

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf - Mila

Institut des Sciences et de Technologie

Département de Génie Civil et Hydraulique



N° Ref :

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Spécialité : Hydraulique Urbaine

THEME

**Comparaison de la similitude entre l'indice SPI et
SPEI comme outils d'évaluation de la sécheresse
dans le Nord-Est de l'Algérie**

Réalisé par :

- **GUENOUCHE Mohamed Amine**

- **BOURTAL Haroun**

- **BOULBAIR Aissa**

Soutenu devant le jury :

M. KEBLOUTI Mehdi

M. KOUSSA Miloud

M. BERHAIL Sabri

Président

Examineur

Promoteur

Année universitaire : 2022/2023

Remerciements

La réalisation de ce mémoire a été rendue possible grâce à la contribution de plusieurs personnes à qui nous souhaitons exprimer toute notre reconnaissance.

Tout d'abord, nous tenons à remercier Dieu qui nous a accordé la santé ainsi que la capacité psychologique et physique pour mener à bien ce travail.

Ensuite, nous adressons notre plus profonde gratitude à nos encadrateurs, Monsieur BERHAIL Sabri, pour leur patience, leur disponibilité et surtout leurs précieux conseils qui ont enrichi nos réflexions.

Nous souhaitons également remercier tous les professeurs qui nous ont fourni les outils nécessaires à la réussite de nos études universitaires.

Nous exprimons notre reconnaissance envers nos amis et collègues qui nous ont apporté leur soutien tout au long de cette démarche.

Enfin, nous tenons à témoigner toute notre gratitude envers nos pères et nos mères pour leur confiance et leur inestimable soutien.

Dédicaces

*Nous dédions ce travail à nos **chers pères** pour leur soutien indéfectible tout au long de nos carrières.*

*À nos **chères mères**, en témoignage de notre éternelle reconnaissance. Que Dieu vous protège et vous accorde une bonne santé ainsi qu'une longue vie.*

*À nos **sœurs** et nos **frères** qui ont toujours su nous motiver, même dans les moments de doute.*

À tous les professeurs et à l'encadreur, nous vous souhaitons le meilleur, bonheur et succès dans vos carrières.

SOMMAIRE

Remerciements	I
Dédicaces	II
Sommaire.....	III
Liste des figures.....	V
Liste des tableaux.....	VI
Résumé.....	VII
Abstract.....	VIII
الملخص.....	IX

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

CHPITERE 1 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

1. INTRODUCTION :	2
2. Le climat et les changements climatiques :	2
2.1. L'effet de serre comme phenomene naturel :	2
2.2. Le changement climatique :.....	3
2.3. Les effets du changement climatique :	3
3. La secheresse :.....	3
4. Les type de secheresse :.....	3
4.1. La secheresse de type meteorologique :	4
4.2. La secheresse de type agricole :.....	4
4.3. La secheresse de type hydrologique :.....	4
4.4. La secheresse socio-economique :.....	4
5. Consequences et impact de la secheresse :.....	4
5.1. Conséquences sur la qualite de la ressources :	4
5.2. Conséquences economiques :.....	5
5.3. Conséquences sociales:.....	5
5.4. Conséquences sur la santé:	5
6. Indicateurs de secheresse :.....	6
7. Méthodes de suivi de la secheresse :	7
8. Sommaire des Indicateurs et indices.....	7
9. Designation de l'indice SPEI :.....	10
9.1. Évapotranspiration reelle et potentielle	11
10. Quelques etudes realisees sur la secheresse en Algerie :.....	11

CHPITERE 2: PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

1. Presentation de la zone d'etude :.....	13
2. Analyse de la pluviometrie :	15
3. Variation des precipitations annuelles dans le temps et dans l'espace :	16
4. Variation des precipitations saisonnieres :.....	16
5. Variation des temperatures annuelles :.....	19
6. Variation des temperatures saisonnieres :.....	20

CHAPITRE 3 : MATERIELS ET METHODES

1.Introduction :	23
2.Presentation Du Logiciel R :.....	23
3.Presentation De L'environnement Rstudio :.....	23
4.Spei Package	24
5.Donnees de l'indice Standardise De Precipitations EtD'evapotranspiration (SPEI) :	28
6.Parametres descriptifs des sequences de secheresse :.....	31
7.Les Differentes Interpretations de l'indice SPEI :	31
7.1. Indice SPEI sur 3 mois	32
7.2. Indice SPEI sur 6 mois (Moyen Terme)	33
7.3. Indice SPI sur 12 mois et jusqu'a 24 mois (Long Terme)	34
8.Bland And Altman Plot :.....	34
9.Cohen's Kappa Test :	34
10.Analyse de la tendance de l'indice SPEI par la methode ITA :	36

CHAPITRE 4 : RESULTATS ET DISCUSSIONS

1.Comparaison entre les indices SPI et SPEI :	38
2.Relation lineaire Entre SPI et SPEI	40
3. Niveau d'accord Entre SPI et SPEI :.....	44
4.Characterisation de la sechresse dans la Wilaya de Mila :.....	45
5.Analyse de la secheresse meteorologique de la wilaya de Mila	46
6.Analyse de tendance des periodes seche et humide :	47

CONCLUSION GENERALE	50
----------------------------------	----

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	51
--	----

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Situation géographique de la région d'étude	13
Figure 2 : Localisation des stations pluviométriques dans la zone d'étude	15
Figure 3 : Carte de la pluie moyenne interannuelle de la zone d'étude (1981-2021)	16
Figure 4 : Carte de la pluie moyenne saisonnière de la zone d'étude (1981-2021)	19
Figure 5 : Carte de la température moyenne annuelle de la zone d'étude (1981-2021)	20
Figure 6 : Carte de la température moyenne saisonnière de la zone d'étude (1981-2021)	22
Figure 7 : l'écran RStudio	24
Figure 8 : Installation du package SPEI	25
Figure 9 : Importation des données	25
Figure 10 : Sélectionnement de fichier Excel	25
Figure 11 : Visualisation des données	26
Figure 12 : Calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP)	26
Figure 13 : Résultats de calcul de déficit hydrique	27
Figure 14 : Résultats de calcul de l'SPEI 3	27
Figure 15 : Graph de l'indice SPEI à l'échelle de 3 mois	28
Figure 16 : Eléments descriptive des séquences de sécheresse	31
Figure 17 : Modèle de la méthode innovante d'analyse de tendance (ITA) montre la zone de tendance à la hausse et à la baisse.	36
Figure 18 : Analyse de la variation temporelle des indices SPI et SPEI à échelle multiple de 1981 à 2021 à la wilaya de Mila.	39
Figure 19 : Graphique de matrice de corrélation avec niveaux de signification entre les indices SPI et SPEI aux échelles de temps de 3, 9, 12 et 24 mois.	41
Figure 20 : Diagramme de dispersion montrant la relation linéaire entre les indices SPI et SPEI à différentes échelles de temps pour la période 1981-2021 à la wilaya de Mila.:	43
Figure 21 : Graphique de Bland et Altman pour les indices SPI et SPEI aux échelles de temps	44
Figure 22 : le découpage administratif de la wilaya de Mila	45
Figure 23 : Exemple des résultats de la méthode ITA pour les SPI (3, 9, 12 et 24 mois) à la wilaya de Mila.	48

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Différents types d'indicateurs de sécheresse	8
Tableau 2 : Caractéristiques géographiques de la zone d'étude	14
Tableau 3 : Catégories de sécheresse et d'humidité définies par les valeurs du SPEI	30
Tableau 4 : Plages de la statistique Kappa K et force correspondante de l'accord.	35
Tableau 5 : Valeurs du coefficient de Pearson au ou seuil de significativité <0.001	42
Tableau 6 : Test de degré d'accord entre SPI et SPEI.....	42
Tableau 7 : Caractéristiques de la sécheresse sur une échelle de temps de 3 et 12 mois pour la wilaya de Mila.	46
Tableau 8 : Nombre de mois et fréquences des classes de sécheresse sur une échelle de temps de 3 et 12 mois pour la wilaya de Mila	47
Tableau 9 : Résultats des tendances de l'SPEI par la méthode ITA.....	48

Résumé

Cette étude vise à comparer le niveau d'accord entre l'Indice de Précipitation Standardisé (SPI) et l'Indice de Précipitation Évapotranspiration Standardisé (SPEI), une variante de ce dernier, à différentes échelles de temps, notamment 3, 9, 12 et 24 mois. Les données ont été collectées à partir de 81 stations pluviométriques situées dans le Nord-Est de l'Algérie sur une période de 42 ans, de 1981 à 2021. Nous avons utilisé les statistiques de Cohen's Kappa et la méthode de Bland-Altman pour évaluer le degré d'accord entre le SPI et le SPEI. De plus, la méthode d'Analyse de Tendances Innovante (ITA) a été utilisée pour analyser les tendances de sécheresse et d'humidité sévère et extrême dans la wilaya de Mila.

Les résultats obtenus à partir de la statistique de Cohen's Kappa ont révélé un niveau significatif d'accord entre les valeurs du SPI et du SPEI aux différentes échelles de temps. De plus, une corrélation linéaire positive ($r > 0,90$, $p < 0,0001$) entre les indices étudiés a été observée. La faible différence moyenne entre les analyses de Bland-Altman confirme le niveau d'accord entre les deux méthodes d'analyse.

Les résultats suggèrent également que le SPI peut être utilisé en l'absence de données de température pour calculer le SPEI. Par conséquent, il est acceptable d'utiliser le SPI, étant donné le degré acceptable d'accord entre les deux indices dans la zone d'étude. Cette étude souligne l'importance d'utiliser différents types d'indices de sécheresse pour évaluer la performance de la sécheresse dans des localisations spécifiques ou des zones géographiques afin de prendre des décisions éclairées.

Mots-clés : Changement climatique ; SPI ; SPEI ; graphique de Bland et Altman ; statistiques de Cohen's Kappa ; Degré d'accord.

Abstract

This study aims to compare the agreement level between the Standardized Precipitation Index (SPI) and the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI), a variant of the latter, at different time scales, including 3, 9, 12, and 24 months. The data were collected from 81 rainfall stations located in Northeast Algeria over a period of 42 years, from 1981 to 2021. Cohen's Kappa statistics and the Bland-Altman method were used to assess the agreement between SPI and SPEI. Additionally, the Innovative Trend Analysis (ITA) method was employed to analyze severe and extreme drought and moisture trends in the Mila province.

The results obtained from Cohen's Kappa statistics revealed a significant level of agreement between SPI and SPEI values at different time scales. Moreover, a positive linear correlation ($r > 0.90$, $p < 0.0001$) between the studied indices was observed. The small mean difference in the Bland-Altman analyses confirmed the agreement level between the considered analytical tools. Furthermore, the results suggest that SPI can be used when temperature data are unavailable to calculate SPEI. Therefore, it is acceptable to use SPI, as this study demonstrated an acceptable degree of agreement between these two scales in the study area. This study emphasizes the importance of using different types of drought indices to evaluate drought performance in specific locations or geographic areas for informed decision-making.

Keywords: Climate change; SPI; SPEI; Bland and Altman plot; Cohen's Kappa statistics; Degree of agreement

ملخص:

تهدف هذه الدراسة إلى مقارنة مستوى التوافق بين المؤشر المعياري للهطول (SPI) ومؤشر التبخر النصفى المعياري للهطول (SPEI) ، وهو مشتق من الأخير، على فترات زمنية مختلفة، بما في ذلك 3 و 9 و 12 و 24 شهراً. تم جمع البيانات من 81 محطة مطرية تقع في شمال شرق الجزائر على مدار 42 عامًا، من 1981 إلى 2021. تم استخدام إحصائيات كوهين كابا وطريقة بلاند-ألتمان لتقييم درجة التوافق بين SPI و SPEI. بالإضافة إلى ذلك، تم استخدام طريقة تحليل الاتجاهات المبتكرة (ITA) لتحليل اتجاهات الجفاف والرطوبة الشديدة في ولاية ميلة.

أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها من إحصائية كابا كوهين مستوى عالٍ من التوافق بين قيم SPI و SPEI في فترات زمنية مختلفة. بالإضافة إلى ذلك، لوحظ وجود علاقة خطية إيجابية $(r > 0.90)$ ، $p < 0.0001$ بين المؤشرات المدروسة. يؤكد الفرق المتوسط الصغير بين تحليلات بلاند-ألتمان مستوى التوافق بين الطريقتين.

تشير النتائج أيضًا إلى أنه يمكن استخدام SPI في حالة عدم توفر بيانات درجات الحرارة لحساب SPEI. لذلك، يعتبر استخدام المؤشر المعياري للهطول مقبولًا، نظرًا للتوافق المقبول بين المؤشرين في منطقة الدراسة. تسلط هذه الدراسة الضوء على أهمية استخدام أنواع مختلفة من مؤشرات الجفاف لتقييم أداء الجفاف في مواقع أو مناطق جغرافية محددة، وذلك من أجل اتخاذ قرارات مستنيرة فيما يتعلق بإدارة الموارد المائية والزراعة والتخطيط العمراني وغيرها.

الكلمات المفتاحية: تغير المناخ؛ SPI ؛ SPEI. الرسم البياني لبلاند والتمان ؛ إحصائيات كابا كوهين ؛ درجة الاتفاق.

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

La sécheresse est un phénomène climatique qui a des conséquences significatives sur l'environnement, l'agriculture et la société. Comprendre et évaluer de manière précise la sécheresse est crucial pour une gestion efficace des ressources en eau et le développement de stratégies d'adaptation. Dans cette optique, de nombreux indices de sécheresse ont été développés pour quantifier et surveiller les conditions de sécheresse.

Dans le cadre de cette étude, nous nous proposons de comparer les résultats de deux indices de sécheresse couramment utilisés : l'Indice de Précipitation Standardisé (SPI) et l'Indice de Précipitation Évapotranspiration Standardisé (SPEI). Cette comparaison sera réalisée à différentes échelles de temps dans le Nord-Est de l'Algérie, une région sujette à des variations climatiques marquées et à des conditions de sécheresse récurrentes.

Le **premier chapitre** de ce travail sera consacré à une synthèse bibliographique sur le changement climatique, la sécheresse du régime pluviométrique à travers le monde, en particulier en Méditerranée et en Algérie. Nous y résumerons les principales conclusions des nombreuses études menées sur ce sujet.

Le **deuxième chapitre** présentera une description détaillée de la zone d'étude, mettant en lumière les caractéristiques climatiques, géographiques et environnementales spécifiques du Nord-Est de l'Algérie.

Le **troisième chapitre** décrira en détail les matériaux et les méthodes utilisés dans notre étude. Cela comprendra la description des données utilisées, les techniques d'analyse statistique employées, ainsi que les procédures de calcul et de comparaison des indices SPI et SPEI à différentes échelles de temps. Cette section garantira la transparence et la reproductibilité de nos résultats.

Le **quatrième chapitre** présentera les résultats obtenus et les discussions qui en découlent. Nous examinerons les associations et les différences entre les indices SPI et SPEI, en nous appuyant sur les analyses statistiques réalisées. Nous discuterons également des implications de ces résultats pour la compréhension des conditions de sécheresse dans le Nord-Est de l'Algérie.

Enfin, la conclusion générale récapitulera les principales conclusions de notre étude, mettra en évidence les contributions spécifiques apportées à la recherche sur la sécheresse dans la région étudiée, et identifiera les perspectives de recherche futures. Cette section permettra de dresser un bilan de notre travail et de souligner son importance pour la gestion des ressources en eau et l'adaptation aux conditions de sécheresse.

CHAPITRE 1 :

Synthèse bibliographique

1. INTRODUCTION :

Depuis le début de la révolution industrielle, l'impact des activités humaines sur l'environnement est devenu de plus en plus important, altérant l'équilibre climatique et ayant ainsi des effets sur les précipitations.

Les conséquences de ces changements climatiques se manifestent par des pics de température, des sécheresses, des inondations ainsi qu'une élévation du niveau de la mer. Aujourd'hui, les changements climatiques sont considérés comme l'une des plus grandes menaces sur l'environnement et le bien-être humain.

La première partie de ce chapitre consiste à présenter des généralités concernant le sujet du changement climatique. La seconde partie a comme objectif de mettre en évidence la sécheresse en présentant les différentes études et travaux effectués sur ce sujet puisqu'il représente un phénomène d'actualité mais également l'une des conséquences la plus dominante des changements climatiques.

2. LE CLIMAT ET LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES :

Le climat définit et explique les conditions de l'atmosphère d'un lieu à moyen et long terme alors que la météorologie s'intéresse au court terme et notamment aux prévisions sur quelques jours. La climatologie étudie les composantes et les variations des climats sur la surface de la terre. Le climat est une succession de type de temps avec des caractères relativement constants mesurés sur trente ans. La climatologie se préoccupe alors davantage des facteurs géographiques (répartition des terres et des mers, volumes de relief...) pour expliquer les irrégularités et définir différents types de climat.

2.1. L'effet de serre comme phénomène naturel :

Dans l'atmosphère (qui entoure la Terre) on retrouve une couche de gaz : les gaz à effet de serre. Cette couche de gaz agit comme les fenêtres d'une serre et capte la chaleur du soleil. Les rayons du soleil traversent cette couche de gaz et s'en vont réchauffer la surface de la Terre. La surface de la Terre, ainsi réchauffée, réémet des radiations vers l'atmosphère. Toutefois, la couche de gaz à effet de serre absorbe une grande quantité de ces radiations, les empêchant de retourner dans l'espace. Ceci augmente la température à la surface de la Terre en assurant une température moyenne globale de 15°C, Sans l'effet de serre, la température à la surface de la Terre serait de -18°C [1].

Depuis l'ère industrielle, les êtres humains ont augmenté la concentration des gaz à effet de serre, dans l'atmosphère, en raison de diverses activités : la combustion du charbon, du pétrole et du gaz naturel, la déforestation, la présence d'anciens dépotoirs et d'autres activités. Cette augmentation des gaz à effet de serre épaissit la couche de gaz qui capte alors plus de radiations, élevant ainsi la température globale à la surface de la Terre. Les scientifiques ont remarqué une augmentation de la température globale de 0,60C au cours du siècle dernier. Cette variation de la température, qui est très rapide, comparativement aux changements déjà arrivés sur Terre de façon naturelle, entraîne le changement climatique [2].

2.2. Le changement climatique :

Les changements climatiques se réfèrent à des changements de climat qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables [3].

2.3. Les effets du changement climatique :

La Méditerranée, en particulier la rive Sud et Est, est et sera plus touchée par le changement climatique que la plupart des autres régions du monde au cours du 21^{ème} siècle. Les impacts du changement climatique sont :

- La hausse des températures,
- La diminution des précipitations,
- L'augmentation du nombre et de l'intensité des événements extrêmes
- La hausse possible du niveau de la mer

Tous ces impacts se superposent et amplifient les pressions liées aux activités humaines déjà existantes sur l'environnement naturel.

Les répercussions de ces impacts sur l'environnement sont les suivantes :

- La diminution de la mobilisation des eaux de surface due à une baisse du ruissellement superficiel et à une fréquence de plus en plus grande des périodes de sécheresse.
- La dégradation accélérée des sols par l'accroissement de l'érosion hydrique et éolienne, et leur salinisation due à une plus forte évaporation doublée d'une baisse des pluies.
- L'occurrence et l'intensité de plus en plus grande des inondations.
- La surexploitation des nappes d'eau souterraines.
- L'élévation du niveau de la mer.
- L'accentuation de la vulnérabilité des cultures pluviales provoquée par une augmentation de l'évapotranspiration et une disponibilité plus faible des eaux de précipitations.

3. LA SECHERESSE :

Une sécheresse se définit comme un déficit hydrique d'une composante (au moins) du cycle hydrologique [4], la sécheresse est un phénomène naturel qui pose de nombreux problèmes à travers le monde, dans les pays sous-développés, les effets peuvent être néfastes. Selon l'Organisation météorologique mondiale (OMM) près de 1,3 milliards en sont mortes de causes directes ou indirectes, l'Algérie est particulièrement concernée par les effets du changement climatique sur l'augmentation en fréquence et en intensité des sécheresses.

4. LES TYPE DE SECHERESSE :

La sécheresse est aussi définie selon les différents secteurs qui interagissent avec ses effets. On définit donc une sécheresse du point de vue météorologique, hydrologique, agricole ou socio-économique [6].

4.1. La sécheresse de type météorologique :

Elle est généralement définie par un seuil correspondant à un certain déficit de précipitations sur une période de temps déterminée. Le seuil choisi (par exemple 75 % de la normale) et la durée de la période (par exemple six mois) varient d'un endroit à l'autre selon les besoins des utilisateurs ou les applications concernées.

La sécheresse de type météorologique est un phénomène naturel dû à des causes multiples, qui varient d'une région à l'autre [7].

4.2. La sécheresse de type agricole :

Elle se définit plus volontiers par la présence dans le sol d'une quantité d'eau suffisante pour assurer la croissance des cultures et du fourrage que par l'écart des précipitations par rapport à la normale sur une période de temps déterminée. Il n'y a pas de relation directe entre la hauteur de précipitation et l'infiltration des précipitations dans le sol. Le taux d'infiltration varie en fonction des conditions d'humidité antérieures, de la pente de la nature du sol et de l'intensité des précipitations. Les sols ont aussi des caractéristiques variables : certains ont une faible capacité de rétention d'eau et sont donc plus sujets à la sécheresse de type agricole.

4.3. La sécheresse de type hydrologique :

Elle correspond à une diminution des réserves d'eau dans les cours d'eau, les réservoirs de surface et la nappe phréatique. La sécheresse hydrologique est causée par un manque de précipitations accompagné d'une évaporation massive. Cependant, des facteurs non météorologiques, comme la demande en eau, la disponibilité de réservoirs de surface et le forage de puits artésiens, en aggravent l'effet [8].

