity, duration and frequency occurred during the decade 1980-1989 and this whatever the time scale considered. These dry episodes reached their peak in 1983 and 1987 with extremely severe droughts. The drought of 1984, lasting twenty-three months, experienced a maximum intensity of -3.72 (extreme drought) and an average intensity of -1.96, had a greater impact on the region. The maximum intensity of SPI (-3.72) occurred in February 1984 and its relative frequency was around 46%. In addition, analyzes have shown that the long-term time scale appears to be the most appropriate to describe dry episodes more accurately.

**Keywords:** Climate change, Drought, Trends, Statistical index, Macta basin, Algeria

## ملخص:

الجزائر واحدة من المناطق الأكثر تعرضاً للآثار وتغير المناخ خلال القرن الحادي والعشرين. شهد شمال الجزائر تقلباً في معدل هطول الأمطار السنوي خلال القرن العشرين. وقد زاد هذا التباين من الثمانينات وكان له آثار كبيرة على موارد المياه السطحية والجوفية. يصف هذا العمل دراسة الاتجاهات في هطول الأمطار الشهرية في الحوض الهيدروغرافي ماكتا، الواقع في شمال غرب الجزائر. تستند الدراسة إلى بيانات هطول الأمطار الشهرية بما في ذلك 42 محطة قياس الامطار، ولكل منها 42 سنة من الملاحظات خلال الفترة الممتدة ما بين 1970 الى غاية 2011. يتم استخدام اختبار Man-Kendall واختبار تقدير منحدر Sen للكشف عن الاتجاهات الشهرية والموسمية والسنوية. تظهر الدراسة الشهرية الانخفاض في شهر مارس. تحدد الدراسة الموسمية الحد من قياس التدفق في فصل الشتاء والربيع مقابل زيادة في فصل الصيف. من وجهة نظر سنوية، تتوافق الطريقتان على الاتجاه النازل عند المحطات التي تقع في شمال وسط مسقط المياه المقطع والاتجاه التصاعدي للمحطات الواقعة في الجنوب. نفس النتائج أكدت باستخدام الطريقة المبتكرة ل Sen. وأخيراً، لتصور الامتداد الإقليمي لتقلب المناخ، قمنا بدمج تمثيلات الخرائط مع الإجراءات الإحصائية. استخدم التحليل قيم مؤشر الهطول القياسي المحسوب لفترات تتراوح بين 6 و12 شهراً. تشير النتائج إلى أن حالات الجفاف الأكثر بروزاً من حيث شدتها ومدتها وتواترها حدثت خلال العقد 1989-1980 وهذا بغض النظر عن النطاق الزمني. هذه الحلقات الجافة بلغت ذروتها في عامي 1983 و1987 مع الجفاف الشديد. شهد جفاف عام 1984، الذي استمر لمدة ثلاثة وعشرين شهراً، أقصى شدة بلغت -3.72 (جفاف شديد) ومتوسط شدة بلغ -1.96، وكان له تأثير أكبر على المنطقة. الحد الأقصى لشدة SPI (-3.72) حدث في فبراير 1984 وكان تردده النسبي حوالي 46 ٪. بالإضافة إلى ذلك، أظهرت التحليلات أن النطاق الزمني طويل الأجل يبدو الأنسب لوصف الحلقات الجافة بدقة أكثر.

**الكلمات المفتاحية:** تغير المناخ، الجفاف، اتجاهات الأمطار، المؤشر الإحصائي، الحوض الهيدروغرافي ماكتا، الجزائر

# *Introduction générale*

## **INTRODUCTION GENERALE :**

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

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

Ce travail est en grande partie focalisé sur la pluviométrie du bassin versant de la Macta, qui est l'un des plus grands bassins de l'Algérie. Le bassin de la Macta couvre une grande partie de l'ouest Algérien. Cette partie du pays semble plus affecté par le changement climatique que les autres régions du pays.

De plus, le bassin de la Macta contient un réseau de stations pluviométriques relativement dense. Les stations couvrent aussi bien la partie Nord, côtière, que la partie Sud, saharienne. En outre, la disponibilité des données de cette zone nous a incités à l'étudier.

## **2. OBJECTIFS ET PLAN DE L'ETUDE :**

### **2.1. Objectifs :**

Les objectifs du présent travail consistent principalement à étudier la variabilité climatique dans le bassin versant de la Macta, la variabilité des pluies, de caractériser la sécheresse, d'identifier les tendances et enfin de réactualiser les cartes des précipitations, sur la période 1970-2011. Nous nous sommes demandés sur la tendance de la pluviométrie. La pluviométrie est-elle en diminution ? Et si oui dans quelle partie de notre région d'étude ? Au niveau de quel mois, quelle saison ?

### **2.2. Plan d'étude :**

Notre travail s'organise autour de quatre chapitres :

- **Le premier chapitre** : propose une synthèse bibliographique sur le changement climatique, la sécheresse du régime pluviométrique dans le monde, en méditerranée et en Algérie. Nous y résumons les principales conclusions des nombreuses études ayant traité cette thématique.

- **Le deuxième chapitre** présente le bassin versant de la Macta en traitant ses principales caractéristiques (situation, géologie, morphologie, etc), et collecte de données.
- **Dans le troisième chapitre**, les séries de la pluviométrie mensuelles de 42 stations sont ainsi formées pour étudier les tendances temporelles (mensuelles, saisonnières et annuelles) et spatiales.
- **Et le quatrième chapitre** : porte sur les détails et la caractérisation de la sécheresse. En effet il nous donne les résultats de l'application de l'indice pluviométrique standardisé pour la caractérisation de la sécheresse climatique, la réactualisation de la carte des précipitations.

***CHAPITRE 1 :***  
***Synthèse bibliographique***

## 1. INTRODUCTION

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

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

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

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

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

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

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

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

## 2. CHANGEMENT CLIMATIQUE

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

Parmi ces manifestations on peut citer :

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### 3. SECHERESSE :

Selon l'Organisation météorologique mondiale (OMM), de 1967 à 1991, 1,4 milliards de personnes ont été affectées par les sécheresses. Selon certains scénarios des changements planétaires, l'occurrence et l'impact des sécheresses risquent d'augmenter dans les années à venir [33]. En 2000, la perte de bétail due à une sécheresse grave en Asie méridionale et au Proche-Orient a causé la mort de nombreuses personnes. Au sud de l'Afghanistan, la population entière (300 000 familles) du désert du 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 [34].

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

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

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

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

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

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

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

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

#### **4. SECHERESSE EN ALGERIE :**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

[22] mettent, par des études de la sécheresse aux stations du nord de l'Algérie, en évidence une diminution pluviométrique au cours des dernières décennies. Ce déficit génère un grave problème d'ordre économique et social, compte tenu de la pression croissante qui exerce sur la ressource en eau (alimentation en eau potable, irrigation...).

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

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

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

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

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

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

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

Depuis 1994, prenant conscience des dégâts provoqués par les événements de sécheresse répétés dans l'État du Chihuahua au Mexique, les décideurs, les politiques, les scientifiques et

les universitaires se sont concertés et leurs efforts ont abouti à la création du Centre de recherche sur la Sécheresse [60]. Le but du centre NDMC (National drought mitigation center) développé aux Etats-Unis d'Amérique est de rassembler, mesurer, et cartographier les impacts de la sécheresse et fournir aux rapporteurs un accès aux résultats à travers des outils de recherche faciles et interactifs. Les utilisateurs peuvent soumettre leurs propres rapports des impacts de la sécheresse. Dans le même contexte, d'autres pays tels que le Canada, l'Italie, l'Espagne, ..., ont développés des centres de mitigation et de planning semblables pour une meilleure compréhension et analyse du phénomène.

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

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

***CHAPITRE 2 :***  
***Présentation de la zone d'Etude***

## **1. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE :**

### **1.1. Situation géographique de bassin versant de Macta :**

Le bassin versant de la Macta, situé au Nord-Ouest du territoire algérien, appartient à l'ensemble de l'Oranie - Tafna - Chott Cherguie -Cheliff (Figure 1).

Le bassin de la Macta s'étend sur une superficie de 14 389 Km<sup>2</sup> et un périmètre environ 730,90 km. Il est limité au Nord-Ouest par les chaînes montagneuses du Tessala, au Sud par les hauts plateaux de Maalif, à l'Ouest par les plateaux de Telagh et à l'Est par les monts de Saida [66].

Ce bassin s'étend Sur la majorité des wilayas de Mascara, Sidi Bel Abbes et Saida et une partie des wilayas de Tlemcen et Mostaganem.

Globalement, le bassin versant est drainé par deux principaux cours d'eau l'oued Mekera à l'ouest, et l'oued El-Hammam à l'est.

Le bassin versant de la Macta associe :

- ✓ Une basse plaine littorale : Elle est séparée de la mer par un cordon dunaire et présente des altitudes le plus souvent inférieures à 9 m, ce qui favorise la présence de plans d'eau, de marais et de steppes plus ou moins humides. Vers l'amont, elle se prolonge au sud-est par les vallées des oueds Sig et Habra.
- ✓ Des massifs, orientés Sud Ouest-Nord Est, qui confèrent un caractère montagneux à la plus grande partie du bassin versant : Les monts de Tessala (point culminant à 1061 m) bordent le bassin versant à l'ouest et au nord-ouest. Ils sont traversés par l'oued Mebtouh avant qu'il ne rejoigne la basse plaine inférieure. Au sud-ouest, ils sont relayés par la partie orientale des monts de Tlemcen (1412 m au djebel Ouargla). Les monts de Beni Chougrane (932 m) occupent une bonne partie de la zone moyenne du bassin versant. Celui-ci remonte, à l'est, jusqu'aux monts de Saïda (1201 m au djebel Tiffrit) et, au sud, jusqu'aux monts de Dhaya (1455 m au djebel Mezioud) et jusqu'aux hauteurs de la bordure septentrionale des hauts plateaux (1415 m au djebel Beghira) qui séparent le terrain d'étude de la dépression du Chott Ech Chergui.
- ✓ Enfin, de larges plaines alluviales insérées dans les massifs montagneux : Celle de Sidi Bel Abbès, de direction Sud-Nord, est associée à l'oued Mekerra (nom donné à l'oued Mebtouh dans sa partie supérieure). Le bassin de l'oued El-Hammam, de son côté, renferme la plaine de Ghriss-Mascara, qui est orientée Ouest-Sud Ouest et Est-Nord Est, et qui est drainée par l'oued Ain Fekane.

Le bassin versant de la Macta est géré par l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (A.N.R.H) et l'agence du bassin hydrographique (A.B.H O.C.C) Oranais Chott Chergui sous le code 11.

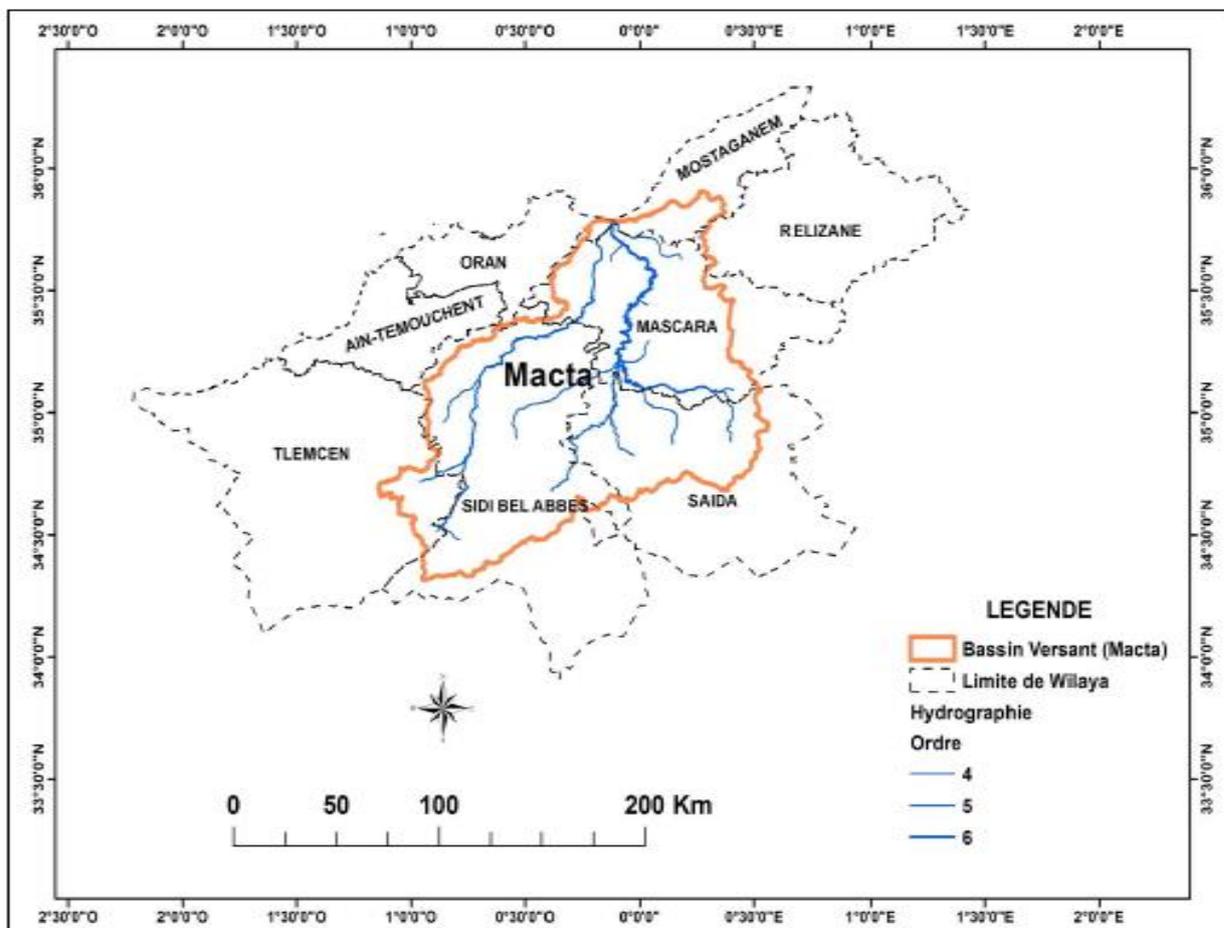


Figure 1 : Situation administrative du bassin versant de Macta [67]

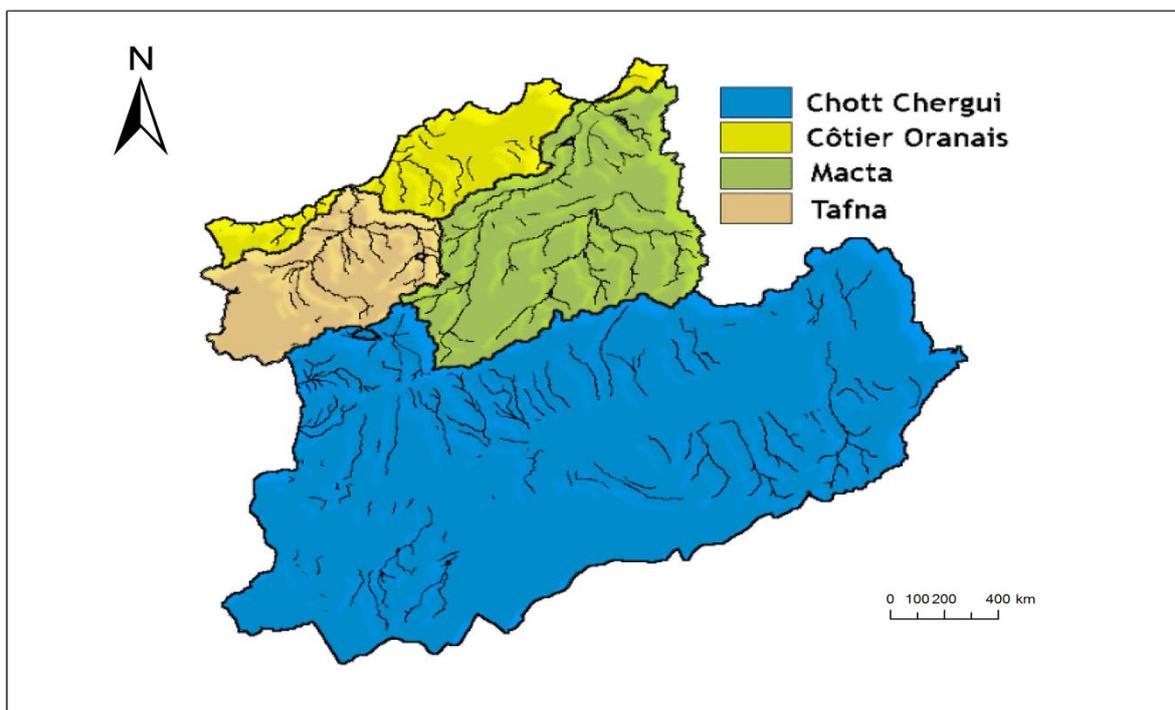


Figure 2 : Bassins versants hydrographiques « Oranie - Tafna - Chott Cherguie- Macta »

## 2. CARACTERISTIQUES TOPOGRAPHIQUES :

### 2.1. Reliefs :

Le relief du bassin versant de la Macta est très varié allant des hautes altitudes ( $> 1000$  m) du sud, aux dépressions sublittorales ( $< 50$  m) au nord (Figure 03). Cependant, on distingue :

#### ✓ Zone des basses plaines littorales:

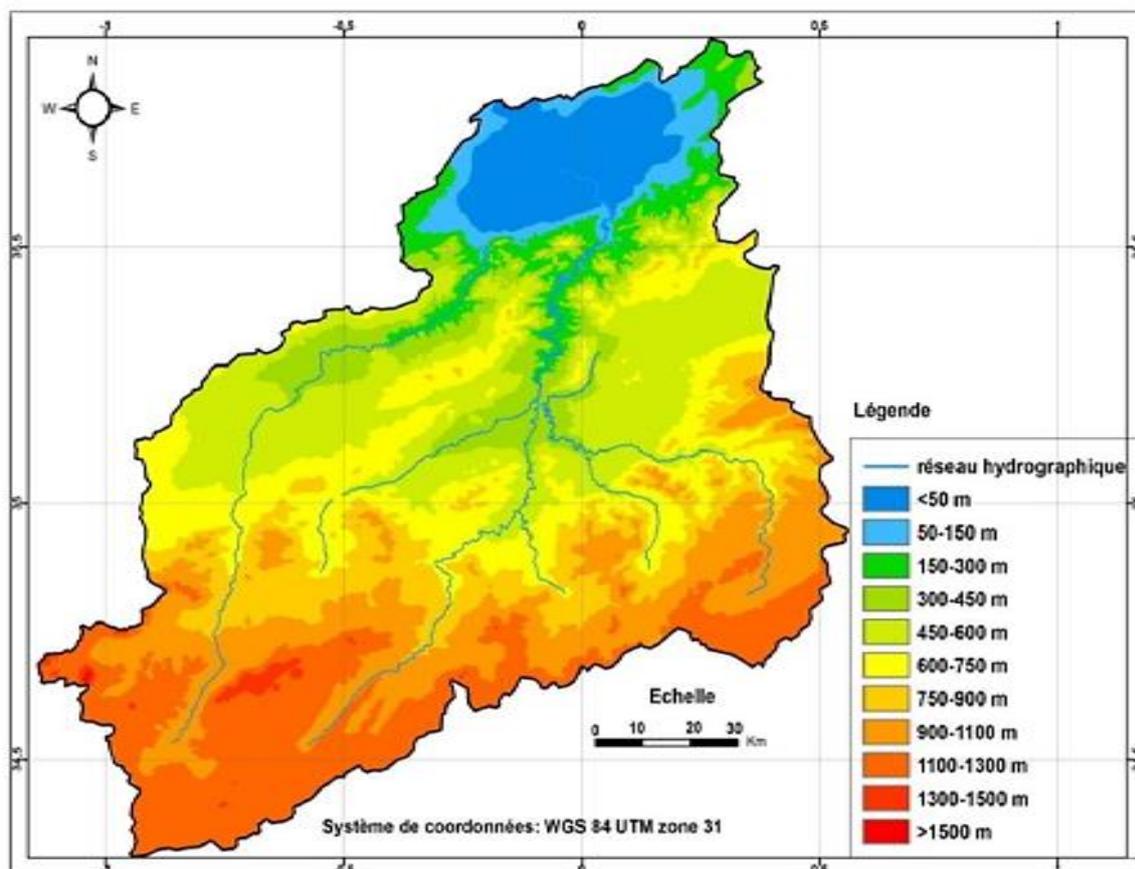
Séparée de la mer par un cordon dunaire et présente des altitudes les plus faibles (inférieures à 9 m), ce qui favorise la présence de plans d'eau, du marais et de steppes plus ou moins humides.

#### ✓ Massifs montagneux:

Ils confèrent un caractère montagneux à la plus grande partie du bassin versant de la Macta : A l'Ouest et au Nord-Ouest se trouvent les monts de Tessala (point culminant à 1061 m) qui sont traversés par l'oued Mebtouh avant qu'ils rejoignent la basse plaine inférieure. Au Sud-Ouest, ils sont relayés par la partie orientale des monts de Tlemcen (1412 m au djebel Ouargla).

#### ✓ Zone des plaines alluviales:

Les plaines alluviales sont insérées dans les massifs montagneux comme la plaine de Sidi Bel Abbès de direction S-N, qui est associée à l'oued Mekerra et la plaine de Ghriss à l'Est drainée par l'oued Ain Fekane.



**Figure 3 :** Modèle numérique du terrain et réseau hydrographique du bassin versant de la Macta [68]

### 3. CARACTERISTIQUES MORPHOMETRIQUES DU BASSIN :

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

➤ **Superficie du bassin versant :**

La surface du bassin égale à 14389 Km<sup>2</sup>.

➤ **Périmètre du bassin versant :**

Le périmètre du bassin versant estimé à 730,90 Km.

#### 3.1 Indice de Gravilius (ou compacité) :

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

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

P : le périmètre du bassin versant (Km).

S: la surface du bassin versant (Km<sup>2</sup>).

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

Le bassin versant de la Macta a un coefficient de compacité égal à 1.71, ce qui traduit son allongement et un développement de l'érosion linéaire.

#### 3.2 Rectangle équivalent :

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

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

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

Avec :

C : indice de compacité ;

S : Superficie du bassin versant en km<sup>2</sup> ;

L : longueur du rectangle équivalent en km.

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

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

Ce qui donne : L=318.52 km et B= 45.18 km

➤ **Indice de pente moyenne :**

$$I_{moy} = \frac{H_{max} - H_{min}}{L}$$

Elle ne tient compte pas de la forme de la courbe hypsométrique

H<sub>max</sub> : altitude maximale du bassin (m) ;

H<sub>min</sub> : altitude minimale du bassin (m) ;

L : longueur du rectangle équivalent en (m) ;

On obtient I<sub>moy</sub> = 3.41 (%)

**3.3. Tableau récapitulatif :**

La connaissance des paramètres morphométriques et hydrographique ainsi que leur comparaison sont importantes, Ils interviennent souvent de façon combinée pour commander les modalités de l'écoulement.

Ces paramètres sont résumés dans le tableau 1 suivant :

**Tableau 1 :** Récapitulatif des caractéristiques morpho métriques et hydrographiques de sous bassin versant de l'oued Mekker

Paramètre	Symbole	Valeur	Unité
Surface	S	14389	Km <sup>2</sup>
Périmètre	P	730.90	m
Indice de compacité	C	1.71	-
Longueur du rectangle équivalent	Lé	318.52	km
Largueur du rectangle équivalent	B	45.18	km
Altitude minimale	H <sub>min</sub>	18	m
Altitude maximale	H <sub>max</sub>	1715	m
Altitude moyenne	H <sub>moy</sub>	483	m
Indice de pente moyenne	I <sub>p</sub>	3.41	%

**4. SOL :**

Les sols en général ont des prédominances type calcaires, au niveau du haut piémont et montagne. Les sols sont peu profonds à l'exception des sols des différentes vallées et du bas piémont caractères par des dépôts les plus récents (sols marneux et argileux).

La région des bēni Chougrane, se caractérise par un faciès composé de grès et de conglomérats.

A proximité de l'exutoire (marécage de la Macta), se compose des dépôts de matériaux de sédiment transposés et remaniés.

**5. OCCUPATION DU SOL :**

Selon [68], il y a Six (06) classe représente la Superficie et pourcentage d'occupation du sol dans le bassin versant de la Macta :

- Couvert végétal permanent : 2948,03 (Km<sup>2</sup>)
- Couvert végétal temporaire : 8335,48 (Km<sup>2</sup>)
- Couvert végétal clairsemé : 2663,24 (Km<sup>2</sup>)
- Sols nus : 302,89
- Eau libre : 14,86
- Agglomération : représente 0,87 %.

La superficie et le pourcentage de chaque classe indiquent la dominance du couvert végétal temporaire (58 % de la surface total) concentré dans les plaines intérieures de Sidi Belabbes, Ghriss et les grands périmètres irrigués.

La couverture végétale clairsemée est dominée au Sud-Ouest (l'Alfa, parcours, maquis clairs). Alors que le couvert végétal permanent occupe 20% de la surface totale qui est caractérisé par des forêts couvertes de pins d'Alep (Louza, Belarbi, Tenira et Tiffrit), de maquis et de l'arboriculture (olivier, vignobles,...).

**6. HYDRO-CLIMATOLOGIE :**

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

**6.1. Caractéristiques hydrologiques :****6.1.1 Précipitation :**

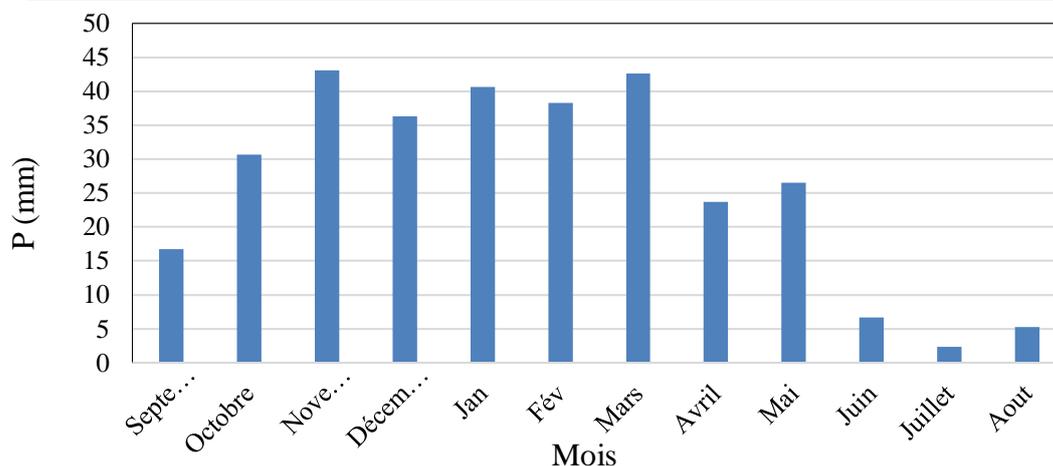
Les précipitations constituent une composante essentielle du cycle de l'eau. Elles permettent le renouvellement total ou partiel des nappes par le biais des infiltrations et elles conditionnent l'écoulement saisonnier et le régime des cours d'eaux.

**Tableau 2 :** Précipitation moyennes mensuelles de l'Oued Mekkera (1970-2011).

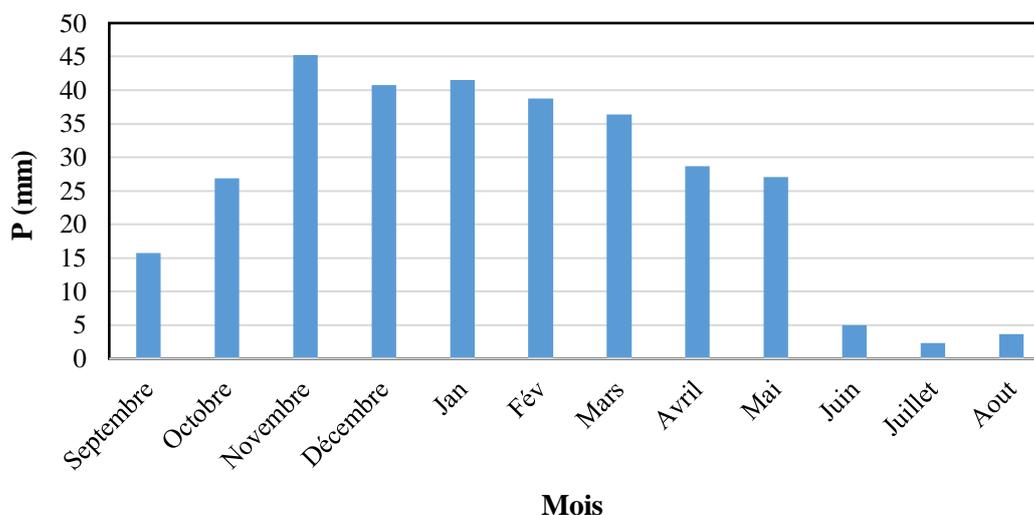
Mois	Sép	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev
P (mm)	16.77	30.62	43.05	36.33	40.65	38.32
Mois	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou
P (mm)	42.62	23.73	26.54	6.71	2.32	5.30

**Tableau 3 :** Précipitation moyennes mensuelles de l'Oued Fekan (1970-2011).

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



**Figure 4 :** Variations des précipitations moyennes mensuelles à Oued Mekkera (1970-2011).



**Figure 5 :** Variations des précipitations moyennes mensuelles à Oued Fekan (1970-2011).

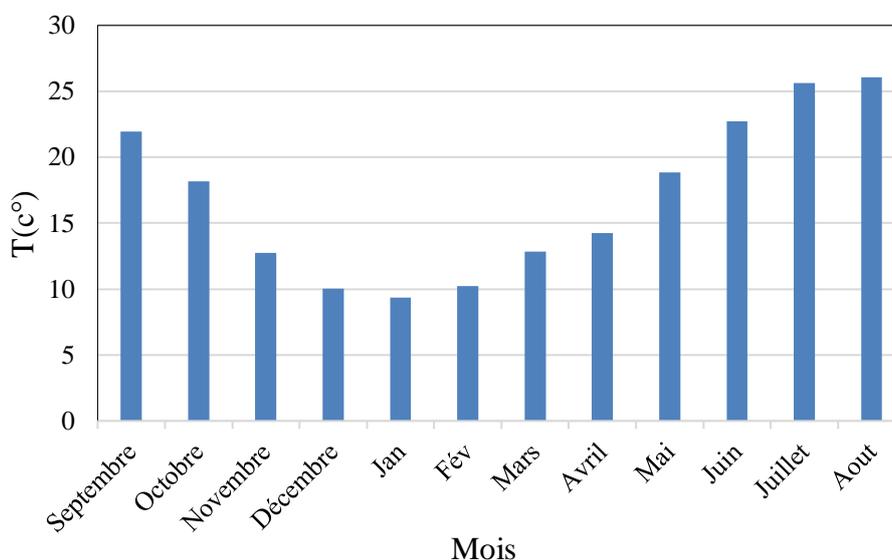
### 6.1.2 Température :

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

**Tableau 4 :** Températures moyennes mensuelles d'Oued Mekkera (1970-2011).

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

Selon le tableau 4, on remarque le mois le plus froid est celui de janvier avec une température moyenne de l'ordre de 9.38 °C, et le mois le plus chaud est celui d'Août avec une température moyenne de 26.05 °C.

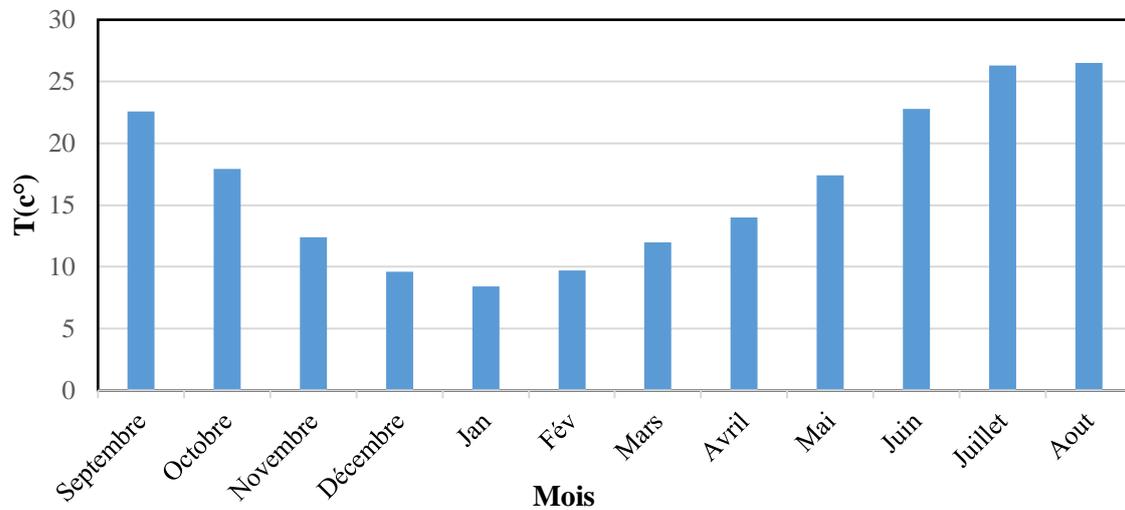


**Figure 6 :** Variations des températures moyennes mensuelles d'Oued Mekkera (1970-2011)

**Tableau 5 :** Températures moyennes mensuelles d'Oued Fekan (1970-2011).

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

Selon le tableau 5, on remarque le mois le plus froid est celui de janvier avec une température moyenne de l'ordre de 8.4 °C, et le mois le plus chaud est celui d'Août avec une température moyenne de 26.5 °C.



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

### 6.1.3 Climat :

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

- **L'indice d'aridité annuelle :**

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

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

Avec :

P : Précipitation moyenne annuelle en mm;

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

I : Indice d'aridité annuelle.

Selon Demartonne :

I < 5 : le climat est hyper-aride.

5 < I < 7.5 : le climat est désertique.

7.5 < I < 10 : le climat est steppique.

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

20 < I < 30 : le climat est tempéré.

I > 30 : le climat est humide.

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

• **L'indice d'aridité mensuel :**

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

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

Avec :

P : Précipitation moyenne mensuel (mm).

T : Température moyenne mensuel (C°).

i : Indice d'aridité mensuel.

**Tableau 6 :** Indice mensuel d'aridité à Oued Mekkera.

<b>Mois</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Déc</b>	<b>Jan</b>	<b>Fév</b>
<b>T (°C)</b>	21.97	18.15	12.76	10.03	9.38	10.22
<b>P (mm)</b>	16.77	30.62	43.05	36.33	40.65	38.32
<b>I</b>	6.29	13.05	22.70	21.76	25.17	22.74
<b>Mois</b>	<b>Mars</b>	<b>Avril</b>	<b>Mai</b>	<b>Juin</b>	<b>Juit</b>	<b>Aout</b>
<b>T (°C)</b>	12.83	14.27	18.85	22.7	25.63	26.05
<b>P (mm)</b>	42.62	23.73	26.54	6.71	2.32	5.30
<b>I</b>	22.40	11.73	11.04	2.46	0.78	1.76

Le tableau 6 et 7 montre une répartition mensuelle du climat.

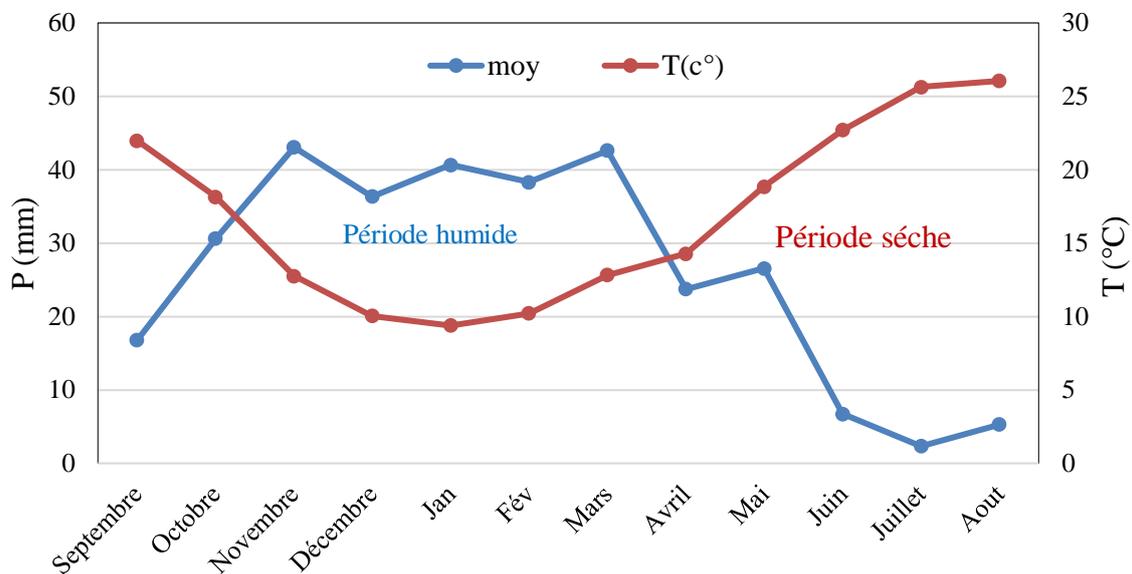
- Le mois de septembre présente un climat désertique.
- Les mois de Juin, Juillet et Août présentent un climat hyper-aride.
- Les mois avril, mai et octobre jouissent d'un climat semi-aride.
- Les mois de Novembre, Décembre, Janvier, Février, et Mars présentent un climat tempéré.

**Tableau 7 :** Indice mensuel d'aridité à d'Oued Fekane.

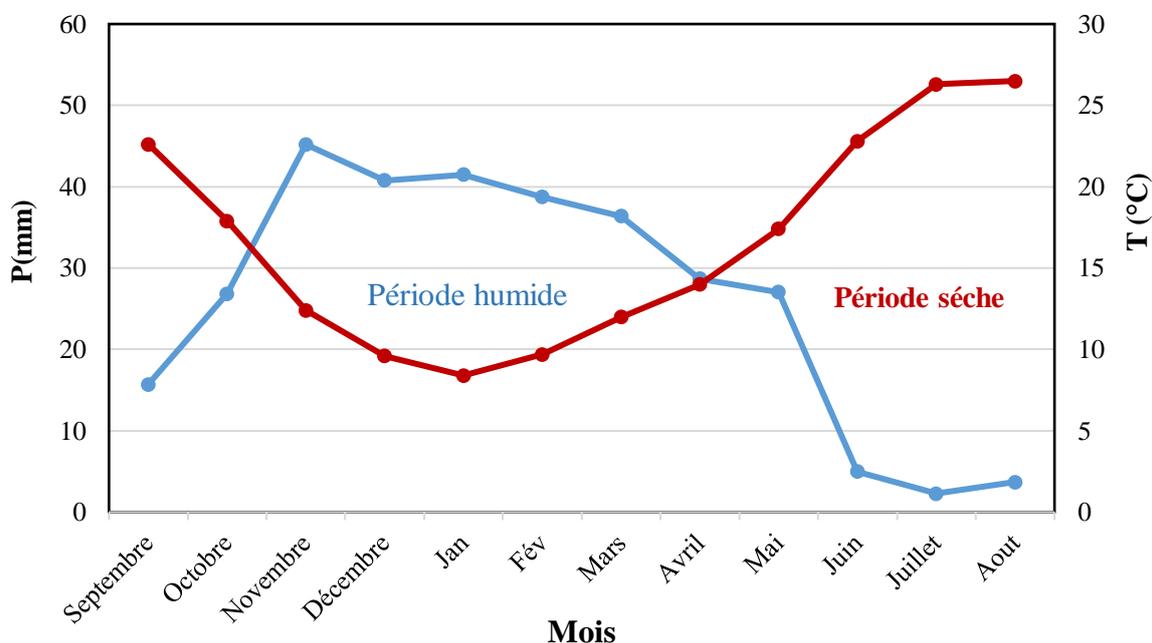
<b>Mois</b>	<b>Sép</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dec</b>	<b>Jan</b>	<b>Fev</b>
<b>T (°C)</b>	22.6	17.9	12.4	9.6	8.4	9.7
<b>P (mm)</b>	15.7	26.8	45.2	40.8	41.5	38.7
<b>i</b>	5.77	11.53	24.21	24.96	27.06	23.6
<b>Mois</b>	<b>Mar</b>	<b>Avr</b>	<b>Mai</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Aou</b>
<b>T (°C)</b>	12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

### 6.1.4 Diagramme Ombrothermique :

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



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



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

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

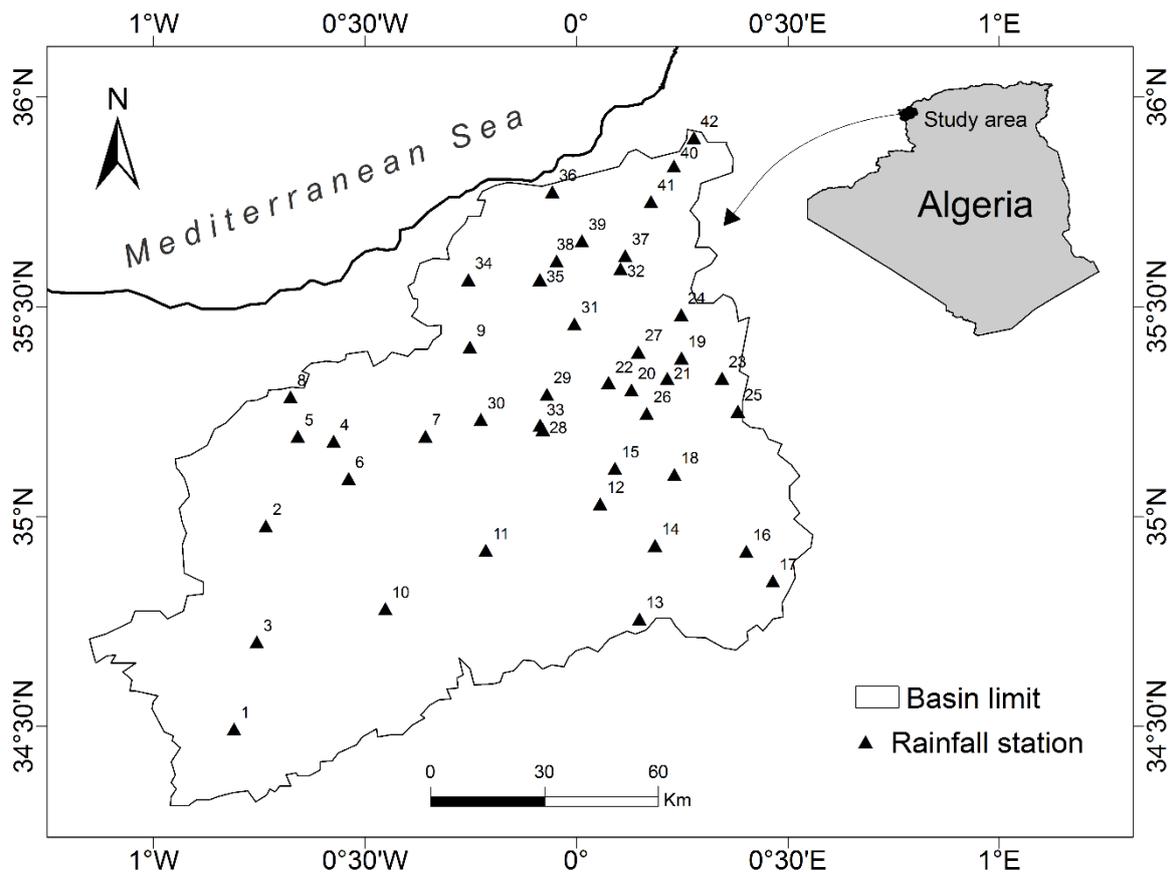
- Une période sèche qui s'étend entre le mois de Mai jusqu'au mois d'Octobre.
- Une période humide qui dure six mois donc du mois de Novembre jusqu'au mois de Avril.

## 7. Analyse de la pluviométrie :

### 7.1 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 42 stations pluviométriques qui représentent des totaux pluviométriques mensuels dans notre bassin versant.

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



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

### 7.2. Caractéristiques des postes pluviométriques:

Les caractéristiques des stations pluviométriques étudiées sont empilées dans le tableau 8. Ces stations présentent une longue période d'enregistrement de données allant de 1970 à 2011.

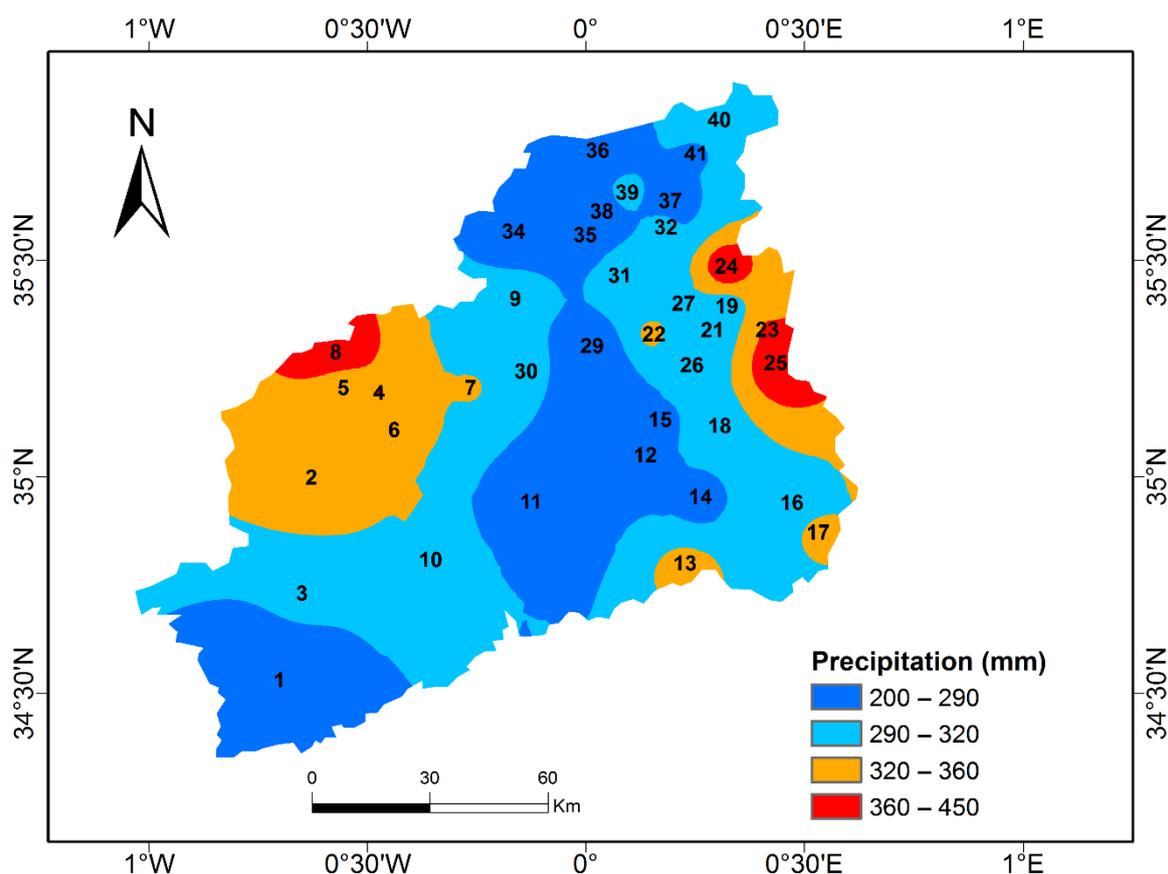
**Tableau 8 : Caractéristiques des stations pluviométriques**

N°	Nom de la station	Code	Longitude (°)	Latitude (°)	Z (m)
1	RAS EL MA	110102	- 0,809334	34,494740	1097
2	SID ALI BEN YOUB	110201	- 0,734043	34,978248	635
3	EL HACAIBA	110203	- 0,755568	34,702013	950
4	SARNO Bge	110304	- 0,574060	35,180350	425
5	SIDI BEL ABBES	110305	- 0,658583	35,191520	485
6	HASSI DAHO	110309	- 0,538585	35,091110	650
7	MOSTEFA BEN BRAHIM	110312	- 0,356967	35,192004	590
8	AIN TRID	110314	- 0,675747	35,285762	530
9	CHEURFAS BGE	110402	- 0,251628	35,404398	230
10	MERINE	110501	- 0,451765	34,781331	970
11	DAOUD YOUB	110802	- 0,214122	34,920480	660
12	MEFTAH SIDI	111102	0,055986	35,031000	530
13	AIN EL HADJAR	111103	0,149130	34,757058	1025
14	HAMMAM RABI	111112	0,186280	34,931920	710
15	OUED TARIA	111201	0,091058	35,115659	501
16	AIN TIFRIT	111204	0,401859	34,917816	970
17	TAMESNA	111210	0,464584	34,847322	1105
18	BENIANE	111217	0,231450	35,101077	630
19	MAOUSSA	111401	0,248202	35,378314	494
20	FROHA	111402	0,1300400	35,302130	467
21	MATEMORE	111405	0,215025	35,329824	482
22	TIZI	111413	0,076127	35,320075	453
23	SIDI KADA	111414	0,344322	35,330201	549
24	AIN FARES	111417	0,247782	35,481576	806
25	NESMOTH MF	111418	0,381819	35,251571	930
26	GHRISS	111424	0,166501	35,246272	498
27	MASCARA	111429	0,146428	35,392860	550
28	SAHOUEZ OUIZERT	111502	- 0,079531	35,207846	361
29	BOU HANIFIA BGE	111503	- 0,069807	35,291959	306
30	SFISSEF	111508	- 0,226020	35,231837	545
31	HACINE	111509	- 0,004537	35,459880	145
32	MOHAMMADIA GRHA	111511	0,104206	35,590378	50
33	TROIS RIVIERES	111516	- 0,085948	35,218519	315
34	OGGAZ	111604	- 0,255370	35,564871	73
35	BOU HENNI	111605	- 0,086492	35,565329	26
36	FORNEKA	111606	- 0,056751	35,774381	78
37	SAMOURIA	111607	0,115319	35,622188	48
38	MOCTA DOUZ	111610	- 0,046623	35,609550	18
39	FERME BLANCHE	111611	0,013060	35,657361	20
40	BLÉD TAOURIA	111612	0,230748	35,835681	118
41	MARAIS DE SIRAT	111616	0,176414	35,750668	30
42	FERME ASSORAIN	111617	0,277981	35,902936	222

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

### 7.3. Variation des précipitations annuelles dans le temps et dans l'espace :

L'étude des précipitations est basée sur l'analyse statistique des données pluviométriques enregistrées sur les principales stations du bassin versant étudié afin d'analyser la variabilité spatiale et temporelle des précipitations.



**Figure 11** : carte de la pluie moyenne interannuelle du bassin versant de la Macta (1970-2011)

#### 7.3.1 Variation temporelle :

La pluviométrie varie fortement d'une année à une autre. Ceci contribue à l'aridité du climat et complique la gestion des ressources en eau.

##### 7.3.1.1 la méthode de la moyenne arithmétique :

Pour avoir une idée générale sur la variation temporelle à l'échelle du bassin versant étudié, nous avons calculé les pluviométries moyennes annuelles en utilisant la méthode de la moyenne arithmétique sur la période 1970-2011 pour les dix-sept (17) stations.

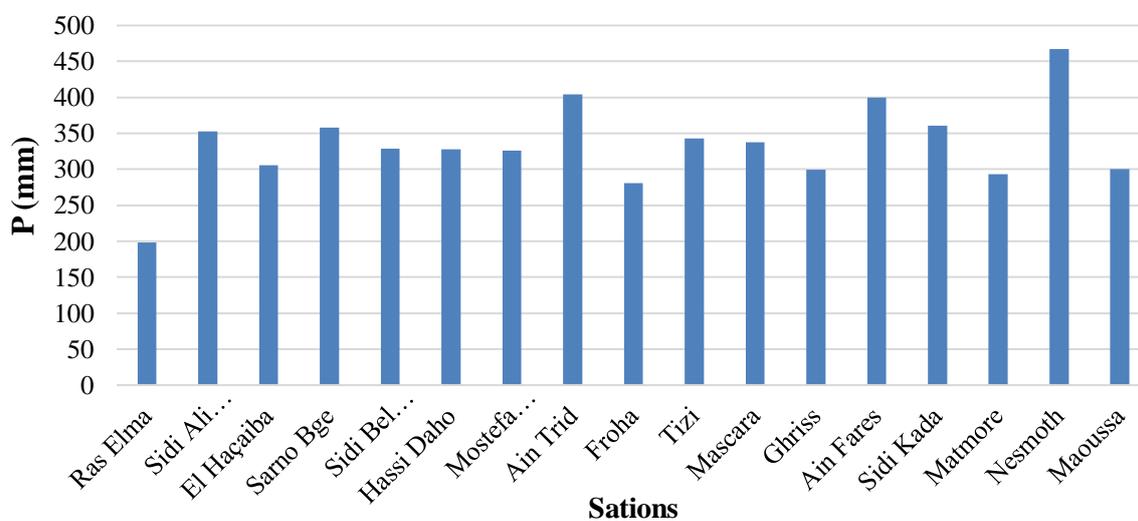
Le tableau 9 récapitule les différents paramètres statistiques déduits.

**Tableau 9** : Paramètres statistique des pluies moyennes annuelles de 17 stations (1970-2011)

Stations	Moyenne	Minimum	Maximum	Ecart-type	Cv
Ras Elma	198,2	41,9	417,6	93,52	0,47
Sidi Ali Ben Youb	352,4	102,2	686,2	127,9	0,36
El Haçaiba	305,5	63,9	478,8	101,3	0,33
Sarno Bge	358,2	150,4	565,5	107,3	0,29
Sidi Bel Abbes	328,8	103,5	495,3	92,8	0,28
Hassi Dahou	327,9	63,2	565,5	115,3	0,35
Mostefa Ben Brahim	326,4	126,5	543	107,3	0,33
Ain Trid	404,3	215,7	680,5	112,9	0,28
Froha	281,1	93,1	405,1	78,87	0,28
Tizi	343,3	116,3	554,1	97,29	0,49
Mascara	337,7	136,7	621	114,59	0,38
Ghriss	299,5	97,5	741,3	131,57	0,37
Ain Fares	400	117,6	794,3	142,66	0,45
Sidi Kada	360,5	109,6	723,8	124,38	0,48
Matmore	293,3	108,6	508,5	87,19	0,64
Nesmoth	467,3	170,7	878	171,82	0,61
Maoussa	300,7	136	621	103,87	0,35

### 7.3.1.2 Variation spatiale :

Il convient de remarquer que le bassin étudié présente des zones pluviométriques relativement hétérogène, autrement dit la variation spatiale devient plus ou moins importante, entre 198.2 mm et 467.3 mm. La station la plus arrosée est celle de Nesmoth et la moins pluvieuse est celle de Ras Elma (figure 12). Cette variabilité est caractérisée par le coefficient de variation (0.47 à 0.61), qui est relativement élevé.

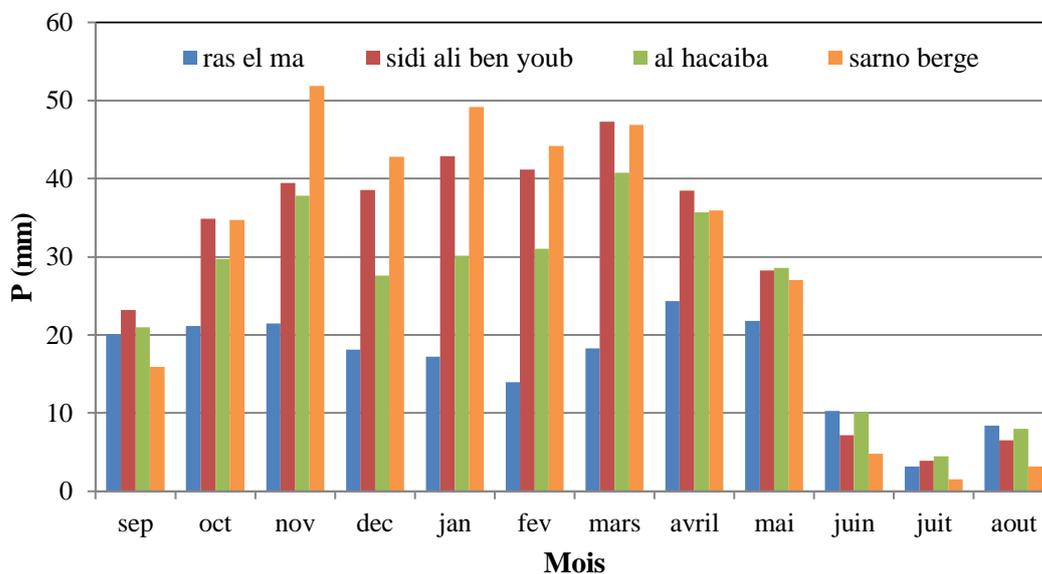


**Figure 12 :** Variation annuelle des précipitations moyenne de quelques stations (1970-2011)

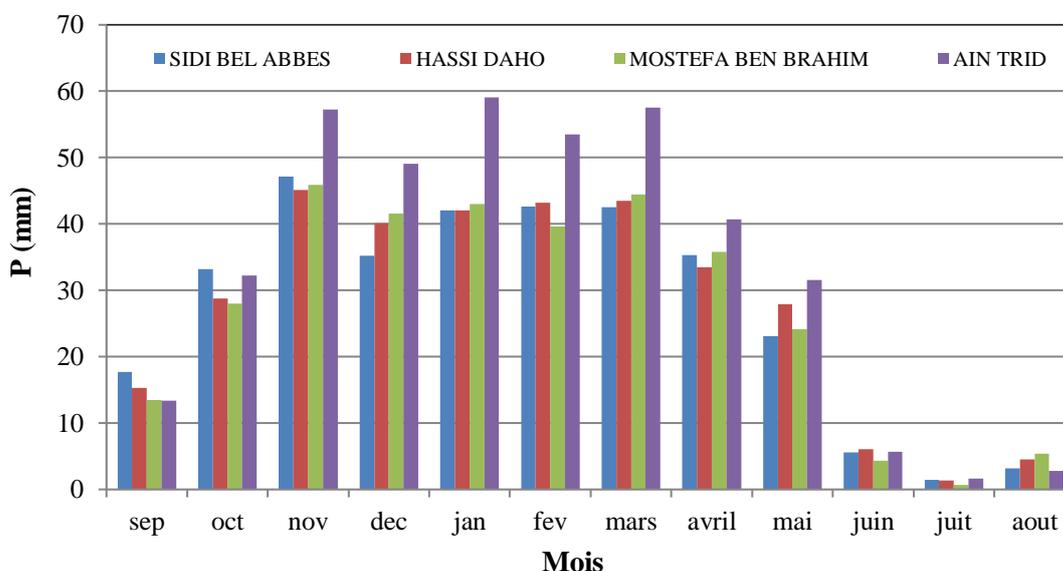
**7.4 Variation des précipitations mensuelle et le régime saisonnier :**

**7.4.1 Variation des précipitations mensuelles :**

La répartition mensuelle des précipitations annuelles et ses variations conditionnent, en relation avec les facteurs thermiques, l'écoulement saisonnier et le régime des cours d'eau ainsi que celui des nappes. La distribution des pluies mensuelles de la station de Ras El Ma, Sidi Ali Ben Youb, Al Hacaiba et Sarno berge montre que les précipitations maximales sont atteintes au mois de novembre (51.87mm) alors que les minimales sont observées durant le mois de Juillet (3.91mm et 1.56mm respectivement). Par ailleurs le mois de Juillet est le moins pluvieux avec seulement 1.56mm pour la station de Sarno berg. Le mois de novembre est le plus humide avec un maximum de 51.87mm.

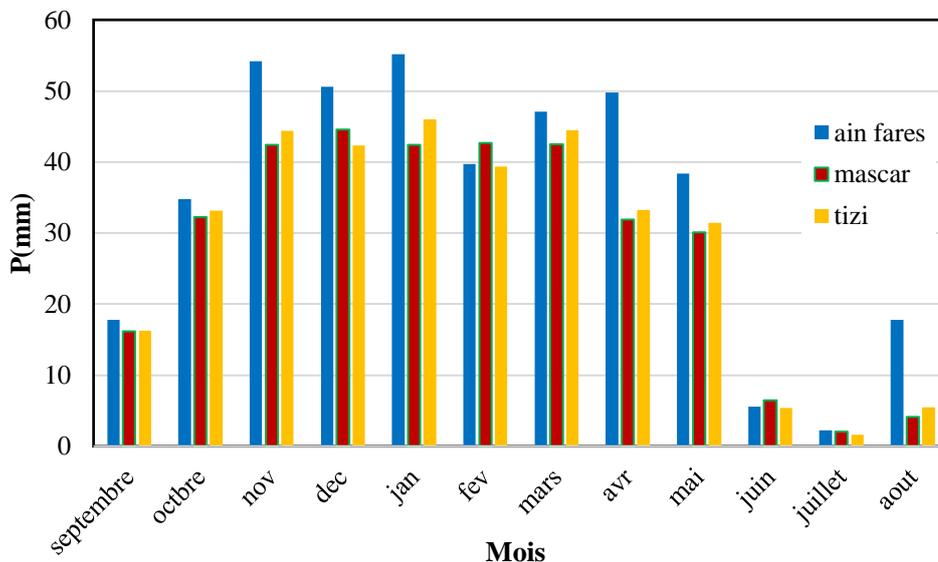


**Figure 13 :** Précipitation moyennes mensuelles (1970-2011)



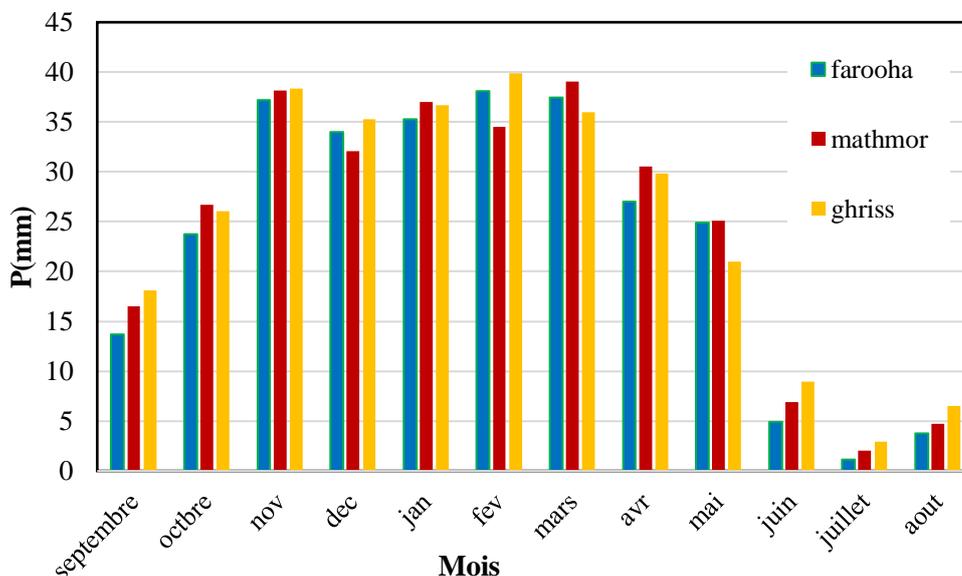
**Figure 14:** Précipitation moyennes mensuelles (1970-2011)

Les stations de Sidi Bel Abbas , Hassi Daho, Mostefa Ben Brahim et Ain Trid sont caractérisées par des précipitations mensuelles pluvieuses correspondant aux mois de Novembre, Janvier , Février et Mars (figure 13) et une saison plus sèche qui correspond aux mois de Juin, Juillet et Août. De ce fait les mois de Juin, Juillet et Août correspondent aux mois les plus secs.



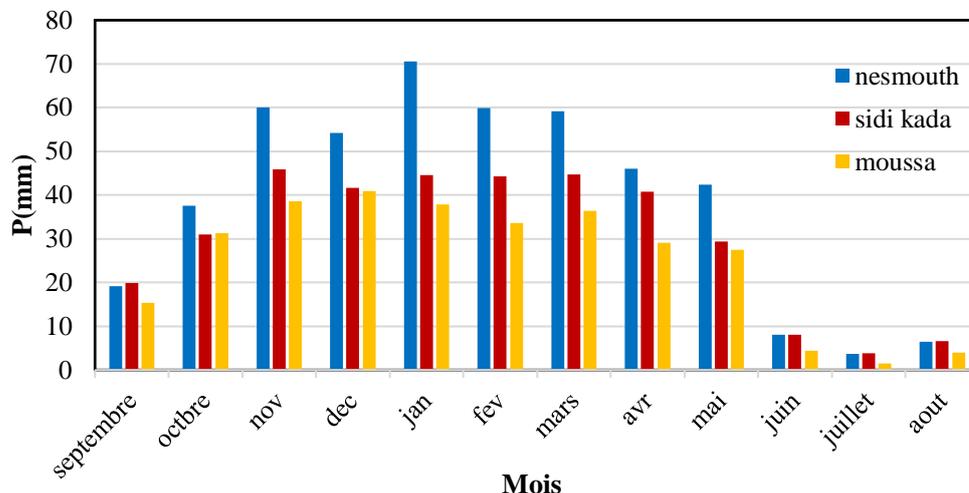
**Figure 15 :** Précipitation moyennes mensuelles (1970-2011)

La distribution des pluies mensuelles de la station de Mascara, Ain Fares et Tizi montre que les précipitations maximales sont atteintes au mois de Janvier (54.2 mm, 42mm et 44.4mm respectivement) alors que les minimales sont observées durant le mois de Juillet (2.2mm et 1.6mm respectivement). Par ailleurs le mois de Juillet est le moins pluvieux avec seulement 1.6mm pour la station de Tizi. Le mois de Décembre est le plus humide avec un maximum de 50.6mm.