4.4. La sécheresse socio-économique :

Elle diffère fortement des autres types de sécheresse du fait qu'elle reflète la relation entre l'offre et la demande de certaines denrées ou de certains biens économiques (i.e. grains, fourrage, énergie hydro-électrique...,etc.) qui sont tributaires des précipitations.

5. CONSEQUENCES ET IMPACT DE LA SECHERESSE :**5.1. Conséquence sur la qualité de la ressource :****❖ Risque accru de la pollution :**

La moindre capacité de dilution des rejets ponctuels (qui peuvent être importants dans les zones touristiques) ou accidentels par la faiblesse des débits augmente l'impact des rejets dans le milieu.

❖ Augmentation des températures de l'eau :

Dégradation de la qualité physicochimique des milieux et diminution de l'oxygène dissous, nécessaire à la vie aquatique.

❖ Aggravation des conséquences de l'eutrophisation des plans d'eau :

Le manque d'oxygène entraîne une libération de phosphore et d'azote contenus dans le sédiment, ce qui amène la prolifération de nouvelles algues. L'eutrophisation altère les conditions de reproduction et d'alimentation des poissons, favorise le développement des algues filamenteuses qui dégrade la qualité des herbiers (lieux d'abri) et engendre une diminution de la transparence. La baignade peut alors être interdite pour raison de sécurité.

5.2. Conséquences économiques :**❖ Irrigation :**

Pertes économiques importantes (rendements en forte baisse si apport d'eau insuffisant). Les pertes d'une exploitation type de la région Midi-Pyrénées sont estimées à 54% de son profit lorsqu'elle est touchée par les interdictions d'irrigation.

❖ Elevage :

Crise fourragère, augmentation des prix des aliments pour le cheptel. Certains éleveurs réduisent le nombre de bêtes pour pouvoir les nourrir. Problème d'alimentation en eau du bétail possible dans certaines zones.

❖ Tourisme :

Altération de la qualité des eaux de baignade (turbidité, développement d'algues, de cyanobactéries), côtes des plans d'eau insuffisantes avec problème d'accès aux plages, réduction des activités nautiques et annulation de manifestations de sport d'eau vive (Kayak).

❖ Industrie :

Arrêt partiel ou total d'activité, en particulier pour les entreprises utilisatrices d'eau implantées sur des ressources déficitaires.

❖ Activités aquacoles et halieutiques :

Les activités de pêche sont réduites et l'équilibre des milieux littoraux supports des productions conchylicoles est fragilisé. Le risque de mortalités s'accroît et peut entraîner des pertes de production.

5.3. Conséquences sociales :

La limitation des usages (arrosage des jardins, lavage des voitures, arrosage des terrains de sport) peut engendrer des conflits d'usage importants sur les secteurs les plus touchés : actes de malveillance, manifestations, voire des différends pour l'accès à l'eau qui se règlent « à coup de fusil » comme pendant la sécheresse de 1989-1990.

5.4. Conséquences sur la santé :

Risque de rupture d'approvisionnement pour les prélèvements en eaux superficielles. Ce point fait l'objet d'une vigilance particulière de la part des préfetures qui peuvent demander une limitation de la consommation de la part des collectivités et des usagers.

6. INDICATEURS DE SECHERESSE :

Il est important de préciser ce que l'on entend par indicateurs et par indices de sécheresse.

Les **indicateurs** sont des variables ou des paramètres qui servent à décrire les conditions de sécheresse. Citons, par exemple, les précipitations, la température, l'écoulement fluvial, le niveau des nappes et des réservoirs, l'humidité du sol et le manteau neigeux.

Les **indices** sont le plus souvent des représentations numériques de l'intensité des sécheresses, que l'on calcule à partir de valeurs climatiques ou hydrométéorologiques, dont les indicateurs précités. Ils mesurent l'état qualitatif d'une sécheresse à un emplacement donné pour une période donnée. Techniquement, ce sont eux aussi des indicateurs.

La surveillance du climat à diverses échelles temporelles permet de détecter de brefs épisodes humides au sein de longues périodes de sécheresse ou de brefs épisodes secs au sein de longues périodes d'humidité. Les indices simplifient parfois certaines relations complexes et facilitent la communication d'informations à divers utilisateurs et parties prenantes, dont le public. Ils servent à établir l'intensité, l'emplacement, l'époque d'apparition et la durée d'un épisode de sécheresse. L'intensité désigne l'écart que présente un indice par rapport à la valeur normale. Un seuil d'intensité peut être fixe pour déterminer quand une sécheresse a commencé, quand elle s'est achevée et quelle zone a été touchée. L'emplacement désigne la zone géographique qui subit les conditions de sécheresse. L'époque d'apparition et la durée renvoient aux dates approximatives auxquelles ces conditions se sont installées et ont cessé. Les impacts dépendent de la conjonction du phénomène dangereux lui-même, des éléments qui y sont exposés (personnes, terres agricoles, réservoirs, sources d'approvisionnement en eau) et de la vulnérabilité de ces derniers. Les sécheresses antérieures peuvent avoir accentué la vulnérabilité, par exemple en provoquant la vente de biens de production pour parer à des besoins immédiats. L'époque d'apparition d'une sécheresse peut, autant que son intensité, déterminer les impacts subis. Une sécheresse de courte durée et d'intensité modérée qui survient alors qu'une culture bien établie est sensible à l'humidité a parfois un effet plus dévastateur sur le rendement qu'une sécheresse longue et intense qui survient à un moment moins crucial du cycle de culture. Les indices de sécheresse – complétés par des informations sur les éléments exposés et sur leur vulnérabilité propre – sont donc essentiels pour suivre et anticiper les impacts.

Certains présentent en outre l'immense avantage de fournir aux planificateurs et aux décideurs une valeur de référence historique qui donne une idée de la probabilité que survienne ou que se répète une sécheresse d'intensité particulière. Il faut savoir néanmoins que l'évolution du climat commencera à modifier les configurations passées.

Les informations tirées des indicateurs et des indices sont utiles pour planifier et concevoir des applications (évaluations des risques, systèmes d'alerte précoce, outils d'aide à la décision en vue d'atténuer la menace dans les zones touchées) à condition de connaître le régime climatique et la climatologie des sécheresses dans la région. De plus, divers indicateurs et indices peuvent servir à valider les résultats obtenus par modélisation, par assimilation ou par télédétection.

7. MÉTHODES DE SUIVI DE LA SÉCHERESSE :

Il existe essentiellement trois façons de surveiller les conditions de sécheresse et de faciliter l'alerte précoce et l'évaluation :

1. Utiliser un seul indicateur ou indice ;
2. Utiliser plusieurs indicateurs ou indices ;
3. Utiliser des indicateurs composites ou hybrides.

Par le passé, les décideurs et les scientifiques analysaient un seul indicateur ou indice car ils ne disposaient pas d'autres éléments de mesure ou manquaient de temps pour obtenir des données et calculer des indices dérivés ou d'autres valeurs. On observe depuis une vingtaine d'années, dans le monde entier, un intérêt grandissant pour la mise au point de indices construits à partir de divers indicateurs qui conviennent pour différentes applications et échelles spatio-temporelles. Ces nouveaux outils ont offert une plus grande palette de choix aux décideurs et aux dirigeants mais, jusqu'à récemment, on ne disposait toujours pas d'une méthode claire pour synthétiser les résultats sous la forme d'un message simple qui puisse être transmis au public. L'arrivée des systèmes d'information géographique et l'augmentation de la puissance de calcul et d'affichage des ordinateurs ont permis de superposer, de cartographier et de comparer plusieurs indicateurs ou indices.

8. SOMMAIRE DES INDICATEURS ET INDICES

Les indicateurs et les indices cités dans le tableau 1 proviennent de documents publiés au titre du Programme de gestion intégrée des sécheresses ou par ses partenaires, ainsi que de recherches en ligne. Ils sont classés par type et facilité d'emploi et regroupés en cinq catégories :

- a) météorologie,
- b) humidité du sol,
- c) hydrologie,
- d) télédétection
- e) valeurs composites ou modélisées.

Bien que les indices soient classés par facilité d'emploi, il est possible que n'importe lequel ou l'ensemble d'entre eux convienne pour une application particulière, ou qu'aucun ne convienne, selon les connaissances et les besoins des utilisateurs et selon les données et les ressources informatiques à leur disposition. Les moyens à mettre en œuvre augmentent quand on passe du vert au jaune puis au rouge, comme cela est expliqué ci-après. Rappelons une fois encore que l'indicateur ou l'indice le plus simple n'est pas forcément le meilleur.

Un code de couleur indique la «facilité d'emploi» de chaque indicateur ou indice, comme suit :

Vert Un indice est codé vert si l'une au moins des conditions suivantes est remplie :

- Un logiciel ou programme d'exécution de l'indice est facilement et librement accessible ;
- Il n'est pas nécessaire de détenir des données quotidiennes ;
- Les données peuvent comporter des lacunes ;
- La valeur de sortie est produite en exploitation et accessible en ligne.

Note : Bien que le codage vert de la «facilité d'emploi» puisse suggérer que l'indicateur ou

l'indice est le plus simple à obtenir ou à utiliser, ce n'est pas nécessairement le meilleur pour une région ou une localité donnée. Il appartient à l'utilisateur de choisir les indicateurs ou les indices en fonction de l'application.

Jaune Un indice est codé jaune si l'une au moins des conditions suivantes est remplie :

- De multiples variables ou données d'entrée sont requises pour les calculs ;
- Il n'existe pas de logiciel ou de programme d'exécution de l'indice dans le domaine public ;
- Une seule variable ou donnée d'entrée est requise, mais il n'existe pas de logiciel ;
- La production de l'indice exige des calculs de complexité minimale.

Rouge Un indice est codé rouge si l'une au moins des conditions suivantes est remplie :

- Un logiciel doit être élaboré pour calculer l'indice selon une méthode publiée ;
- L'indice ou les éléments dérivés ne sont pas faciles à obtenir ;
- L'indice est peu connu et peu employé, mais il pourrait convenir ;
- L'indice renferme des données modélisées ou fait partie des calculs.

Tableau 1 : Différents types d'indicateurs de sécheresse [9]

Météorologie	Facilité d'emploi	Paramètres d'entrée	Informations complémentaires
AAI – Indice d'aridité anormale	Vert	P, T, EPT, ET	Disponible en exploitation pour l'Inde
Déciles	Vert	P	Facile à calculer ; les exemples provenant de l'Australie sont utiles
KBDI – Indice de sécheresse de Keetch-Byram	Vert	P, T	Calculs fondés sur le climat de la zone visée
SPI – Indice de précipitations normalisé	Vert	P	Recommande par l'OMM comme point de départ pour le suivi de la sécheresse météorologique
WASP – Anomalie pondérée des précipitations normalisées	Vert	P, T	Peut aussi servir à la classification des climats
AI – Indice d'aridité	Jaune	P, T	Peut aussi servir à la classification des climats
CMI – Indice d'humidité des cultures	Jaune	P, T	Valeurs hebdomadaires nécessaires
CZI – Indice Z chinois	Jaune	P	Destiné à améliorer le SPI
DAI – Indice de zone de sécheresse	Jaune	P	Donne une idée de la pluviosité pendant la mousson
DRI – Indice de détection de la sécheresse	Jaune	P, T	Requiert les valeurs mensuelles des températures et des précipitations
EDI – Indice de sécheresse efficace	Jaune	P	Programme disponible en contactant directement les concepteurs
NDI – Indice de sécheresse de la NOAA	Jaune	P	Destiné surtout aux applications agricoles

PDSI – Indice de sécheresse de Palmer	Jaune	P, T, TED	Code jaune en raison de la complexité des calculs et de la nécessité d'avoir des séries de données complètes
RAI – Indice d'anomalie de pluviosité	Jaune	P	Séries de données complètes requises
SAI – Indice d'anomalie normalise	Jaune	P	Description des conditions régionales à l'aide de données ponctuelles
SPEI – Indice de précipitations et d'évapotranspiration normalise	Jaune	P, T	Séries de données complètes requises ; valeurs de sortie similaires au SPI mais intégrant la température
ARID – Indice de référence pour la sécheresse agricole	Rouge	P, T, Mod.	Mis au point dans le sud-est des Etats-Unis d'Amérique, peu teste ailleurs
CSDI – Indice de sécheresse par type de culture	Rouge	P, T, Tr, V, Ray., TED, Mod., DC	Données de qualité requises pour de nombreuses variables, d'où une utilisation difficile
RDI – Indice de sécheresse du Bureau of Réclamation des Etats-Unis	Rouge	P, T, MN, RS, EF	Similaire au SWSI, mais intégrant la température
Humidité du sol	Facilité d'emploi	Paramètres d'entrée	Informations complémentaires
SMA – Anomalie d'humidité du sol	Jaune	P, T, TED	Destine à améliorer le bilan hydrique du PDSI
ETDI – Indice de déficit d'évapotranspiration	Rouge	Mod.	Calculs complexes et multiples valeurs d'entrée requises
SMDI – Indice de déficit d'humidité du sol	Rouge	Mod.	Valeurs hebdomadaires à différentes profondeurs ; calculs compliqués
SWS – Stockage d'eau dans le sol	Rouge	TED, RS, TS, DHS	Interpolation difficile sur de vastes étendues en raison des variations du type de sol et de culture
Hydrologie	Facilité d'emploi	Paramètres d'entrée	Informations complémentaires
PHDI – Indice de sécheresse hydrologique de Palmer	Jaune	P, T, TED	Séries de données complètes requises
SDI – Indice de sécheresse fonde sur l'écoulement fluvial	Jaune	EF	Calculs similaires à ceux du SPI, en remplaçant les précipitations par des données sur l'écoulement
SRSI – Indice d'alimentation des réservoirs normalise	Jaune	RS	Calculs similaires à ceux du SPI avec des données sur les réservoirs
SWSI – Indice d'apport d'eau de surface	Rouge	P, RS, EF, MN	Nombreuses méthodes et valeurs dérivées disponibles, mais la comparaison entre bassins est subordonnée à la méthode choisie
ADI – Indice de sécheresse agrège	Rouge	P, ET, EF, RS, TED, MN	Pas de programme, calculs expliqués dans les articles scientifiques

Note : Les indicateurs et les indices sont classés par «facilité d'emploi» puis, à l'intérieur de chacune de ces catégories, par ordre alphabétique de leur désignation française ou de l'abréviation anglaise communément employée.

Abréviation :

CC = coefficient de culture
CT = couverture terrestre
DC = données de culture
DHS = déficit hydrique du sol
EF = écoulement fluvial
ER = écorégion
ES = eaux souterraines
ET = évapotranspiration
ETP = évapotranspiration potentielle
MN = manteau neigeux
Mod. = valeur modélisée
P = précipitations
Plus. = plusieurs indicateurs
Ray. = rayonnement solaire
RS = réservoir
T = température
TED = teneur en eau disponible
Tr = température de rosée ou point de rosée
TS = type de sol
V = vent

9. DESIGNATION DE L'INDICE SPEI :

Origine : Défini par Vicente-Serrano et ses collaborateurs à l'Institut pyrénéen d'écologie de Saragosse (Espagne).

Caractéristiques : Cet indice relativement récent repose sur les mêmes bases que le SPI mais ajoute la température, pour tenir compte de l'effet de celle-ci sur la progression de la sécheresse par un calcul élémentaire du bilan hydrique. Il comporte une échelle d'intensité pour calculer les valeurs positives et négatives, qui signalent les épisodes humides et secs. Le pas de temps peut aller de 1 à 48 mois, voire plus. L'actualisation mensuelle permet l'utilisation en mode opérationnel ; plus la série de données est longue, plus les résultats seront robustes.

Paramètres d'entrée : Valeurs mensuelles des précipitations et des températures. On doit disposer d'une série complète de relevés dans laquelle ne manque aucun mois.

Applications : L'indice présente la même polyvalence que le SPI ; il peut servir à déceler et à suivre les conditions associées à une diversité d'impacts.

Points forts : En complétant les précipitations par la température, l'indice tient compte de l'effet de ce paramètre sur les conditions de sécheresse. Il s'applique à tous les régimes climatiques et les résultats peuvent être comparés car ils sont normalisés. Grace aux données de

température, le SPEI se prête particulièrement bien à l'analyse des impacts du changement climatique simulés au moyen de modèles selon divers scénarios d'évolution future.

Points faibles : La nécessité de disposer de jeux de données complets sur les températures et sur les précipitations risque de limiter l'emploi, si les séries disponibles comportent des lacunes. Comme il s'agit d'un indice mensuel, il pourrait ne pas déceler assez tôt les sécheresses qui s'installent rapidement.

9.1. ÉVAPOTRANSPIRATION REELLE ET POTENTIELLE

L'évaporation réelle (ETR), est la quantité d'eau évaporée ou transpirée par le sol, les végétaux et les surfaces libres pour une surface donnée. L'ETR étant difficile à mesurer, on peut calculer l'ETP, qui représente la quantité d'eau évaporée et transpirée en considérant que l'eau disponible n'est pas un facteur limitant. Ainsi l'ETP permet de mesurer la limite supérieure de l'ETR. De manière empirique, plusieurs méthodes permettant de calculer l'ETP ont été proposées.

La formule de Penman Monteith [10] a été adoptée par la FAO (Food and Agriculture Organization) ou encore l'ICID (International Commission on irrigation and Drainage) comme méthode standard pour calculer l'ETP. Cette formule repose sur le bilan énergétique et est assez complexe car elle prend en compte de nombreux facteurs comme la vitesse du vent, la durée réelle d'insolation, le flux radiatif etc. Mavromatis [11] a montré que calculer des indicateurs de sécheresses comme le PDSI en utilisant des méthodes simples ou complexes pour calculer l'ETP conduit à des résultats similaires. La formule proposée par Thornthwaite en 1948 est plus simple, car elle ne dépend que de la température et c'est pourquoi elle a été choisie pour calculer le SPEI [12].

Pour un mois donné :

$$ETP = 16 \left(10 \times \frac{T}{I}\right)^a \times K$$

$$a = \left(\frac{1.61}{100}\right) I + 0.5$$

$$I = \sum_{1}^{12} i$$

$$i = \left[\frac{T}{5}\right]^{1.51}$$

Avec :

ETP : Evapotranspiration potentielle (mm).

T : Température moyenne mensuelle du mois (°C).

I : Indice thermique annuel.

i : Indice thermique mensuel.

K : Coefficient d'ajustement.

10. QUELQUES ETUDES REALISEES SUR LA SECHERESSE EN ALGERIE :

Selon l'étude de Dechemi et al. [13] ont fait une simulation des débits moyens mensuels en

zone semi-aride (barrage de Beni-Bahdel), par l'application d'une analyse en composantes principales (ACP) et cela dans l'objectif de faire une bonne gestion des ressources en eau. Les sept premières composantes principales ont été retenue expliquant une variance de 89%, le résidu représente la perte de l'information dû à la négligence des autres composantes principales ; les résidus ont été analysé à l'aide des chaines de Markov. La simulation a abouti à des séries synthétiques utilisées donne la gestion des ressources en eau ces séries ont donné des résultats satisfaisant et ont montré la fiabilité de la méthode.

Une autre étude sur le phénomène de la sécheresse dans les régions littorales de l'Algérie a été faite par Bougara et al. [14] à l'aide de 08 stations météorologiques (Ghazaouat, Oran, Arzew, Alger, Chlef, Skikda, Annaba et El kala) qui couvrent 48 ans d'observations pluviométriques annuelles et mensuelles (de 1954 à 2001). Les méthodes utilisées sont les estimations par le modèle Jack Nife et par Bootstrap. L'utilisation de ces simulations a permis d'illustrer clairement l'information chronologique des pluies à l'échelle temporelle et font distinguer deux périodes ; la période humide qui s'étale de 1954 à 1986 et la période sèche qui correspond à la dernière décennie (1990-2000). Selon ces deux méthodes, le déficit pluviométrique est bien remarqué à l'Ouest (notamment à Oran, Ghazaouat et Arzew), les régions du Centre et de l'Ouest ont vu un déficit pluviométrique supérieur à 50% et à l'Est, il était de 30%, durant la période (1987-2001). D'autres auteurs ont examiné les crues et les déficits pluviométriques au niveau du bassin versant de l'oued Mina, par la méthode de l'analyse en composantes principale (ACP) qui sert à optimiser les données pluviométriques annuelles et reconstituer les séries hydrologiques, sur une période d'étude de 30 ans (allant 1970/71 à 1999/00). Les résultats ainsi obtenus sur le comportement de la pluie moyenne sur la première composante principale mettent en évidence une période excédentaire allant de 1970/71 à 1980/81, puis une période déficitaire de 1981/82.

L'étude faite par les auteurs concerne le Nord-Ouest de l'Algérie [15]. La méthode utilisée est le modèle numérique PLUVIA, qui permet l'établissement de la carte de la répartition spatiale de la pluviométrie à l'échelle mensuelle. Cette technique a permis de tracer les cartes pluviométriques des mois de janvier, mars et novembre en fonction de la topographie. L'avantage de cette méthode montre l'influence des paramètres topographiques sur la distribution spatiale des pluies à l'échelle régionale et locale. Les résultats obtenus montrent que, les pluies mensuelles augmentent du sud au nord et de l'ouest à l'est. La partie littorale et les sommets qui lui sont proches reçoivent les pluies les plus importantes et les régions intérieures reçoivent moins de pluies du fait de l'appauvrissement des masses nuageuses de leurs humidités au fur et à mesure qu'elles se dirigent vers l'intérieur.

CHAPITRE 2 :

Présentation de la zone d'étude

1. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE :

Situé au Nord-Est Algérien, notre zone d'étude comprenant les wilayas d'Annaba, Batna, Skikda, Souk Ahras, Sétif, Bordj Bou Arréridj, Tébessa, Mila, Oum El Bouaghi, M'Sila, Khenchela, Constantine, Jijel, Guelma, Béjaïa et El Tarf, qui présentent une diversité géographique, climatique et culturelle remarquable (Figure 1).

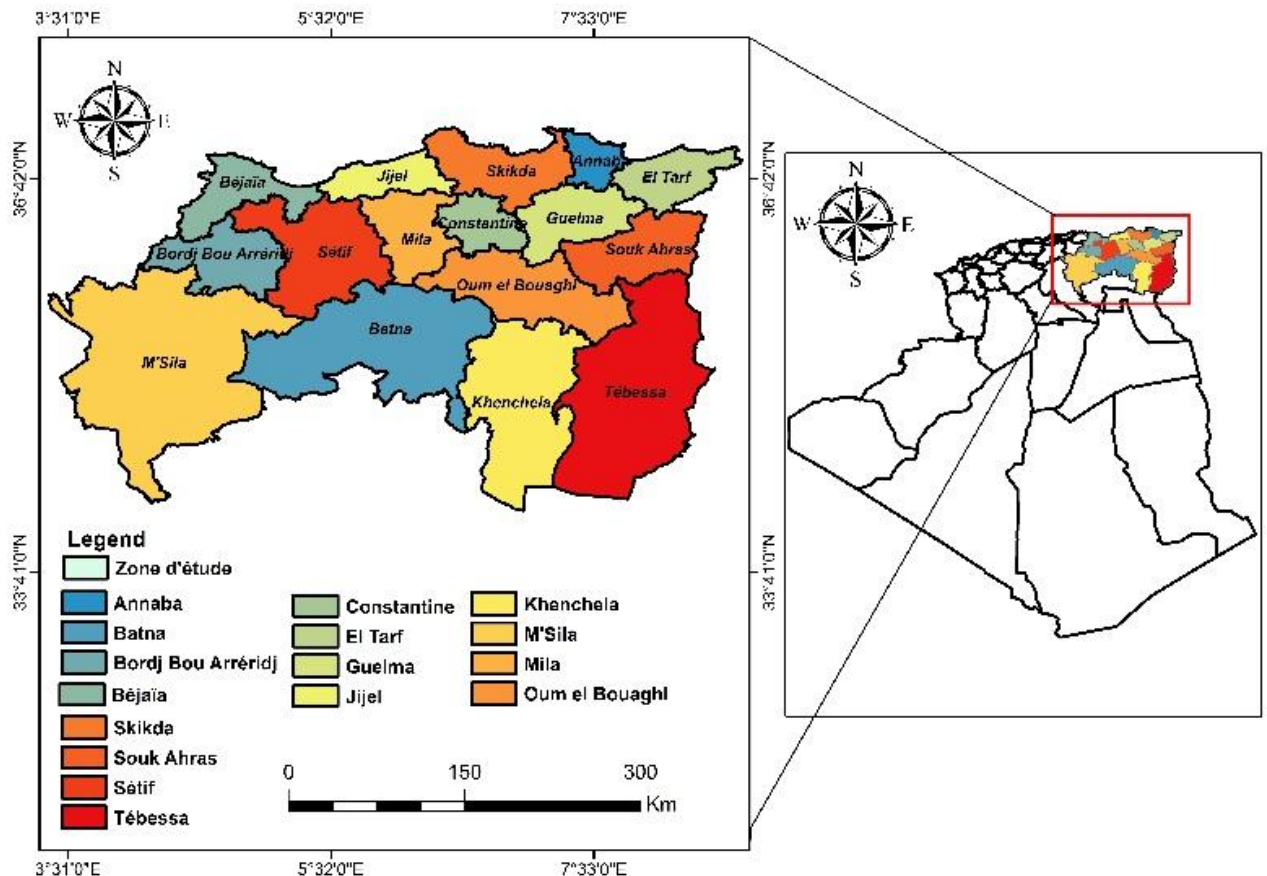


Figure 1 : Situation géographique de la région d'étude

Cette région est caractérisée par une combinaison de paysages côtiers, de montagnes majestueuses et de vastes plaines. Les wilayas côtières telles qu'Annaba, Skikda, Jijel, Guelma, Béjaïa et El Tarf offrent de magnifiques plages, des criques pittoresques et une richesse marine. Les montagnes des Aurès, présentes dans les wilayas de Batna, Sétif, Khenchela et M'Sila, offrent des paysages montagneux spectaculaires, des vallées verdoyantes et une biodiversité remarquable.

Les wilayas des Hauts Plateaux, telles que Souk Ahras, Bordj Bou Arréridj, Tébessa, Mila, Oum El Bouaghi et Constantine, sont caractérisées par des plaines fertiles propices à l'agriculture et à l'élevage. Constantine, surnommée la "Ville des Ponts Suspendus", est une ville emblématique avec ses ponts impressionnants et ses gorges profondes creusées par le fleuve Rhumel.

Sur le plan climatique, la zone d'étude présente une diversité de climats. Les wilayas côtières bénéficient d'un climat méditerranéen avec des hivers doux et des étés chauds, tandis que les

wilayas montagneuses connaissent des hivers plus froids et des étés plus frais. Les wilayas des Hauts Plateaux ont un climat continental, avec des variations saisonnières plus marquées.

Sur le plan culturel, la région du Nord-Est Algérien abrite un riche patrimoine historique et culturel. Chaque wilaya a ses propres traditions, festivals et sites archéologiques qui témoignent de l'histoire millénaire de la région. Des vestiges romains, des citadelles médiévales, des sites archéologiques berbères et des mosquées historiques font partie intégrante du paysage culturel de cette région.

Les localités étudiées (Tableau 2) se situent dans trois régions climatiques différentes. (1) La région méditerranéenne, qui se caractérise par des hivers doux et humides sous l'influence des vents d'ouest dominants, et des étés chauds, secs et calmes ; (2) une région subhumide avec des hivers doux mais frais et un léger risque de gel ; et (3) une zone semi-aride caractérisée par des hivers frais et des étés avec une température maximale de 26,8 °C en juillet à Tébessa et Khenchela, avec des taux d'humidité relative ne dépassant pas 38 %, selon Benarfa et al. [16].

Tableau 2 : Caractéristiques géographiques de la zone d'étude

Wilaya	Coordonnées			Surface (km ²)
	Latitude	Longitude	Altitude	
El Taref	36°46'07N	8°19'00E	14	3339
Annaba	36°53'59N	7°46'00E	0	1439
Skikda	36°51'44N	6°56'50E	25	4026
Jijel	36°47'59N	5°46'00E	47	2577
Bejaia	36°45'00N	5°04'49E	0	3268
Souk Ahras	36°16'07N	7°56'08E	686	4541
Guelma	36°27'58N	7°26'02E	256	4101
Constantine	36°21'54N	6°36'54E	626	2187
Setif	36°11'29N	5°24'34E	1080	6504
Bordj	36°04'00N	4°46'00E	900	4115
Bouarreridj	36°04'00N	4°46'00E	900	4115
Oum Bouaghi	36°52'39N	7°06'49E	902	7638
Mila	36°27'04N	6°15'55E	486	3407
M'Sila	36°43'32N	4°31'40E	475	18718
Batna	36°33'19N	6°10'43E	1048	12192
Tebessa	36°24'15N	8°07'27E	851	14227
Khenchela	36°26'09N	7°08'36E	1152	9211
Total				102090

En conclusion, la zone d'étude du Nord-Est Algérien, avec ses wilayas diverses, offre un cadre propice à la recherche scientifique multidisciplinaire. Les caractéristiques géographiques, climatiques et culturelles variées de cette région en font un domaine d'étude fascinant pour comprendre les dynamiques environnementales, la biodiversité, l'adaptation aux changements climatiques et l'interaction entre l'homme et son environnement.

2. ANALYSE DE LA PLUVIOMETRIE :

Les données pluviométriques ont été collectées auprès de 81 stations situées dans le Nord-Est de l'Algérie. Il convient de mentionner que les données de précipitations et de températures ont été obtenues à partir du site de la NASA, une source largement utilisée et reconnue par les chercheurs, dont les résultats sont souvent publiés dans des revues scientifiques. Les données nécessaires peuvent être téléchargées depuis le site <https://power.larc.nasa.gov/>.

La carte de localisation des stations pluviométriques est basée sur les coordonnées Lambert (figure 2). Cela permet de visualiser la répartition géographique des stations et de repérer les endroits où les mesures ont été prises.

Il est important de souligner que l'utilisation de ces données dans votre étude offre une base scientifique solide pour analyser les modèles de précipitations et les variations de température dans la région étudiée.

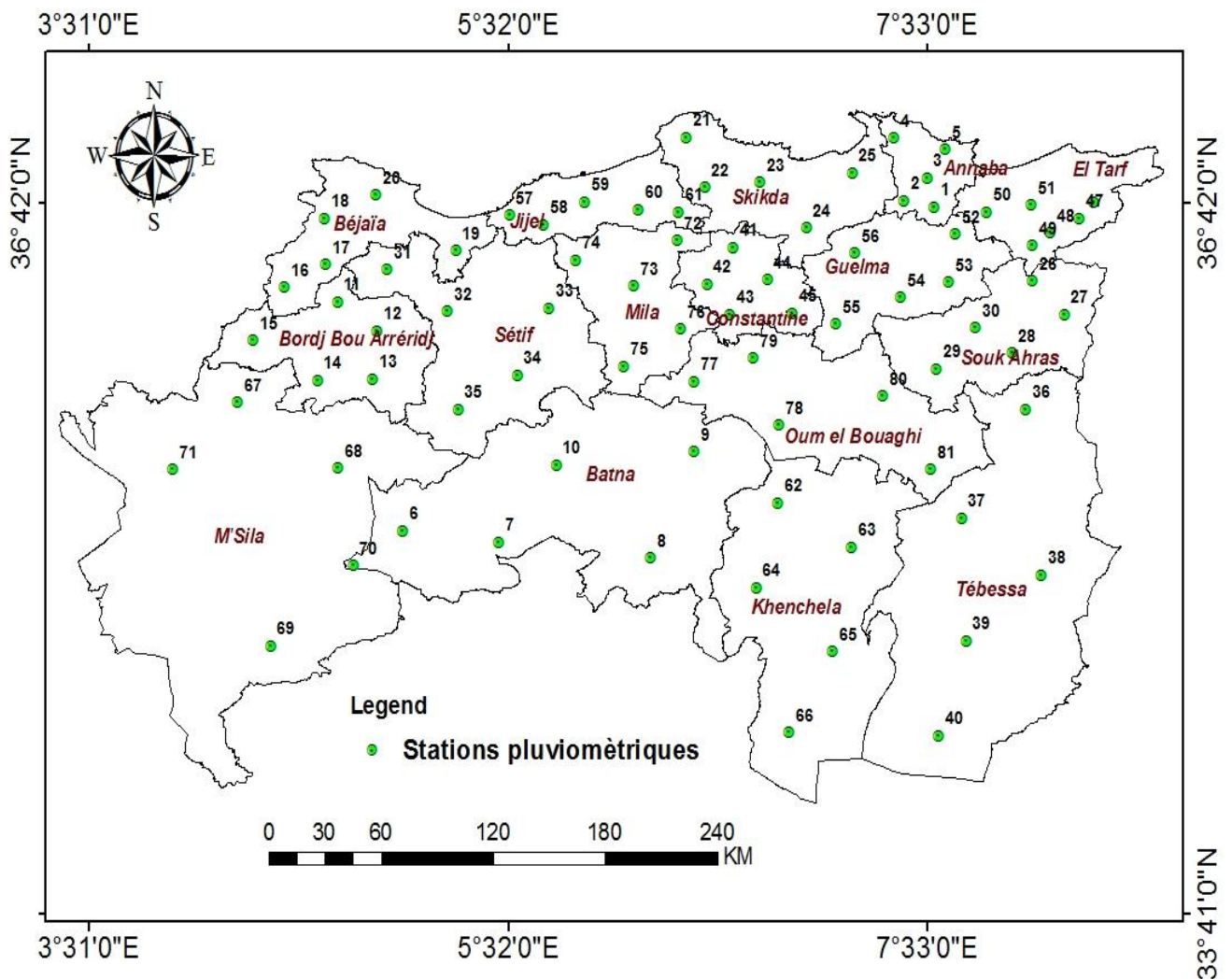


Figure 2 : Localisation des stations pluviométriques dans la zone d'étude

3. VARIATION DES PRECIPITATIONS 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 de la zone d'étude afin d'analyser la variabilité spatiale et temporelle des précipitations.

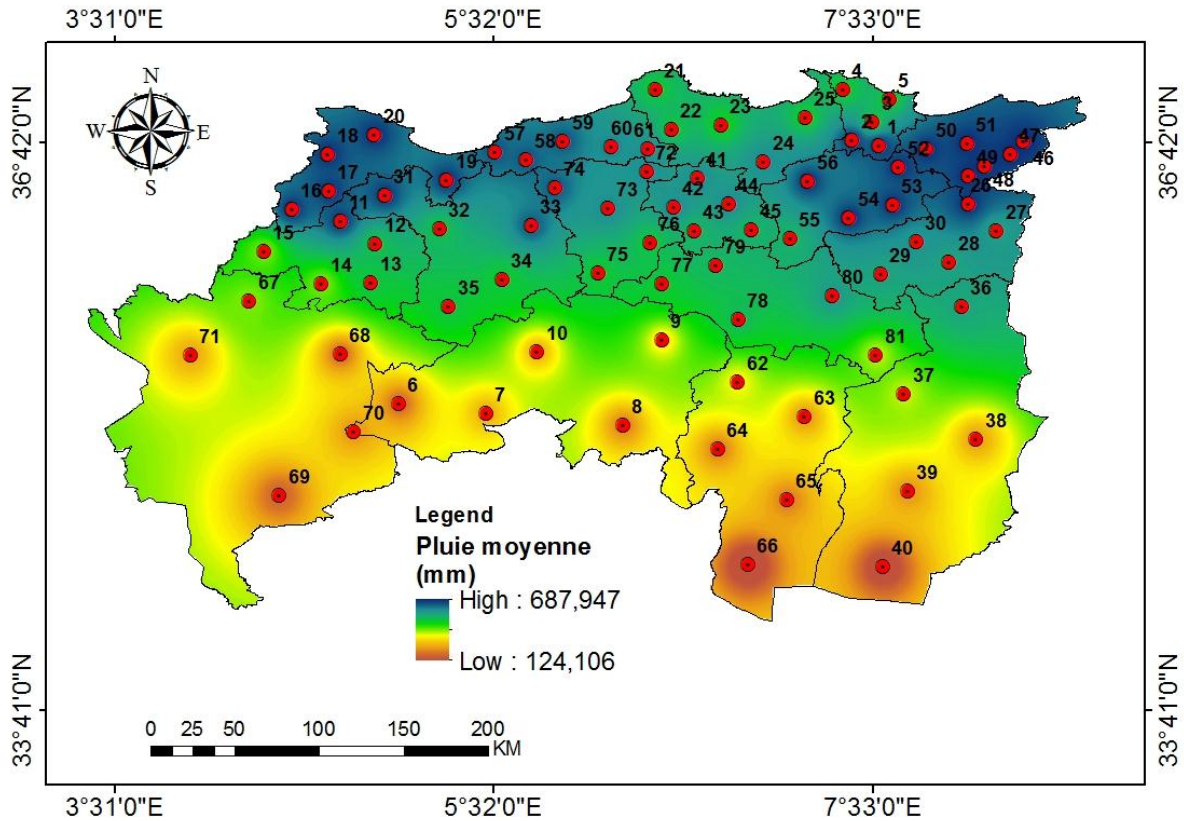


Figure 3 : Carte de la pluie moyenne interannuelle de la zone d'étude (1981-2021)

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.

On observe une hétérogénéité relative des régions en termes de pluviométrie, ce qui signifie que la variation spatiale est plus ou moins importante, allant de 124,10 mm à 687,94 mm. Les régions les plus arrosées sont Bejaia, Souk Ahras, El Taref et Annaba, tandis que Khenchela est la moins pluvieuse. Cette distribution inégale des précipitations peut avoir un impact significatif sur les ressources en eau disponibles et nécessite une gestion adaptée pour répondre aux besoins de ces régions.

4. VARIATION DES PRECIPITATIONS SAISONNIERES :

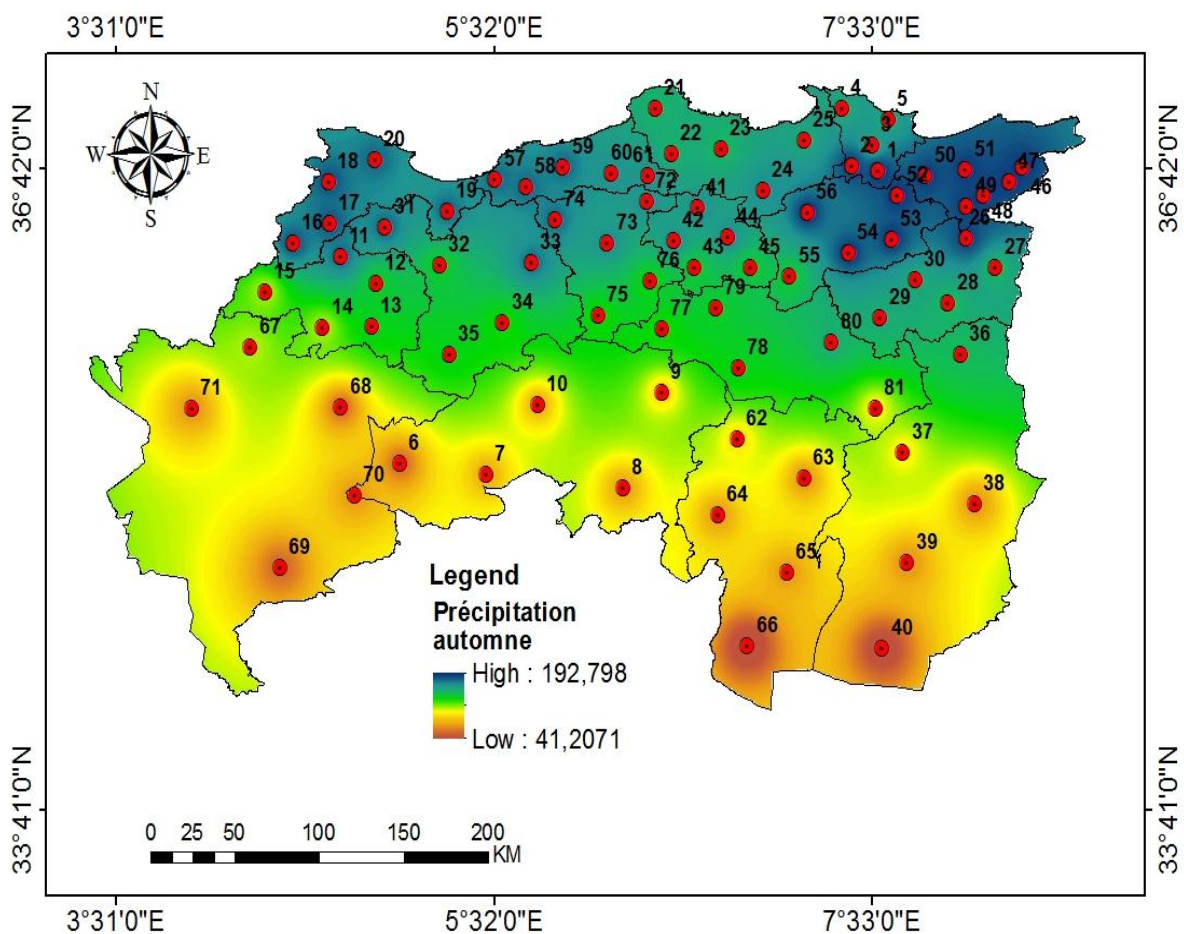
Les précipitations dans la région du Nord-Est Algérien présentent des variations significatives d'une saison à l'autre et d'une région à l'autre. Pendant la saison d'automne, Guelma enregistre la plus grande quantité de précipitations avec une moyenne de 192.84 mm, tandis que Khenchela connaît des niveaux plus bas avec seulement 41.17 mm. La moyenne inter-