**Figure 16** : Précipitation moyennes mensuelles (1970-2011)

Les stations de Matmore, Froha et Griss sont caractérisées par des précipitations mensuelles pluvieuses correspondant aux mois de Novembre, Janvier et Février (figure 15) et une saison plus sèche qui correspond aux mois de Juin, Juillet et Août. De ce fait les mois de Juin, Juillet et Août correspondent aux mois les plus secs.

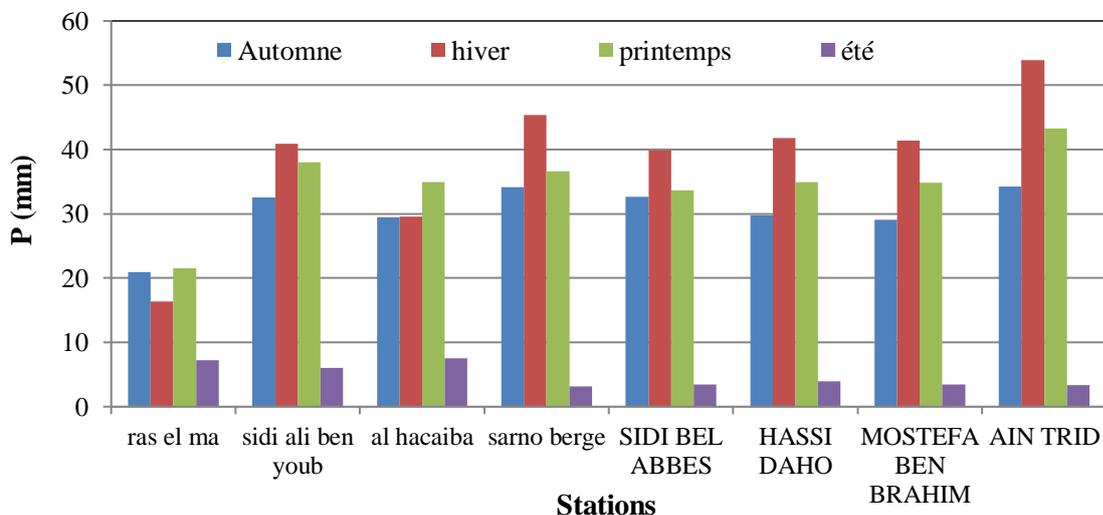


**Figure 17** : Précipitation moyennes mensuelles (1970-2011)

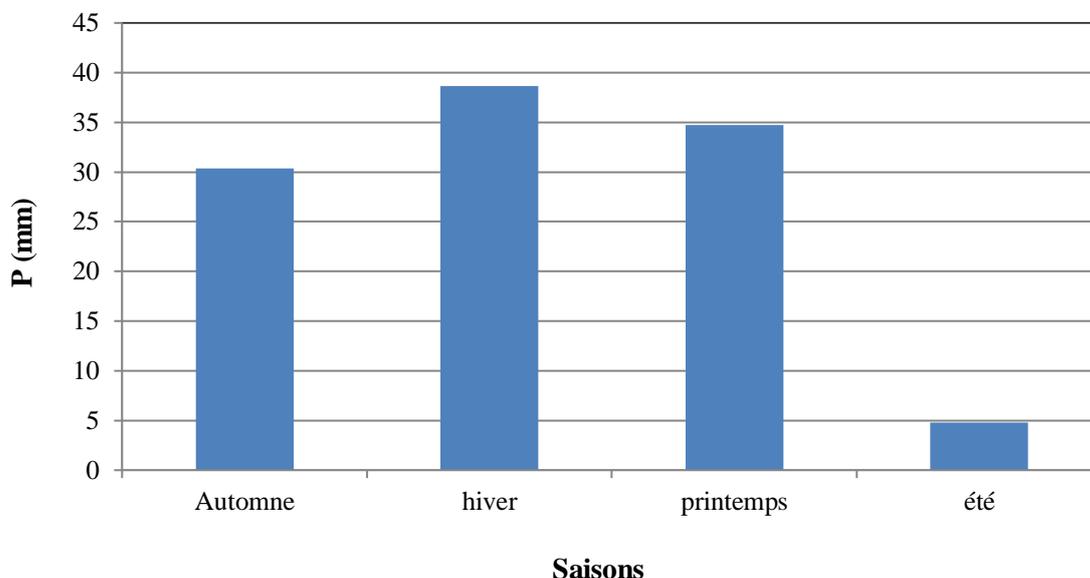
L'analyse des précipitations mensuelles mesurées à la station de Nesmoth, Sidi Kada et Moussa montre que les valeurs maximales sont observées au mois de novembre (60.1mm), janvier (70.5mm) et février (59.9mm) respectivement. Le minimum pour les stations est enregistré au mois de juillet avec des valeurs de 3.7mm et 1.1mm. Il ressort également de cette analyse que la station de Nesmoth est plus arrosée que celle de Sidi Kada et Moussa (Figure 16).

**7.4.2 Variation des précipitations saisonnières :**

Les histogrammes des précipitations saisonnières (figures 17 et 18), montrent que l'hiver est la saison la plus pluvieuse alors que l'été correspond à la saison la plus sèche.



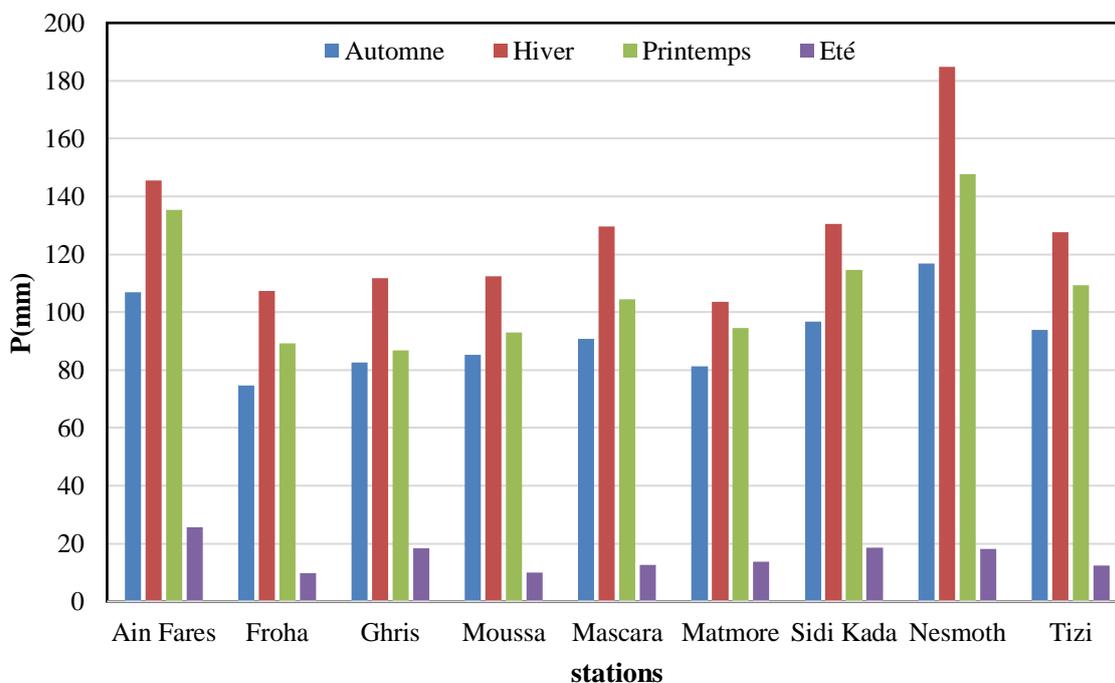
**Figure 18 :** Evolution de la pluviométrie saisonnière dans le bassin versant de l'oued Mekerra (1970-2011)



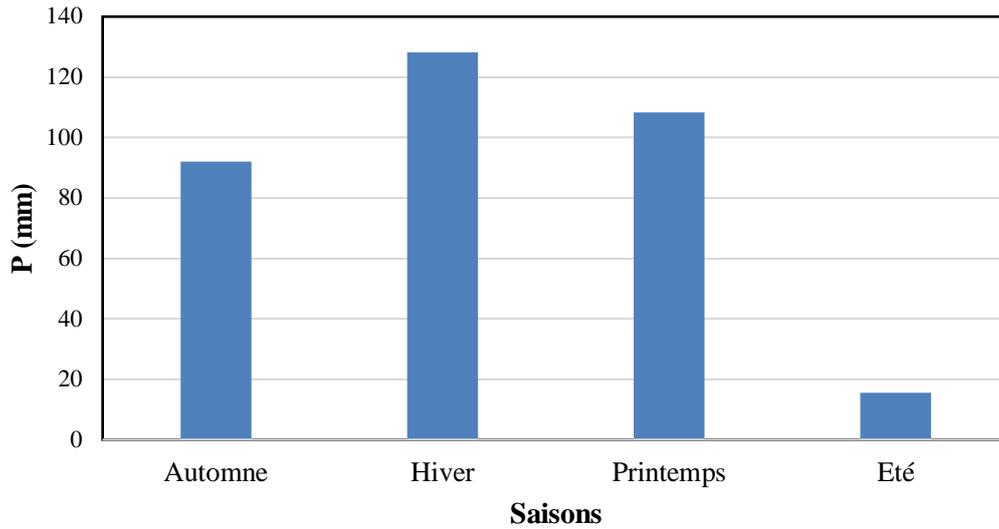
**Figure 19 :** Précipitation saisonnière dans le bassin versant de l'oued Mekerra (1970-2011)

Les valeurs des précipitations mesurées durant la saison d'hiver, varient entre 53.87mm pour la station d'Ain Trid et 16.4mm pour la station Ras El Ma (figure 17), avec une moyenne inter-saisonnière de 38.65mm (figure 18).

Les valeurs de la saison la plus sèche, varient entre 3.19 mm pour la station de Sarno berg avec une moyenne inter-saisonnière d'environ 4.77mm.



**Figure 20 :** Evolution de la pluviométrie saisonnière dans le bassin versant de l'oued Fekan (1970-2011)



**Figure 21** : Précipitation saisonnière dans le bassin versant de l'oued Fekan (1970-2011)

Les valeurs des précipitations mesurées durant la saison d'hiver, varient entre 103.58mm pour la station de Matmore et 184.73mm pour celle de Nesmoth (figure 19), avec une moyenne inter-saisonnière de 128.12mm (figure 20).

Les valeurs de la saison la plus sèche, varient entre 9.8mm pour la station de Froha et 25.6 pour la station de Ain Fares, avec une moyenne inter-saisonnière d'environ 15mm.

**CHAPITRE 3 :**  
*Etude de la variabilité et de l'évolution  
de la pluviométrie*

## 1. INTRODUCTION

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

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

Les éléments les plus importants dans une série de précipitation temporelle sont les variations saisonnières et systématiques à l'écart de la composante stochastique. La saisonnalité est une composante beaucoup plus connue selon l'emplacement de la zone d'étude et les caractéristiques climatologiques, mais la composante tendancielle a besoin de soins supplémentaires pour son identification (Elouissi et al., 2016). Durant les trois dernières décennies, le nombre de recherche sur les tendances dans la littérature est de plus en plus élevé. La plupart des œuvres sont basées sur l'approche de Mann-Kendal (Mann, 1945 ; Kendall, 1975) pour l'identification des tendances et sa détermination.

Fatichi et al. (2013) a déclaré qu'en raison de l'impact des changements climatiques, l'identification, la détection et l'évaluation des tendances sont devenus des sujets importants dans les différentes disciplines. Les chercheurs de diverses disciplines ont obtenu des informations importantes sur la détection, l'identification et les questions d'évaluation des tendances (Gupta 2007; Novotny and Stefan 2007; Douglas and Fairbank 2011; Ehsanzadeh et al., 2011; Bao et al., 2012; Wagesho et al. 2012; Lorenzo-Lacruz et al., 2012; Sharif et al., 2012; Larsen, et al. 2013; Garbrecht et al., 2004 ; Haktanir and Citakoglu, 2014; Haan et al., 2014).

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

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

Le test de Mann-Kendall (Mann 1945, Kendall 1975) permet de tester la stabilité de la moyenne et de la variance des séries d'indices climatiques sur une période donnée. Ainsi, ce test non paramétrique est utilisé pour détecter d'éventuelles tendances dans les séries d'indices climatiques. Il s'agit d'une procédure dans laquelle on compare chaque indice de la série de base avec les indices précédents. Soit  $(x_1, \dots, x_n)$  un échantillon de valeurs

indépendantes issu d'une variable aléatoire  $x$  dont on cherche à évaluer la stationnarité. L'hypothèse nulle  $H_0$  est l'hypothèse de stationnarité de la série (absence de tendance). L'hypothèse alternative  $H_1$  correspond au non stationnarité de la série. La statistique de Mann-Kendall est définie comme suit :

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

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

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

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

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

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

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

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

À ce niveau, une tendance positive est significative lorsque la valeur  $Z > +1.96$ , et une tendance négative est significative lorsque sa valeur  $p < -1.96$  (Finigure et al, 2016).

### 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, 1968). La pente de Sen est donnée par l'expression suivante (Salarijazi et al, 2012):

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

Où  $\beta$  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 %.

## 2.2. Pourcentage de changement :

Le pourcentage de changement a été calculé en l'approximant avec une tendance linéaire. C'est-à-dire que le pourcentage de changement est égal à la pente médiane multipliée par la durée de la période divisée par la moyenne correspondante Yue et Hashino (2003), exprimée par la formule suivante :

$$\text{Percentage change}(\%) = \frac{\beta * \text{lenght year}}{\text{mean}} * 100 \quad (6)$$

## 2.3. Etude de la tendance mensuelle

Nous avons appliqué le test de Kendall sur les données de la pluviométrie mensuelle pour chaque station et chaque mois. Nous Avons calculé le  $S$  de Kendall et la valeur du  $Z$ . Nous avons déterminé les cas où l'hypothèse  $H_0$  peut être rejetée (valeurs de la statistique du test appartient à la région critique). Ces cas dévoilent l'existence de tendance positive ou négative selon le signe du  $S$ . Le Tableau 1 indique le signe de la tendance des stations pour chaque mois.

**Tableau 10.** Valeurs  $Z$  (direction) selon le test de Mann – Kendall pour la période (1970–2011)

N°	Code	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Dec
1	110102	0.74	0.00	-0.10	1.16	0.89	-0.21	1.22	3.71	1.65	1.49	0.81	1.64
2	110201	0.16	0.18	-0.76	-0.01	0.46	-2.36	-0.75	2.44	1.52	2.12	0.74	-0.27
3	110203	-0.43	-0.66	-1.47	-0.46	0.31	-0.29	-1.03	0.75	1.40	1.98	0.38	-0.29
4	110304	-0.87	-0.90	-1.88	-0.62	0.10	-0.83	0.60	0.37	1.14	0.47	0.69	-0.73
5	110305	0.23	-0.55	-2.46	-0.98	0.34	1.06	1.43	0.95	1.32	1.26	1.25	-0.30
6	110309	0.75	-0.29	-2.71	-1.48	-0.57	-0.90	-1.05	0.39	0.63	0.00	1.28	0.69
7	110312	-0.27	-0.74	-2.30	-0.61	0.00	-1.05	0.29	1.75	0.15	0.50	0.28	-0.25
8	110314	-0.50	-1.25	-2.24	-1.22	-0.24	-2.49	-1.90	0.22	1.16	0.00	0.60	-0.39
9	110402	-0.48	-1.38	-1.78	-0.06	-0.20	-1.00	-0.36	1.06	0.52	0.99	2.16	-0.14
10	110501	0.39	-0.87	-1.95	-0.49	0.79	-1.42	0.52	2.71	1.77	2.16	1.25	1.04
11	110802	0.21	0.28	-0.46	1.28	0.97	0.43	2.01	1.56	2.92	2.84	1.79	1.43
12	111102	0.43	-0.01	-1.30	0.11	1.18	-0.59	0.00	1.69	2.93	1.39	1.30	0.79
13	111103	-0.23	0.21	-1.66	0.22	1.55	-0.23	0.28	2.47	2.01	1.51	0.56	-0.20
14	111112	0.35	1.14	-1.82	0.06	0.76	0.12	1.97	3.36	2.22	2.20	1.20	0.62
15	111201	0.09	-0.70	-2.14	-0.13	1.27	-0.49	0.61	2.02	1.27	1.32	1.16	0.33
16	111204	-0.90	-0.09	-1.93	-0.86	0.42	-0.54	0.06	0.95	0.42	0.96	0.51	-0.21
17	111210	-0.14	-0.38	-1.12	-1.15	1.56	-0.34	-1.01	1.69	0.14	1.05	1.35	0.56
18	111217	1.52	1.69	-0.63	0.45	1.23	0.69	-0.59	0.46	2.65	1.46	2.02	1.26
19	111401	0.48	0.60	-1.49	0.13	0.09	-0.20	0.00	2.21	1.87	0.73	2.43	-0.70
20	111402	-0.23	-0.26	-1.00	0.72	0.30	-0.18	0.49	2.93	1.51	1.30	1.60	0.87

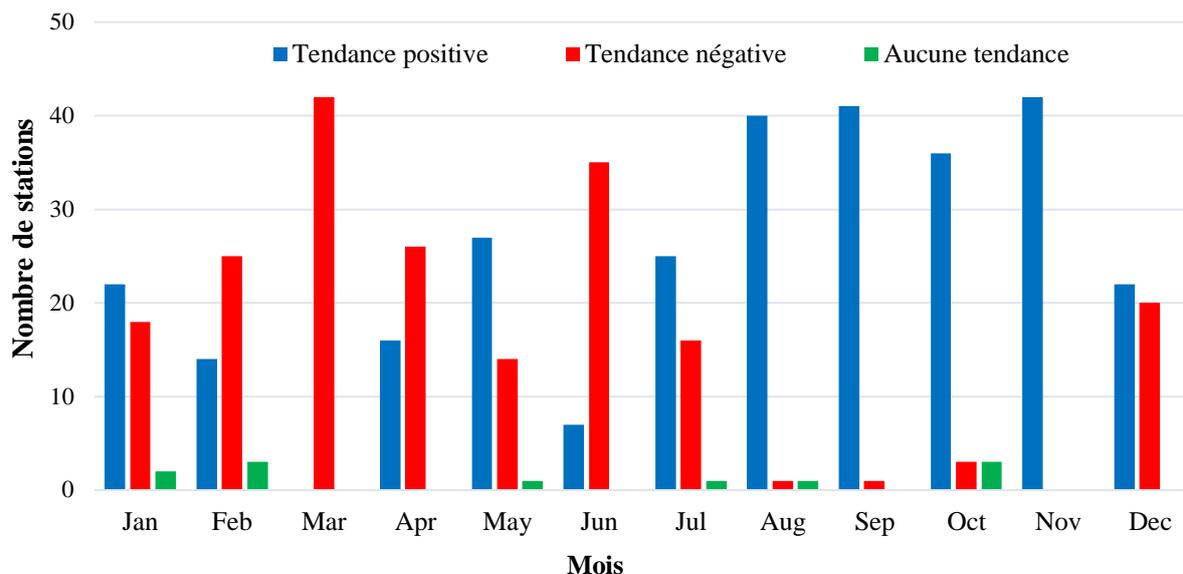
CHAPITRE 3 : \_\_\_\_\_ Etude de la variabilité et de l'évolution de la pluviométrie

21	111405	-0.89	-0.97	-2.96	-0.69	-0.12	-1.12	0.87	1.32	1.25	0.46	1.66	-0.46
22	111413	-0.13	-0.19	-2.03	-0.35	0.15	-1.60	0.08	1.04	0.76	0.87	1.81	0.68
23	111414	-0.89	0.15	-1.70	-0.50	0.04	-0.15	-0.75	2.16	1.43	0.59	1.76	0.28
24	111417	1.55	1.58	-1.22	0.62	0.76	0.44	1.17	1.97	1.84	1.60	2.85	1.78
25	111418	0.00	0.10	-0.92	0.11	0.40	-0.33	-0.35	1.56	1.37	0.66	0.90	-0.61
26	111424	0.00	-0.86	-1.26	0.37	0.08	-1.49	-1.01	0.25	-0.62	0.05	0.29	-0.82
27	111429	0.51	-0.15	-0.92	1.15	0.26	-0.27	0.73	1.50	1.57	1.41	3.19	0.37
28	111502	-0.27	0.04	-2.62	-0.93	-0.15	-1.64	-1.52	0.00	1.61	1.26	1.50	0.96
29	111503	-0.13	-0.80	-2.37	-0.71	-0.64	-0.27	0.82	0.42	0.10	0.17	1.00	0.82
30	111508	-1.03	-0.30	-1.88	-0.26	-1.06	-2.47	-1.77	1.17	0.34	1.26	0.92	-0.40
31	111509	0.70	-0.39	-2.16	-0.72	0.25	0.55	-0.45	0.68	1.59	0.87	2.01	0.01
32	111511	0.03	-0.03	-2.41	-0.10	-0.67	-1.25	0.52	1.74	1.11	0.18	2.37	-0.36
33	111516	0.78	0.05	-1.54	-0.33	0.10	-1.95	0.12	1.37	1.09	0.90	2.03	0.12
34	111604	-1.12	0.00	-2.25	-0.42	-0.55	-1.31	-2.48	-0.94	1.17	-0.16	1.54	0.16
35	111605	0.24	-0.24	-1.67	-0.17	0.00	-0.95	-0.70	0.20	0.24	0.81	2.24	0.78
36	111606	0.20	0.11	-2.27	0.35	-1.76	-1.71	-1.70	0.76	1.32	0.00	1.54	-0.38
37	111607	0.51	0.28	-1.72	-0.93	-0.44	-0.82	0.12	1.78	0.92	-0.46	1.67	0.18
38	111610	1.59	1.73	-0.73	1.40	2.23	1.09	2.91	3.80	2.72	1.30	2.10	1.04
39	111611	-0.25	-0.46	-2.44	-0.28	-0.53	-1.06	0.72	1.33	1.65	-0.10	2.33	-0.46
40	111612	0.14	0.00	-1.34	0.81	0.94	-0.14	0.82	0.52	1.62	0.29	1.90	-1.03
41	111616	0.08	-1.02	-1.31	0.43	-0.87	-3.37	0.12	1.08	2.27	0.44	2.22	-1.20
42	111617	-0.68	-0.83	-2.41	-0.42	-0.39	-1.82	0.39	1.63	1.49	0.53	1.90	-0.76

Les résultats du test de Mann-Kendall des précipitations mensuelles au cours de la période 1970-2011 sont présentés dans le tableau 10. À partir du tableau 10, il a été observé que les précipitations mensuelles de certains mois montraient une tendance à la hausse tandis qu'une tendance à la baisse de certains autres mois. La tendance à la hausse a été observée au cours des mois d'août, septembre, octobre et novembre, tandis que la tendance à la baisse a été observée en mars et juin. La tendance significative a été observée lorsque la valeur statistique Z calculée est supérieure à la valeur Z correspondant au niveau de signification de 5 % ( $Z > |1.96|$ ) et si la valeur statistique Z calculée est inférieure à la valeur Z correspondant au niveau de signification de 5% ( $Z < -1.96$ ), alors il n'y avait pas de tendance significative. En conséquence, une tendance à la baisse significative a été observée en mars pour 15 stations pluviométriques.

Pour obtenir une image plus claire, nous avons compté les stations ayant la même tendance pour chaque mois comme le montre le tableau 11 et la figure 22.

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



**Figure 22 :** Nombre de stations pour chaque type de tendance mensuelle

**Tableau 11 :** Nombre et pourcentage des stations et pour chaque type de tendance mensuelle

	Nombre de stations											
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Tendance positive	22	14	0	16	27	7	25	40	41	36	42	22
Tendance négative	18	25	42	26	14	35	16	1	1	3	0	20
Aucune tendance	2	3	0	0	1	0	1	1	0	3	0	0
	Pourcentages d'occurrence de tendance											
Tendance positive	52	33	0	38	64	17	59	95	98	85	100	52
Tendance négative	43	59	100	62	33	83	38	2	2	7	0	47
Aucune tendance	5	7	0	0	2	0	2	2	0	7	0	0

Le tableau 11 montre clairement la tendance négative du mois de mars (100% des stations). Le mois de juin (83%) présente aussi un bon nombre de stations ayant cette tendance. Cependant, la tendance positive est perceptible au niveau des mois d'aout (95%), septembre (98%) et novembre (100% des stations).

Les mois d'aout, septembre, octobre et novembre sont caractérisés par un régime pluviométrique à la hausse avec un nombre de stations respectif de 40 (95%), 41 (98%), 36 (86%) et 42 (100%).

#### 2.4. Etude de la tendance saisonnière :

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

CHAPITRE 3 : \_\_\_\_\_ Etude de la variabilité et de l'évolution de la pluviométrie

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 significatif de 0.05. Le nombre de stations ayant une tendance particulière est résumé dans le tableau 12 et la Figure 23.

**Tableau 12 :** Valeurs de Z (direction) de Mann-Kendall Z et pourcentage de changement (1970-2011)

N°	Code de station	Automne		Hiver		Printemps		Eté		Annuel	
		Z - value	% change	Z - value	% change	Z - value	% change	Z - value	% change	Z - value	% change
1	110102	<b>2.15</b>	25.43	1.28	12.71	1.02	14.03	<b>2.32</b>	12.01	<b>3.16</b>	84.76
2	110201	<b>1.99</b>	18.27	0.00	-0.06	-0.08	-2.00	-0.27	-0.48	0.55	13.61
3	110203	1.86	16.43	-1.15	-8.50	-0.35	-12.37	0.22	0.52	-0.23	-4.81
4	110304	0.75	5.43	-1.60	-14.70	-1.13	-19.70	0.00	0.00	-1.58	-32.29
5	110305	1.51	16.98	-0.43	-4.53	<b>-2.06</b>	-14.87	0.49	0.51	-0.35	-5.25
6	110309	0.46	5.07	0.74	8.89	-1.11	-24.62	-0.73	-0.87	-1.08	-26.21
7	110312	0.13	1.17	-1.06	-10.29	-1.13	-18.40	0.87	0.00	-1.45	-30.10
8	110314	-0.21	-3.92	-1.34	-14.15	-1.47	-26.50	-1.28	-1.04	<b>-2.35</b>	-51.19
9	110402	1.34	10.27	-0.85	-7.73	-0.60	-18.08	-0.11	-0.05	-1.08	-17.62
10	110501	<b>2.49</b>	21.63	-0.08	-0.61	-0.44	-8.54	0.86	2.54	1.13	15.87
11	110802	<b>3.62</b>	35.24	0.86	8.62	1.17	9.48	1.75	4.67	<b>2.86</b>	61.69
12	111102	1.94	17.46	-0.04	-0.90	-0.52	-5.62	-0.02	0.00	0.65	12.00
13	111103	1.56	15.14	0.28	2.20	-0.08	-8.90	0.73	0.55	0.26	17.55
14	111112	<b>2.80</b>	27.89	0.55	5.44	0.53	-1.66	1.17	1.63	1.47	42.54
15	111201	1.29	13.51	-0.56	-6.30	-0.06	-7.73	0.62	0.75	-0.46	-9.65
16	111204	1.00	9.74	-1.20	-12.93	-1.73	-14.78	0.71	1.71	-0.26	-3.89
17	111210	1.30	9.71	0.05	0.87	-0.63	-4.93	0.27	0.74	0.35	4.17
18	111217	<b>2.55</b>	25.11	1.27	19.71	1.02	7.81	1.08	1.34	1.85	62.25
19	111401	1.57	16.58	0.00	0.00	-0.64	-6.72	1.14	0.64	1.04	20.42
20	111402	<b>2.45</b>	19.52	-0.07	-0.34	-0.40	-4.31	1.67	1.41	0.82	13.07
21	111405	0.91	7.02	-1.06	-12.50	-1.47	-21.09	0.10	0.62	<b>-2.02</b>	-40.22
22	111413	1.70	13.73	0.24	13.78	-1.34	-9.21	-0.55	0.00	-0.48	-7.90
23	111414	1.65	14.05	-0.11	-1.17	-1.19	-10.73	1.05	-2.33	0.39	8.16
24	111417	<b>3.27</b>	23.34	1.93	21.22	0.74	1.05	1.11	1.05	<b>2.47</b>	55.29
25	111418	0.93	7.90	-0.67	-10.34	-0.39	-6.40	0.25	0.00	-0.09	-3.18
26	111424	-0.57	-4.03	-1.60	-19.02	-0.66	-4.49	-0.62	-0.72	-1.58	-32.10
27	111429	<b>2.40</b>	26.82	0.20	3.79	0.13	0.65	1.04	0.85	1.77	38.21
28	111502	1.29	12.31	0.31	3.36	-0.95	-15.96	-0.40	0.00	0.09	1.68
29	111503	0.30	2.01	-0.48	-4.56	-0.89	-24.89	0.29	0.00	-1.47	-32.06
30	111508	0.50	4.92	-1.24	-7.86	-1.18	-24.71	-0.75	-0.99	<b>-2.85</b>	-36.24
31	111509	1.55	14.60	0.30	2.59	-1.11	-20.06	<b>2.24</b>	1.63	-0.23	-5.84
32	111511	1.56	12.12	-0.62	-6.60	-0.91	-21.64	0.22	0.00	-0.81	-19.07
33	111516	1.61	15.96	0.03	0.17	-0.73	-17.12	-0.36	-0.09	0.65	11.15

CHAPITRE 3 : \_\_\_\_\_ Etude de la variabilité et de l'évolution de la pluviométrie

34	111604	1.17	10.86	-0.27	-2.61	<b>-2.44</b>	-23.37	-0.75	0.00	-0.66	-11.81
35	111605	1.51	-12.81	0.82	-5.01	-1.79	-23.61	-0.30	0.00	-0.54	-10.12
36	111606	0.81	6.00	0.03	0.24	-1.52	-23.37	-1.19	-0.85	-1.46	-27.10
37	111607	0.79	6.12	0.00	-0.60	-1.83	-23.06	0.03	0.00	-1.02	-23.45
38	111610	<b>2.43</b>	28.92	1.82	24.99	1.27	11.99	<b>2.71</b>	2.99	<b>2.21</b>	74.42
39	111611	1.17	10.56	-0.48	-4.96	-0.35	-21.37	-0.36	-0.53	-0.91	-14.20
40	111612	1.11	10.88	0.17	1.04	0.04	0.75	0.67	0.00	-0.33	-4.77
41	111616	1.84	16.03	-0.56	-9.00	-0.35	-9.25	-1.72	-0.38	-0.07	-6.31
42	111617	1.42	13.62	-1.21	-11.60	-1.76	-14.72	-0.72	0.00	-1.52	-24.27

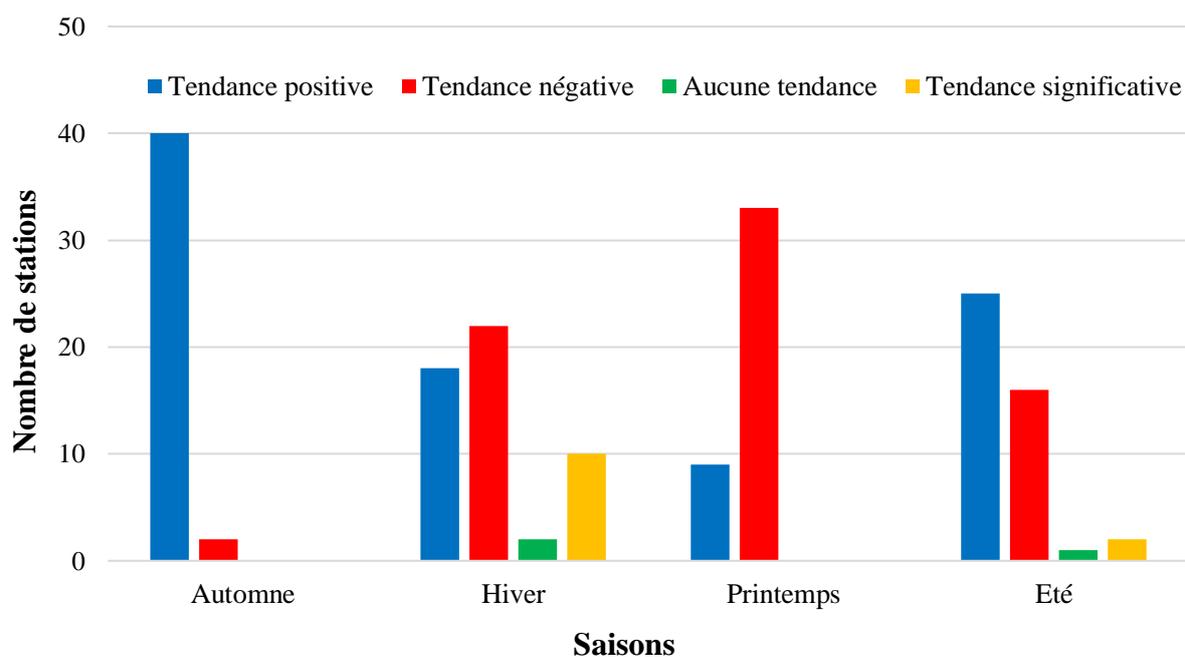
**Explications :** les valeurs de **Z** en **gras** indiquent une **tendance significative**.