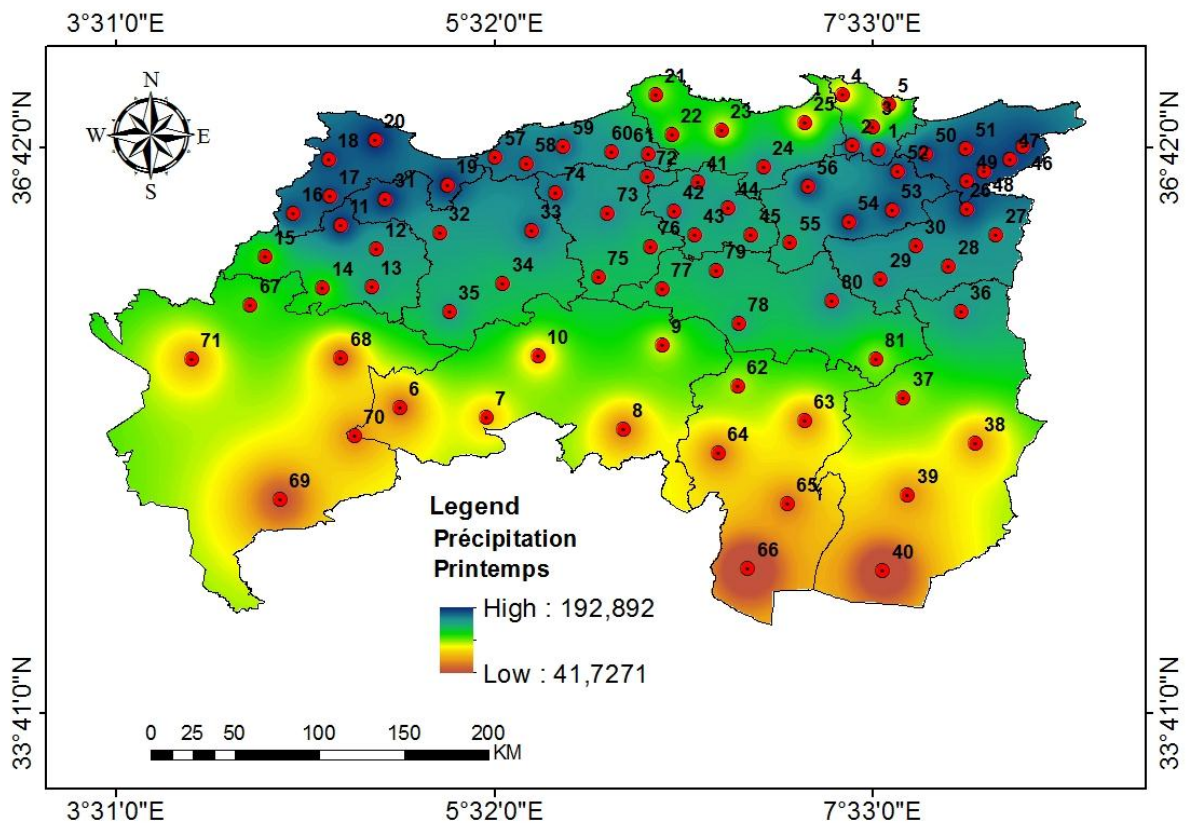
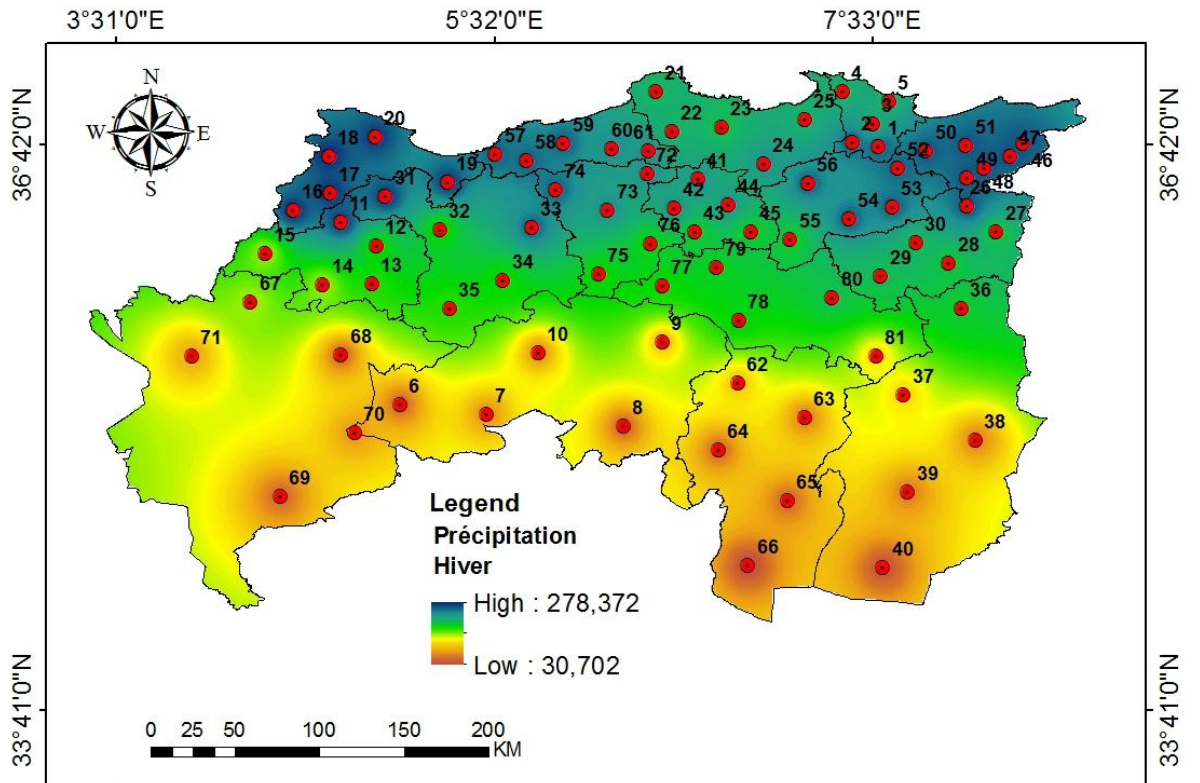
saisonniers pour l'automne est de 144.41 mm, reflétant une quantité modérée de précipitations dans l'ensemble de la région.

Durant la saison hivernale, Béjaïa est la wilaya la plus arrosée avec une moyenne de 278.40 mm, tandis que Khenchela continue à recevoir des niveaux plus faibles de précipitations avec seulement 30.67 mm. La moyenne inter-saisonniers pour l'hiver atteint 187.21 mm, indiquant une période relativement pluvieuse dans l'ensemble.

Au printemps, Béjaïa et Sétif sont les wilayas avec les valeurs les plus élevées, enregistrant une moyenne de 192.92 mm, tandis que Khenchela reste la région la moins arrosée avec 41.70 mm. La moyenne inter-saisonniers pour le printemps est de 150.59 mm, témoignant d'une quantité raisonnable de précipitations pendant cette période.

Enfin, durant la saison estivale, Tébessa reçoit la plus grande quantité de précipitations avec une moyenne de 71.18 mm, tandis que Khenchela enregistre le niveau le plus bas avec seulement 10.45 mm. La moyenne inter-saisonniers pour l'été s'élève à 38.82 mm, indiquant une période relativement sèche dans l'ensemble de la région. Ces variations pluviométriques soulignent les différences climatiques et la diversité géographique de la région du Nord-Est Algérien.





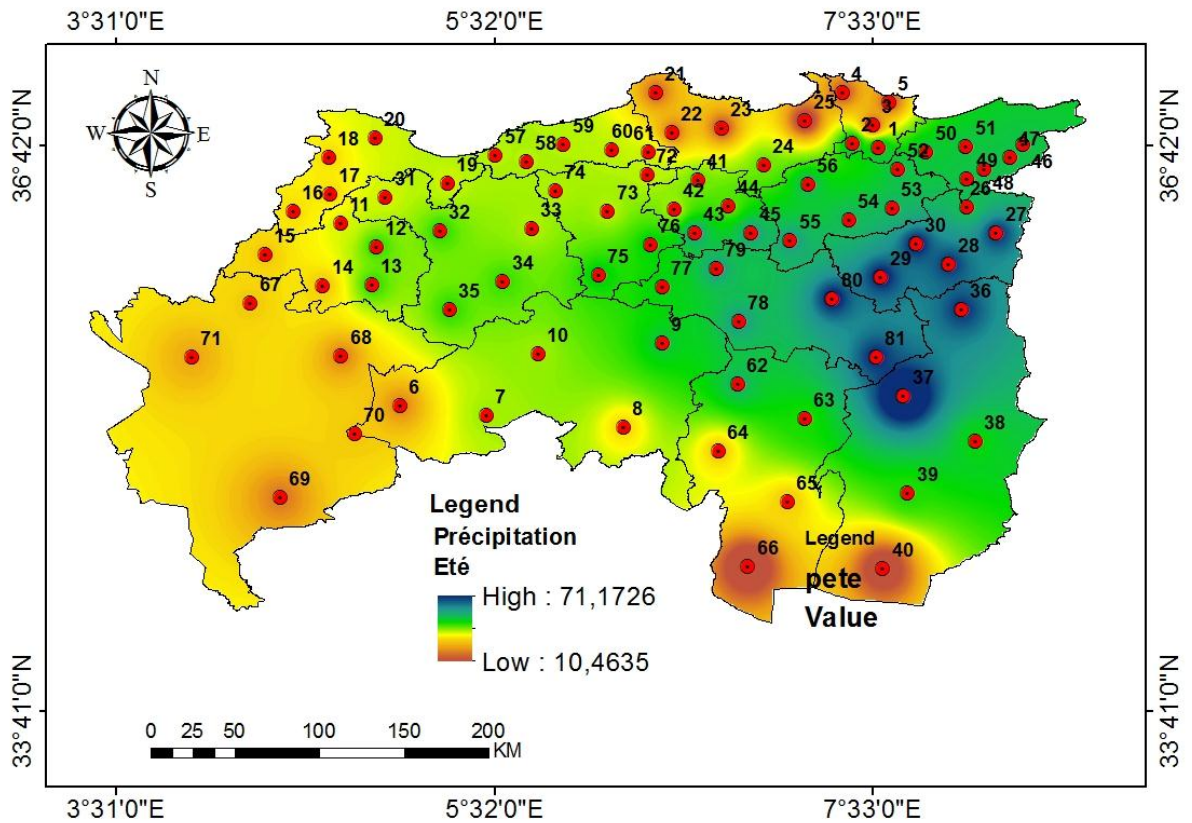


Figure 4 : Carte de la pluie moyenne saisonnière de la zone d'étude (1981-2021)

5. VARIATION DES TEMPERATURES ANNUELLES :

D'après la figure 5, les températures moyennes varient d'une ville à l'autre, ce qui met en évidence les différences régionales en termes de climat. Par exemple, Skikda a la température moyenne annuelle la plus élevée avec 19,93°C, tandis que Bordj Bou Arréridj a la température moyenne annuelle la plus basse avec 14,8°C. Cette diversité de températures peut être attribuée à des facteurs géographiques tels que l'altitude, la proximité de la mer ou des montagnes, et les courants d'air. Les villes côtières comme Annaba, Bejaia, Skikda et El Taref affichent des températures moyennes annuelles plus élevées que celles situées à l'intérieur. Cela peut être dû à l'influence modératrice de la mer, qui permet aux régions côtières de bénéficier d'une plus grande stabilité thermique.

Les villes situées à l'intérieur, telles que Batna, Setif et Guelma, présentent des températures moyennes annuelles légèrement inférieures. Ces régions connaissent généralement un climat continental avec des hivers plus froids et des étés plus chauds en comparaison des régions côtières.

Certaines villes, telles que Souk Ahras, Tébessa et Khenchela, affichent des températures moyennes annuelles modérées. Cela peut être dû à leur emplacement géographique, qui les place dans une position intermédiaire entre les influences maritimes et continentales.

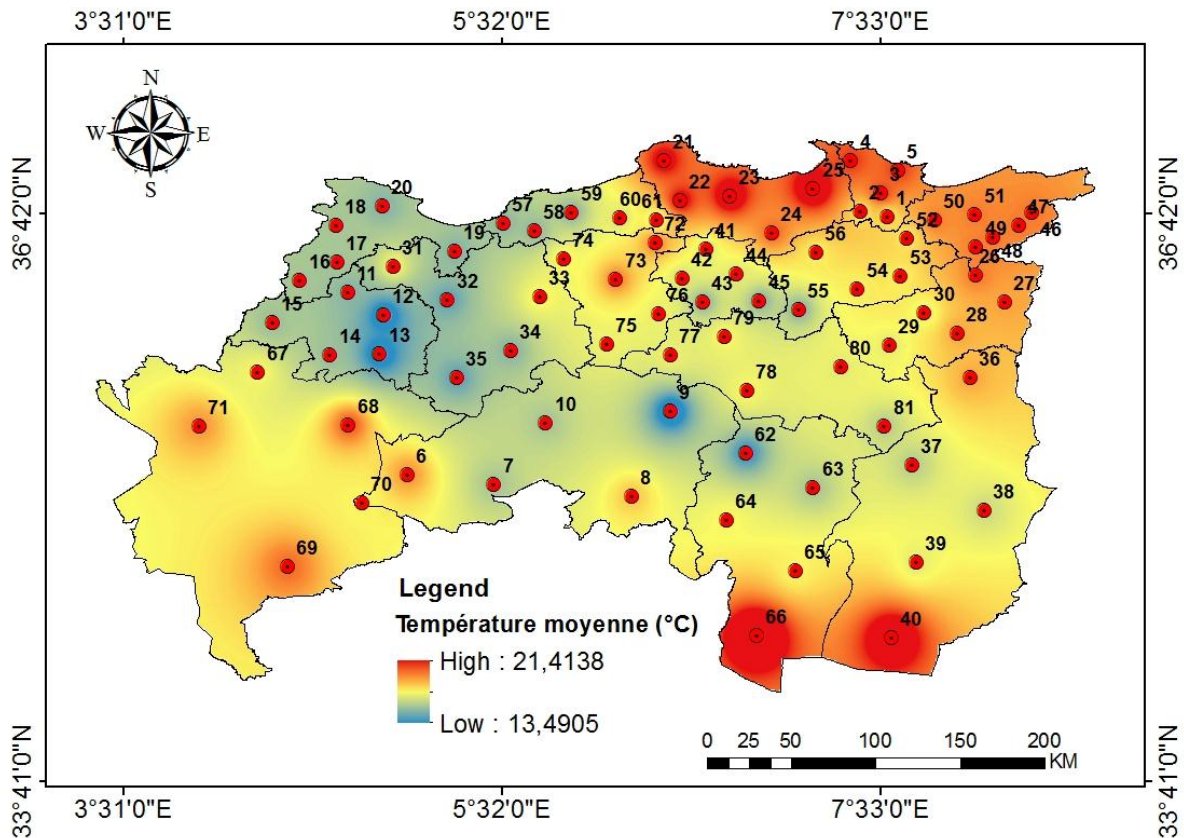


Figure 5 : Carte de la température moyenne annuelle de la zone d'étude (1981-2021)

Il est important de noter que ces températures moyennes annuelles sont indicatives et peuvent varier d'une année à l'autre. De plus, ces données ne prennent pas en compte d'autres facteurs climatiques tels que les précipitations, l'humidité ou les variations saisonnières.

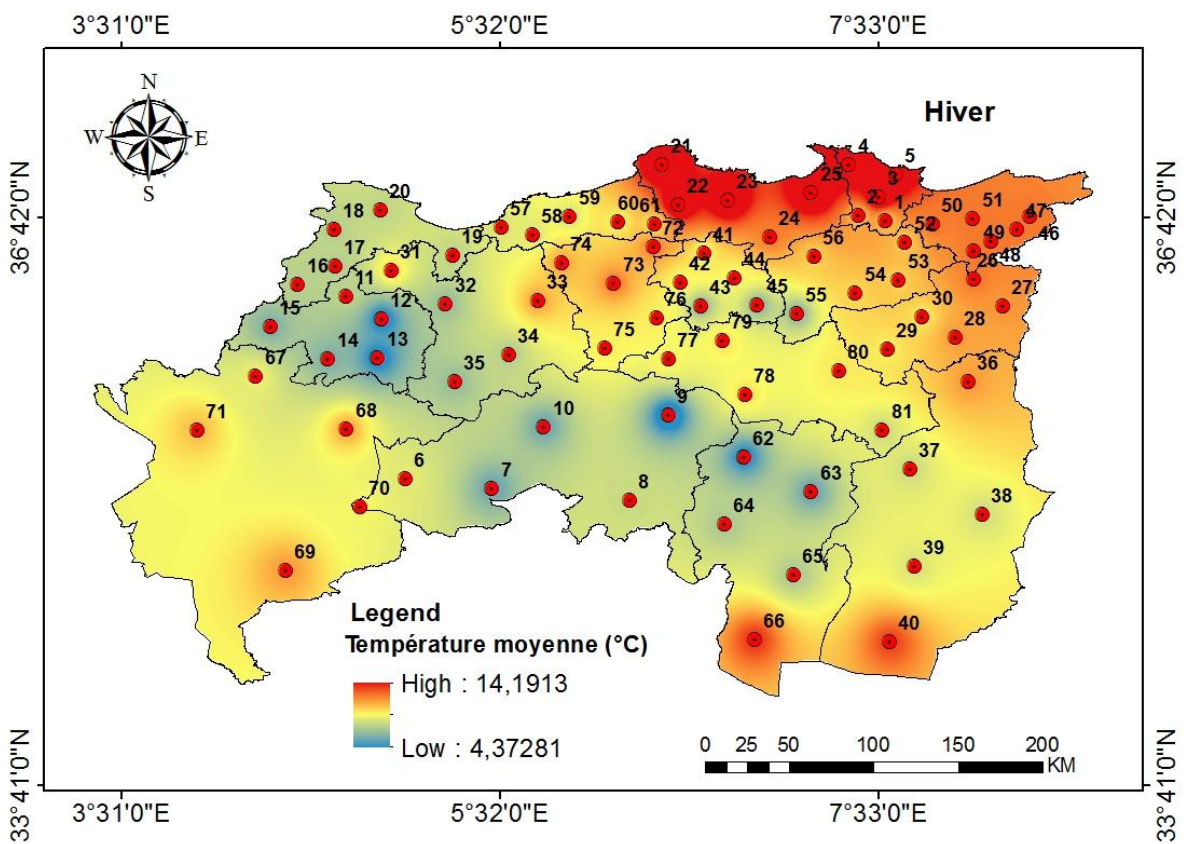
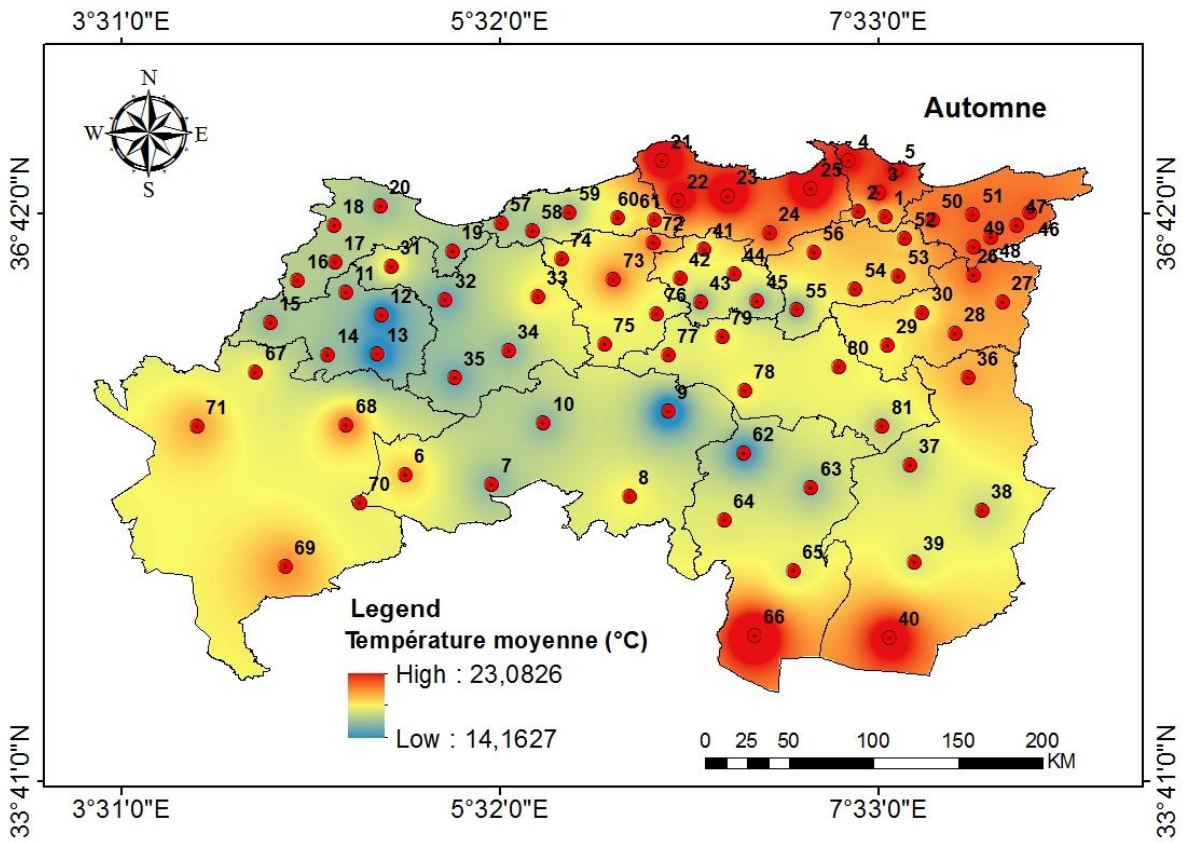
6. VARIATION DES TEMPERATURES SAISONNIERES :

Les résultats mettent en évidence les variations saisonnières significatives dans toutes les villes. Les températures hivernales sont généralement les plus basses, tandis que les températures estivales sont les plus élevées. Cela indique des changements climatiques distincts tout au long de l'année.

Les villes côtières, telles que Annaba, Bejaia, Skikda et El Taref, présentent des températures relativement plus douces et stables tout au long de l'année. Les écarts de température saisonniers sont moins prononcés, ce qui peut être attribué à l'influence modératrice de la mer.

Les villes situées à l'intérieur, comme Batna, Setif et Constantine, connaissent des variations plus marquées entre les saisons. Les hivers sont généralement plus froids, tandis que les étés sont plus chauds. Ces régions sont souvent caractérisées par un climat continental avec des écarts thermiques plus importants.

Le printemps et l'automne, montrent des températures intermédiaires dans la plupart des villes. Cela indique des conditions climatiques agréables et modérées pendant ces périodes, propices à certaines activités extérieures.



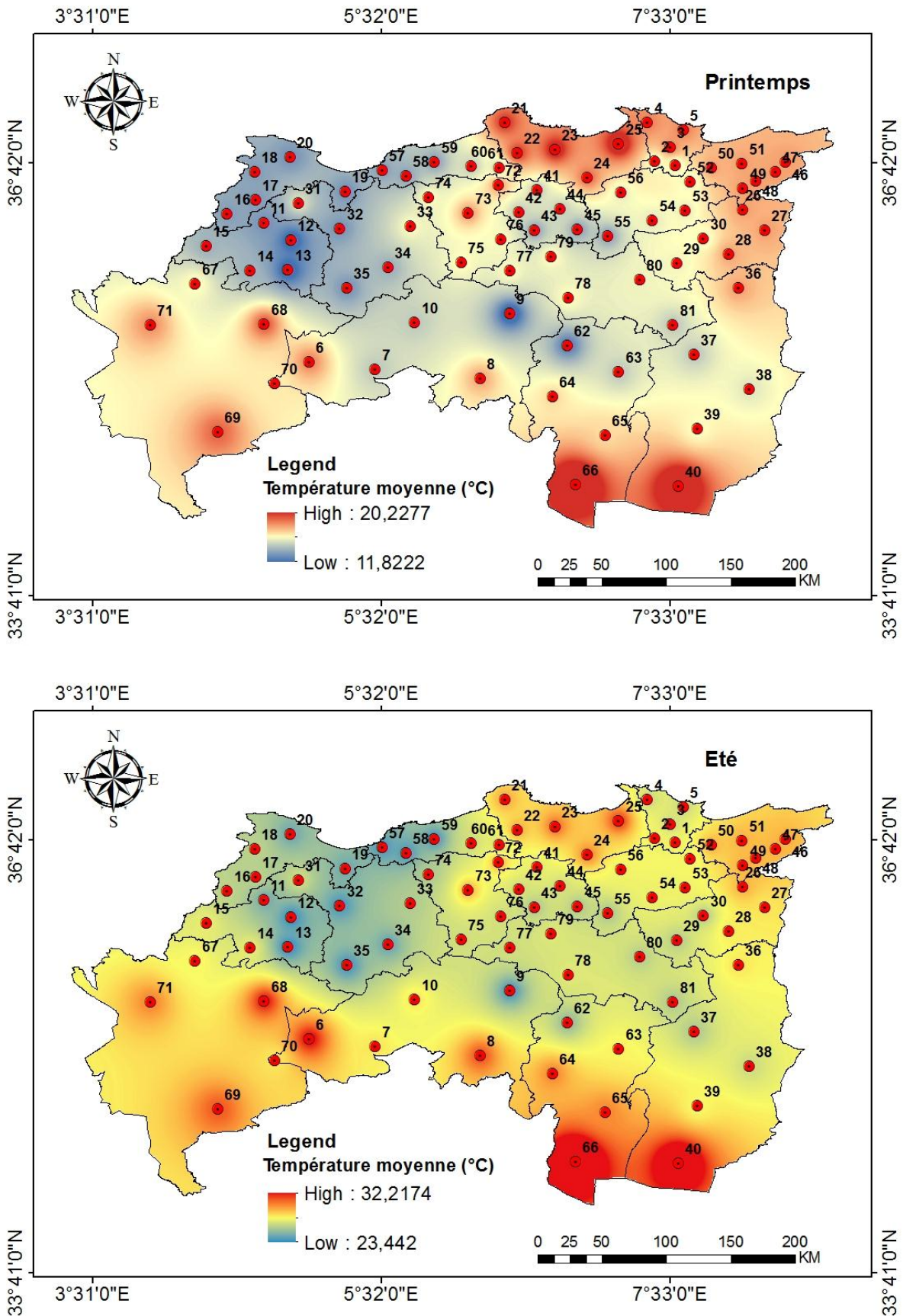


Figure 6 : Carte de la température moyenne saisonnière de la zone d'étude (1981-2021)

CHAPITRE 3 :

Matériels et méthodes

1. INTRODUCTION :

La présente étude vise à comparer le niveau d'accord entre l'Indice de Précipitation Standardisé (SPI) et l'Indice d'Evapotranspiration Standardisé de Précipitation (SPEI), une variante de ce dernier, à différentes échelles temporelles telles que 3, 9, 12 et 24 mois. Les données utilisées dans cette étude comprennent des séries temporelles de précipitations et de températures sur une période de 41 ans, allant de 1981 à 2021. Pour évaluer le niveau d'accord entre le SPI et le SPEI, nous avons appliqué le test statistique de Kappa de Cohen ainsi que la méthode de Bland-Altman. De plus, nous avons utilisé la méthode d'Analyse de Tendances Innovante (ITA) pour analyser les tendances de sécheresse sévères et extrêmes. Il convient de noter que tous les calculs ont été effectués à l'aide du logiciel R.

2. PRESENTATION DU LOGICIEL R :

Le logiciel R constitue aujourd'hui un langage de programmation intégré d'analyse statistique. Le R est un environnement intégré de manipulation de données, de calcul et de préparation de graphiques. Toutefois, ce n'est pas seulement un environnement statistique, mais aussi un langage de programmation complet et autonome. Parmi ses caractéristiques particulièrement intéressantes,

On note :

- ✓ Langage basé sur la notion de vecteur, ce qui simplifie les calculs mathématiques et réduit considérablement le recours aux structures itératives
- ✓ (Boucles for, while, etc.) ;
- ✓ Pas de typage ni de déclaration obligatoire des variables ;
- ✓ Programmes courts, en général quelques lignes de code seulement ;
- ✓ Temps de développement très court.

3. PRESENTATION DE L'ENVIRONNEMENT RStudio :

Après l'installation de logiciel R, il faut encore installer R studio. Ce dernier est un ensemble d'outils intégrés conçus pour aider à être plus productif avec R. Il comprend une console, un éditeur de coloration syntaxique prenant en charge l'exécution directe du code, ainsi que de nombreux outils robustes pour tracer, afficher l'historique, déboguer et gérer l'espace de travail. Cet outil est disponible gratuitement sur le net.

A son ouverture, l'écran est divisé en 4 parties :

- ❖ **La zone A** permet d'éditer du code R, c'est à dire d'ouvrir, de créer ou encore de modifier des scripts de commandes R.
- ❖ **La Zone B** est la console du logiciel R ; elle permet l'exécution de codes. Les lignes de commandes peuvent être directement entrées dans la console, ou bien transférées de la zone A à la zone B par un copier-coller, ou par le raccourci Ctrl+Entrée après s'être positionné sur la ligne.

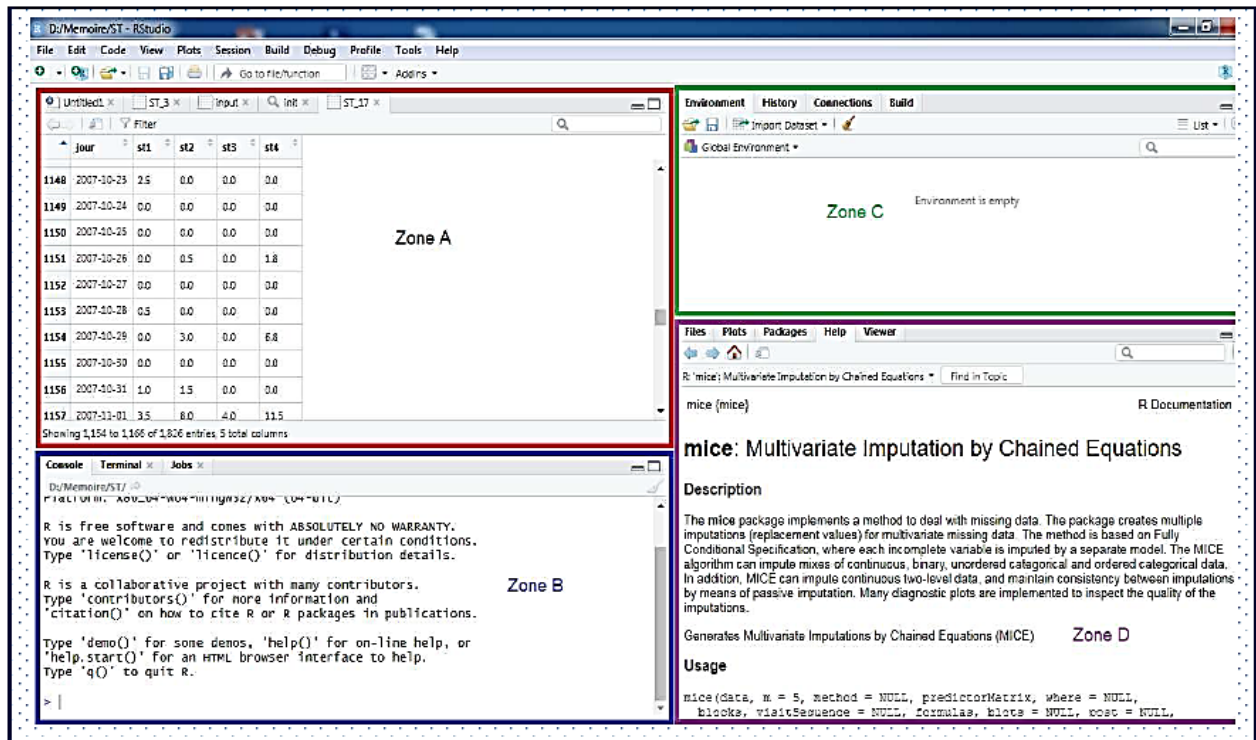


Figure 7: l'écran RStudio

❖ **La Zone C** permet d'avoir accès à plusieurs éléments :

- L'onglet "Environnement" permet d'afficher la liste des objets présents dans la mémoire de R, ainsi que les jeux de données importées ou créés. Il est également possible d'importer des données via le menu déroulant "Import Dataset".
- L'onglet "History" permet d'afficher l'historique des commandes exécutées dans la Console. L'onglet "Git" permet de faire du visionnage. Cela nécessite d'installer Git bash (sous Windows)

❖ **La Zone D** permet également d'avoir accès à plusieurs éléments :

- L'onglet "file" permet de naviguer dans fichiers
- L'onglet "plot" donne accès à la fenêtre d'affichage et d'exportation des graphes
- L'onglet "Package" permet d'accéder à une fenêtre d'installation et de mise à jour des packages
- L'onglet "Help" permet d'accéder à l'aide en ligne de toutes les fonctions des packages chargés dans R.

4. SPEI Package

Ce package permet de calculer les indices SPI, SPEI et le calcul de l'évapotranspiration potentielle avec trois méthodes.

Une fois le téléchargement est terminé, on ajoute le package dans le logiciel R en suivant les étapes suivantes :

1. Cliquer sur «package» «install package(s) from local files».
2. Sélectionner le fichier SPEI.

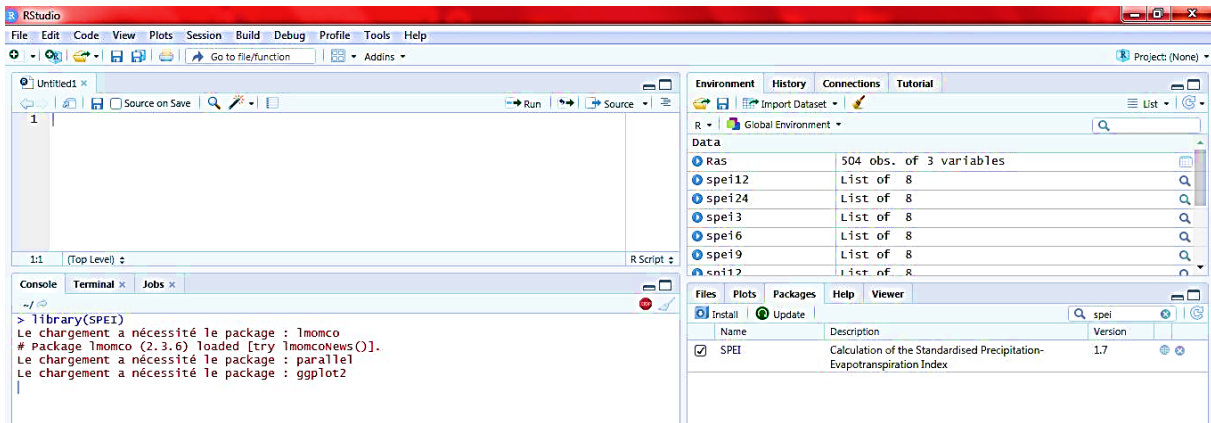


Figure 8 : Installation du package SPEI

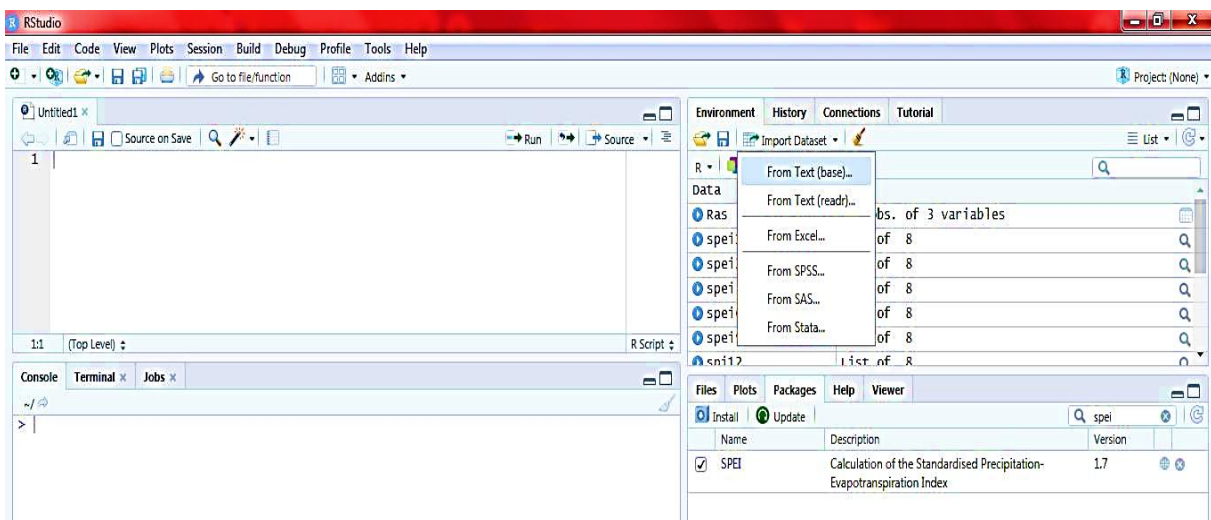


Figure 9 : Importation des données

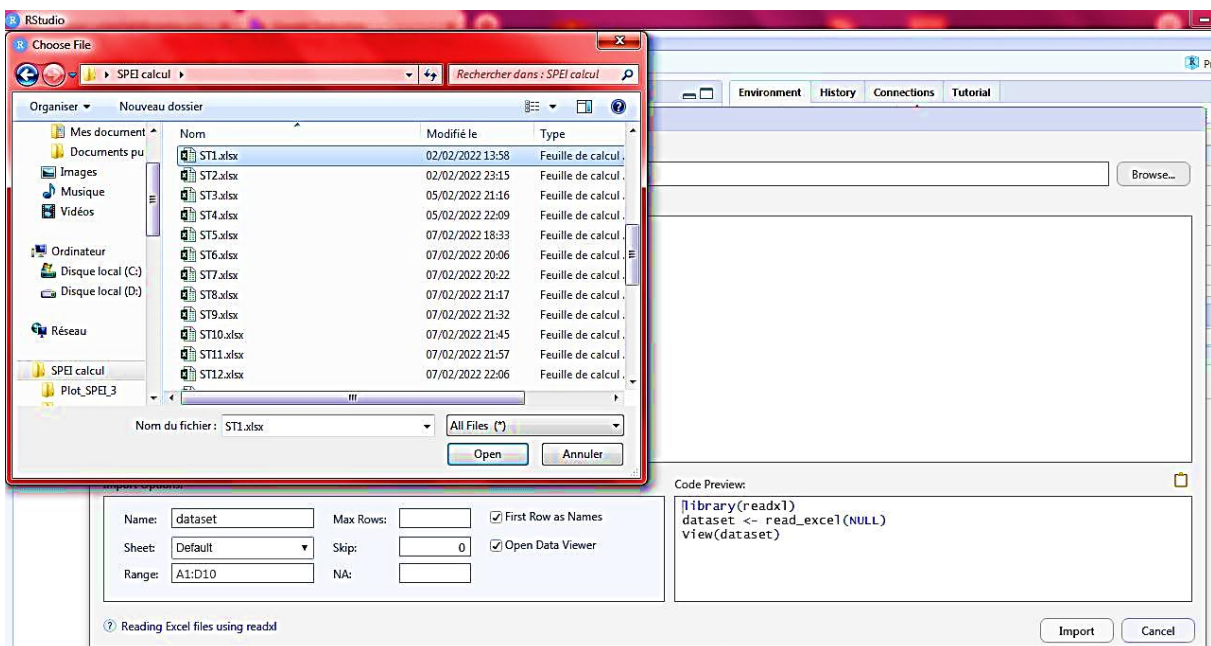


Figure 10 : Sélectionner de fichier Excel

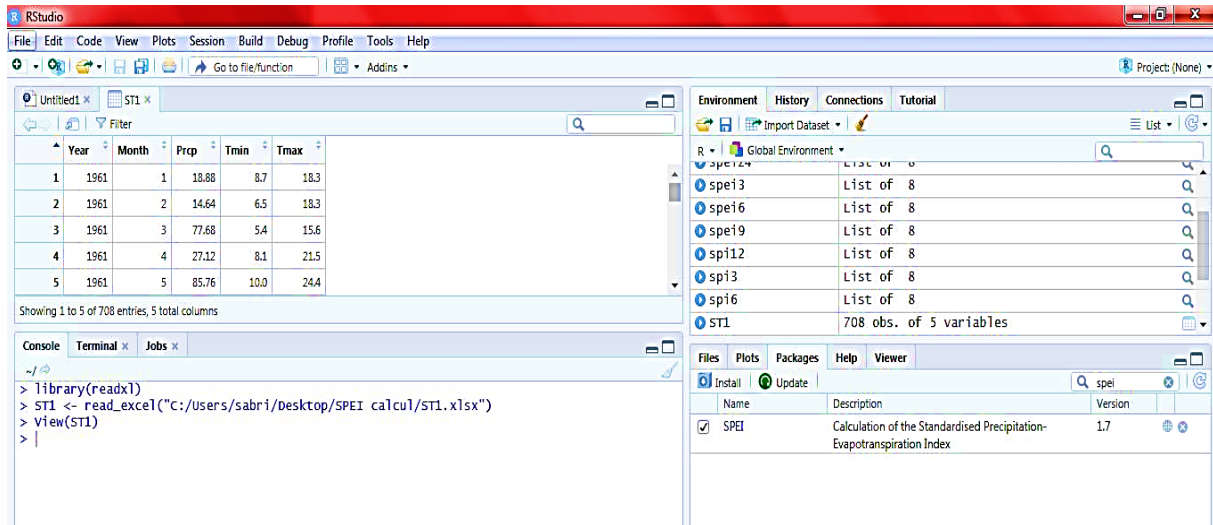


Figure 11 : Visualisation des données

Les données d'entrée :

Le type de fichier d'entrée de la série de précipitation est au format Excel.