**Tableau 13 :** Nombre et pourcentage des stations pour chaque type de tendance saisonnière

Nombre de stations					
	Automne	Hiver	Printemps	Eté	Annuel
<b>Tendance positive</b>	40	18	9	25	17
<b>Tendance négative</b>	2	22	33	16	25
<b>Tendance significative</b>	10	0	2	3	7
<b>Aucune tendance</b>	0	2	0	1	0

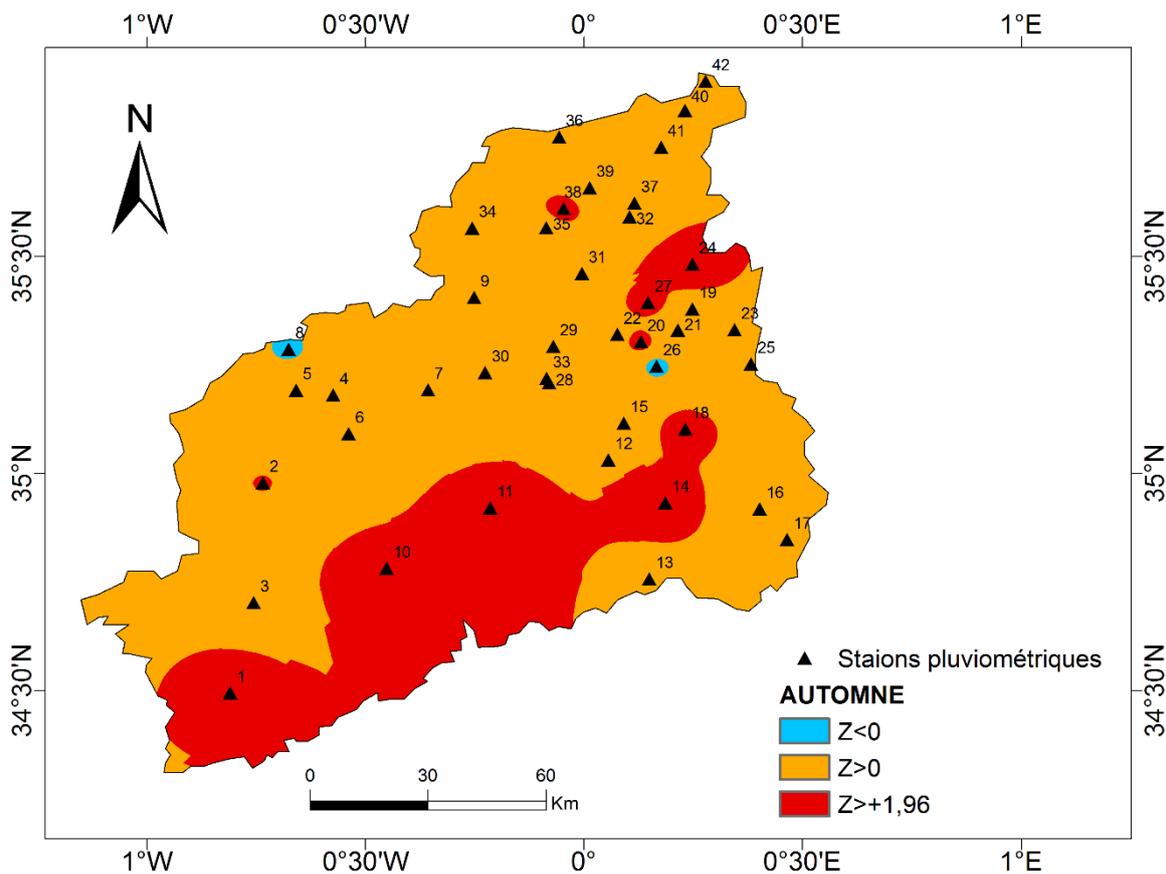
Pourcentages d'occurrence de tendance					
	Automne	Hiver	Printemps	Eté	Annuel
<b>Tendance positive</b>	95.24	42.86	21.43	59.52	40.48
<b>Tendance négative</b>	4.76	52.38	78.57	38.10	59.52
<b>Tendance significative</b>	23.81	0.00	4.76	7.14	16.67
<b>Aucune tendance</b>	0.00	4.76	0.00	2.38	0.00



**Figure 23 :** Nombre de stations pour chaque type de tendance saisonnière

D'après nos résultats, nous pouvons distinguer un nombre élevé de stations ayant une augmentation de la pluviométrie durant la saison de l'automne (40 stations soit 95%) et l'été (25 stations soit 59%). La saison printanière et hivernale attire l'attention avec respectivement 33 stations (79%) et 22 stations (52%) ayant une diminution de leurs pluviométries. Il y avait une tendance significative dans les saisons d'automne, de printemps et d'été car la valeur statistique Z calculée est supérieure à la valeur Z correspondant au niveau de signification de 5% (1.96) et aucune tendance significative n'a été observée pendant la saison d'hiver. Dans un contexte d'une analyse spatiale, nous avons élaboré des cartes qui affichent les tendances des stations avec leurs positions géographiques (Figure 24, 25, 26 et 27).

✚ Saison automnale :



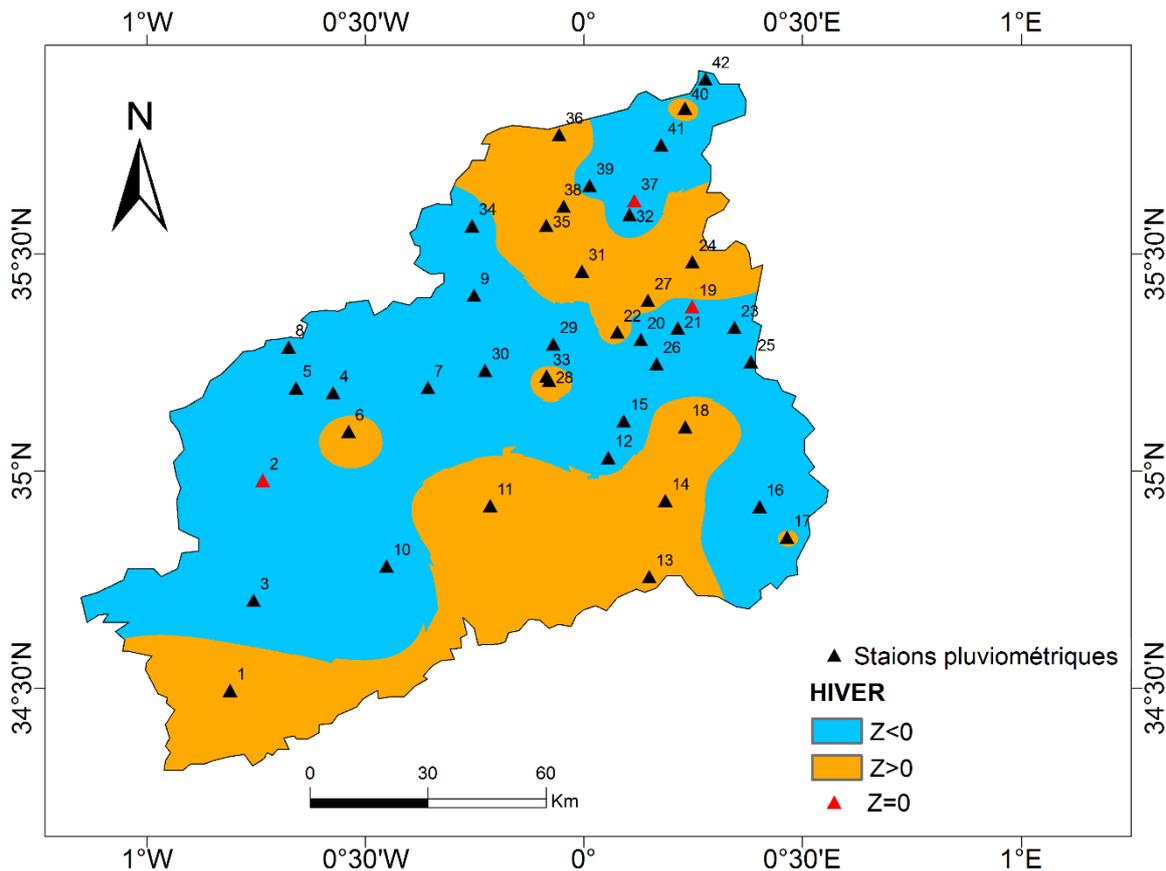
**Figure 24 :** Carte des tendances de la pluviométrie de la saison de l'automne

La série de précipitations d'automne a montré une tendance à la hausse dans la zone d'étude pour la majorité des stations 40 sur 42 (95%) et une tendance à la baisse dans les deux stations restantes (Figure 24). Au total, 10 stations ayant une tendance positive se sont révélées avoir une tendance significative (niveau de confiance de 95%) et aucune n'était significative pour une tendance négative. Contrairement au printemps, la saison d'automne présente une tendance à la hausse des précipitations. Des tendances positives significatives se trouvent principalement au sud-est de la Macta. L'ampleur de la tendance varie entre -0,28 et 1,93

### CHAPITRE 3 : \_\_\_\_\_ Etude de la variabilité et de l'évolution de la pluviométrie

mm/saison par an. En général, on peut conclure que la saison d'automne a connu une augmentation des précipitations durant les 42 ans. Ces résultats sont conformes à ceux obtenus par d'autres études dans le nord-ouest de l'Algérie (Benali et al.2019).

#### ✚ Saison hivernale :

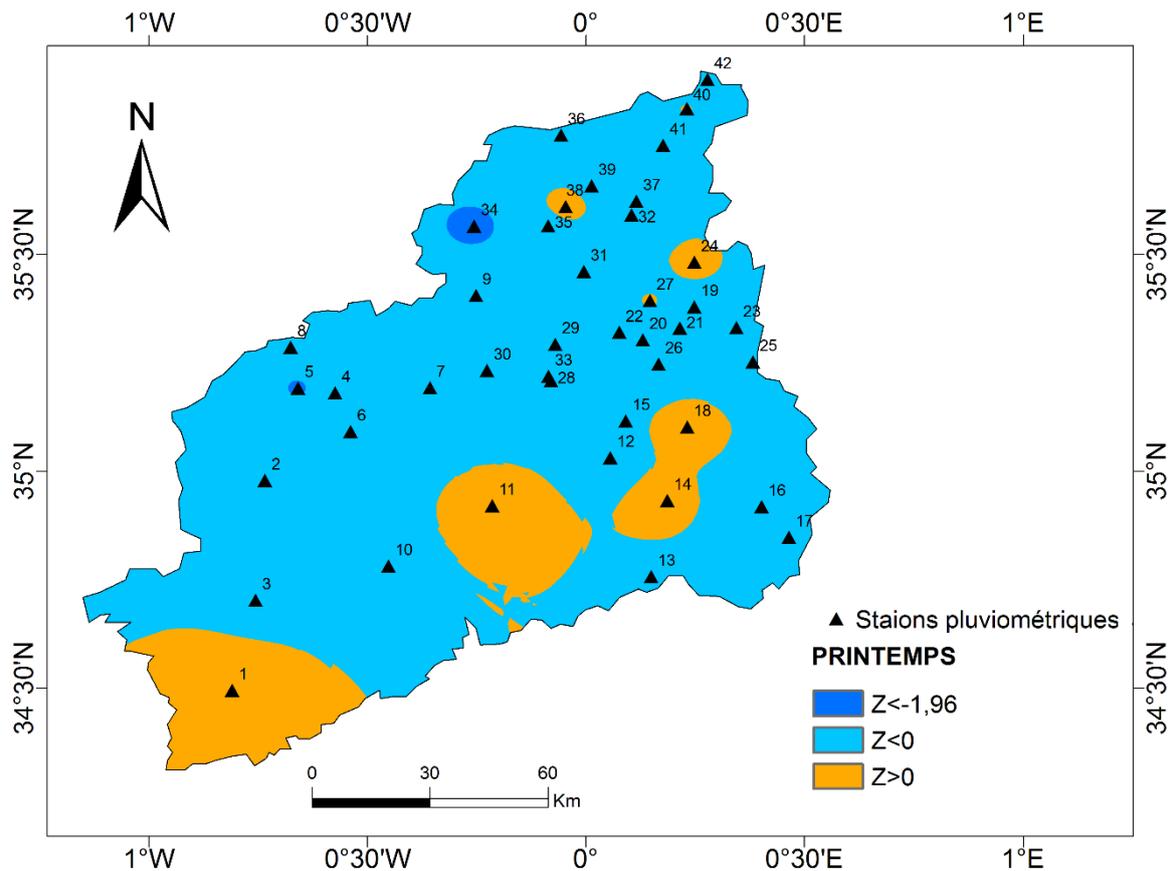


**Figure 25 :** Carte des tendances de la pluviométrie de la saison de l'hiver

Le test MK a révélé des tendances négatives dans la moitié des stations (22 sur 42 stations, soit 52 %) par rapport aux tendances positives (Figure 25). Toutefois, aucun changement significatif n'a été constaté dans les séries chronologiques de précipitations hivernales sur la période 1970-2011. L'ampleur de la tendance variait entre -1,25 et 1,66 mm/saison par an. En général, il a été constaté que la saison hivernale a connu une tendance à la baisse des précipitations de 22 postes pluviométriques localisées au Centre-Nord du bassin de la Macta.

#### ✚ Saison printanière :

Le test MK a révélé un très grand nombre de stations avec des tendances négatives (33 sur 42 stations, 79% ; Figure. 26). Seules 2 stations ont une tendance négative significative. Contrairement à l'automne, le bassin présente au printemps une tendance à la baisse des précipitations. La plupart des stations ont des tendances négatives dans le nord du bassin. L'ampleur de la tendance des précipitations printanières variait entre -1,43 et 0,8 mm / saison par an.



**Figure 26 :** Carte des tendances de la pluviométrie de la saison du printemps

**⊕ Saison estivale :**

Les tendances des précipitations estivales montrent une nature opposée par rapport à celle de l'hiver. Dans ce cas, 25 (60%) stations et 16 (38%) stations présentent respectivement des tendances positives et négatives (Figure 27). Seules 3 stations présentent des tendances positives significatives et aucune ne présente de tendances négatives significatives (Figure 27). Les tendances positives significatives se retrouvent principalement dans les parties nord et sud du bassin. Tout comme l'automne, l'ampleur de la tendance des précipitations estivales variait également entre -0,1 et 0,2 mm / saison par an. En général, on peut dire que la saison estivale a connu une légère augmentation des précipitations pendant les 42 ans.

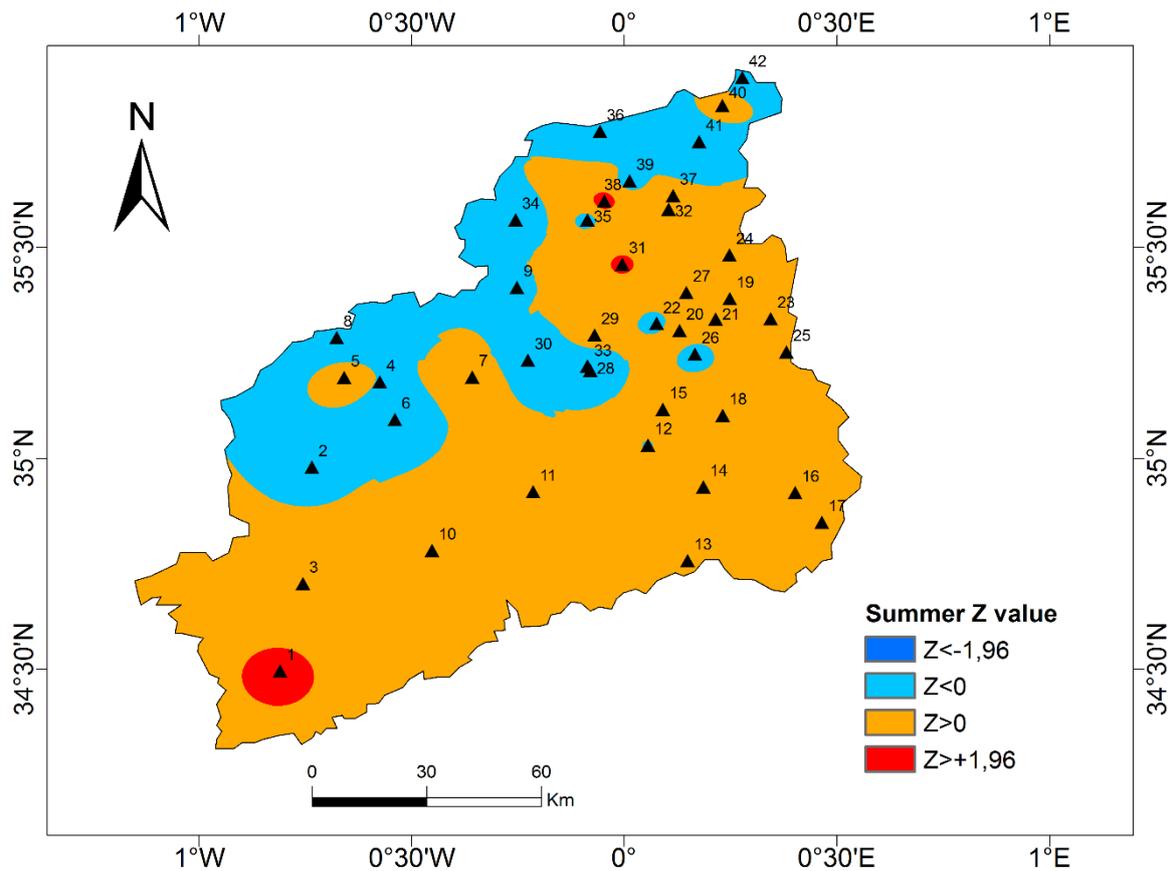
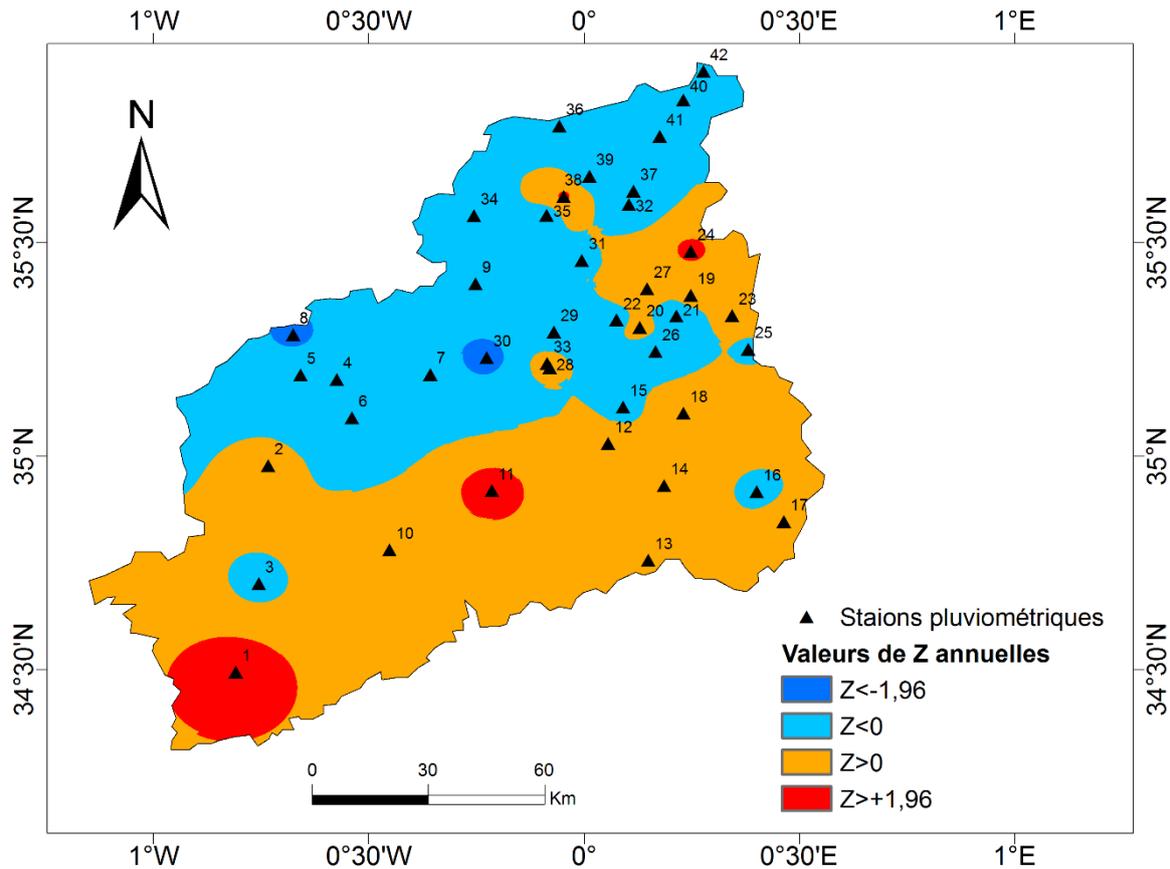


Figure 27 : Carte des tendances de la pluviométrie de la saison de l'été

## 2.5. Etude de la tendance annuelle

L'analyse de la série chronologique des précipitations annuelles à l'aide du test MK a révélé qu'environ la moitié des stations présentant une tendance positive (17 sur 42, soit 40 %) et vingt-cinq stations (60 %) connaissent une tendance négative (Figure 28). Le niveau de signification de la valeur Z a identifié 7 stations ayant une tendance significative (4 stations avec une tendance positive et 3 stations avec une tendance négative) (Figure 28). Les tendances positives significatives se trouvent principalement dans la partie sud du bassin, tandis que les tendances négatives significatives se trouvent dans la partie Centre-Nord du de la zone d'étude.

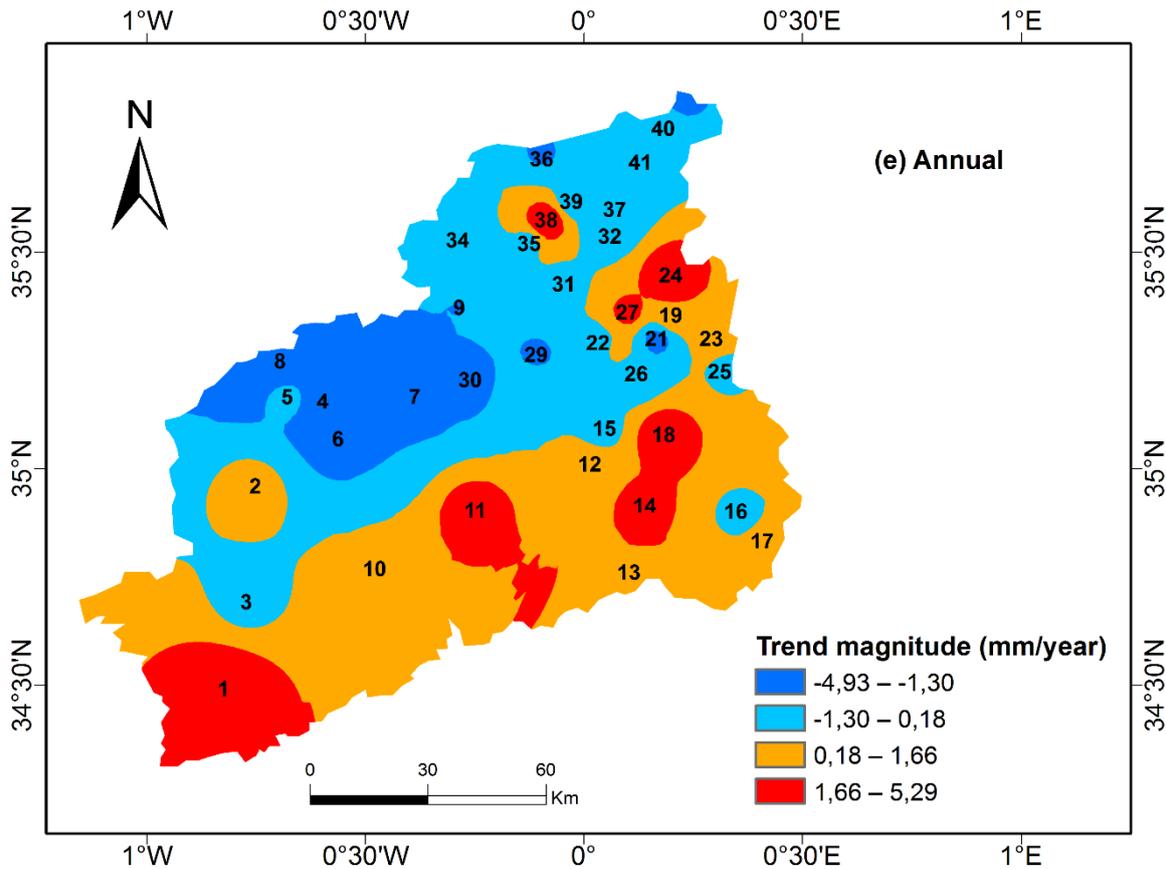


**Figure 28 :** Carte de la tendance annuelle des stations étudiées

## 2.6. Estimation de l'ampleur du changement :

La figure 29 montre également l'ampleur (Pente de Sen) de la tendance des précipitations annuelles (mm/an) ; on observe des pentes positives et négatives (tendances) douces dans tout le bassin. Plus précisément, la partie centre-nord du bassin présente des pentes négatives élevées et la partie sud présente des pentes positives élevées. L'ampleur de la tendance varie entre -4,92 mm par an et 4 mm par an.

La station de Ras El Ma a montré l'augmentation maximale du pourcentage de variation des précipitations annuelles (85%) sur la période de 42 ans. En terme saisonnière, les saisons d'été et d'automne ont une tendance à la hausse tandis que les saisons d'hiver et de printemps ont une tendance à la baisse. La diminution de la variation en pourcentage a varié entre 1,66% (station de Hammam rabi) et 26,50% (station d'Ain trid) au printemps.



**Figure 29 :** Carte de l'ampleur de la tendance des précipitations annuelles

## 2.7. Conclusion :

Nous avons étudié les tendances de la pluviométrie mensuelle, saisonnière et annuelle en utilisant le test de Kendall. 42 stations ont été retenues situées dans le bassin versant de la Macta. Concernant la tendance mensuelle le mois de mars est celui le plus touché par la diminution de la pluviométrie (42 stations, soit 100%). Le mois de juin présente aussi un bon nombre de stations ayant cette tendance (35 stations, soit 83%). A l'opposé, Les mois d'août, septembre, octobre et novembre sont caractérisés par un régime pluviométrique à la hausse avec un nombre de stations respectif de 40 (95%), 41 (98%), 36 (86%) et 42 (100%).

L'étude des tendances de la pluviométrie saisonnière par le test de Kendall a contribué à déterminer le sens de la variabilité. La saison du printemps montre une décroissance de la pluviométrie dans 33 stations (soit 78%) situées essentiellement dans la partie Centre-Nord du bassin de la Macta. La partie Nord-Ouest semble être épargnée par cette tendance. Cependant, la saison de l'automne affiche une augmentation de la pluviométrie dans 40 stations (95%).

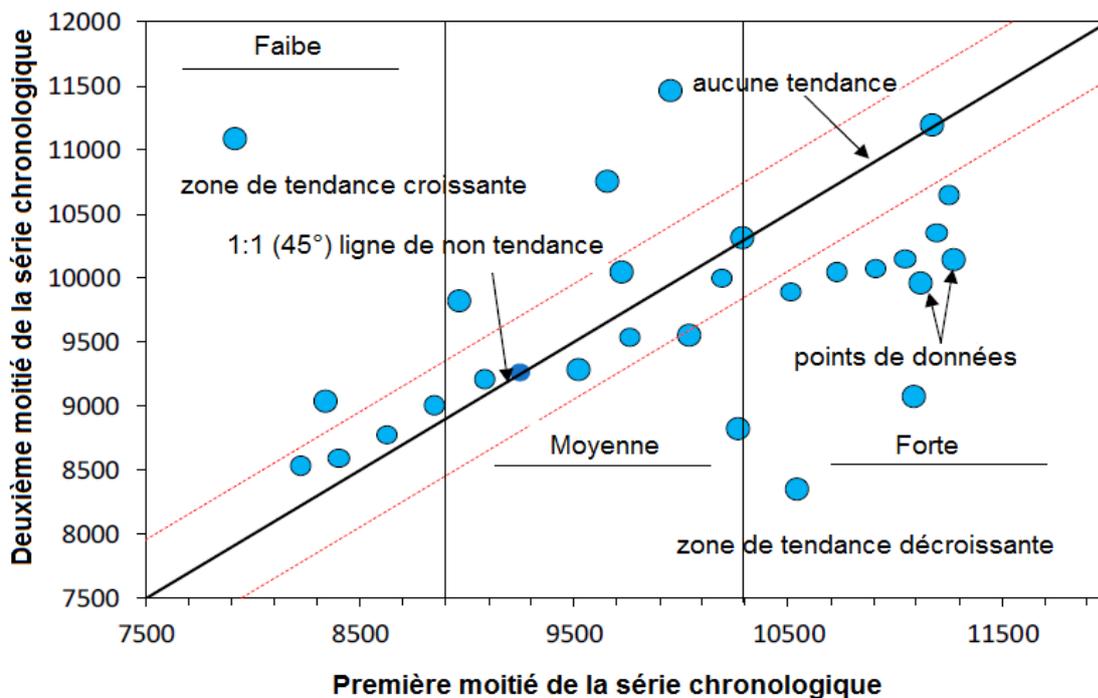
La tendance annuelle décroissante est installée essentiellement dans la zone Centre-Nord. Elle touche 25 stations, soit un pourcentage de 59%.

### 3. ETUDE DES TENDANCES PAR L'ANALYSE INNOVANTE DE LA TENDANCE DE LA PLUVIOMETRIE :

Après avoir utilisé le test de Mann-Kendall, la valeur de  $Z$  et la pente de Sen ( $\beta$ ), nous utilisons dans cette partie une nouvelle méthodologie. Cette procédure est appelée analyse innovante de la tendance « *Innovative Trend Analysis (ITA)* ». Cette dernière qui est simple et efficace, est suggérée par Şen (2012). Cette méthode permet de calculer la pente de l'évolution de la moyenne arithmétique de la différence entre la deuxième et la première moitié de la série. L'objectif principal est d'identifier la tendance de 42 séries de précipitations mensuelles dans le bassin versant Macta.

#### 3.1. Principe de la méthode :

L'approche utilisée divise la série de données en deux parties. Les enregistrements dans chaque moitié sont classés par ordre croissant et sont ensuite représentés sur un graphique à deux axes.



**Figure 30:** Modèle de la méthode innovante d'analyse de tendance (ITA) montre le zone de tendance à la hausse et à la baisse.

La logique est simple. Si ces deux parties ont le même ordre et la même amplitude de séquences de données, leurs points de dispersion seront autour de la ligne 1:1 (45°), qui représente une absence de tendance significative. Par contre tout point au-dessus (au-dessous) de cette ligne implique l'existence d'une tendance vers l'augmentation (diminution) comme le montre la figure 30.

Le modèle de la Figure 30 a toutes les alternatives possibles qui peuvent être obtenus comme types de tendance. La zone triangulaire supérieure (au-dessus de la ligne 1:1) est le domaine de la tendance croissante. Si tous les points de dispersion se trouvent dans cette zone, alors la série temporelle a une composante croissante. Au contraire, si les points de dispersion se

situent dans la région triangulaire inférieure, une composante de tendance à la baisse existe dans la structure de la série chronologique. Cependant, la proximité des points de dispersion autour de la ligne droite 1:1 implique l'absence d'une tendance significative. Il est possible d'afficher le modèle de tendance innovant en trois parties : "faible", "moyenne" et "haute" comme le montre la Figure 30. La sélection quantitative des limites de groupe diffère d'un endroit à un autre (Elouissi et al., 2016).

### 3.2. Résultats et discussion

L'application de l'analyse des tendances innovantes est utilisée pour 42 stations météorologiques dispersées à différents endroits du bassin versant la Macta d'une manière représentative. Les résultats de calculs des tendances et des pentes sont présentés sur la Figure 31 et le Tableau 12. Ces derniers comprennent les moyennes arithmétiques ( $y_1$  et  $y_2$ ) des deux moitiés (1970-1990 et 1991-2011), les écarts types ( $s_1$  et  $s_2$ ), les pentes de la tendance ( $P$ ) et les interprétations.

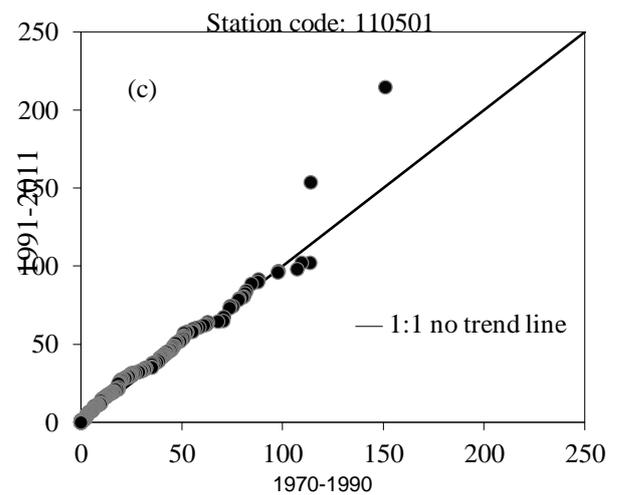
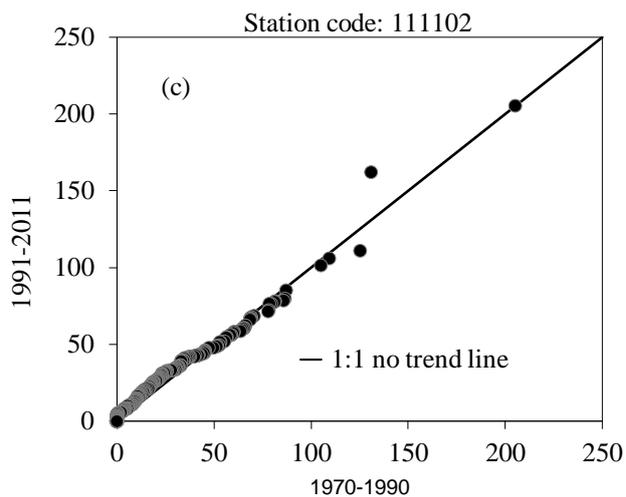
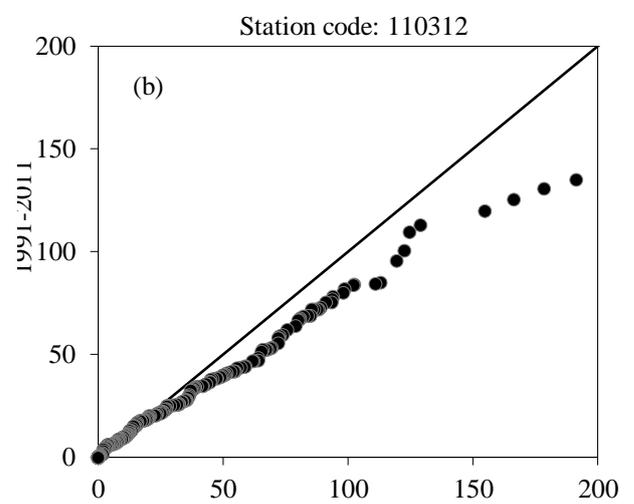
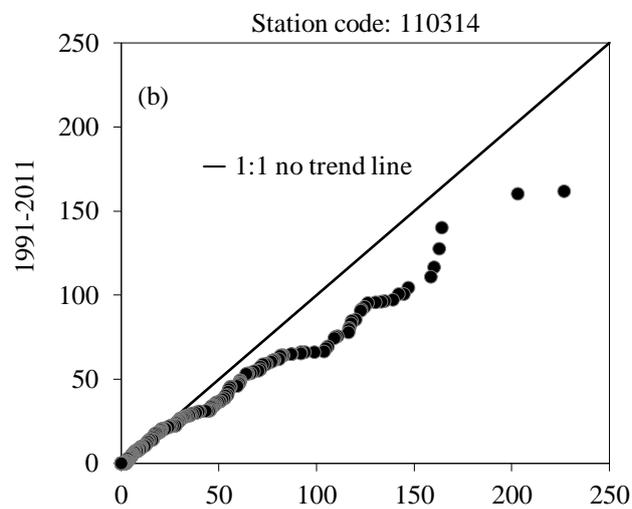
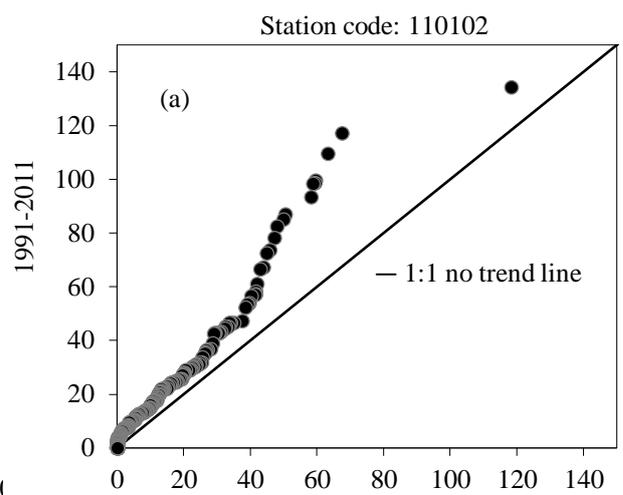
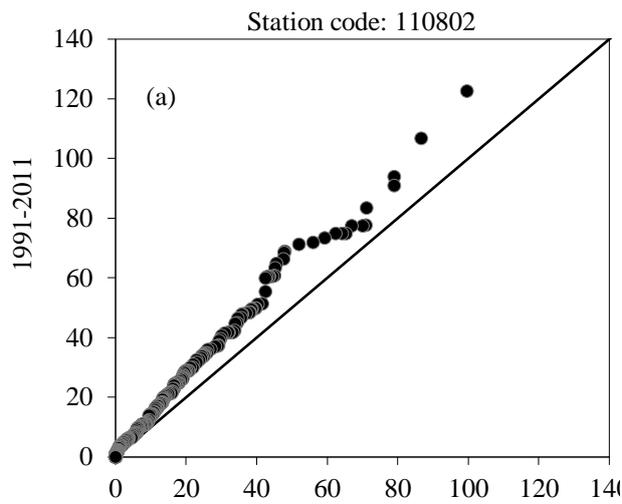
La pente de la tendance est calculée selon l'expression suivante (Şen, 2014) :

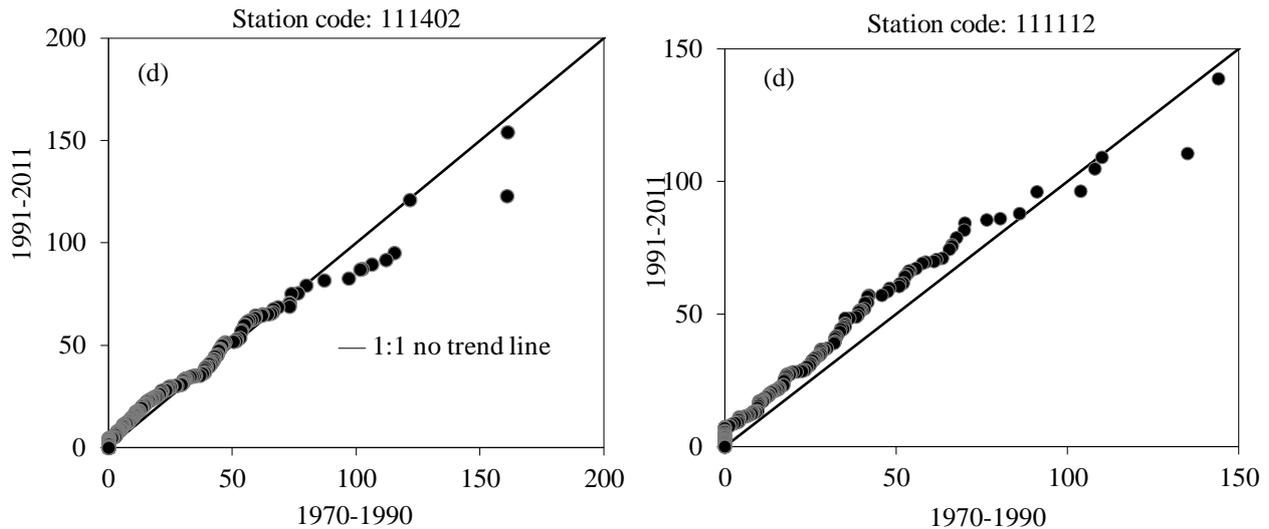
$$P = \frac{2(\bar{y}_2 - \bar{y}_1)}{n}$$

Où  $n$  est le nombre de données,  $n = 12 \times 42 = 504$  mois.

Le modèle innovant offre des possibilités d'interprétation linguistiques pour la tendance des valeurs "faibles", "moyennes" et "élevées". La plus grande plage de valeurs de données est divisée en trois parties égales. La position des points de dispersion des données au-dessus ou au-dessous de la ligne de non tendance 1:1 permet de déterminer si la tendance est croissante, décroissante ou absente dans chacune des trois parties. En prenant ces points en considération, les interprétations nécessaires sont donnés dans la dernière colonne du tableau 14, où **o** implique aucune tendance significative, + (-) montre une augmentation (diminution) significative, ++ (-- ) indique une augmentation (diminution) de manière plus significative que la partie précédente. Enfin +++ (---) implique une très importante augmentation (diminution) par rapport aux deux parties précédentes.

En général, il existe quatre types de modèles distinctifs de tendances innovantes (Figure 31a,b,c et d). De ce fait on peut trouver une tendance générale à la hausse, une tendance générale à la baisse, une tendance à la hausse dans les grandes valeurs et une tendance à la baisse dans les petites valeurs de la pluviométrie. Ces modèles sont également utiles pour les interprétations de caractéristiques de variabilité comme expliqué en détail par Şen (2014). La variabilité est liée à la position du barycentre des deux écarts type. Si le barycentre de l'écart type est au-dessous (au-dessus) de la ligne de non tendance (ligne 1:1), alors il y a une diminution (augmentation) de la variabilité au sein de la série d'enregistrements.





**Figure 31 :** Résultats de la méthode ITA pour les précipitations annuelles : (a) Tendence généralement à la hausse, (b) Tendence généralement à la baisse, (c) Tendence à la hausse aux valeurs de précipitations élevées, (d) Tendence à la baisse aux valeurs de précipitations élevées

La Figure 31 (b et d) présente les stations ayant une tendance décroissante. La majorité des points de dispersion se trouvent au-dessus de la ligne 1:1. Certaines stations affichent des décroissances au niveau des précipitations moyennes et élevées, alors que d'autres ont une décroissance au niveau des pluies élevées seulement. On peut aussi rencontrer des décroissances au niveau des précipitations moyennes alors que les précipitations élevées sont en croissance.

Certaines stations ont des tendances croissantes comme le montre la Figure 31.a La majorité d'entre elles présentent des augmentations au niveau des précipitations moyennes et élevées. La station 111610 affiche des accroissements des quantités enregistrées dans toutes les catégories de la pluviométrie (faibles, moyennes et fortes).

Le Tableau 14 contient les paramètres de l'analyse innovante de la tendance. Certaines stations ont des tendances décroissantes et croissantes dans les trois parties de la pluviométrie (faible, moyenne et forte). Alors que d'autre ont des tendances différentes dans leurs parties. L'analyse du Tableau 14 et des figures de tendances (Figure 31 a,b,c et d) permet de déterminer les stations ayant une tendance croissantes (14 stations) et décroissantes (28 stations).

Sur la Figure 31.a la majorité des points de dispersion se trouvent au-dessus de la ligne droite 1:1, et donc, il y a une tendance générale à la hausse. Dans ces graphiques, la moyenne arithmétique et le barycentre des écarts-type se situent au-dessus de la ligne de non tendance, ce qui indique une croissance de la moyenne et aussi de l'écart-type. Il est évident qu'au niveau des fortes valeurs des précipitations, la tendance est plus efficace, car les points sont plus loin de la ligne 1:1. Ce cas est valable pour les stations 110102 et 110802 qui sont dans la partie moyenne du bassin versant de la Macta, où le climat continental est efficace. Certaines stations ont une baisse au niveau des précipitations faibles et moyennes, mais la tendance est

CHAPITRE 3 : \_\_\_\_\_ Etude de la variabilité et de l'évolution de la pluviométrie

accrue à grandes valeurs. Ce point peut être l'information préliminaire sur l'augmentation de la fréquence des crues de ces stations à l'avenir.

**Tableau 14** : résultats des paramètres de l'analyse de tendance innovante

N°	Code de Station	1970–1990		1991–2011		Tendance	Interprétation		
		M <sub>1</sub> (mm)	S <sub>1</sub> (mm)	M <sub>2</sub> (mm)	S <sub>2</sub> (mm)	P (-)	Faible	Moyenne	Forte
1	110102	12.96	16.29	20.08	23.38	0.0282	+	++	++
2	110201	27.78	30.72	30.95	34.16	0.0125	o	+	++
3	110203	24.87	27.83	26.05	27.97	0.0046	o	-	-
4	110304	32.54	38.02	27.16	29.41	-0.0213	-	--	--
5	110305	27.88	31.87	26.91	28.32	-0.0039	o	-	-
6	110309	28.04	32.34	26.6	30.87	-0.0057	o	-	-
7	110312	29.73	36.39	24.68	28.5	-0.0224	-	--	---
8	110314	38.11	43.6	29.28	31.85	-0.0351	-	--	--
9	110402	27.16	33.47	25.78	28.91	-0.0054	o	o	+
10	110501	25.38	26.88	28.16	28.4	0.0111	o	-	+
11	110802	16.35	18.68	22.04	23.17	0.0226	+	++	++
12	111102	22.36	28.03	24.88	27.15	0.0099	o	o	+
13	111103	26.65	31.42	30.52	31.08	0.0153	o	o	-
14	111112	19.78	24.53	25.41	25.77	0.0223	+	+	-
15	111201	23.62	30.13	23.18	23.43	-0.0017	o	o	+
16	111204	31.69	33.59	28.06	29.01	-0.0144	o	-	+
17	111210	26.37	27.59	27.9	32.16	0.0061	o	o	+
18	111217	21.68	27.64	30.39	33.7	0.0345	+	+	++
19	111401	24.93	30.01	25.18	26.89	0.0009	o	-	-
20	111402	22.8	28.35	24.94	25.95	0.0085	+	o	-
21	111405	26.6	27.92	22.28	23.19	-0.0171	o	-	--
22	111413	28.79	32.18	28.42	29.67	-0.0015	o	o	-
23	111414	29.17	29.75	30.92	32.51	0.0069	o	-	-
24	111417	28.55	33.65	38.42	41.14	0.0391	+	++	++
25	111418	38.51	42.88	39.59	43.5	0.0042	o	o	+
26	111424	27.85	33.35	22.07	23.05	-0.0229	o	-	--
27	111429	26.27	31.32	30.01	32.44	0.0148	o	+	+
28	111502	20.83	23.28	20.84	21.77	0.0001	o	-	-
29	111503	21.49	27.05	20.03	22.31	-0.0057	-	--	---
30	111508	24.64	28.27	21.13	22.74	-0.0139	-	--	---
31	111509	27.24	34.48	25.49	23.34	-0.0069	o	-	--
32	111511	27.26	32.98	24.28	27.28	-0.0118	-	--	---
33	111516	19.33	25.4	18.71	20.08	-0.0025	o	-	--
34	111604	22.05	27.44	20.93	25.54	-0.0044	o	-	--
35	111605	21.49	27.05	20.03	22.31	-0.0057	-	--	---
36	111606	23.4	30.68	20.33	23.62	-0.0121	-	--	---
37	111607	24.65	30.31	21.12	23.94	-0.0141	o	-	--
38	111610	18.43	26.36	28.25	32.59	0.0389	+	++	++
39	111611	25.72	30.46	24.13	25.48	-0.0063	o	-	--
40	111612	26.64	35.08	26.5	30.32	-0.0005	o	-	--

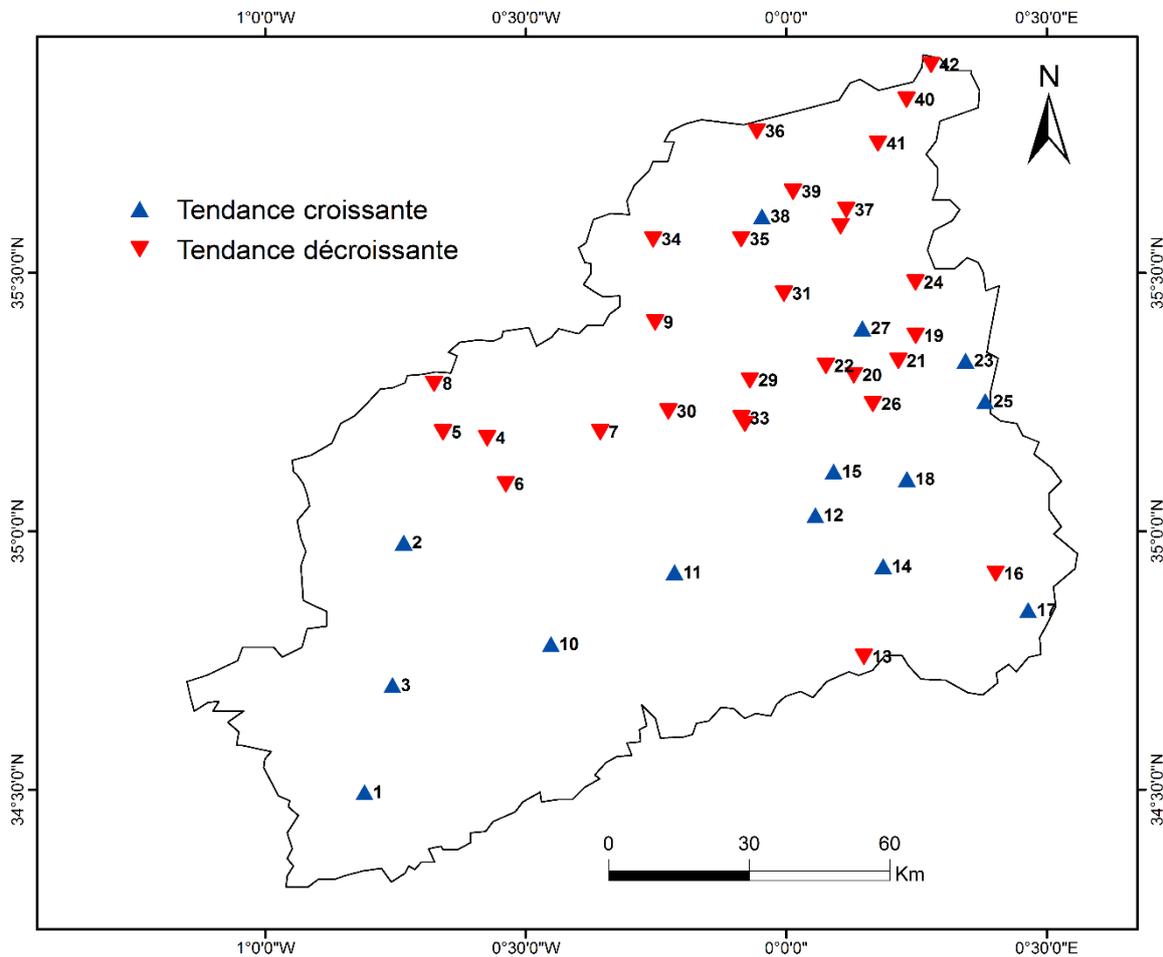
CHAPITRE 3 : \_\_\_\_\_ Etude de la variabilité et de l'évolution de la pluviométrie

41	111616	24.77	32.33	22.97	26.91	-0.0071	o	-	--
42	111617	28.58	35.01	25.08	29.04	-0.0139	o	-	--

Plus de la moitié (67%) des stations ont une composante tendancielle décroissante (Figure 31 b et d). Les points de dispersion de ces graphiques se trouvent, majoritairement, sous la ligne de non tendance 1:1. On peut en déduire que, dans chacune de ces stations, la tendance de la pluviométrie est à la baisse.

Il faut souligner la spécificité des stations 111204 et 111604, qui ont une baisse de la pluviométrie au niveau des valeurs moyennes mais une légère hausse pour les fortes valeurs. La plus part des stations ont une décroissance au niveau des plus grandes hauteurs de la pluviométrie alors que leurs hauteurs moyennes et faibles sont sur ou sous la ligne de non tendance.

Pour de plus amples interprétations, les tendances des cas croissants et décroissants sont indiquées respectivement par les symboles ▲ et ▼ sur la carte de la Figure 32.



**Figure 32 :** Répartition spatiale de la tendance de la pluviométrie mensuelle

Après l'insertion des symboles de la tendance croissante et décroissante sur la carte de la Figure 32, il est clair que la partie nord, près de la zone côtière de la mer Méditerranée dans le bassin de la Macta, est sous un régime à la baisse. Alors que dans le sud, les tendances sont en augmentation. La principale raison, à notre avis, est que l'impact du changement climatique

est apparemment moins dur dans les zones de haute altitude. Pour information, neuf des 12 stations de la tendance croissante ont une altitude supérieure à 600m (alors que 13 parmi 42 stations ont une altitude  $> 600\text{m}$ ). D'autre part, d'un point de vue météorologique, la partie nord du bassin versant de la Macta est subjective au climat méditerranéen, qui est marqué par une réduction de la pluviométrie de 20 à 30% (Meddi et al, 2002). Au sud, une tendance continentale continue, entraînant une aridité marquée, des hivers froids, et en particulier des étés chauds (Meddi et al., 2009).

### **3.3. Conclusion :**

Dans l'analyse innovante des tendances, chaque série de la pluviométrie mensuelle est divisée en deux parties égales (deux périodes), puis les valeurs ordonnées sont représentées les unes contre les autres sur un système de coordonnées cartésien, de telle sorte que la première demi-série se trouve sur l'axe des abscisses. Sur ce modèle, les points de dispersion indiquent la nature de la tendance. Si les points sont au-dessus (au-dessous) de la ligne droite 1:1 ( $45^\circ$ ) alors une tendance à la hausse (baisse) est cachée dans la série originale des données. Ce concept est appliqué à des relevés mensuels de précipitations de 42 stations météorologiques sur une période allant de 1970 à 2011 du bassin versant de la Macta. Le modèle de tendance est présenté pour chaque station en indiquant les paramètres calculés (pente de la tendance, moyennes arithmétiques et écarts-type). Non seulement les tendances, mais aussi les variabilités au sein de chaque station météorologique sont mesurées et les résultats sont présentés dans différentes figures. Le modèle fournit également des tendances détaillées au niveau des valeurs des précipitations mensuelles faibles, moyennes et élevées. On remarque aussi la formation d'une région de baisse de la pluviométrie dans la partie Nord, près de la zone côtière de la mer Méditerranée, du bassin de la Macta. Alors qu'au Sud, une autre région d'augmentation des précipitations est formée.

***CHAPITRE 4 :***  
***Caractérisation des séquences de***  
***sécheresse météorologique***

## 1. INTRODUCTION :

La connaissance du cycle climatique à travers l'étude des précipitations et la détermination des indices indiquant la sécheresse ont l'importance primordiale des ressources en eau, de gestion agricole, et de toutes autres activités touchées par la sécheresse.

La sécheresse est l'un des phénomènes extrêmes qui ont marqué les populations à travers des générations. Dépourvue d'une définition universelle, la sécheresse peut être définie comme étant un déficit de disponibilité en eau par rapport à une situation considérée comme normale pour une période et une région déterminée.

On distingue quatre grands types de sécheresse : météorologique, agricole, hydrologique et socioéconomique. Ces types de sécheresse peuvent ne pas se manifester simultanément, mais la sécheresse météorologique reste l'élément moteur des autres. Elle se caractérise par une réduction ou une mauvaise répartition, voire une absence des pluies dans une région donnée pendant une période de temps [92].

## 2. CARACTERISATION DE LA SECHERESSE METEOROLOGIQUE

### 2.1. Indice standardisé de précipitations SPI :

L'indice Standardisé des Précipitations (Standardized Precipitation Index (SPI)) [93, 94] est un indice à la fois puissant, souple d'utilisation et simple à calculer. Les données sur les précipitations constituent en fait le seul paramètre requis. En outre, l'indice SPI se révèle tout aussi efficace pour analyser les périodes ou cycles humides que les périodes ou cycles secs.

Il est exprimé mathématiquement comme suit :

$$SPI = (P_i - P_m) / S$$

Où :

SPI = Indice standardisé de précipitation ;

$P_i$  = Pluie de l'année  $i$  ;

$P_m$  = Pluie moyenne de la série sur l'échelle temporelle considérée ;

$S$  = Ecart-type de la série sur l'échelle temporelle considérée.

Etudier cet indice permet également de distinguer les années sèches des années humides ou les années déficitaires des années excédentaires. Une sécheresse sévit lorsque le SPI est consécutivement négatif et que sa valeur atteint une intensité de -1 ou moins et se termine lorsque le SPI devient positif. On effectue une classification de la sécheresse suivant les valeurs du SPI (Tableau 15).

**Tableau 15 :** 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

<b>0 à - 0,99</b>	Sécheresse légère
<b>-1,0 à - 1,49</b>	Sécheresse modérée
<b>-1,5 à - 1,99</b>	Sécheresse forte
<b>≤ -2,0</b>	Sécheresse extrême

Il est possible de résumer les avantages et les inconvénients que présente l'indice SPI comme suit :

➤ **Avantages de méthode SPI :**

- L'indice SPI offre une bonne souplesse d'utilisation : il est possible de le calculer pour de multiples échelles de temps.
- Quand il porte sur un laps de temps relativement court, entre 1 et 3 mois par exemple, l'indice SPI permet de détecter rapidement les situations de sécheresse et d'en évaluer la gravité.
- L'indice SPI présente une bonne cohérence spatiale, ce qui permet d'établir des comparaisons entre des zones différentes soumises à des climats différents.
- Sa nature probabiliste le place dans un contexte historique, ce qui convient bien à la prise de décision.

➤ **Inconvénient de méthode SPI :**

- L'indice SPI ne repose que sur les relevés de précipitations.
- Le bilan hydrique du sol n'étant pas pris en compte, l'indice ne permet pas le calcul du rapport évapotranspiration/évapotranspiration potentielle (ET/ETP).

Grâce à une variante de l'indice qu'ils ont mis au point, [95] tentent de régler le problème mentionné ci-dessus en prenant en compte la température dans les calculs du nouvel indice qu'ils nomment indice de précipitations et d'évapotranspiration normalisé (SPEI).

## 2.2. Paramètres descriptifs des séquences de sécheresse

Parmi les paramètres caractérisant la sécheresse, il est important de citer sa durée, son intensité, et sa fréquence.

**Durée de la sécheresse (D) :** La durée est l'une des caractéristiques importante de la sécheresse. La durée de la sécheresse est la période pendant laquelle la SPI est continuellement en dessous du niveau de troncature et la gravité de la sécheresse est le déficit cumulé en dessous du niveau de troncature pendant la durée de l'épisode de sécheresse.

**Sévérité de la sécheresse (S) :** c'est l'accumulation de valeurs SPI négatives pendant un événement de sécheresse.

**Intensité de la sécheresse (I) :** L'intensité de la sécheresse reflète l'ampleur du déficit des précipitations. L'intensité est obtenue en divisant la gravité de la sécheresse par sa durée.

### Fréquence des séquences de sécheresse

La fréquence cumulée (F) de sécheresse donne une idée sur l'occurrence des séquences sèches sur une période d'étude. Elle est obtenue en faisant le rapport de l'effectif cumulé des séquences sèches par l'effectif total des années pluviométriques.

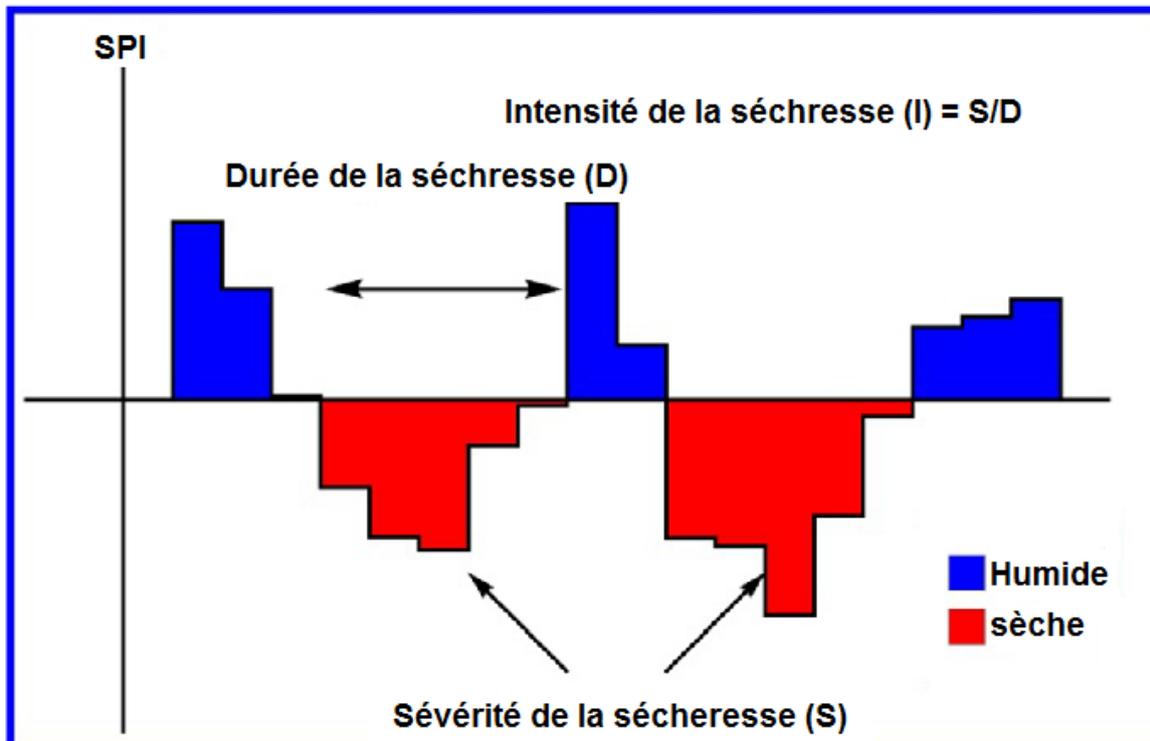


Figure 33 : Eléments descriptive des séquences de sécheresse

### 3. 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.

### 3.1. 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.

### 3.2. 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.

## 4. 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'évaluation de l'indice de précipitations normalisé (SPI) a été calculé en utilisant le logiciel MDM (*Meteorological Drought Monitor*) qui a été développé par le laboratoire des travaux de récupération et de l'eau gestion des ressources de l'Université technique nationale d'Athènes, Grèce [96], l'indice de sécheresse a été estimé pour la période 1970-2011 pour les 42 stations pluviométrique du bassin versant de la Macta.