Les formats et les abréviations des titres des colonnes de fichier Excel sont :

- **Year** : les années,
- **Month** : l'ordre du mois,
- **Prcp** : les enregistrements des précipitations mensuelles en mm,
- **Tmax** : la moyenne mensuelle maximale des températures en °C,
- **Tmin** : la moyenne mensuelle minimale des températures en °C,

La commande complète pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP) est :

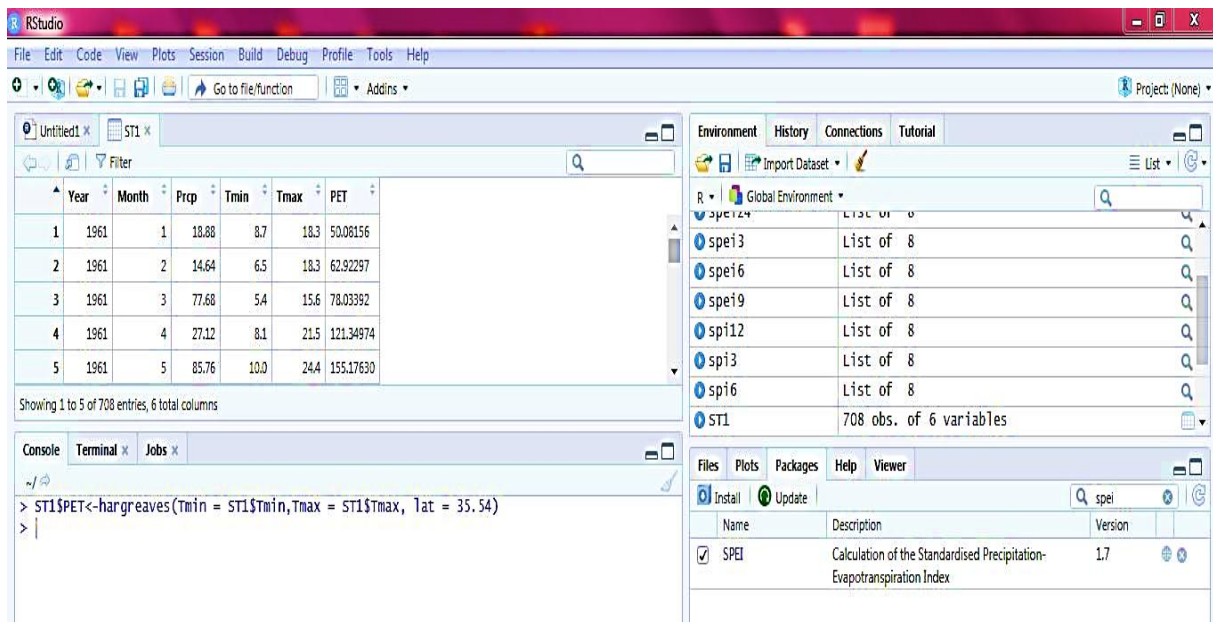


Figure 12 : Calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP)

Nom de fichier\$PET<-hargreaves(Tmin = Nom de fichier \$Tmin,Tmax = Nom de fichier \$Tmax, lat = XX)

On suite on calcul de déficit hydrique qui représente la différence entre la pluie et l’ETP selon la commande suivante :

CWBAL<-nom de fichier\$Prcp-nom de fichier\$PET

CWBAL : Climatic Water Balance (Bilan hydrique)

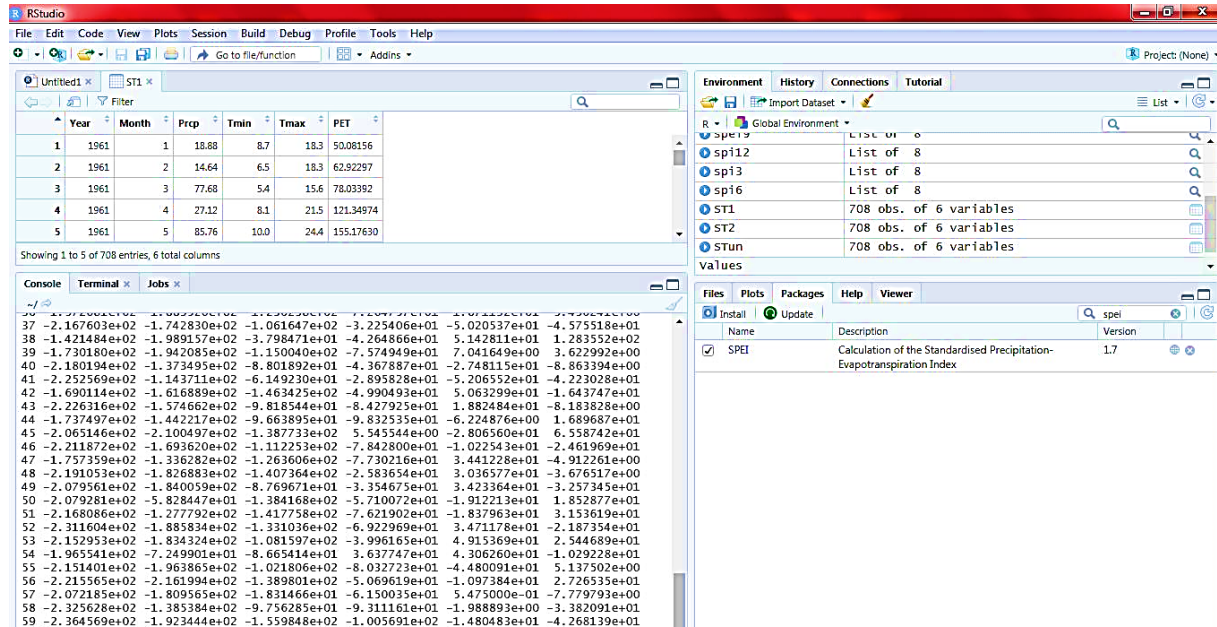


Figure 13 : Résultats de calcul de déficit hydrique

La commande suivante serve pour calculer SPEI 3 mois avec le nom de fichier :

spei3<-spei(CWBAL,3)

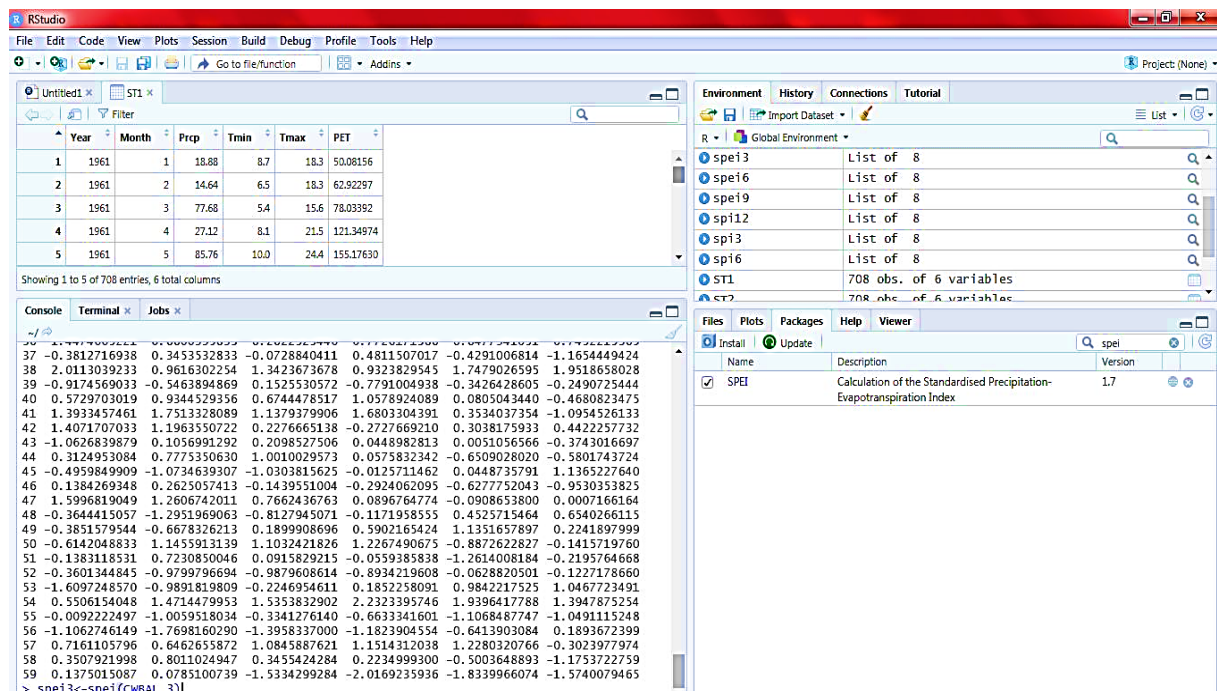


Figure 14 : Résultats de calcul de l’SPEI 3

Pour tracer le graphe de SPEI 3 mois, taper la commande suivante :

```
plot.spei(spei3)
```

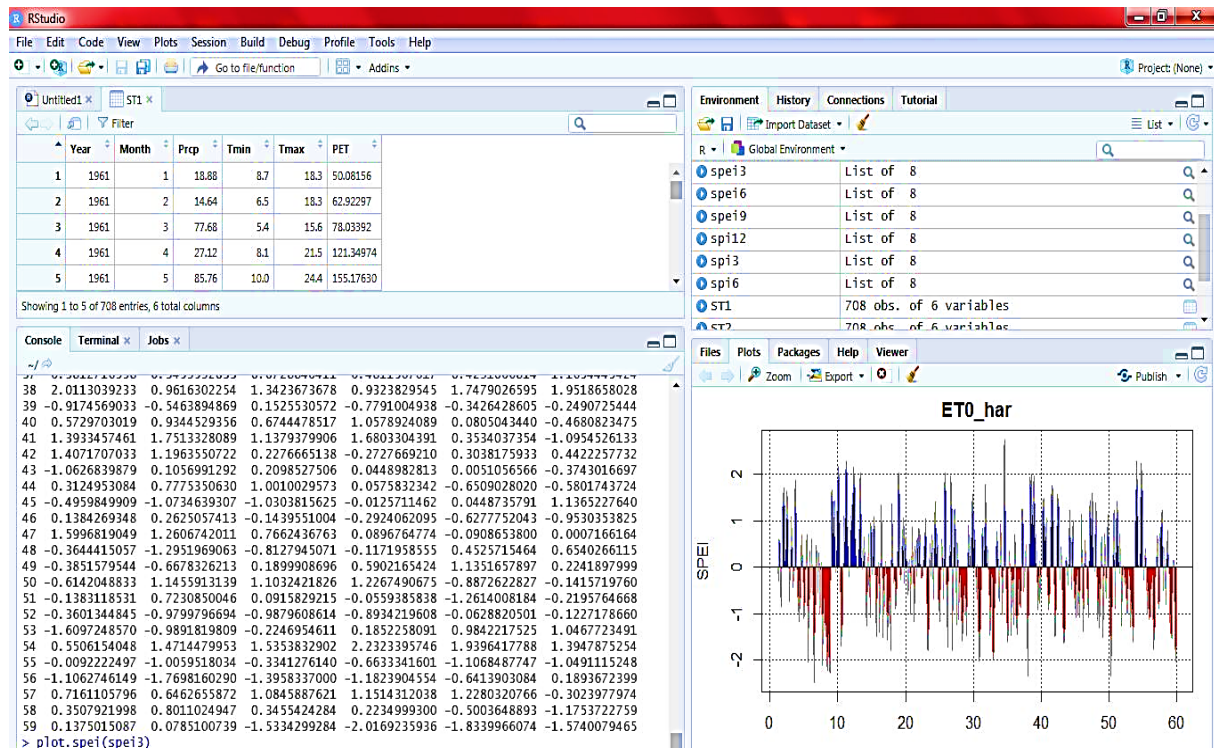


Figure 15 : Graph de l'indice SPEI à l'échelle de 3 mois

5. DONNEES DE L'INDICE STANDARDISE DE PRECIPITATIONS ET D'EVAPOTRANSPIRATION (SPEI) :

Dans cette étude, les valeurs de l'indice SPEI ont été calculées à l'aide de données de températures et de précipitations. Les données de précipitations et de températures utilisées dans cette étude ont été obtenues à partir du site de la NASA. La NASA collecte ces données dans le cadre de ses programmes de surveillance climatique et les met à disposition du public pour des analyses et des recherches scientifiques. Ces données sont considérées comme fiables et largement utilisées dans la communauté académique pour étudier les variations climatiques et les phénomènes connexes.

Le calcul de l'indice SPEI est basé sur l'équation Thornthwaite et de Hargreaves pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle ETP. Le principal avantage de SPEI Global Drought Monitor est donc son caractère quasi temps réel, caractéristique qui convient le mieux à la surveillance de la sécheresse et à l'alerte rapide. Le SPEI est considérée comme un indice de sécheresse amélioré, particulièrement adapté à l'analyse de l'effet du réchauffement climatique sur les conditions de sécheresse [17]. Le calcul du SPEI dans cette étude suit la méthode mentionnée dans l'étude de Vicente-Serrano [12].

Le SPEI est basée sur un bilan hydrique climatique qui est déterminé par la différence entre Précipitations (P) et Evapotranspiration potentielle (ETP) pour le mois i :

$$D_i = P_i - ETP_i \quad (1)$$

D_i fournit une mesure simple de l'excédent ou du déficit en eau pour le mois analysé. Le PET est calculé suivant l'équation de Thornthwaite [18].

Les valeurs calculées D_i sont agrégées à différentes échelles de temps, en suivant la même procédure que celle pour le SPI. La différence, $D_{i,j}^k$ dans un mois donné j et l'année i dépend de l'échelle de temps choisie, k . Par exemple, la différence accumulée pendant un mois d'une année donnée, avec une échelle de temps de 12 mois, est calculée selon la formule suivante :

$$X_{i,j}^k = \sum_{l=13-k+j}^{12} D_{i-l,j} + \sum_{l=1}^j D_{i,l} \quad (2)$$

$$X_{i,j}^k = \sum_{l=j-k+j}^j D_{i,l} \quad (3)$$

Où $D_{i,j}$ est la différence de P-ETP du $l^{\text{ème}}$ mois de l'année i , en mm.

Et ensuite, la distribution log-logistique est sélectionnée pour normaliser la série D afin d'obtenir le SPEI. La fonction de densité de probabilité de la variable distribuée log-logistique est exprimée comme suit :

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1} \left[1 + \left(\frac{x-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta} \right]^{-2} \quad (4)$$

Où α , β et γ sont respectivement les paramètres d'échelle, de forme et d'origine pour les valeurs D comprises dans la plage ($\gamma > D < \infty$).

Ainsi, la fonction de distribution de probabilité de la série D est donnée par :

$$f(x) = \left[1 + \left(\frac{x-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta} \right]^{-1} \quad (5)$$

Avec $F(x)$, le SPEI peut facilement être obtenu en tant que valeurs normalisées de $F(x)$. Par exemple, après l'approximation classique :

$$SPEI = W - \frac{c_0 + c_1 W + c_2 W^2}{1 + d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^3} \quad (6)$$

Où $W = \sqrt{-2 \ln(p)}$ pour $P \leq 0.5$ et p est la probabilité de dépasser une valeur D déterminée, $p = 1 - F(x)$. Si $p > 0.5$, p est remplacé par $1 - p$ et le signe du SPEI résultant est inversé.

Les constantes sont :

$C_0 = 2,515517$, $C_1 = 0,802853$, $C_2 = 0,010328$, $d_1 = 1,432788$, $d_2 = 0,189269$ et $d_3 = 0,001308$.

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 SPEI est consécutivement négatif et que sa valeur atteint une intensité de -1 ou moins et se termine

lorsque le SPEI devient positif. On effectue une classification de la sécheresse suivant les valeurs du SPEI.

Tableau 3 : Catégories de sécheresse et d'humidité définies par les valeurs du SPEI

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

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

➤ **Avantages de méthode SPEI :**

- L'indice SPEI 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 SPEI permet de détecter rapidement les situations de sécheresse et d'en évaluer la gravité.
- L'indice SPEI 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.

En complétant les précipitations par la température, l'indice tient compte de l'effet de ce paramètre sur les conditions de sécheresse. Il s'applique à tous les régimes climatiques et les résultats peuvent être comparés car ils sont normalisés. Grâce aux données de température, le SPEI se prête particulièrement bien à l'analyse des impacts du changement climatique simulés au moyen de modèles selon divers scénarios d'évolution future.

➤ **Inconvénient de méthode SPEI :**

La nécessité de disposer de jeux de données complets sur les températures et sur les précipitations risque de limiter l'emploi, si les séries disponibles comportent des lacunes. Comme il s'agit d'un indice mensuel, il pourrait ne pas déceler assez tôt les sécheresses qui s'installent rapidement.

6. PARAMETRES DESCRIPTIFS DES SEQUENCES DE SECHERESSE :

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 importantes 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.

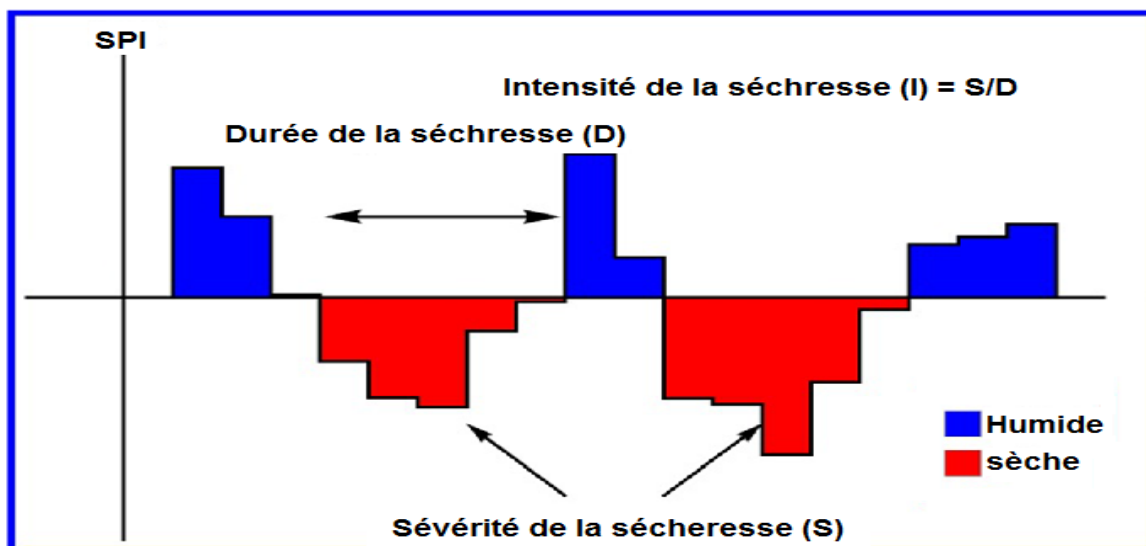


Figure 16 : Eléments descriptive des séquences de sécheresse

7. LES DIFFERENTES INTERPRETATIONS DE L'INDICE SPEI :

Il est possible de donner à la sécheresse bien des définitions. On peut en effet distinguer différents types de sécheresses que l'on regroupe en général en quatre catégories : les sécheresses météorologiques, agricoles, hydrologiques et socio-économiques. La sécheresse est un aléa qu'il est complexe de définir et de détecter. Ce fléau affecte de nombreux secteurs et couvre des échelles de temps multiples. Tout comme il est impossible de donner une définition unique de la sécheresse, il n'existe pas d'indice unique de la sécheresse pouvant répondre à toutes les exigences de l'ensemble des applications possibles.

Cela étant dit, l'indice SPEI peut être calculé pour de nombreuses échelles de temps, ce qui est un réel avantage, qui permet de l'appliquer à bon nombre des différents types de sécheresses dont il vient d'être question. La possibilité de calculer l'indice SPEI sur des échelles de temps multiples offre une souplesse temporelle dans l'évaluation des conditions de précipitations par rapport à l'approvisionnement en eau.

Comme cela a déjà été précisé, l'indice SPEI 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 SPEI variera donc en fonction du type de sécheresse faisant l'objet des analyses et applications envisagées : on prendra par exemple l'indice SPEI 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 [9].

Le laps de temps pour lequel il est possible de calculer l'indice SPEI varie de 1 à 72 mois. D'un point de vue statistique, une période allant de 1 à 24 mois représente le champ d'application présentant la meilleure utilité pratique. Le seuil de 24 mois est basé sur la recommandation formulée par Guttman quant à la nécessité de disposer d'une série de données couvrant 50 à 60 ans environ. À moins d'avoir à sa disposition des données s'étalant sur 80 à 100 ans, la taille de l'échantillon est trop petite et le degré de confiance statistique à accorder aux estimations de probabilités correspondant aux traînes des distributions (extrêmes humides et secs) devient faible au-delà de 24 mois [9]. En outre, le fait de ne disposer que d'une série de données sur 30 ans, soit la durée minimale (ou moins), diminue la taille de l'échantillon et affaiblit le degré de confiance. Il est techniquement possible de calculer l'indice SPEI à partir de données portant sur moins de 30 ans, à condition toutefois de garder à l'esprit les limites statistiques et l'affaiblissement de la confiance dont on vient de parler.

7.1. Indice SPEI sur 3 mois

L'indice SPEI sur 3 mois établit la comparaison entre le total des précipitations sur la période de trois mois examinée et les totaux des précipitations pour cette même période de trois mois de toutes les années pour lesquelles on dispose de relevés. En d'autres termes, l'indice SPI sur 3 mois se terminant fin février permet de comparer le cumul des précipitations des mois de décembre, janvier et février de l'année examinée aux cumuls de précipitations de décembre à février de toutes les années figurant dans l'historique des observations exécutées à la station étudiée. Chaque nouvelle année, les données d'observation viennent s'ajouter à la série des relevés dont la durée gagne ainsi une année et les valeurs de toutes les années sont une nouvelle fois prises en compte. Les valeurs peuvent alors évoluer, ce qui sera le cas quand on comparera, d'un point de vue historique et statistique, l'année en cours avec toutes les années précédentes composant la série chronologique des observations.

L'indice SPEI sur 3 mois fournit une indication sur les conditions d'humidité à courte et moyenne échéances et une estimation des précipitations sur une saison. Dans les régions essentiellement agricoles, l'indice SPEI sur 3 mois peut se révéler plus performant que l'indice Palmer à réponse lente ou que d'autres indices hydrologiques actuels pour mettre en évidence la nature des conditions d'humidité en cours. Dans la zone de culture du maïs aux États-Unis, l'analyse de l'indice SPEI sur 3 mois se terminant fin août peut permettre de détecter les tendances des précipitations au cours des stades importants de la reproduction et du début du remplissage des grains à la fois du maïs et du soja. Quant à l'indice SPEI sur 3 mois se terminant fin mai, il fournit une indication sur les conditions d'humidité du sol au début de la phase végétative.

Il importe de comparer l'indice SPEI sur 3 mois à des laps de temps plus longs. Il est possible que des conditions relativement normales voire humides se produisent durant trois mois au milieu d'une sécheresse s'étalant sur une durée plus longue, ce qu'on ne pourrait mettre en évidence qu'en examinant une période relativement longue. En analysant des laps de temps relativement longs, on évite de confondre la présence temporaire d'une période humide avec la fin d'une sécheresse. Il est donc essentiel d'assurer un suivi constant pour déterminer à quels moments un épisode de sécheresse débute et prend fin et pour se garder ainsi d'annoncer à tort le début et la fin d'une sécheresse. Pour veiller à cela, on peut mettre en place une série de «déclencheurs» de mesures fixées selon un programme de lutte contre la sécheresse.