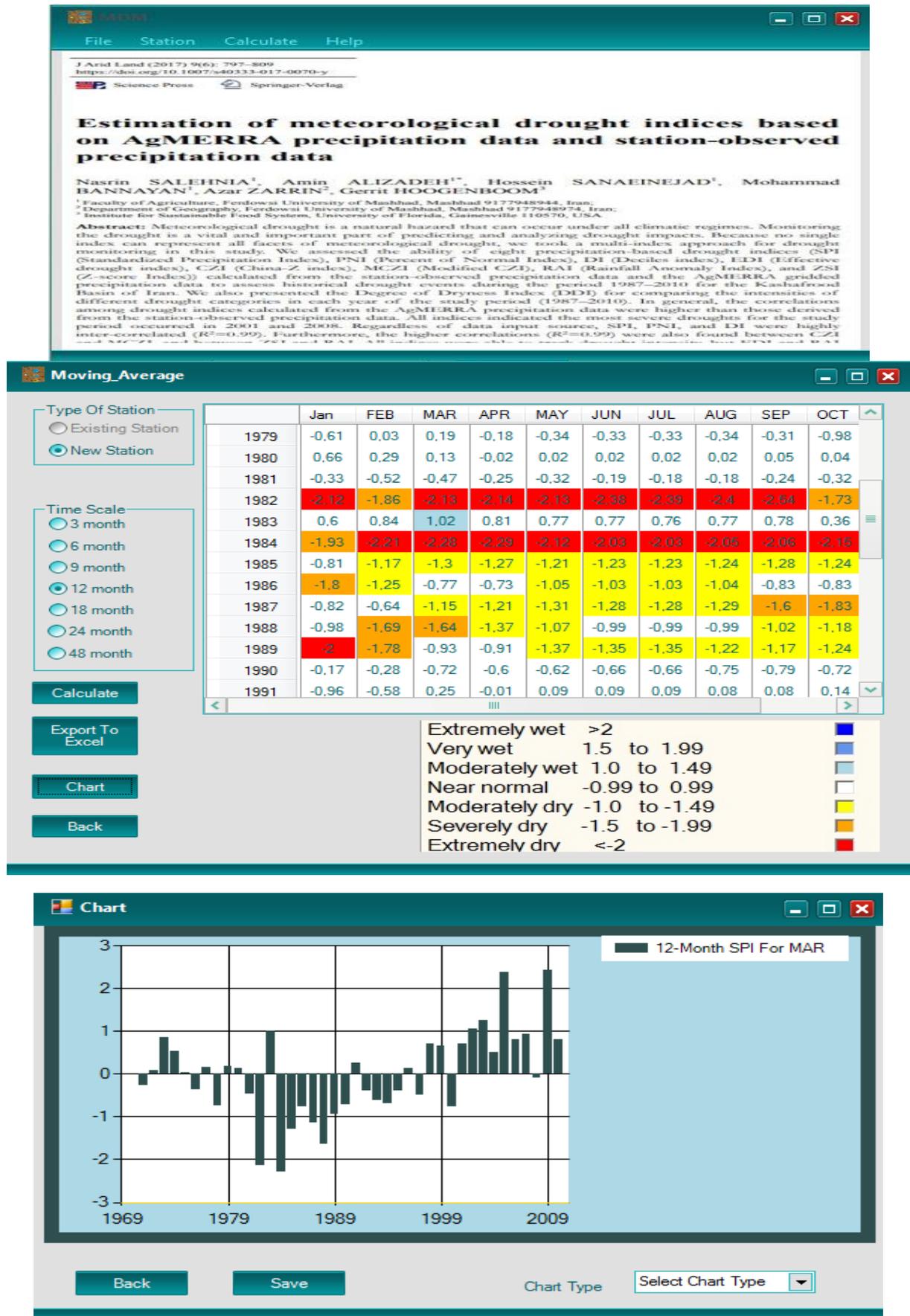


Figure 34 : Interface du logiciel MDM

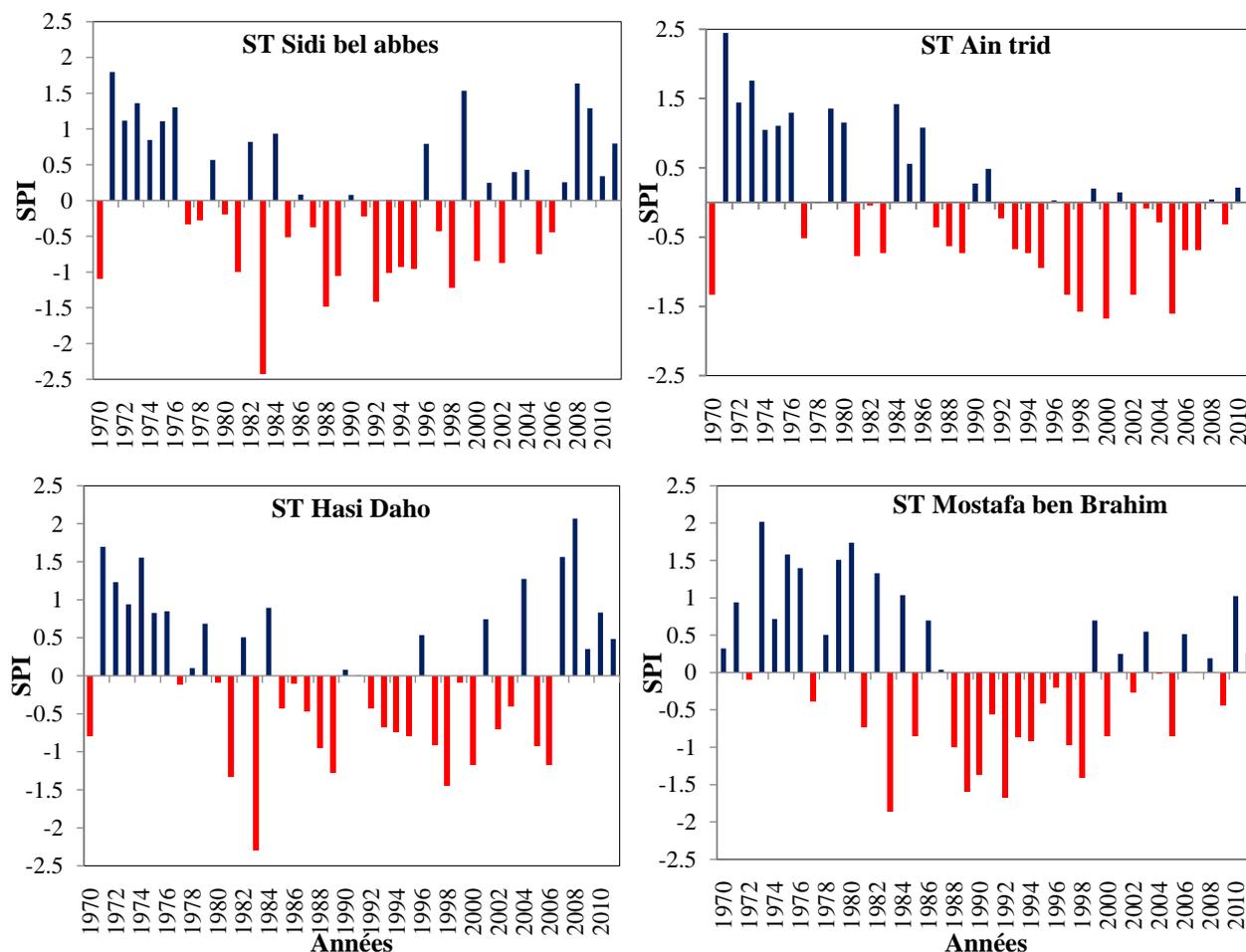
**5. VALEURS ANNUELLES MOYENNES DE L'INDICE SPI :**

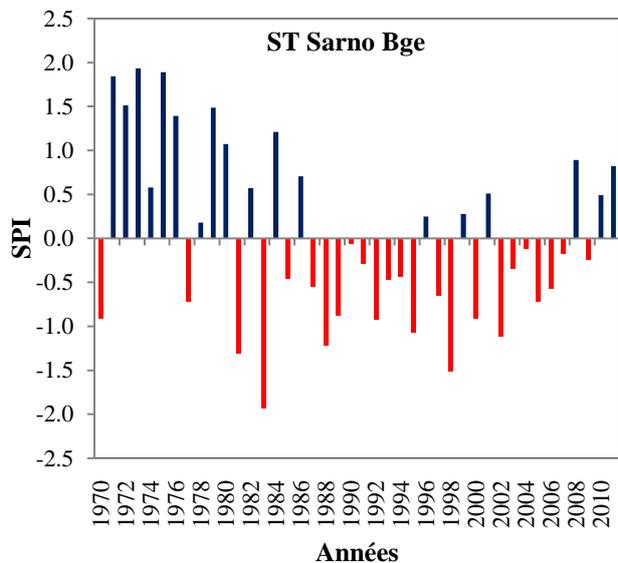
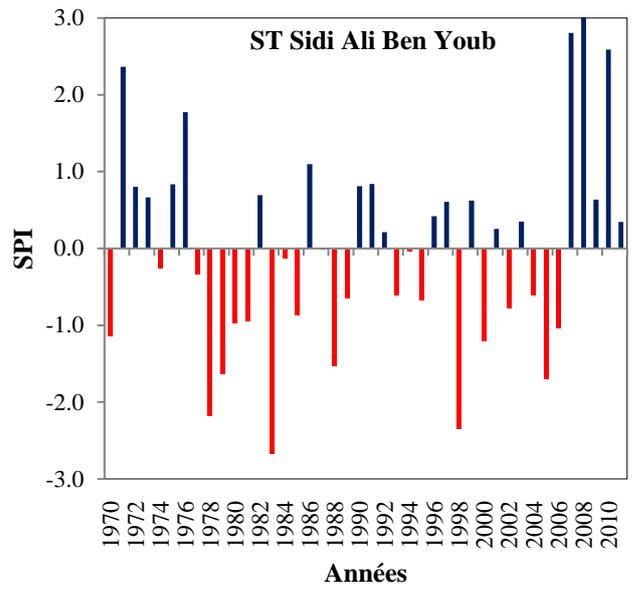
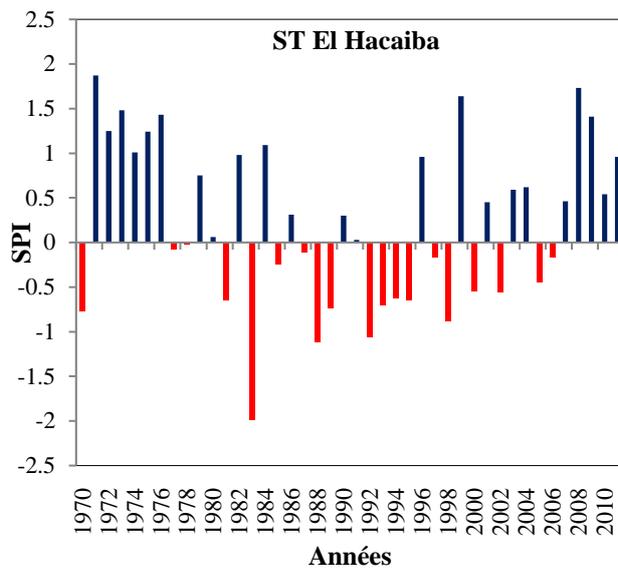
Ce tableau résume les caractéristiques des différentes périodes de l'indice standardisé des précipitations (SPI) sur la période (1970-2011).

**Table 16 :** les caractéristiques des différentes périodes de l'indice Standardisé des Précipitations (SPI) sur la période (1970-2011).

Descripteurs	humide	sèche	sèche	humide	
	1970/1979	1980/1989	1990/1999	2000/2011	1970/2011
<b>Moyenne</b>	0.41	-0.51	-0.26	0.16	-0.05
<b>Minimum</b>	-3.27	-4.22	-3.20	-2.66	-3.34
<b>Maximum</b>	2.74	1.95	1.85	3.57	2.53
<b>Ecart type</b>	3.03	3.11	2.54	3.12	2.95
<b>Ecart moyen</b>	2.15	2.20	1.78	2.14	2.07

La valeur moyenne de l'indice SPI est positive sur la période 1970-1979 (0.41), elle fut humide, se prolongeant sur une période de vingt ans (1980-1989 (-0,51) ; 1990-1999 (-0,26)) cruellement sèche. Cette dernière vue son parcours interrompu par une décennie clémente et humide allant de 2000-2011 (0,16) comme le démontre le tableau ci-haut (Table 16).

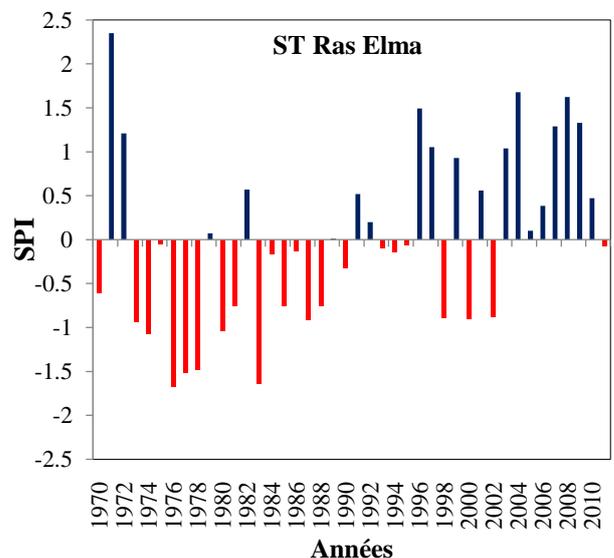


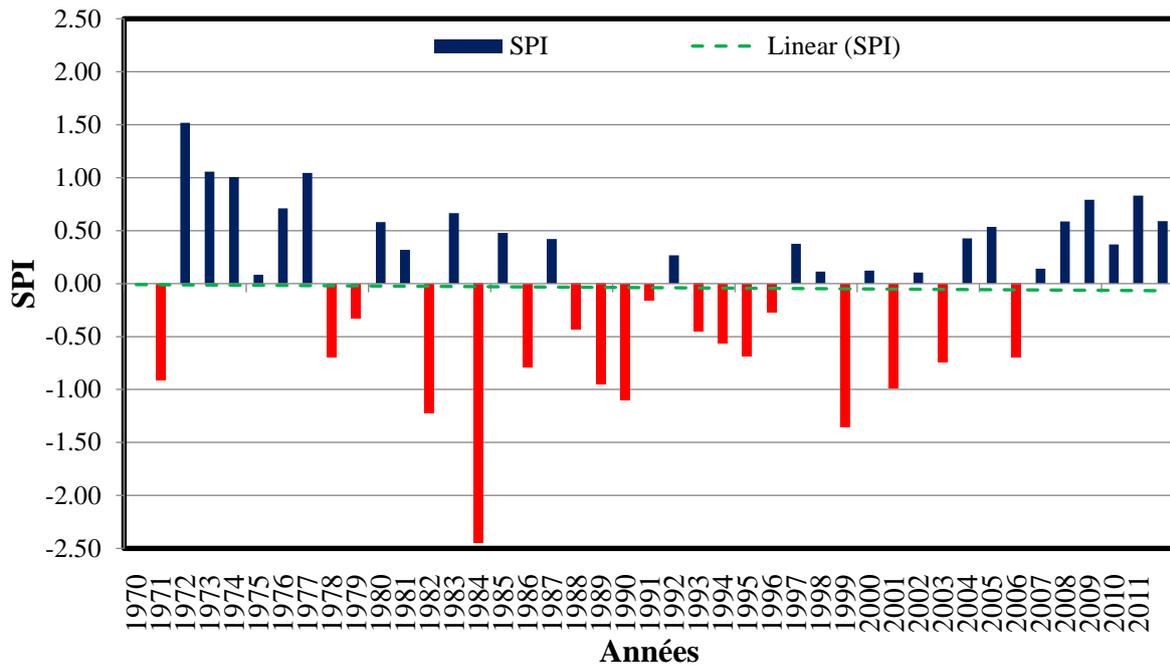


**Figure 35** : Indice de Précipitations Standardisé (SPI) pour quelques stations étudiées durant la période 1970-2011.

La figure 35 présentes l'évolution des valeurs moyennes annuelles de l'indice SPI pour quelques stations pluviométriques sur la période 1970-2011, les décennies ont été marquées par une alternance de séquences humide et sèche au niveau des stations

étudiées. Toutefois, les années sèches sont formées de deux, trois, voire cinq années sèches successives on trouve partout les stations.





**Figure 36 :** Indice de Précipitations Standardisé (SPI) dans le bassin versant de la Macta durant la période 1970-2011.

L'illustration graphique de l'indice de précipitations standardisé, à partir de la série 1970-2011, a permis de mettre en évidence deux périodes bien distinctes ; la première étant sèche tandis que la seconde est plutôt humide.

Dans notre cas, le SPI indique une situation variant entre l'humidité et la sécheresse où 49% des années présentent une sécheresse avec un  $SPI < -0.1$ , tandis que le reste s'inscrit dans un contexte humide avec un  $SPI > 0,09$ .

La série pluviométrique 1970-2011 est caractérisée par dix-huit années de sécheresse légère et vingt-quatre ans d'humidité légère. Notant que l'année 1983 a connu une sécheresse extrême ( $SPI = -2.45$ ) suivi par l'année 1989 ( $SPI = -1.52$ ). La série a aussi connu trois années chacune de sécheresse et d'humidité sévères. Il est à noter que la période 1970-2011 n'a pas connue une humidité extrême.

L'indice SPI indiquait une légère sécheresse 30.16 % du temps, une sécheresse modérée 8.22 % du temps, une grande sécheresse 4,25 % du temps et une sécheresse extrême 3,92 % du temps. L'indice étant normalisé, ces pourcentages sont ceux qui paraissent vraisemblables pour une distribution normale des valeurs de l'indice. Ainsi est-il normal de trouver 3,92 % des valeurs dans la catégorie de sécheresse « extrême », cette valeur représentant la probabilité qu'une sécheresse extrême se produise. On notera aussi durant la période 1970 à 2011, des séquences consécutives de sécheresse forte et extrême (de 6 années) subit depuis plus de deux décennies (1980 à 1999) ont été enregistrées à la station de Sidi bel Abbas situé au centre-ouest du bassin. Le fait que l'indice soit normalisé permet de déterminer le caractère peu fréquent d'un épisode de sécheresse en cours (Tableau 17), ainsi que la probabilité d'une précipitation suffisante pour y mettre fin.

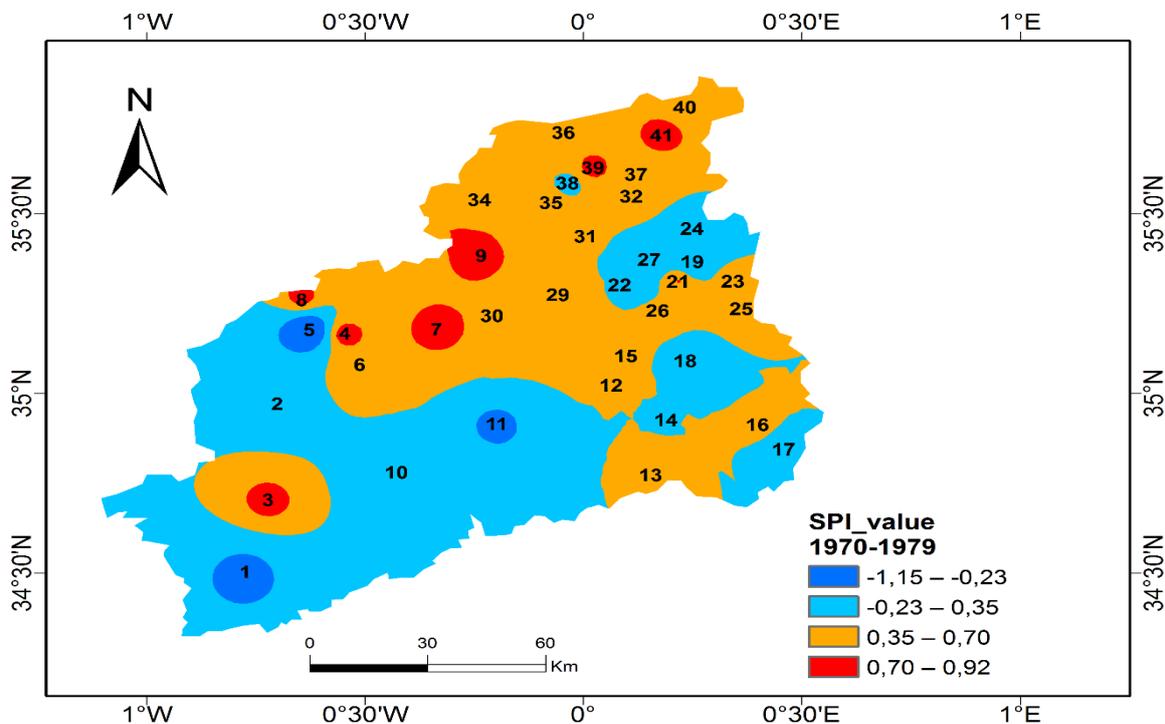
**Tableau 17 :** Fréquences (en %) des classes de l'Indice SPI dans le bassin de la Macta (1970/2011).

Descripteurs	%
Sécheresse légère	32.32
Sécheresse modéré	8.22
Sécheresse forte	4.25
Sécheresse extrême	3.92

**6. EVOLUTION DE L'INDICE SPI PAR DECENNIE :**

Pour mieux visualiser on présente la variabilité spatio-temporelle des précipitations des 42 stations pluviométriques situées dans le bassin versant de la Macta sur la période de 42 ans. La variation spatio-temporelle de la pluviométrie s'est faite en utilisant les différentes données des stations pluviométriques qui couvrent la zone d'étude. Pour réaliser cette cartographie, un grand nombre de postes pluviométriques a été retenus afin de constituer une base de données annuelle, la plus complète et la plus représentative possible de la zone d'étude les données disponibles ont été calculées et classées pendant la période (1970 - 2011) qui couvre la disponibilité des données. La base de données obtenue est exportée sous le logiciel GIS où il a été procédé à une interpolation par la méthode dite " pondération inverse de la distance " (Inverse Distance Weighting ou IDW) pour générer la carte thématique par rapport à nos indices standardisés de précipitations (SPI) durant les décennies. Ces indices nous ont permis de montrer que le bassin a connu des épisodes secs et humides.

**La décennie 1970-1979**

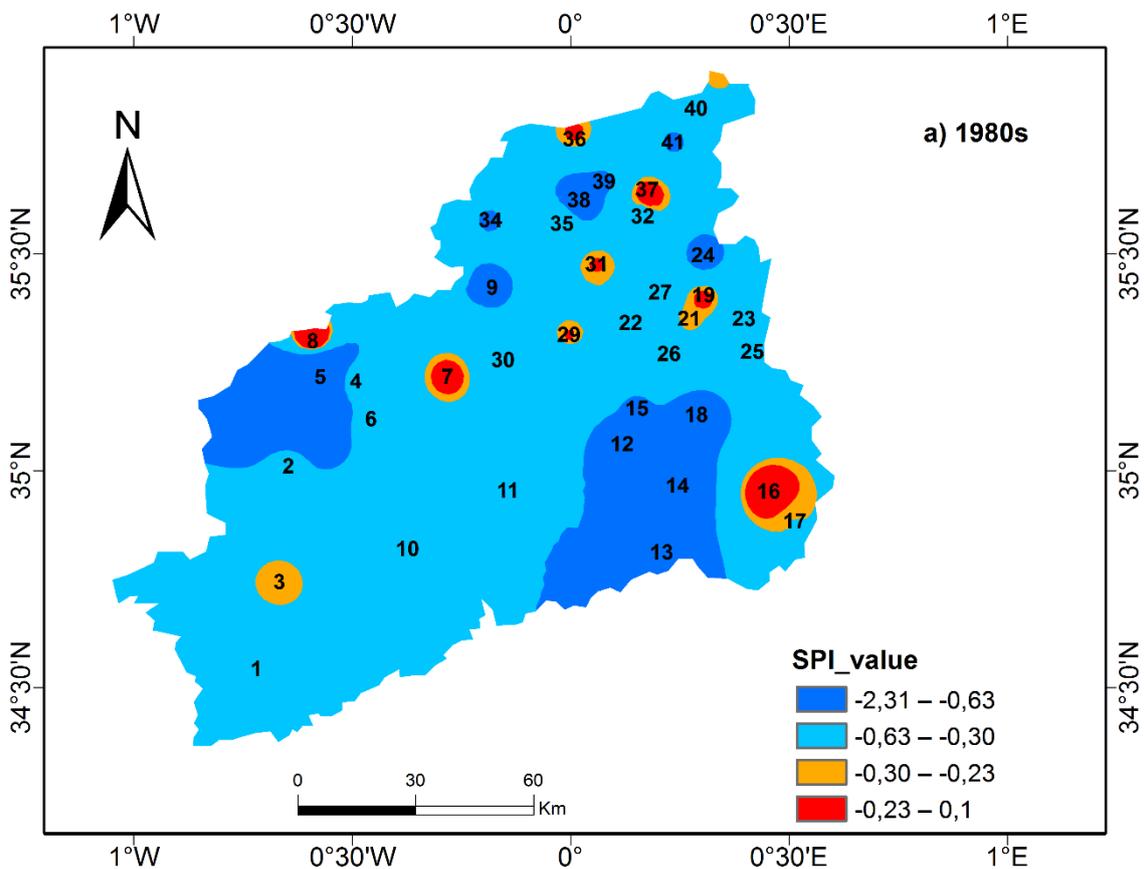


**Figure 37 :** Evolution du SPI sur la décennie (1970-1979)

Lors de cette décennie notre zone d'étude est divisée en deux groupes géographiques à caractère pluviométrique bien distinct : un net contraste est observée à l'Ouest. Au niveau de cette zone, l'indice pluviométrique varie entre -1.15 et -0.15 donc c'est cette zone qui a été beaucoup plus touchée par la sécheresse. La deuxième zone dans le centre-nord du bassin à enregistre également un excédent avec un indice pluviométrique entre 0.33 et 0.92.

**La décennie 1980-1989 :**

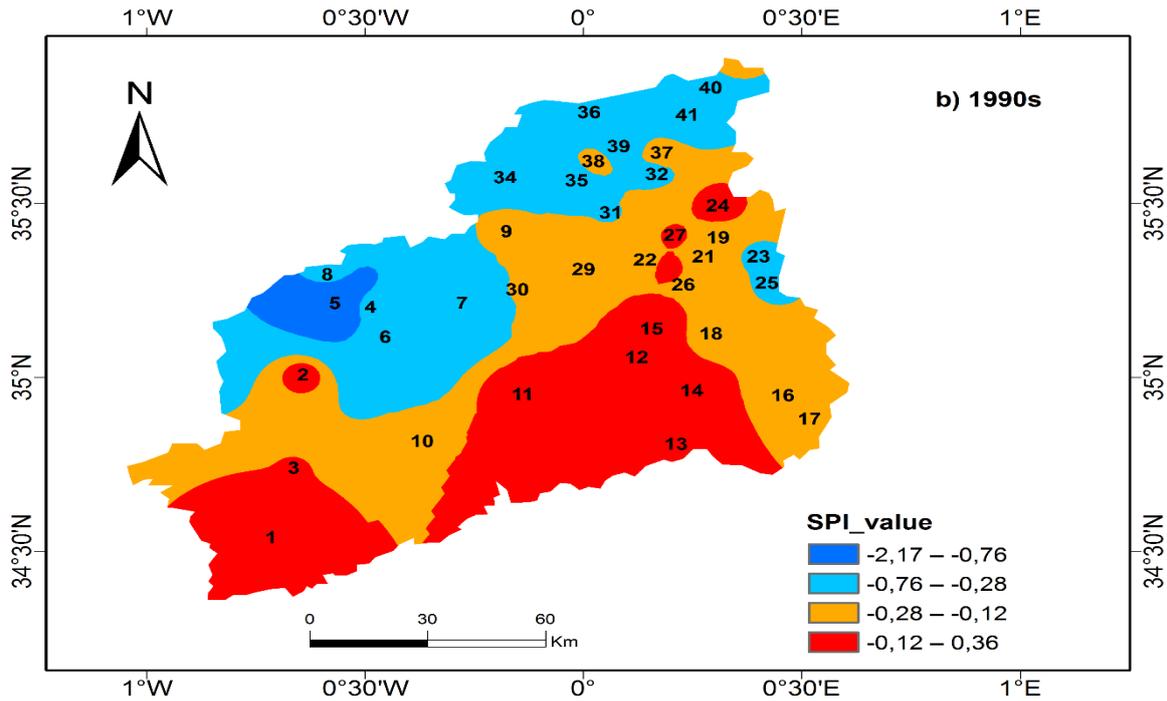
C'est une des périodes des plus déficitaires que n'a jamais connu la zone. Ce caractère s'accroît et apparaît très marqué dans toute la zone. Au niveau du bassin, les valeurs des indices y sont beaucoup plus basses qu'auparavant, les indices standardisés pluviométriques varient entre -2.31 et -0.6 dans la partie Centre - Ouest du bassin d'étude. On notera que la station de Sidi Bel Abbes a enregistré une valeur moyenne de -2.31, ce qui est tombé dans une classification de sécheresse extrême.



**Figure 38 :** Evolution du SPI sur la décennie (1980-1989)

**La décennie 1990-1999**

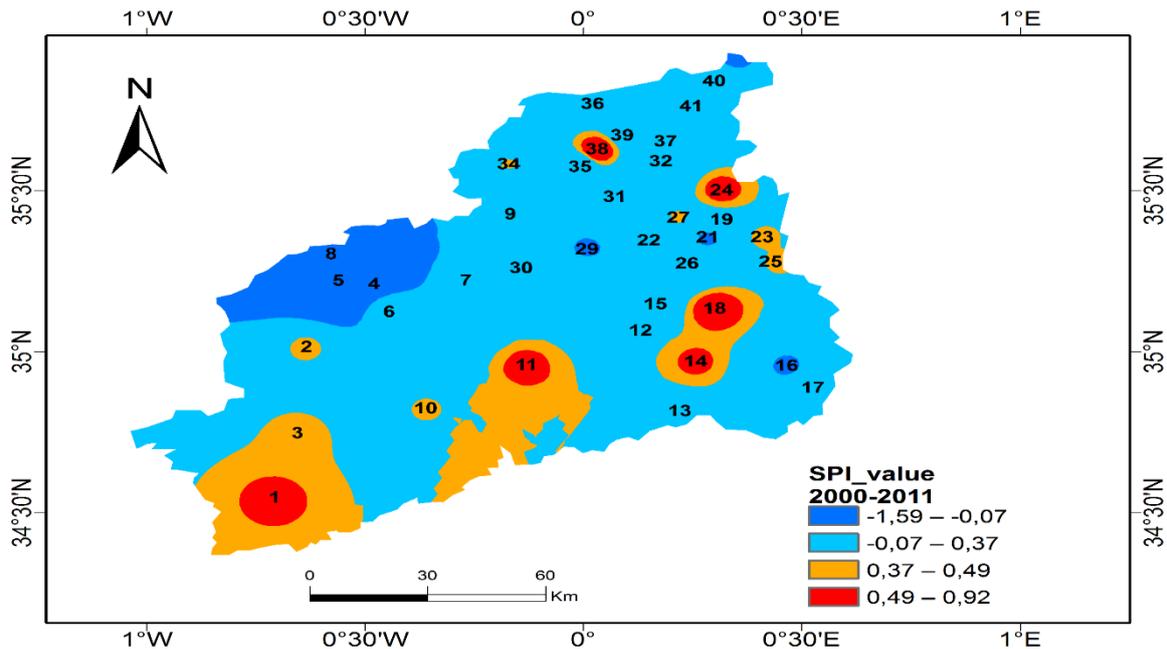
Durant cette décennie, les déficits continuent avec des indices pluviométriques compris entre -2,17 et -0,11 dans la partie Nord- Ouest et Centre-Ouest du bassin d'étude. Par contre, on observe une zone excédentaire avec des indices pluviométriques qui varient entre 0,13 et 0,36 dans la partie Centre-est et Sud-est.



**Figure 39 :** Evolution du SPI sur la décennie (1990-1999)

**La décennie 2000-2011**

Ont observé la présence d'un caractère excédentaire avec des indices pluviométriques compris entre 0,19 et 0,92 dans la partie Centre-est et Sud-est du bassin. Au cours de cette décennie le phénomène de sécheresse commence à s'estomper et il est moins intense par rapport à la décennie précédente. Cependant un important déficit sur la station Sidi bel abbes et l'indice pluviométrique moyenne de - 1,59 ce qui est tombé dans une classification de sécheresse forte.



**Figure 40 :** Evolution du SPI sur la décennie (2000-2011)

**7. ANALYSE DE LA SECHERESSE METEOROLOGIQUE A MOYEN TERME :**

Comme indiqué précédemment, le calcul du SPI pour une échelle de temps spécifique à n'importe quel endroit nécessite un bon ajustement d'une distribution de fréquence gamma aux données de précipitation. Les valeurs SPI à 6 et 12 mois pour l'ensemble du bassin sont présentées dans les tableaux 18 et 19 sur la période 1970-2011. Comme on peut le voir, les caractéristiques d'une sécheresse changent avec le temps. À des échelles de temps plus longues, les sécheresses deviennent moins fréquentes mais leur durée augmente. Sur la base de l'SPI de 6 mois, plusieurs sécheresses ont été identifiées entre 1970 et 2011. Parmi ces sécheresses, les sécheresses de 1981–1982, 1983–1984 et 1996–1999 ont été les plus importantes. La sécheresse la plus longue, qui a commencé en avril 1983 et s'est retirée en novembre 1984, a duré dix-neuf mois. La sécheresse de 1984, d'une durée de dix-huit mois, avait une intensité de pointe de -3,72 (sécheresse extrême) et une intensité moyenne de -2,33, qui tombaient dans une classification sévère. L'intensité maximale du SPI (-3,72) de cette échelle de temps s'est produite en septembre 1984 et la fréquence relative des sécheresses de cette échelle de temps était d'environ 14,09%.

**Tableau 18 :** Caractéristiques de la sécheresse sur une échelle de temps de 6 mois pour les stations utilisées dans cette étude.