Tout comme l'indice SPEI sur 1 mois, l'indice SPEI sur 3 mois peut prêter à confusion dans le cas de régions au climat normalement sec durant la période de 3 mois examinée. Des valeurs négatives ou positives importantes de l'indice SPEI peuvent être associées à des cumuls de précipitations ne s'écartant que peu de la moyenne. Cette mise en garde peut s'expliquer dans le cas du climat méditerranéen de la Californie, de l'Afrique du Nord et du sud de l'Europe, à savoir des régions qui ne reçoivent que très peu de pluie durant certaines périodes de l'année et où on s'attend à ce qu'il en soit ainsi. Ces périodes se caractérisant par de faibles pluies, les cumuls historiques correspondants seront faibles, si bien que des écarts relativement petits, dans un sens ou dans l'autre par rapport à la moyenne, peuvent donner des valeurs négatives ou positives importantes de l'indice SPEI. En revanche, cette période de trois mois peut constituer un indicateur bien adapté à certaines régions soumises au régime de la mousson.

7.2. Indice SPEI sur 6 mois (moyen terme)

L'indice SPEI 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 SPEI 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 SPEI avec les anomalies du débit des cours d'eau et des niveaux des réservoirs, selon la région et la période de l'année considérées.

7.3. Indice SPI sur 12 mois et jusqu'à 24 mois (long terme)

À ces échelles de temps, l'indice SPEI fournit une représentation des régimes de précipitations à longue échéance. L'indice SPEI 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 SPEI 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 SPEI 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.

8. Bland and Altman plot :

Bland and Altman [19] ont convenu qu'à un certain point, deux techniques différentes ne pouvaient pas aboutir au même résultat sans aucune variation des résultats. Il est donc important de déterminer la différence de sortie des méthodes étudiées lors de l'analyse de leurs avantages et inconvénients. Selon le graphique de Bland et Altman, une compréhension éclairée a été obtenue concernant le niveau d'accord entre les méthodes, également appelées évaluateurs. Bland et Altman [19] ont développé cet outil à l'origine pour comparer deux types de mesures différentes. Les résultats, c'est-à-dire la différence entre les paires de valeurs et les valeurs moyennes des paires, ont été affichés respectivement sur l'axe des y et des x. Le graphique tracé de cette manière permet de visualiser les niveaux d'accord. Cette valeur peut fournir des informations sur le niveau d'accord entre les méthodes étudiées [20-22]. Cependant, les mêmes auteurs ont mentionné que le jugement de chaque individu devrait définir les différences entre les méthodes considérées et accepter ces différences. Selon Kaira [21], la dispersion élevée des points dans le graphique de Bland et Altman correspond à un biais inégal entre les méthodes. Ainsi, conformément aux lignes directrices développées par Bland et Altman [19], la moyenne et les différences de chaque paire de valeurs SPI et SPEI ont été calculées dans cette étude. Les auteurs ont ensuite déterminé l'écart type (SD) de la différence et du biais (différence moyenne) entre chaque paire de valeurs. Dans ce travail de recherche, un intervalle de confiance à 95% a été utilisé pour déterminer l'accord entre les limites supérieures (Biais + 1,96 SD) et inférieures (Biais - 1,96 SD).

9. Cohen's Kappa test :

Conformément au niveau d'accord, le test de Cohen's Kappa est effectué pour analyser les similitudes entre les indices de sécheresse. Ce test est principalement utilisé pour analyser le niveau d'accord entre deux classificateurs, méthodes, taux, échelles, etc., dans les sciences de la vie. Selon Fleiss [23], l'introduction des statistiques Kappa avait pour but de déterminer l'accord à l'échelle nominale entre deux méthodes d'évaluation. Lors de la mesure du niveau d'accord entre les méthodes étudiées, une statistique devrait être incluse pour tenir compte de la possibilité d'accord ou de désaccord par simple probabilité. Étant donné que les statistiques Kappa ont le potentiel de résoudre ce problème, cette mesure est souvent citée comme la méthode statistique la plus couramment utilisée [24]. Les valeurs de Kappa sont généralement

comprises entre -1 et +1, les valeurs de Kappa les plus élevées indiquant un fort degré d'accord entre les deux éléments. Lorsque Kappa est égal à 1, le degré d'accord est parfait entre les indices. Si Kappa est égal à 0, alors l'accord est le même par simple probabilité. Lorsque Kappa est < 0 , un faible accord existe, mais cette situation se produit rarement, comme le montre le tableau 4.

Tableau 4 : Plages de la statistique Kappa K et force correspondante de l'accord.

Valeur de Kappa	Degré d'accord
<0	Accord équivalent à un hasard
0.1 – 0.2	Accord légèrement élevé
0.2 – 0.4	Accord acceptable
0.4 – 0.6	Accord modéré
0.6 – 0.8	Accord substantiel
0.8 – 0.99	Accord presque parfait
1	Accord parfait

Les statistiques Kappa sont généralement déterminées en suivant soit la Kappa de Cohen [25] soit la Kappa de Fleiss [23]. Entre les deux, la première est utilisée pour évaluer le niveau d'accord en cas de deux modules d'évaluation et d'un seul essai ou de deux essais avec une seule méthode d'évaluation. La seconde, c'est-à-dire la Kappa de Fleiss, est une version étendue de la Kappa de Cohen et est utilisée dans le cas de trois mesures ou plus. De plus, on considère généralement que la Kappa de Cohen sélectionne délibérément les méthodes d'évaluation et est fixée. En revanche, dans le cas de la statistique Kappa de Fleiss, les méthodes d'évaluation sont aléatoires et incluent une grande population. Donc, conformément à ces hypothèses, les chercheurs ont constaté que les statistiques Kappa de Cohen sont un choix approprié pour l'étude actuelle. Elles sont donc utilisées pour analyser le degré d'accord entre les indices de sécheresse SPI et SPEI. L'équation 7 montre la formule utilisée pour déterminer les statistiques Kappa de Cohen.

$$k = \frac{P_0 - P_e}{1 - P_e} * 100 = 1 - \frac{1 - P_0}{1 - P_e} \quad (7)$$

P_0 correspond à la fréquence totale observée de l'accord et P_e représente la proportion d'accord attendue par hasard. En pratique, K indique dans quelle mesure la fréquence observée de l'accord est supérieure à la fréquence d'accord P_e qui serait prédite dans le cas d'une classification aléatoire [26].

Les calculs effectués précédemment ne tiennent compte que des correspondances exactes entre les indices de sécheresse. Dans le cas où les catégories sont ordonnées (Mouillé, Normal, Sécheresse modérée, Sécheresse sévère et Sécheresse extrême), il est possible de tenir compte des correspondances proches. En d'autres termes, si un indice de sécheresse classe un sujet dans la catégorie 'Normal' tandis que l'autre indice le classe dans la catégorie 'Sécheresse modérée', cela est considéré comme proche. Cependant, le calcul est beaucoup plus complexe si un indice

classe comme 'Mouillé' et l'autre comme 'Sécheresse sévère'. Le Kappa pondéré détermine comment les catégories sont ordonnées et prises en compte, ce qui est compris par la distance entre les deux indices de sécheresse. Le calcul de l'étude actuelle a utilisé des pondérations linéaires.

10. ANALYSE DE LA TENDANCE DE L'INDICE SPEI PAR LA METHODE ITA :

La méthode « *Innovative Trend Analysis (ITA)* » analyse innovante de la tendance récemment développé par Sen [27] 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. Notre objectif est d'identifier la tendance de l'indice de sécheresse SPEI dans la zone d'étude.

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.

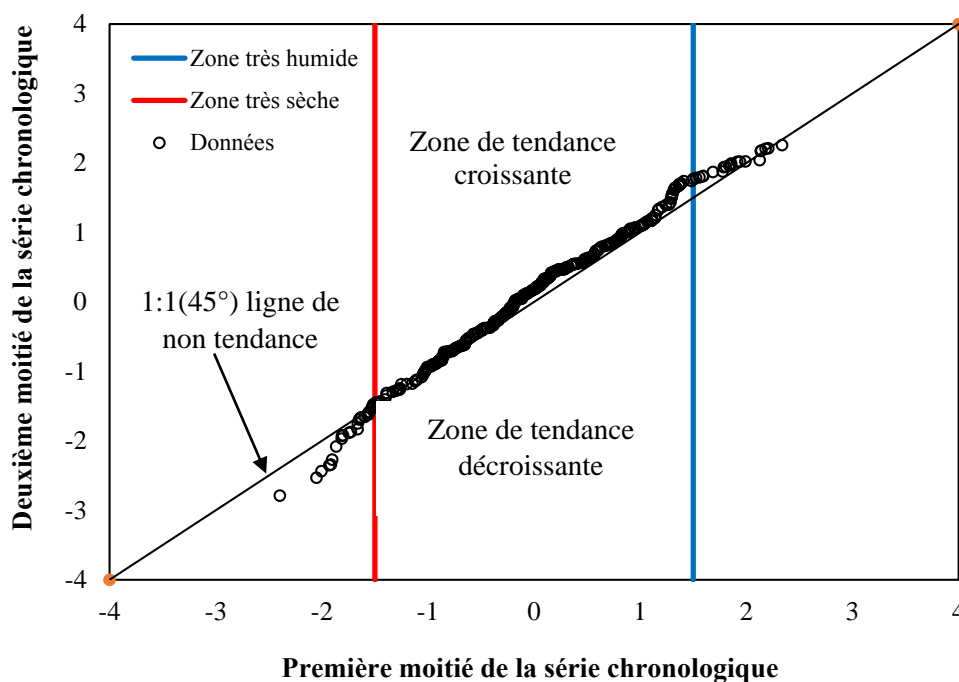


Figure 17. Modèle de la méthode innovante d'analyse de tendance (ITA) montre la zone de tendance à la hausse et à la baisse.

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 17.

Le modèle de la figure 17 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.

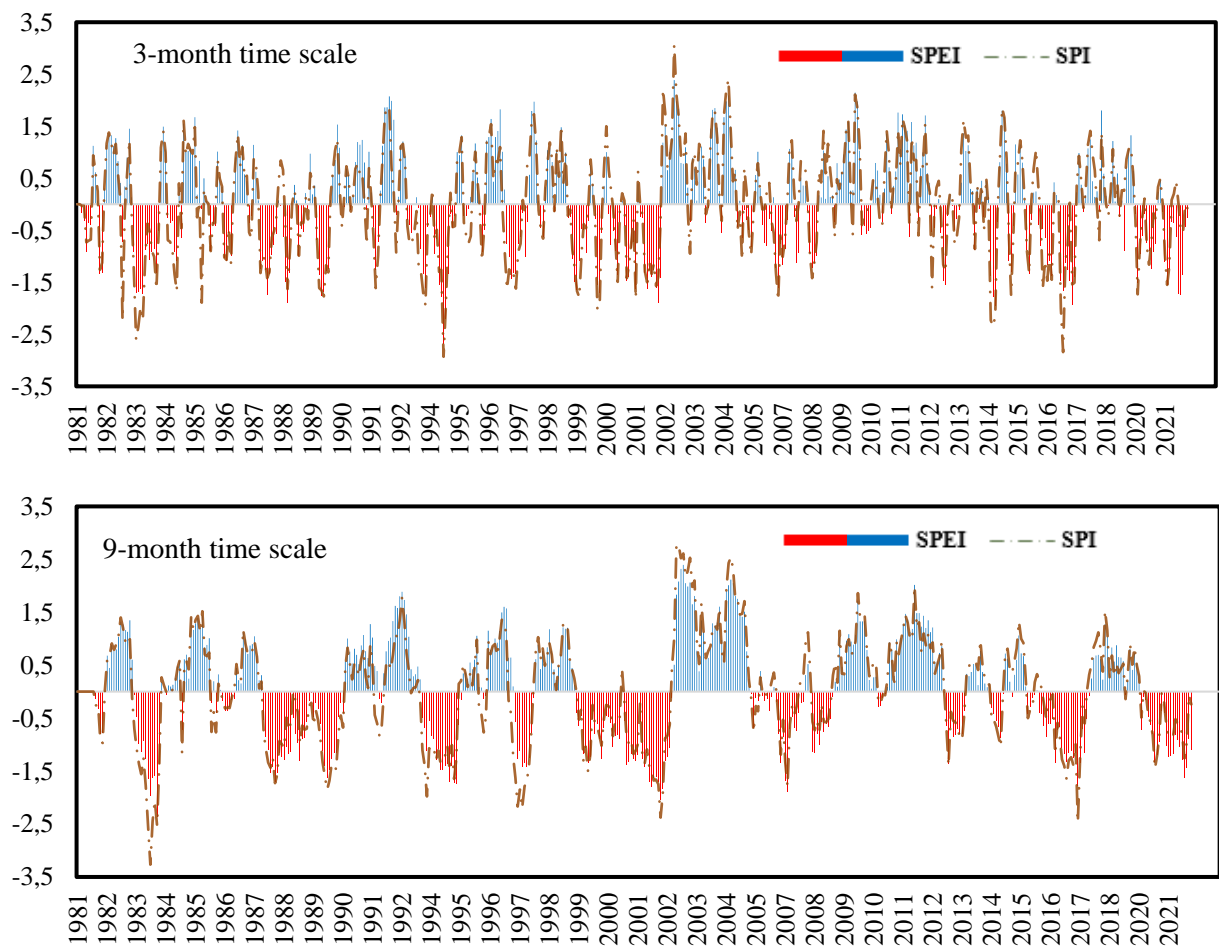
Dans cette étude, la méthode ITA est modifiée en ajoutant deux lignes (rouge et bleue) pour distinguer deux régions. La région sèche (humide) représente les valeurs SPEI inférieures ou égales (supérieures ou égales) à -1.50 (1.50) [28]. Par conséquent, le terme sévérité de la sécheresse fait référence à des valeurs SPEI inférieures à -1.50.

CHAPITRE 4 :

Résultats et discussion

1. Comparaison entre les indices SPI et SPEI :

Cette étude vise à comparer le niveau de concordance entre deux indices, le SPI (Standardized Precipitation Index) et le SPEI (Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index), qui sont des variantes l'un de l'autre. Les indices de sécheresse SPI et SPEI ont été déterminés à partir des données de précipitations et de température entre 1981 et 2021. Les données ont été recueillies auprès de 81 stations pluviométriques situées dans le Nord-Est de l'Algérie. Il convient de souligner que les données de précipitations et de températures ont été obtenues à partir du site de la NASA. Ce site a été utilisé par de nombreux chercheurs pour mener des études qui ont été ultérieurement publiées dans des revues scientifiques. Ces données sont téléchargeables sur le site <https://power.larc.nasa.gov/>. La Figure 18 présente l'analyse des indices SPI et SPEI pour différentes échelles de temps, moyennées sur les différentes stations de la wilaya de Mila.



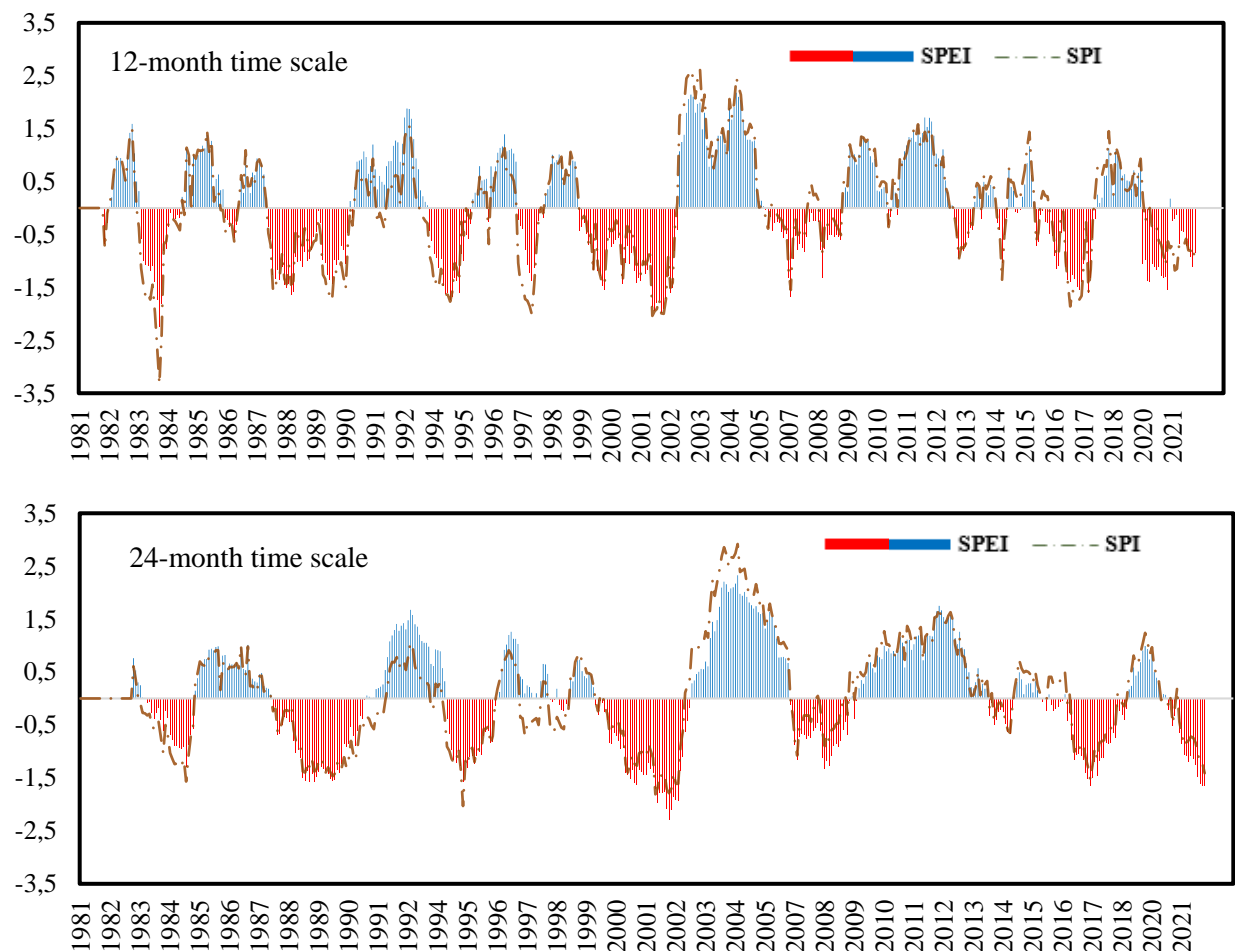


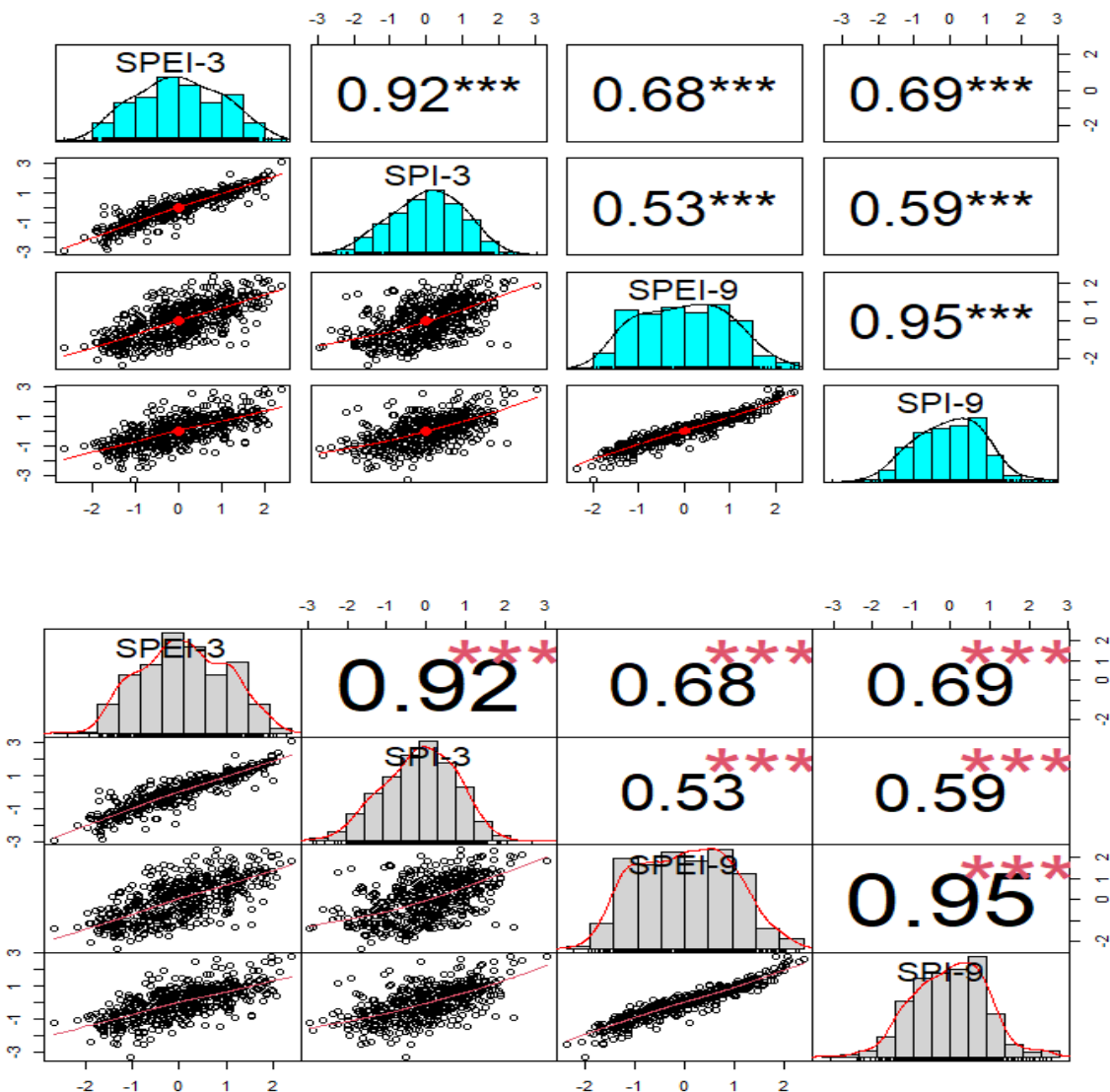
Figure 18 : Analyse de la variation temporelle des indices SPI et SPEI à échelle multiple de 1981 à 2021 à la wilaya de Mila.