Code de ST	Intensité maximale observée			Durée la plus intense			Durée la plus longue			FR (%)		
	SPI-6	Année	Mois	D(M)	Années	M	I	D(M)	Années		M	I
110102	-2.66	1978	Mar	7	77-78	-16.46	-2.35	14	76-77	-25.48	-1.82	14.88
110201	-2.98	1979	Apr	7	78-79	-17.79	-2.54	14	78-79	-28.98	-2.07	15.67
110203	-2.88	1981	Nov	4	81-82	-9.72	-2.43	19	87-89	-28.63	-1.51	16.87
110304	-3.57	1981	Dec	4	81-82	-11.77	-2.94	7	81-82	-14.56	-2.08	12.90
110305	-3.51	1983	Sep	4	83-84	-12.25	-3.06	12	83-84	-25.12	-2.09	14.68
110309	-3.27	1983	Jun	7	83-84	-18.58	-2.65	13	83-84	-27.04	-2.08	15.67
110312	-3.11	1983	Sep	7	83-84	-10.04	-1.43	9	96-97	-20.77	-2.31	16.07
110314	-3.33	1997	Mar	7	96-97	-17.86	-2.55	10	96-97	-22.07	-2.21	16.07
110402	-3.45	1983	Oct	4	83-84	-10.88	-2.72	10	83-84	-18.03	-1.80	15.87
110501	-3.28	1983	Sep	6	83-84	-15.32	-2.55	8	83-84	-18.68	-2.34	16.47
110802	-3.72	1984	Sep	8	83-84	-24.39	-3.05	18	73-75	-42.02	-2.33	12.90
111102	-3.65	1989	May	5	89	-13.61	-2.72	12	83-84	-25.69	-2.14	13.49
111103	-3.45	1983	Nov	6	83-84	-17.93	-2.99	19	83-84	-41.86	-2.20	13.69
111112	-3.2	1989	May	6	83	-14.18	-2.36	12	83-84	-25.22	-2.10	14.09
111201	-3.81	1981	Dec	7	81-82	-17.09	-2.44	13	83-84	-27.38	-2.11	12.90
111204	-3.02	1973	Oct	4	2005	-9.16	-2.29	9	2005	-18.71	-2.08	14.88
111210	-3.15	1983	Oct	6	83	-16.09	-2.68	11	83-84	-23.55	-2.14	13.29
111217	-2.71	1983	Sep	4	78	-8.91	-2.23	12	83-84	-22.36	-1.86	16.67
111401	-3.4	2000	Jun	3	2000	-8.74	-2.91	9	73-74	-14.82	-1.65	13.69
111402	-3.09	2000	Jun	4	2000	-10.04	-2.51	10	83-84	-19.28	-1.93	15.08
111405	-3.12	2000	Jun	4	2000	-10.33	-2.58	9	83-84	-18.03	-2.00	13.49
111413	-3.42	1983	Sep	4	2000	-9.33	-2.33	10	81-82	-17.88	-1.79	15.28
111414	-3.28	1983	Oct	4	81-82	-9.78	-2.45	10	83-84	-19.26	-1.93	14.29
111417	-3.05	1981	Dec	5	83	-11.56	-2.31	12	81-82	-23.09	-1.92	14.09
111418	-3.48	1983	Oct	6	83	-16.12	-2.69	9	00-01	-20.56	-2.28	13.89

## CHAPITRE 4 : \_\_\_\_\_ Caractérisation des séquences de sécheresse météorologique

111424	-2.92	1983	Oct	3	83	-7.67	-2.56	9	83-84	-16.31	-1.81	13.69
111429	-3.45	1977	Apr	5	76-77	-16.01	-3.20	11	73-74	-18.54	-1.69	13.29
111502	-3.11	1981	Dec	5	81-82	-13.09	-2.62	8	81-82	-17.56	-2.20	16.27
111503	-2.85	1983	Oct	5	83-84	-12.08	-2.42	11	83-84	-20.34	-1.85	14.09
111508	-2.86	1997	Mar	3	81-82	-7.04	-2.35	8	83-84	-15.32	-1.92	14.68
111509	-3.49	1983	Oct	5	81-82	-14.51	-2.90	9	81-82	-21.31	-2.37	13.89
111511	-3.43	2000	Jun	3	2000	-8.68	-2.89	9	81-82	-18.78	-2.09	14.48
111516	-3.14	1996	Dec	5	96-97	-13.68	-2.74	9	83-84	-17.63	-1.96	13.89
111604	-3.1	1983	Oct	6	96-97	-13.96	-2.33	12	83-84	-22.01	-1.83	15.08
111605	-2.95	1981	Jan	4	81-82	-9.71	-2.43	7	81-82	-14.71	-2.10	14.29
111606	-3.3	2000	Jun	5	81-82	-14.27	-2.85	8	81-82	-19.31	-2.41	13.29
111607	-2.97	2000	Jun	2	2000	-5.71	-2.86	8	99	-12.65	-1.58	16.47
111610	-3.41	1987	Aug	6	81-82	-14.35	-2.39	11	83-84	-22.95	-2.09	14.09
111611	-3.15	1982	Jan	5	81-82	-13.78	-2.76	9	81-82	-19.91	-2.21	14.29
111612	-2.71	2000	Jun	3	81-82	-7.39	-2.46	14	83-84	-22.11	-1.58	15.87
111616	-3.18	1983	Oct	5	92-93	-12.37	-2.47	7	88-89	-12.26	-1.75	14.88
111617	-3.66	1997	Mar	5	96-97	-15.51	-3.10	11	81-82	-18.23	-1.66	14.88

**(D)** : Durée de la sécheresse ; **(M)** : Magnitude de la sécheresse ; **(I)** Intensité de la sécheresse et **(FR)** : la fréquence relative

### 8. ANALYSE DE LA SECHERESSE METEOROLOGIQUE A LONG TERME :

Le tableau 19 résume les caractéristiques de la sécheresse de 1970 à 2011 pour les stations à travers le bassin sur une échelle de temps de 12 mois. Des caractéristiques similaires sont obtenues pour une échelle de temps de 6 mois. Comme le montre le tableau 19, presque toutes les stations ont connu des pics d'intensité inférieurs à -2, tombant dans une classification extrême. Des stations dont les pics d'intensité sont inférieurs à -3 sont visibles. La plupart de ces pics d'intensité se sont produits dans les années 1980, en particulier en 1983. La plus grande intensité (SPI = -3,93) s'est produite en mars 1982 à la station Hacine (111509). La plus longue sécheresse a duré 34 mois d'avril 1976 à janvier 1979 à la station Ras El Ma (110102). L'intensité maximale de cette sécheresse était de -2,94, sa magnitude était de -70,22 et son intensité moyenne était de -2,07. La sécheresse de 33 mois à la station Hammam Rabi (111112) avec une magnitude de -58,31 et une intensité moyenne de -1,77 se distingue également. La sécheresse de 1997–1998 d'une durée de 12 mois, d'une magnitude de -27,35 et d'une intensité moyenne de -2,28 à la station d'Ain Trid (110314) dans la partie nord-ouest a eu un impact plus important sur la région par rapport aux sécheresses mentionnées précédemment. Comme le montre le tableau 19, presque toutes les stations ont connu leurs sécheresses les plus longues et les plus intenses au cours des années 80.

Les fréquences relatives des stations Forneka (111606), Sahouet Ouizert (111502), Mostefa ben brahim (110312) et Mascara (111429) (18,65%, 18,45%, 18,06% et 17,06%, respectivement) sont plus visibles.

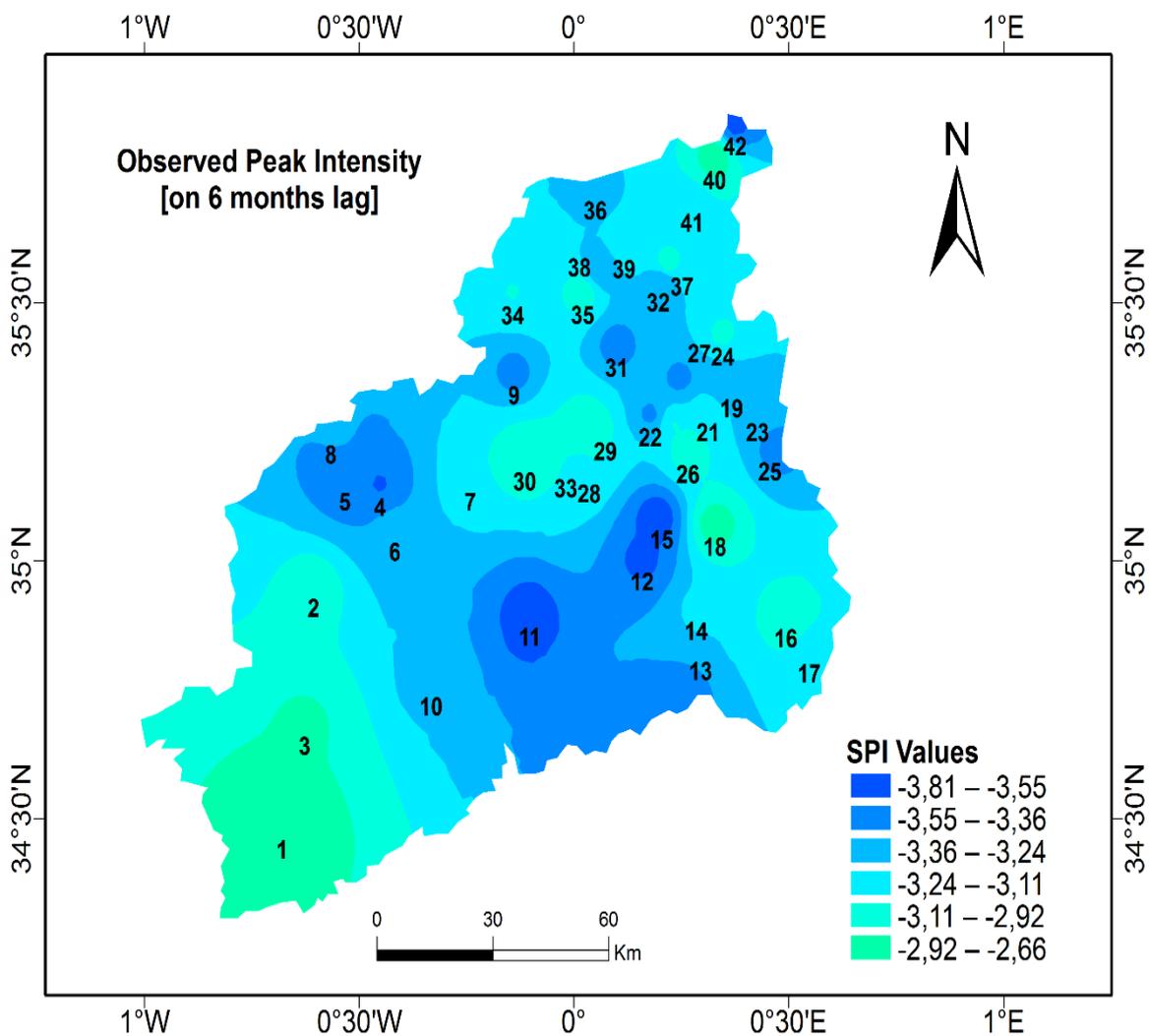
**Tableau 19** : Caractéristiques de la sécheresse sur une échelle de temps de 12 mois pour les stations utilisées dans cette étude.

Code de ST	Intensité maximale observée			Durée la plus intense				Durée la plus longue				FR (%)
	SPI-12	Année	Mois	D(M)	Années	M	I	D(M)	Années	M	I	
110102	-2.94	1978	Sep	7	77-78	-18.81	-2.69	34	76-79	-70.22	-2.07	13.10
110201	-3.28	1979	May-Jun	11	79	-31.79	-2.89	26	78-80	-52.36	-2.01	14.09
110203	-3.28	1983	Dec	13	88-89	-30.04	-2.31	17	88-89	-35.68	-2.10	14.68
110304	-2.43	1983	Dec	4	83-84	-8.51	-2.13	11	81-82	-19.61	-1.78	15.87
110305	-3.16	1983	Dec	6	83-84	-15.05	-2.51	16	92-93	-25.04	-1.57	16.87
110309	-3.29	1983	Dec	6	83-84	-15.92	-2.65	12	83-84	-19.01	-1.58	14.09
110312	-3.13	1997	Jun	7	97-98	-18.57	-2.65	26	89-91	-38.53	-1.48	18.06
110314	-3.08	1997	Jul	8	97-98	-21.29	-2.66	12	97-98	-27.35	-2.28	13.49
110402	-2.52	1983	Dec	4	97-98	-8.29	-2.07	18	88-90	-28.51	-1.58	17.66
110501	-3.17	1983	Dec	6	83-84	-15.18	-2.53	13	98-99	-22.77	-1.75	15.87
110802	-3.59	1974	Sep	12	74-75	-38.56	-3.21	18	83-84	-40.61	-2.26	12.90
111102	-3.43	1983	Dec	8	83-84	-20.62	-2.58	16	89-90	-33.01	-2.06	14.68
111103	-3.59	1983	Dec	12	83-84	-36.04	-3.00	24	80-82	-34.19	-1.42	11.11
111112	-3.03	1984	Jan	9	89	-21.46	-2.38	33	88-90	-58.31	-1.77	13.49
111201	-3.25	1978	Sep	11	83-84	-27.54	-2.50	16	77-79	-36.05	-2.25	12.10
111204	-2.76	1983	Dec	6	2005	-15.74	-2.62	10	1993	-19.87	-1.99	14.09
111210	-2.94	1983	Dec	4	83-84	-10.35	-2.59	19	83-84	-30.65	-1.61	12.90
111217	-2.68	1983	Dec	6	78	-13.58	-2.26	19	85-86	-25.91	-1.36	15.08
111401	-2.32	1974	Jan	7	73-74	-10.52	-1.50	12	88-89	-17.16	-1.43	15.48
111402	-3.06	1983	Dec	4	83-84	-10.63	-2.66	12	83-84	-22.91	-1.91	16.07
111405	-2.71	1983	Dec	3	83-84	-7.51	-2.50	9	2000	-16.02	-1.78	16.47
111413	-3.44	1983	Nov	10	81-82	-22.18	-2.22	12	89	-18.61	-1.55	15.87
111414	-2.73	1983	Dec	3	83-84	-7.03	-2.34	10	80-81	-13.41	-1.34	15.87
111417	-3.04	1982	Jan	10	81-82	-24.57	-2.46	19	81-82	-37.76	-1.99	12.50
111418	-2.81	2000	May	8	2000	-21.62	-2.70	27	00-02	-48.22	-1.79	13.29
111424	-2.27	2000	Mar	2	82	-4.16	-2.08	10	2000	-15.66	-1.57	13.69
111429	-3.01	1977	Apr	8	77	-20.38	-2.55	21	76-77	-38.71	-1.84	17.06
111502	-2.80	1982	Jan	5	81-82	-11.76	-2.35	12	83-84	-19.55	-1.63	18.45
111503	-2.67	1983	Dec	5	83-84	-11.36	-2.27	11	81-82	-16.71	-1.52	13.69
111508	-2.51	1983	Dec	4	97	-8.51	-2.13	10	81-82	-14.48	-1.45	16.67
111509	-3.93	1982	Mar	5	82	-11.71	-2.34	10	81-82	-22.15	-2.22	16.27
111511	-2.70	1982	Mar	8	1982	-17.52	-2.19	13	88-89	-22.47	-1.73	15.67
111516	-2.50	1983	Dec	7	82	-16.71	-2.39	12	81-82	-26.58	-2.22	14.88
111604	-3.15	1983	Dec	6	97	-15.71	-2.62	14	88-89	-21.34	-1.52	15.48
111605	-2.12	1982	Dec	2	82	-4.37	-2.19	22	80-82	-40.31	-1.83	16.47
111606	-2.83	1982	Sep	6	81-82	-16.43	-2.74	15	01-03	-28.44	-1.90	18.65
111607	-2.23	1999	Aug	4	99	-8.53	-2.13	10	2000	-13.26	-1.33	16.47
111610	-2.54	1982	Sep	9	84	-19.22	-2.14	13	83-84	-25.59	-1.97	14.88
111611	-2.72	1982	Apr	7	82	-17.91	-2.56	14	88-89	-26.23	-1.87	14.48
111612	-2.88	1983	Dec	5	82	-11.64	-2.33	16	88-90	-26.48	-1.66	15.08
111616	-2.51	1992	Nov	3	92-93	-7.15	-2.38	21	92-93	-39.04	-1.86	16.27
111617	-2.49	1982	Sep	7	82	-16.31	-2.33	14	94-95	-24.57	-1.76	14.68

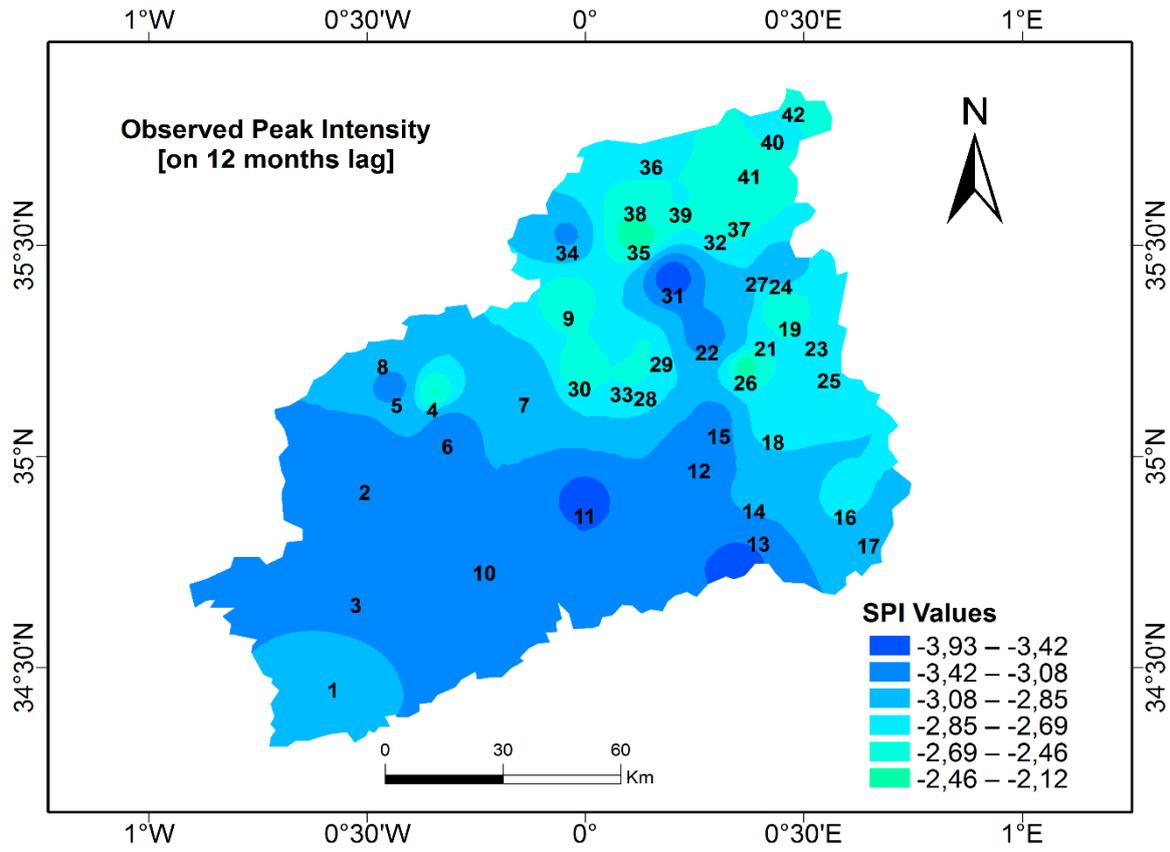
### 9. CARACTERISATION DES SEQUENCES DE LA SECHERESSE

Les caractéristiques de l'indice SPI calculées pour les tendances à moyen et long terme des précipitations ont été utilisées pour générer des cartes de sécheresse pour le bassin de la Macta en utilisant la méthode IDW pour l'interpolation des données des stations sous ArcGis.

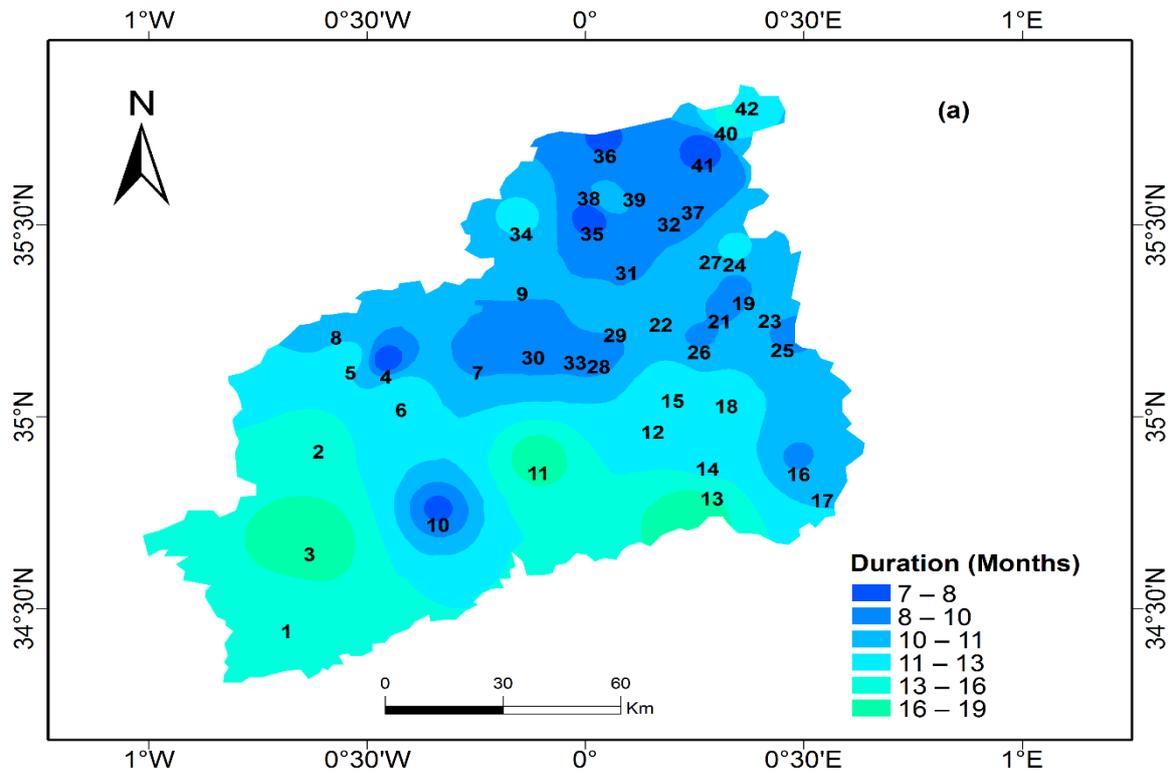
La carte d'intensité de la sécheresse sur 6 mois (Figure 41a) montre des intensités plus importantes dans la partie centrale que dans la région sud-ouest et nord-est. Sur cette carte, il y a plus de zones affectées de haute intensité que de zones de moindre intensité. La carte d'intensité de la sécheresse sur 12 mois (Figure 41b) indique que les parties sud-ouest et centrale du bassin ont connu des intensités plus importantes que celles de l'est, du nord et des exutoires au cours de la période d'étude. Bien que les valeurs d'intensité à cette échelle de temps soient élevées par rapport au SPI à 6 mois, la zone affectée est plus grande.



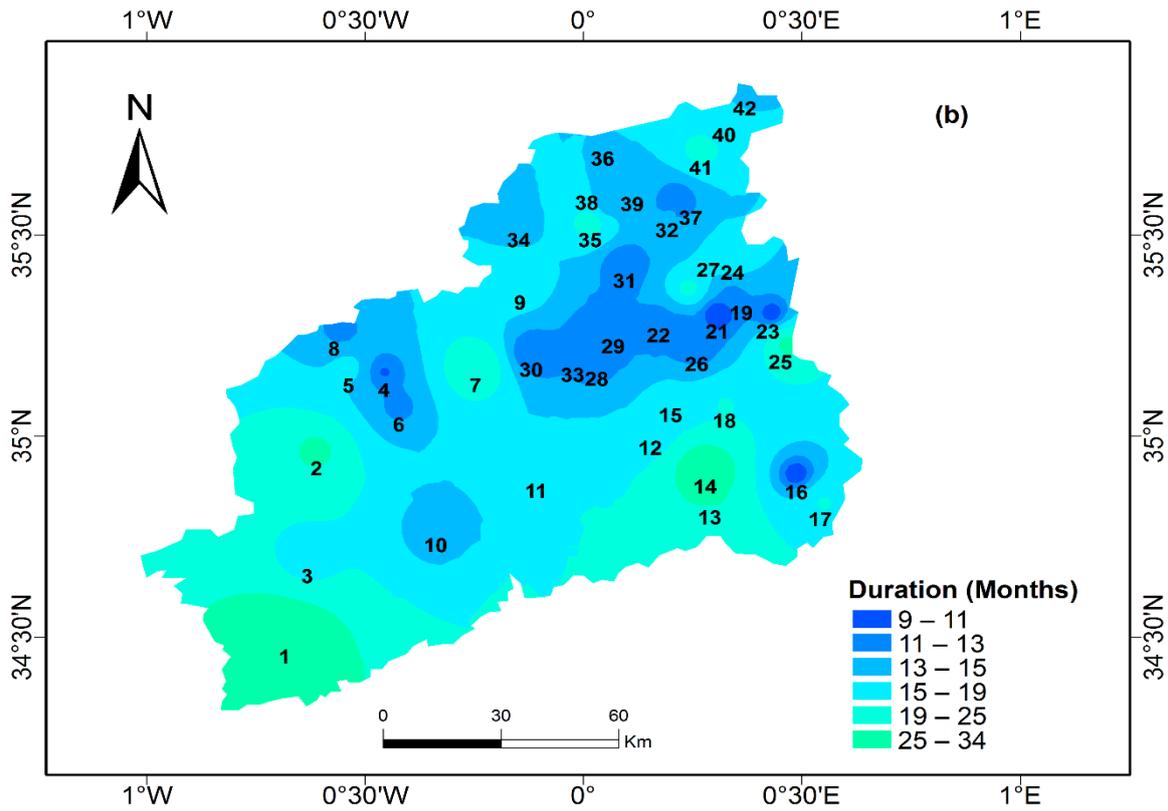
**Figure 41 :** Carte de l'intensité maximale observée à (a) 6 mois.



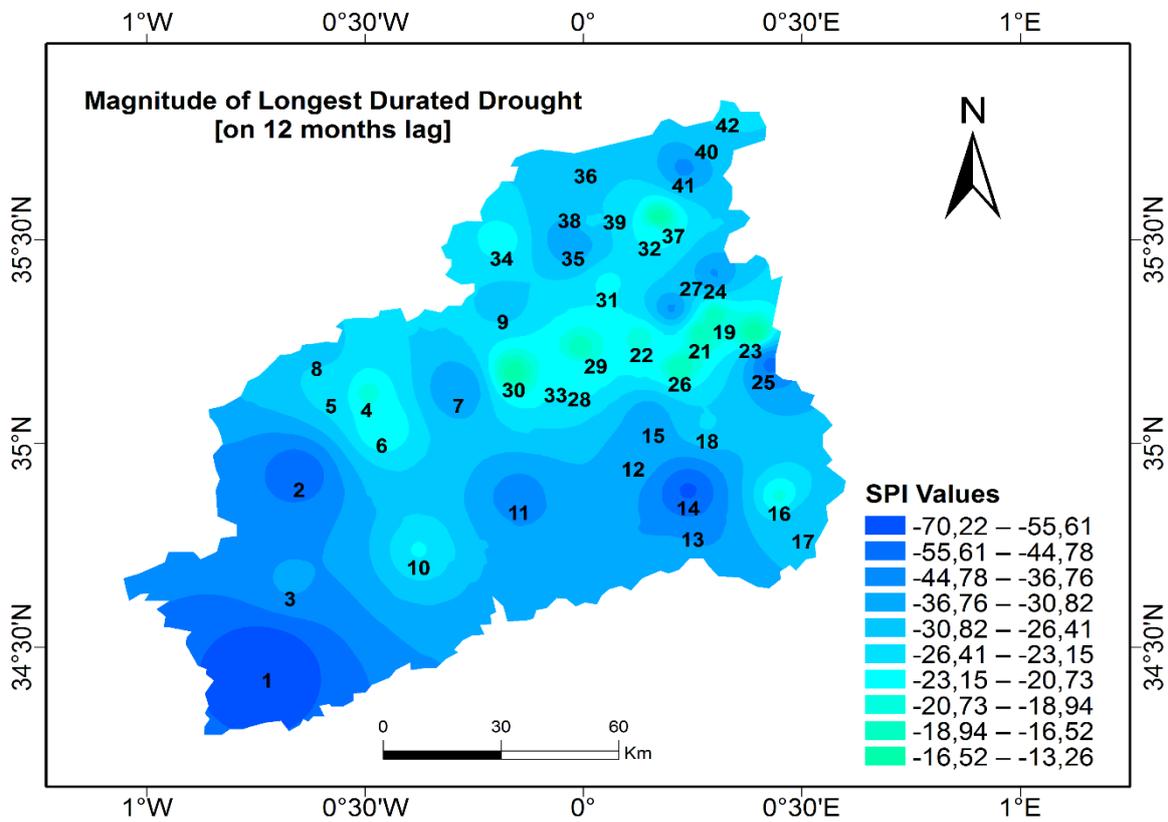
**Figure 42 :** Carte de l'intensité maximale observée (b) à 12 mois.



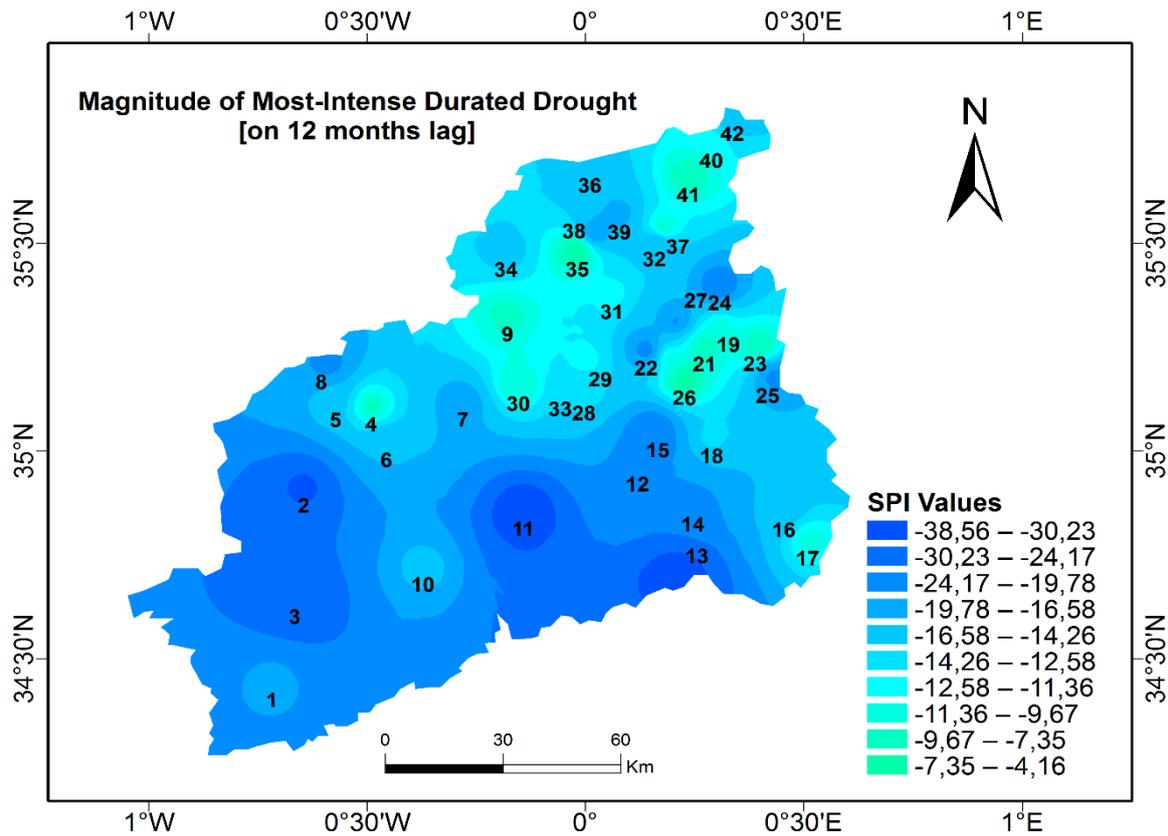
**Figure 43 :** Carte de la durée de sécheresse les plus longue à (a) 6 mois.



**Figure 44 :** Carte de la durée de sécheresse les plus longue (b) à 12 mois.



**Figure 45 :** Ampleur des sécheresses les plus longues (a) sur un pas de temps de 12 mois.



**Figure 46 :** Ampleur des sécheresses les plus intenses (b) sur un pas de temps de 12 mois.

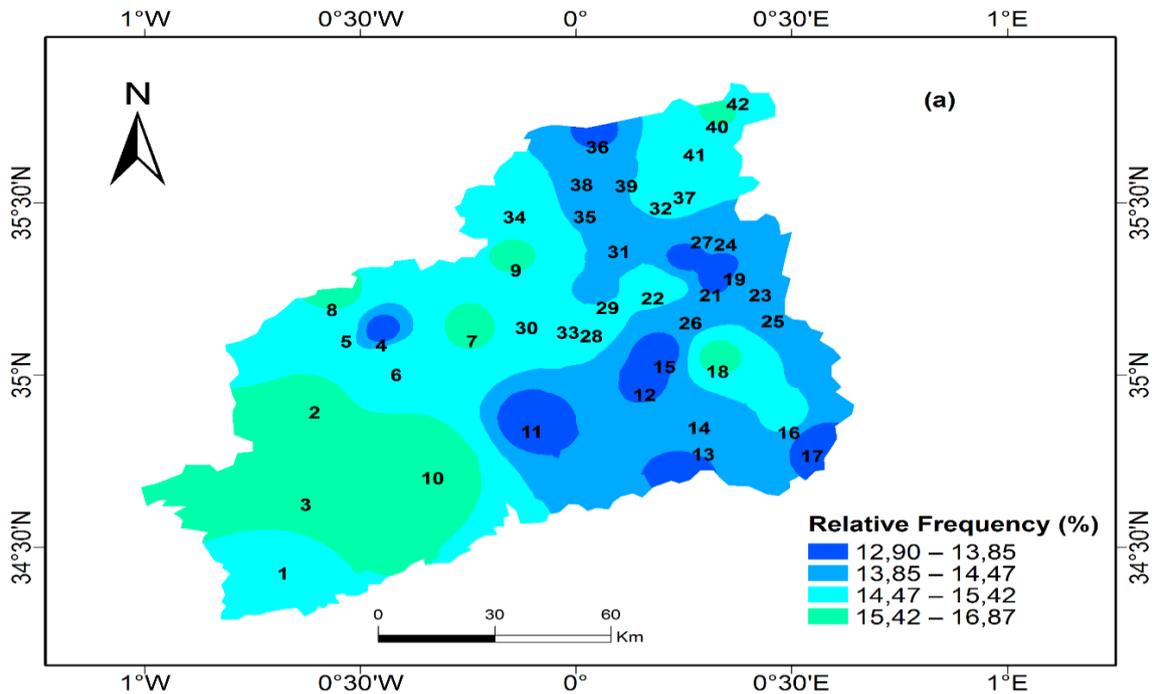
La carte de la durée de la sécheresse SPI à 6 mois (Figure 42a) indique que les parties sud et centrale ont connu des sécheresses de plus longue durée que les parties nord et aval du bassin. Cependant, la majeure partie du bassin a connu des durées élevées, diminuant du sud, du sud-est et du nord-ouest vers l'exutoire.

Comme prévu, les durées de sécheresse détectées par le SPI de 12 mois étaient supérieures à celles du SPI de 6 mois. La carte de la durée de la sécheresse de l'ISP de 12 mois (Figure 42b) montre des durées plus importantes presque dans tout le bassin, sauf celles des parties nord-est et centre-ouest du bassin. Entre 1970 et 2011, l'ampleur moyenne de la sécheresse la plus longue et de la sécheresse la plus intense sur une échelle de 12 mois (Figures 43a et b) est d'environ -29 et -16 respectivement avec leur intensité moyenne de -2,07 et -3,21. La zone a souffert d'une sécheresse plus longue, l'ampleur y a également été jugée élevée.

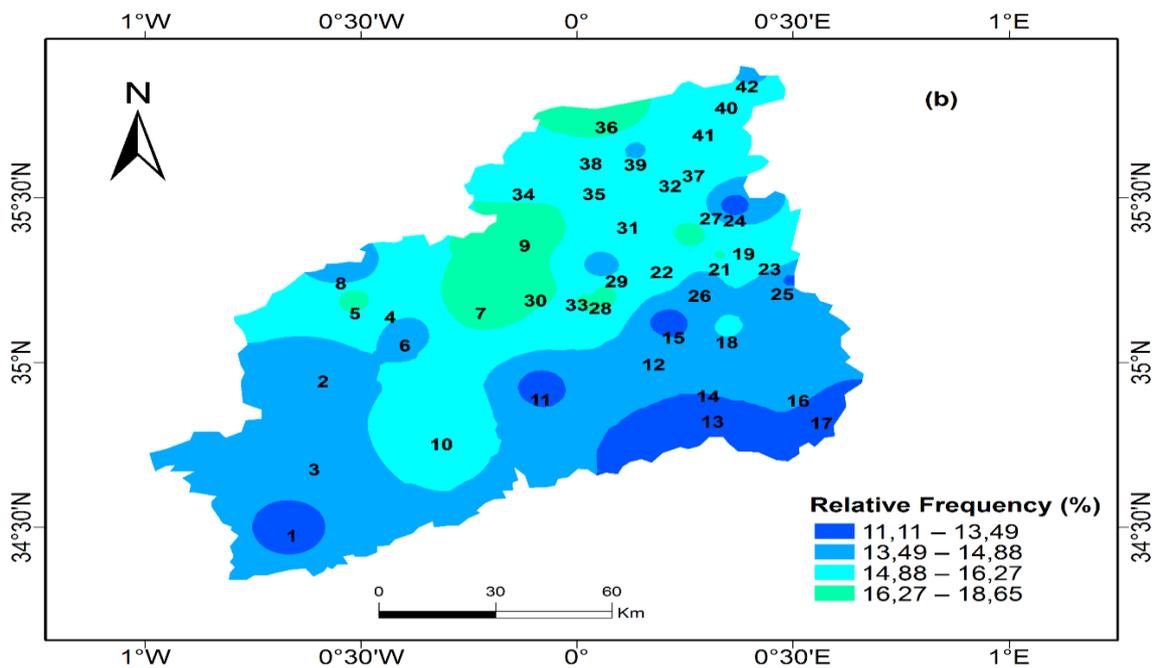
Étant donné que les sécheresses varient dans le temps et dans l'espace, la répartition régionale de la sécheresse à l'aide d'événements de sécheresse avec des valeurs SPI inférieures à -1,0 a été interpolée et cartographiée sur des échelles de temps de 6 et 12 mois. La distribution spatiale de la fréquence relative de la sécheresse (%) pour le SPI à 6 mois (Figure 44a) montre que les régions du centre et du sud-ouest sont caractérisées comme étant en sécheresse plus fréquemment que la région du nord-est.

La carte de fréquence des sécheresses du SPI sur 12 mois (Figure 44b) montre que les régions du nord et de l'ouest du bassin ont connu une sécheresse plus fréquemment que les parties sud et est de la zone d'étude. Comme le montrent les Figures 44a et b, les ressources en eau à long

terme ont été affectées dans les parties ouest et nord. Dans le centre-sud-ouest, cependant, l'approvisionnement en eau à moyen terme a été influencé. La variation des valeurs de fréquence est très faible pour les échelles à deux temps, mais le SPI à 12 mois à des fréquences plus élevées que le SPI à 6 mois dans son ensemble.

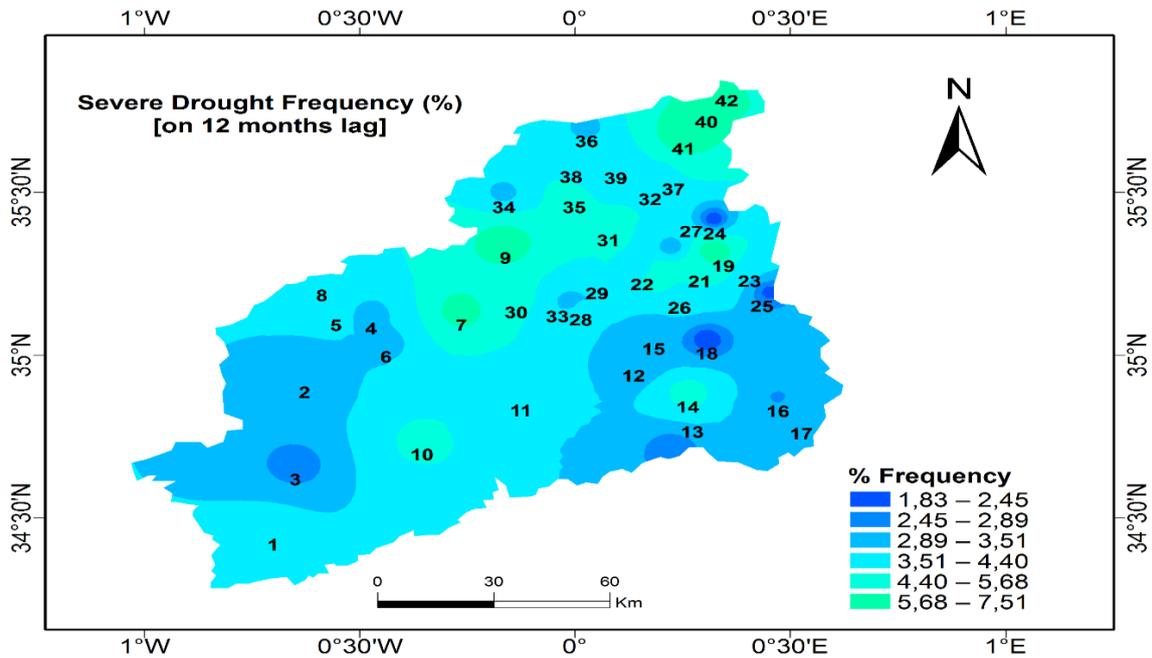


**Figure 47 :** Fréquences des séquences de sécheresse durant la période 1970-2011 à moyen termes (a) dans le bassin de la Macta.

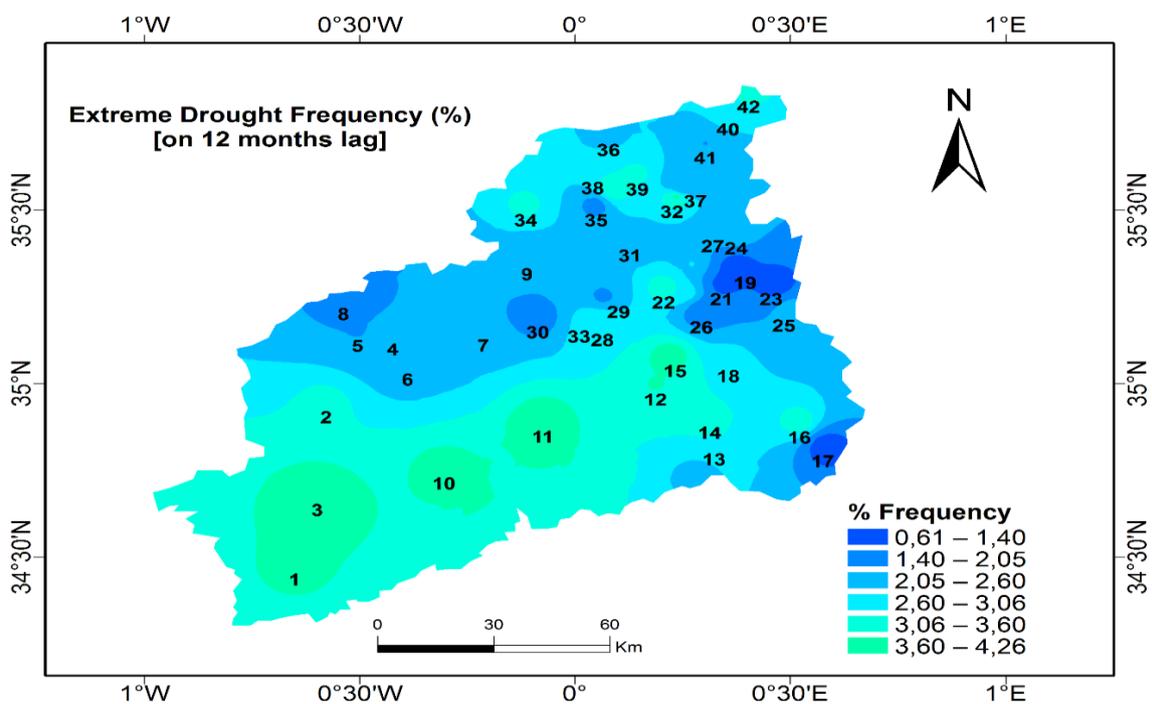


**Figure 48 :** Fréquences des séquences de sécheresse durant la période 1970-2011 à long termes (b) dans le bassin de la Macta.

Au pas de 12 mois, les parties nord et centrale du bassin ont connu des sécheresses sévères plus fréquentes (Figure 45a). L'état de sécheresse sur cette figure correspond à des valeurs SPI comprises entre -1.50 et -1.99, c'est-à-dire des conditions de sécheresse sévère. Par contre, les épisodes de sécheresse extrême (-2 et moins) sont plus prononcés dans les parties est et sud-ouest du bassin (Figure 45b). Cela signifie que les parties est et sud-ouest souffrent fréquemment de conditions de sécheresse extrême, tandis que les parties nord-ouest et centrale de la zone d'étude souffrent de graves conditions de sécheresse fréquentes.



**Figure 49 :** Occurrences de sécheresse sévère au pas de 12 mois.



**Figure 50 :** Occurrences de sécheresse extrême au pas de 12 mois.

Les études précédentes sur la variabilité des précipitations dans le nord-ouest de l'Algérie ont signalé la sécheresse dans les années quarante du siècle dernier et ont révélé une diminution des pluies de printemps comme une raison potentielle [97]. 1944 est caractérisée comme une année humide et les deux décennies les plus humides suivent dans les années 1950 et 1960 [98]. La décennie de sécheresse dans les années 1970 a été détectée par [97-99] dans le bassin de la Tafna. Cette tendance à la baisse est également évidente dans la région méditerranéenne du nord du Maroc [98, 100] et peut s'expliquer par un changement de la circulation atmosphérique [101]. La situation évolue avec une année pluvieuse en 1975. Vient ensuite une année sèche en 1976 [99], puis l'occurrence des deux décennies les plus sèches des années 1980 et 1990 [97, 98]. Surtout dans les années 1980, un niveau sec est dû à une diminution des précipitations hivernales [102] et à la fluctuation vers les années humides après la date de rupture en 2007, qui est entraînée par une augmentation de la tendance des précipitations à l'automne. Cela génère un ruissellement conduisant à de fortes inondations, qui peuvent être qualifiées de modérées à élevées par rapport aux résultats trouvés dans les principaux fleuves d'Europe et d'Afrique [103]. Ceci est confirmé par les résultats de notre étude avec le test de Mann-Kendall et la méthode de Sen, qui ont indiqué une tendance à l'augmentation significative des précipitations pendant la saison d'automne.

## **10. Conclusion :**

Le calcul de l'indice pluviométrique standardisé nous a permis de localiser les phases déficitaires (1980-1989 ; 1990-1999), et les phases normales voire excédentaires de (1970-1979 et 2000-2011), situant et limitant ainsi chaque zone sous le régime qui prévaut en l'occurrence sec ou humide selon l'indice obtenu.

À l'échelle annuelle, 47 % des sécheresses sont survenues lors des trois dernières décennies du

20ème siècle. Elles sont les plus persistantes et fréquentes, étalées sur quatre à six années consécutives, tandis que les sécheresses observées les années 70 étaient plutôt isolées sauf exception la station de Sidi bel abbes.

Ainsi, les sécheresses, les plus sévères sont celles des années 1980-1989,1990-1999 elles ont touché la majorité Ouest de notre zone d'étude.

La cartographie montre qu'au cours de ce siècle, le bassin versant de la Macta a connu une succession de périodes à déficits et de périodes à excédents pluviométriques sans toutefois, pouvoir parler de cycle. Il apparaît d'une façon générale une tendance de baisse de la pluviométrie était marquée pendant le début des années 70. La fluctuation la plus brutale et la plus significative (au sens statistique du terme) est observée autour des années 80, au cours desquelles on note une diminution généralement assez importante de la pluviométrie annuelle. Cette période déficitaire se caractérise par son intensité et sa durée.

# *Conclusion générale*

## CONCLUSION GENERALE

L'objectif de ce travail était de contribuer à l'étude de la variabilité multi échelle de la pluviométrie observée dans le bassin versant de la Macta, particulièrement sur la période 1970-2011, et d'évaluer l'impact de cette variabilité sur la répartition spatiotemporelle des sécheresses. Sa principale originalité a été d'étudier les tendances des séries mensuelles, saisonnières et annuelles, mais aussi de réactualiser la carte des précipitations de la zone.

L'analyse des tendances des précipitations saisonnières a prouvé que la saison de l'hiver et le printemps sont les plus touchés par la sécheresse. Meddi (2002) confirme que 40% de la diminution de la pluviométrie se situe au niveau de l'hiver et du printemps. Medjerab (2005) affirme que le printemps enregistre une diminution des précipitations. Nous avons aussi décelé une croissance pendant la saison de l'été.

L'utilisation de la méthode innovante de l'analyse des tendances de Şen (2012), a permis de déterminer les tendances de nos stations. Chaque série est divisée en deux parties. Les deux moitiés ordonnées sont ensuite comparées. D'une manière générale, les stations situées au Centre Nord de la Macta ont une pluviométrie plus faible par rapport à la première moitié. Par contre les stations du Sud ont des pluviométries à la hausse. Meddi (2003) constate qu'à partir de 1980, l'ensemble du pays, et surtout sa partie ouest, est touché par une réduction de la pluviométrie qui dépasse 60%.

Sur le plan national, le calcul de l'indice pluviométrique standardisé annuel révèle que 49 % des sécheresses sont survenues lors des trois dernières décennies du 20<sup>ème</sup> siècle. Elles sont les plus persistantes et fréquentes, étalées sur quatre à cinq années consécutives, tandis que les sécheresses observées les années 70 étaient plutôt isolées sauf exception la région de Sidi bel abbes (sous bassin de Mekker).

Ainsi, les sécheresses, les plus sévères sont celles des années 1980-1989 et 1990-1999, elles ont touché la majorité d'Ouest de la zone étudiée.

À l'échelle régionale, les sécheresses les plus importantes ont été signalées au niveau de la région Centre-Ouest de la zone d'étude également à son centre. Cela explique la forte réduction pluviométrique constatée dans cette région. Ces résultats permettent de confirmer la tendance à l'assèchement qui s'est accentuée lors des décennies 80-89 ; 90-99 au niveau de la région.

Pour finaliser notre travail d'étude, nous avons créé des cartes de répartition spatiale des pluies, la réactualisation de la carte des précipitations moyennes annuelles de la zone concernée a été élaborée, en plus des éléments ci-dessus, en utilisant la méthode dite " pondération inverse de la distance " (Inverse Distance Weighting ou IDW qui se base sur l'interpolation de 42 stations.

Finalement, nous nous retrouvons avec des résultats obtenus qui offrent des informations sur l'intensité et la variabilité des précipitations et ses aspects spatio-temporels.

Du point de vue économique, ce travail permet aux décideurs, d'une part, de localiser spatialement les régions sujettes aux accidents pluviométriques. D'autre part pour identifier et

comprendre l'origine et les mécanismes de la variabilité pluviométrique qui constituent des préalables essentiels à la prévention et à la réalisation d'aménagements pour la lutte contre les aléas du climat et des tendances futures : changement climatique, de plus nos résultats pourraient être d'une grande utilité pour la première phase de la planification agricole et hydraulique, les activités agricoles sont fortement liées aux facteurs du climat.

## *Références bibliographiques*

*Références bibliographiques*

- [1] Duplessy J.C., 2001 : État des connaissances et incertitudes sur le changement climatique induit par les activités humaines. *Compte Rendu de l'Académie des Sciences, Paris, Sciences de la Terre et des planètes*, vol. 333, p. 765-773.
- [2] Leroux M., 2007 : Les échanges méridiens commandent les changements climatiques. Séminaire de travail "Évolution du climat", Académie des sciences, Paris, 12 p.
- [3] Christensen JH., Hewitson B., Busuijac A., Chen A., Gao X., Held I., Jones R., Kollir.K., Kwon W.T., Laprise R., Magaña Rueda V., Mears L., Menéndez C.G., J. Räisänen J., Rinke A., Sarr A. et Whetton P., 2007: Chapter 11: Regional climate projections. In : *Climate change 2007: the physical sciences basis, contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, Tignor M et H.L. Miller édit., Édit. Cambridge University Press, Cambridge/New York, p. 847-940.
- [4] OMM (2013), 2001-2010 : une décennie d'extrême climatique. Organisation Météorologique Mondiale, communiqué de presse n° 976.
- [5] Trenberth K.E., Jones P.D., Ambenje P., Bojariu R., Easterling D., Klein T A., Parker D., Rahimzadeh F., Renwick J.A., Rusticucci M., Soden B. et Zhai P., 2007 : Chapter 3: Regional climate projections. In : *Climate change 2007 : the physical sciences basis, contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, Tignor M et H.L. Miller édit., Édit. Cambridge University Press, Cambridge/New York, p. 235-336.
- [6] Le Monde, 2011 : Inondations : l'Australie s'attend à une facture record. URL : [http://www.lemonde.fr/asiе-pacifique/article\\_inondations-l-australie-s-attend-a-une-facture-record\\_1466392\\_3216.html](http://www.lemonde.fr/asiе-pacifique/article_inondations-l-australie-s-attend-a-une-facture-record_1466392_3216.html). (Date de consultation 17/01/2011)
- [7] Bossy D., 2013 : La mousson en Inde est-elle exceptionnelle en 2013. *Futur a Sciences*, URL <http://www.futurasciences.com/magazines/environnement/infos/actu/d/meteorologiemousson-inde-elle-exceptionnelle-2013-47361/>
- [8] Norrant C., 2004 : Tendances pluviométriques indicatrices d'un changement climatique dans le bassin méditerranéen de 1950 à 2000. Étude diagnostique. Thèse de l'Université de Provence (Aix Marseille I), 266 p.
- [9] Douguédroit A. et Bridier S., 2007 : Réchauffement climatique et évolution de l'environnement des stations en région méditerranéenne française (1951-2000). In : *Climat, tourisme, environnement, Actes du XXème colloque de l'Association Internationale de Climatologie (Carthage, Tunisie)*, H. BEN BOUBAKER édit., p. 204-209.
- [10] Rothschild E. et Beltrando G., 2007 : Évolution des températures observées en Suisse durant les dernières décennies. In : *Risques et changements climatiques, Actes du*

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

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

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

- [55] Khoualdia W., et Djebbar Y., 2012 : « Contribution à l'étude de la sécheresse et son impact sur les ressources en eau de surface du bassin versant nord de la Medjerda (Nord Est de l'Algérie) ». Colloque international «Géomatique et gestion des risques naturels» : 6-8 Mars 2012 université Oujda (Maroc).
- [56] Khoualdia W., et Djebbar Y., 2013: Caractérisation de la variabilité climatique dans le bassin versant de la Medjerda (Nord Est de l'Algérie). Colloque international «Hazards and Géomatics» : 17-20 Mai 2013 Hammamet - Tunisie.
- [57] Khoualdia W., Djebbar Y., et Hammar Y., 2014: Caractérisation de la variabilité climatique « cas du bassin versant de Medjerda » Nord- Est de l'Algérie. Rev. Sci. Technol., Synthèse 29: 6-23 (2014) (REVUE. SYNTHÈSE ANNABA)
- [58] Kettab A., Ait Mouhoub D., Ouarda T., Bobbee B., 2002 : Contribution à l'étude du phénomène de la sécheresse sur les régions littorales de l'Algérie » Laboratoire de recherche en Sciences de l'eau – LRS – EAU/ENP Ecole Nationale Polytechnique (E.N.P) – Alger; Colloque international sur l'eau, Chelef, 05/06/février, Algérie.
- [59] Meddi H. & Meddi M., 2009 : Variabilité des précipitations annuelles du Nord-Ouest de l'Algérie. Sécheresse, Vol 20, 57-67.
- [60] Beersma, J. J., and T. A. Buishand (2004), Joint probability of precipitation and discharge deficits in the Netherlands, *Water Resour. Res.*, 40, W12508, doi: 10.1029/2004WR003265.
- [61] Lloyd-Hughes, B., Saunders, M., (2002) *International Journal of Climatology*, "Adroght Climatology for Europe" *Int. J. Climatol.* 22: 1571–1592
- [62] OMM-WMO., 2000. Detecting trend and other changes in hydrological data. In : Kundzewicz ZW, Robson A, eds. World Climate Programme Data and Monitoring. WCDMP-45. WMO/TD-n° 1013. Genève.
- [63] Svoboda M., Hayes M., Heim R., Gleason K., Angel J., Rippey B., Tinker R., Palecki M., Stooksbury D., Miskus D., et Stephens S., 2002 : The drought monitor, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 83, 1181–1190
- [64] Robles M., López N., Gadsden H., Pineda R., Reyes-Gómez M. et Hinojosa R., 2006 : Analyse des déficits hydriques dans l'état de Chihuahua (Mexique). *Sècheresse*, 17(4), 457-465.
- [65] Jarraud M., 2006 : changements climatiques et gestion des risques, conférence de presse l'Organisation météorologique mondiale (OMM), La Pastorale » Route de Ferney 106, Genève.
- [66] Djedjai H., 1997. Etat de la qualité des eaux superficielles du bassin versant de la Macta. Projet de coopération Algéro-Français.
- [67] BEDDAL D. 2015 : Analyse statistique des apports liquides en climat semi-aride, cas du bassin versant de la Macta. Mémoire de Magister, Univ. Chelef, Algérie.
- [68] Elouissi A., Şen Z. & M. Habi (2016). Algerian rainfall innovative trend analysis and its implications to Macta watershed. *Arabian Journal of Geosciences*. Vol 9, N 4.
- [69] Mann HB (1945) Nonparametric tests against trend. *Econometrica* 13:245–259.
- [70] KENDALL MG (1975) Rank correlation methods. 4th ed. London, UK. Charles Griffin. ISBN 0852641990 pp. 202.
- [71] Fatichi S, Ivanov VY, Caporali E (2013). Assessment of a stochastic downscaling methodology in generating an ensemble of hourly future climate time series. *Clim Dyn*

- 40:1841–1861
- [72] Gupta A (2007). *Large Rivers: Geomorphology and Management*, Wiley, Chichester, U.K.
- [73] Novotny EV and Stefan HG (2007). Stream flow in Minnesota: Indicator of climate change. *J. Hydrol.*, Vol. 334(3–4): 319–333.
- [74] Douglas EM and Fairbank CA (2011). Is precipitation in Northern New England becoming more extreme? Statistical analysis of extreme rainfall in Massachusetts, New Hampshire, and Maine and updated estimates of the 100-year storm. *J. Hydrol. Eng.*, Vol. 16(3): 203–217.
- [75] Ehsanzadeh E., Ouarda TB., and Saley HM (2011). A simultaneous analysis of gradual and abrupt changes in Canadian low streamflows. *Hydrol. Processes*, Vol. 25(5): 727–739.
- [76] Bao Z et al. (2012). Sensitivity of hydrological variables to climate change in the Haihe River basin, China. *Hydrol. Processes*, Vol. 26(15): 2294–2306.
- [77] Wagesho N Goel NK and Jain MK (2012). Investigation of non-stationarity in hydro-climatic variables at Rift Valley lakes basin of Ethiopia. *J. Hydrol.*, Vol. 444: 113–133
- [78] Lorenzo-Lacruz J Vicente-Serrano SM Lopez-Moreno JI Moran-Tejeda E and Zabalza J (2012). “Recent trends in Iberian streamflows (1945–2005).” *J. Hydrol.*, Vol. 30(7): 463–475.
- [79] Sharif M Archer D and Hamid A (2012). Trends in Streamflow Magnitude and Timings in Satluj River Basin. *World Environmental and Water Resources Congress 2012: 2013-2021*
- [80] Larsen J Ussing L and Brunø T (2013). Trend-Analysis and Research Direction in Construction Management Literature. *ICCREM 2013:73-82*.
- [81] Garbrecht J Van Liew M and Brown GO (2004). Trends in precipitation, streamflow, and evapotranspiration in the Great Plains of the United States. *J. Hydrol. Eng.*, Vol. 9(5): 360–367.
- [82] Haktanir T and Citakoglu H (2014). Trend, Independence, Stationarity, and Homogeneity Tests on Maximum Rainfall Series of Standard Durations Recorded in Turkey. *J. Hydrol. Eng.*, Vol. 19(9), 05014009.
- [83] Haan J Huang G Zhang H Li Z and Li Y (2014). Heterogeneous Precipitation and Streamflow Trends in the Xiangxi River Watershed, 1961–2010. *J. Hydrol. Eng.*, Vol. 19(6): 1247–1258.
- [84] Kim HS, Muhammad A, Maeng SJ (2016) Hydrologic Modeling for Simulation of Rainfall-Runoff at Major Control Points of Geum River Watershed. *Procedia Eng* 154:504–512.
- [85] Şen PK (1968) Estimates of the regression coefficient based on Kendall’s Tau. *J Am Stat Assoc* 63:1379–1389.
- [86] Shifteh Somee B, Ezani A, Tabari H (2012) Spatiotemporal trends and change point of precipitation in Iran. *Atmos Res* 113:1–12.
- [87] Yue S, Hashino M (2003) Long term trends of annual and monthly precipitation in Japan. *J Am Water Resour Assoc* 39:587–596.
- [88] Benzater B, Elouissi A, Benaricha B, Habi M (2019) Spatio-temporal trends in daily maximum rainfall in northwestern Algeria (Macta watershed case, Algeria). *Arab J*

- Geosci 12: 370.
- [89] Şen Z (2014) Trend identification simulation and application. *J Hydrol Eng* 19:635–642.
- [90] Meddi M, Arkamose AA, Meddi H (2010) Temporal variability of annual rainfall in the Macta and Tafna catchments, northwestern Algeria. *Journal of Water Resource Management* 24:3817–3833.
- [91] Meddi M, Talia A, Martin C (2009) Évolution récente des conditions climatiques et des écoulements sur le bassin versant de la Macta (Nord-Ouest de l'Algérie). *Physio-Géo* 3: 61–84.
- [92] Bootsma, R. E.(1996) Chemical composition of precipitation and its significance to the nutrient budget of Lake Malawi. In: “The chemical Composition of precipitation and its significance to the nutrient budget of Lake Malawi. Jonson T. C. et Odada E. O. (eds), Gordon and Breach, P. 251-266.
- [93] 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.
- [94] McKee, T.B.; Doesken, N.J.; Kleist, J (1995) Drought monitoring with multiple time scales. In Proceedings of the 9th Conference on Applied Climatology; AMS: Boston, MA, USA, 233–236
- [95] Vicente-Serrano SM, Beguería S, López-Moreno JI. 2010a. A multi-scalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index – SPEI. *J. Clim.* 23: 1696– 1718.
- [96] Trambly Y, Badi W, Driouech F, El Adlouni S, Neppel L, Servat E (2012) Climate change impacts on extreme precipitation in Morocco. *Glob Planet Chang* 82–83: 104–114.
- [97] Belarbi H, Touaibia B, Boumechra N, Amiar S, Baghli N (2017) Sécheresse et modification de la relation pluie–débit : cas du bassin versant de l’Oued Sebdou (Algérie Occidentale). *Hydrol Sci J* 62:124–136.
- [98] Ghenim AN, Megnounif A, Seddini A, Terfous A (2010) Fluctuations hydropluviométriques du bassin-versant de l’oued Tafna a` Béni Bahdel (Nord-Ouest algérien). *Sécheresse* 21:115–120.
- [99] Knippertz P, Ulbrich U, Marques F, Corte-Real J (2003) Decadal changes in the link between El Niño and springtime North Atlantic oscillation and European–North African rainfall. *Int J Climatol* 23:1293–1311.
- [100] Wang L, Chen W, Zhou W, Chan JCL, Barriopedro D, Huang R (2010) Effect of the climate shift around mid 1970s on the relationship between wintertime Ural blocking circulation and East Asian climate. *Int J Climatol* 30: 153–158.
- [101] Matari A, Douguedroit A (1995) Chronologie des précipitations et des sécheresses dans l’ouest Algérien. Les stratégies pour le contrôle des sécheresses. 9e conférence régionale afro-asiatique des irrigations et du drainage, 5-6 juin 1995, Alger, Algérie, Compte rendu, pp. 166-278.
- [102] Ketrouci K, Meddi M, Abdesselam B (2012) Study of the extreme floods in Algeria: The case of the Tafna catchment area. *Sécheresse* 23:297–305.