D'après la figure, les périodes de temps courtes et moyennes (3, et 9 mois) ont montré la fréquence temporelle maximale d'événements secs et humides, tandis que les échelles de temps plus longues étaient caractérisées par une fréquence temporelle stabilisée. À long terme, ces résultats suggèrent que les réponses des indices SPI et SPEI étaient lentes et cohérentes par rapport aux variations mensuelles des précipitations et de la température. Ce schéma met en évidence clairement les événements secs et humides à l'échelle mensuelle et annuelle. Ainsi, il a été constaté que les échelles de temps plus longues étaient plus adaptées pour identifier les événements historiquement importants.

Les résultats indiquent une sécheresse continue à partir des années 1980, tandis que les années 2000 ont principalement enregistré des événements humides. Cependant, la période allant de 2003 à 2021 a été caractérisée par un mélange d'événements secs et humides, bien que les premiers étaient souvent dominants. Les indices SPI et SPEI (tous deux négatifs) révèlent que les décennies 1980 et 1990 ont connu les événements secs les plus longs, ce qui indique que les événements secs étaient dominants pendant cette période. Par conséquent, l'indice SPEI avait la capacité d'identifier quelques grandes sécheresses dans le la wilaya de Mila (par exemple, 1982-1983, 1993-1994).

2. RELATION LINEAIRE ENTRE SPI et SPEI

La présente étude a utilisé le coefficient de corrélation de Pearson pour analyser la relation entre les indices de sécheresse étudiés à différentes échelles de temps. Selon les résultats de l'analyse, le SPI et le SPEI présentent une relation très forte et significative à 3, 9, 12 et 24 mois ($r > 0,9$, $p < 0,001$) (Tableau 5 et Figure 19). Cette constatation est en contradiction avec l'étude comparative du SPI et du SPEI réalisée par Uddin et al. [29] au Bangladesh, Adnan et al. [30] au Pakistan et Bayissa et al. [31] dans le bassin amont du Nil Bleu en Éthiopie. Contrairement aux résultats de cette étude, Homdee et al. [32] ont comparé les indices SPI et SPEI dans le bassin de la rivière Chi, en Thaïlande, et ont observé une tendance à la baisse. D'autres études contradictoires, dont celles de Kamruzzaman et al. [33] au Bangladesh et de Mahmoudi et al. [34] en Iran, ont comparé le SPI à d'autres indices, tels que l'indice de sécheresse efficace (EDI), et ont constaté de meilleures performances de l'EDI par rapport au SPI.



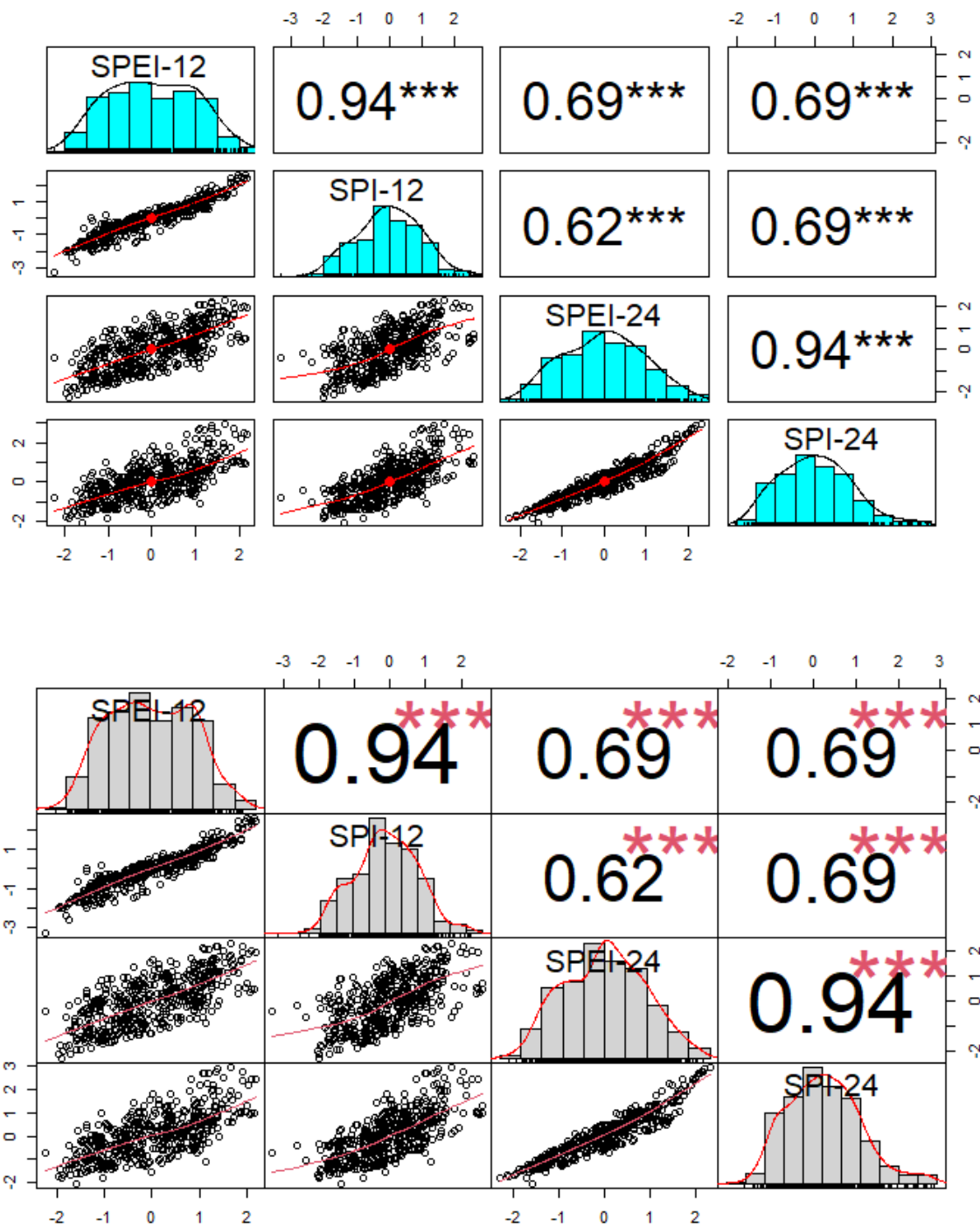


Figure 19 : Graphique de matrice de corrélation avec niveaux de signification entre les indices SPI et SPEI aux échelles de temps de 3, 9, 12 et 24 mois.

Dans cette étude, toutes les tendances des indices SPI et SPEI ont été identifiées comme étant fortes, positives et caractérisées par une fréquence élevée d'épisodes de sécheresse. Cette constatation renforce l'affirmation de Cook et al. [35] selon laquelle le réchauffement climatique a augmenté les occurrences de sécheresse dans de nombreuses régions et localités au cours de ce siècle.

Tableau 5 : Valeurs du coefficient de Pearson au ou seuil de significativité <0.001.

N°	Willaya	3mois	9mois	12mois	24mois
1	Annaba	0,89	0,96	0,96	0,97
2	Batna	0,89	0,91	0,92	0,91
3	Bejaia	0,92	0,96	0,97	0,97
4	Bourj	0,92	0,94	0,94	0,93
5	Constantine	0,92	0,95	0,95	0,93
6	Taref	0,93	0,97	0,98	0,98
7	Guelma	0,92	0,96	0,96	0,96
8	Jijel	0,92	0,95	0,96	0,95
9	Khenchela	0,87	0,89	0,9	0,88
10	Msila	0,89	0,89	0,89	0,88
11	Mila	0,92	0,95	0,94	0,94
12	Oum El Bouaghi	0,92	0,94	0,94	0,93
13	Setif	0,93	0,95	0,95	0,94
14	Skikda	0,87	0,93	0,94	0,94
15	Souk ahras	0,93	0,96	0,96	0,96
16	Tébessa	0,9	0,93	0,93	0,91

La statistique Kappa est un indicateur qui mesure la fiabilité de l'accord entre deux variables. Dans le Tableau 6, l'accord entre les valeurs du SPI et du SPEI a été évalué selon les statistiques Kappa. Selon les résultats obtenus, il a été déterminé qu'il existe un accord substantiel entre les valeurs du SPI et du SPEI pour toutes les périodes de temps.

Table 6 : Test de degré d'accord entre SPI et SPEI

N°	Willaya	R ²				Cohen kappa			
		3mois	9mois	12mois	24mois	3moi	9mois	12mois	24mois
1	Annaba	0.78	0.91	0.92	0.93	0.8	0.9	0.92	0.94
2	Batna	0.79	0.82	0.83	0.83	0.79	0.8	0.8	0.79
3	Bejaia	0.85	0.92	0.93	0.93	0.91	0.93	0.86	0.96
4	Bourj	0.85	0.89	0.89	0.87	0.86	0.89	0.86	0.85
5	Constantine	0,84	0,89	0,90	0,87	0,84	0,89	0,89	0,81
6	Taref	0,86	0,94	0,95	0,96	0,87	0,95	0,96	0,98
7	Guelma	0,85	0,92	0,93	0,92	0,87	0,91	0,93	0,92
8	Jijel	0,84	0,89	0,92	0,90	0,85	0,91	0,91	0,88
9	Khenchela	0,76	0,79	0,81	0,78	0,74	0,76	0,77	0,67
10	Msila	0,79	0,79	0,79	0,77	0,78	0,76	0,76	0,67
11	Mila	0,84	0,89	0,88	0,88	0,84	0,9	0,87	0,86
12	Oum El Bouaghi	0,85	0,88	0,89	0,86	0,84	0,89	0,87	0,82
13	Setif	0.86	0.90	0.91	0.89	0.88	0.9	0.88	0.88
14	Skikda	0.75	0.87	0.88	0.88	0.78	0.85	0.85	0.85
15	Souk ahras	0.86	0.91	0.92	0.91	0.87	0.92	0.91	0.91
16	Tébessa	0.80	0.85	0.86	0.83	0.79	0.85	0.84	0.77

Il y a eu un accord significatif entre les valeurs des indices SPI et SPEI selon les résultats des statistiques Kappa de Cohen. Un accord de niveau moyen (0,6-0,9) a été obtenu entre ces deux techniques, montrant un niveau d'accord de 60 à 90 % pour la période d'étude. Ainsi, ces résultats sont en accord avec les résultats obtenus dans la littérature, notamment l'étude de Ankrah [36], qui a utilisé le graphique de Bland and Altman pour évaluer le niveau d'accord entre les indices SPI et SPEI en tant que techniques de mesure de la sécheresse sur la côte de Winneba-Ghana. Le diagramme de dispersion peut être utilisé pour analyser la relation entre deux variables différentes. Les valeurs de ces deux variables sont interprétées en fonction d'une ligne 1:1 dans le diagramme. Cela signifie que plus la distribution des données se rapproche de la ligne 1:1, plus la relation entre elles est forte. De plus, la Figure 20 présente le graphique de dispersion dans lequel une bonne relation linéaire positive ($R^2 > 0,8$) est observée entre le SPI et le SPEI à toutes les échelles de temps.

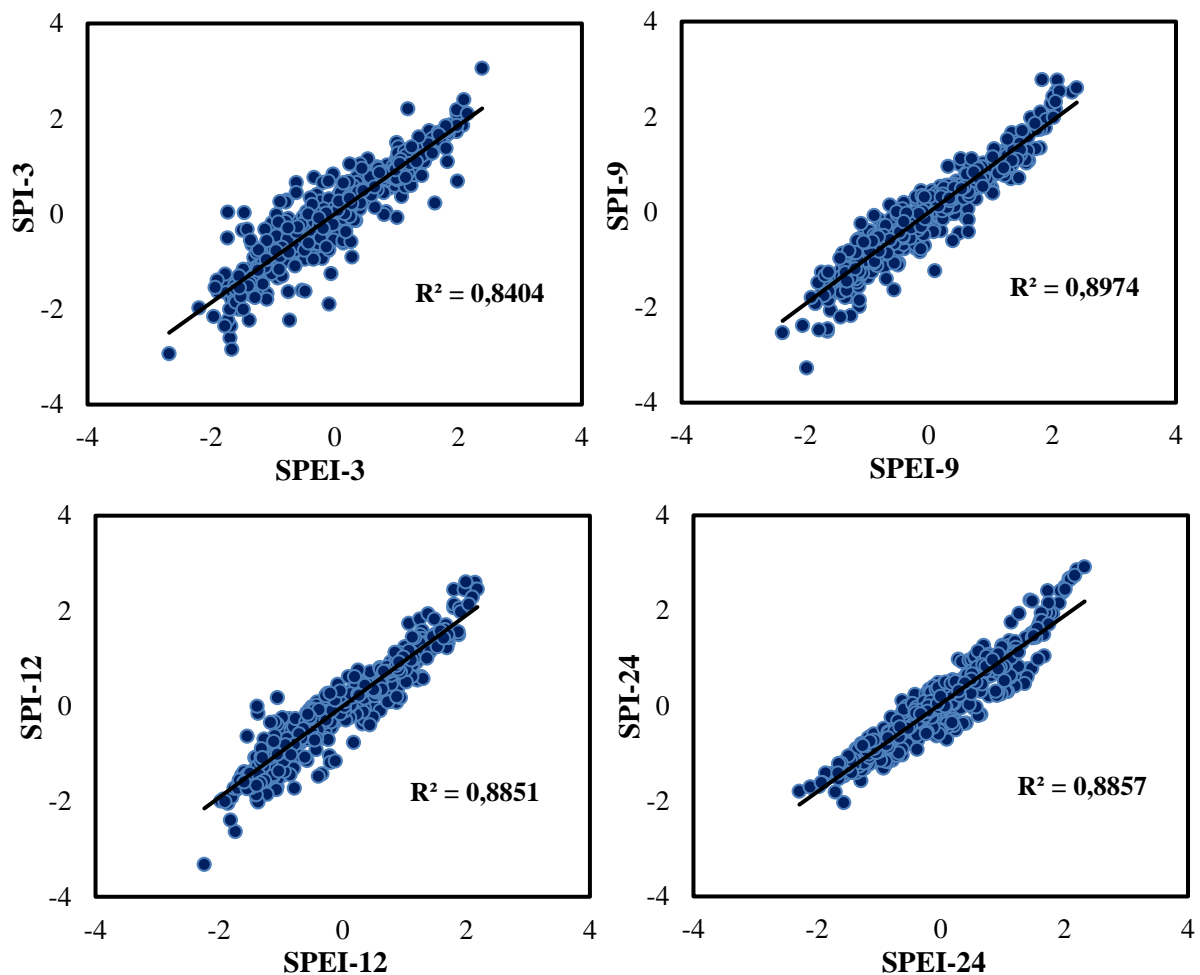


Figure 20 : Diagramme de dispersion montrant la relation linéaire entre les indices SPI et SPEI à différentes échelles de temps pour la période 1981-2021 à la wilaya de Mila.

3. NIVEAU D'ACCORD ENTRE SPI et SPEI :

Le graphique de Bland and Altman permet de déterminer le niveau d'accord ou de différence entre les indices SPI et SPEI (Figure 21). Ici, l'outil principal pour évaluer le niveau d'accord ou de désaccord entre les méthodes est la différence moyenne (biais). Dans un scénario idéal, avec un accord complet entre les méthodes étudiées, la différence moyenne est généralement de 0 [20]. En accord avec cela, la présente étude a trouvé les valeurs de différence moyenne entre les indices comme suit (0.0012, 0.0015, 0.0039, et 0.0028 aux échelles de temps de 3, 9, 12 et 24 mois, respectivement).

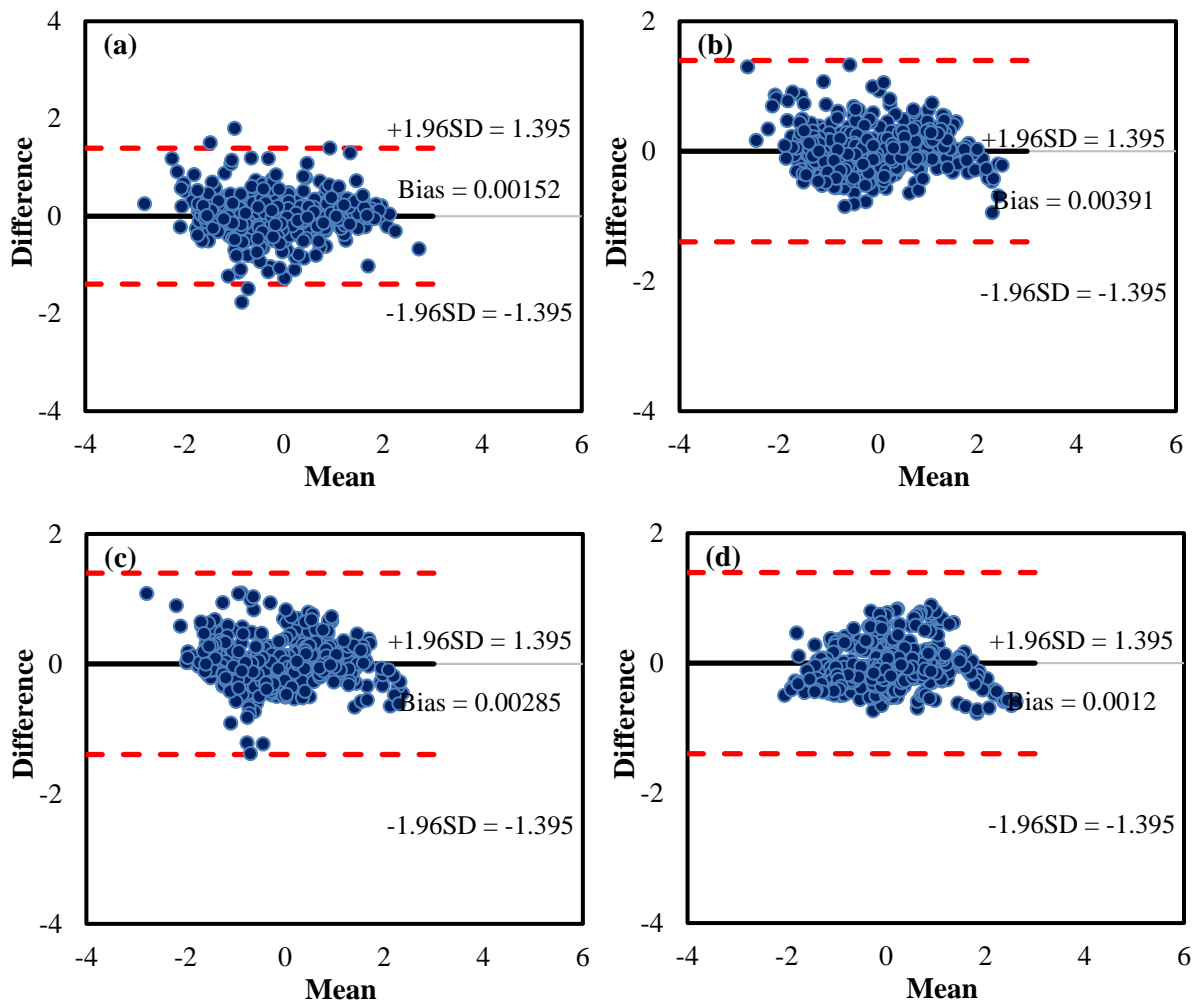


Figure 21 : Graphique de Bland et Altman pour les indices SPI et SPEI aux échelles de temps (a) 3 mois, (b) 9 mois, (c) 12 mois, et (d) 24 mois de la wilaya de Mila.

Ces valeurs sont proches de 0 et indiquent un excellent accord entre SPI et SPEI à différentes échelles de temps. En plus de cela, nos résultats sont en accord avec les résultats de l'étude de Dogan [37]. Dans leur étude, Dogan mentionne qu'un bon accord peut être prédit en cas de réduction de la dispersion des points. Lorsque les points se situent relativement près de la ligne, cela signifie qu'il existe un biais moyen. Les résultats de la présente étude ont établi un bon niveau d'accord, car la plupart des points de dispersion se situent soit aux niveaux d'accord supérieurs ou inférieurs et plus proches de la différence moyenne de chaque échelle de temps.

De plus, l'étude a analysé tous les petits degrés d'accord (c'est-à-dire limite inférieure = biais - 1,96 écart-type, limite supérieure = biais + 1,96 écart-type) aux échelles de temps, ce qui laisse entendre la présence d'un niveau d'accord acceptable entre SPI et SPEI.

4. CARACTERISATION DE LA SECHRESSE DANS LA WILAYA DE MILA :

La wilaya de Mila s'étend sur une superficie de 9 373 km², et se subdivise en 13 daïras et 32 communes. Géographiquement, la wilaya de Mila est située dans la région de la Kabylie, au nord-est de l'Algérie. Elle est bordée au nord par les wilayas de Jijel et de Skikda, à l'est par la wilaya de Constantine, au sud par les wilayas de Batna et d'Oum el Bouaghi et à l'ouest par la wilaya de Sétif.

La localisation de Mila (code ONS 43), au nord de l'Algérie est représentée dans figure 22.

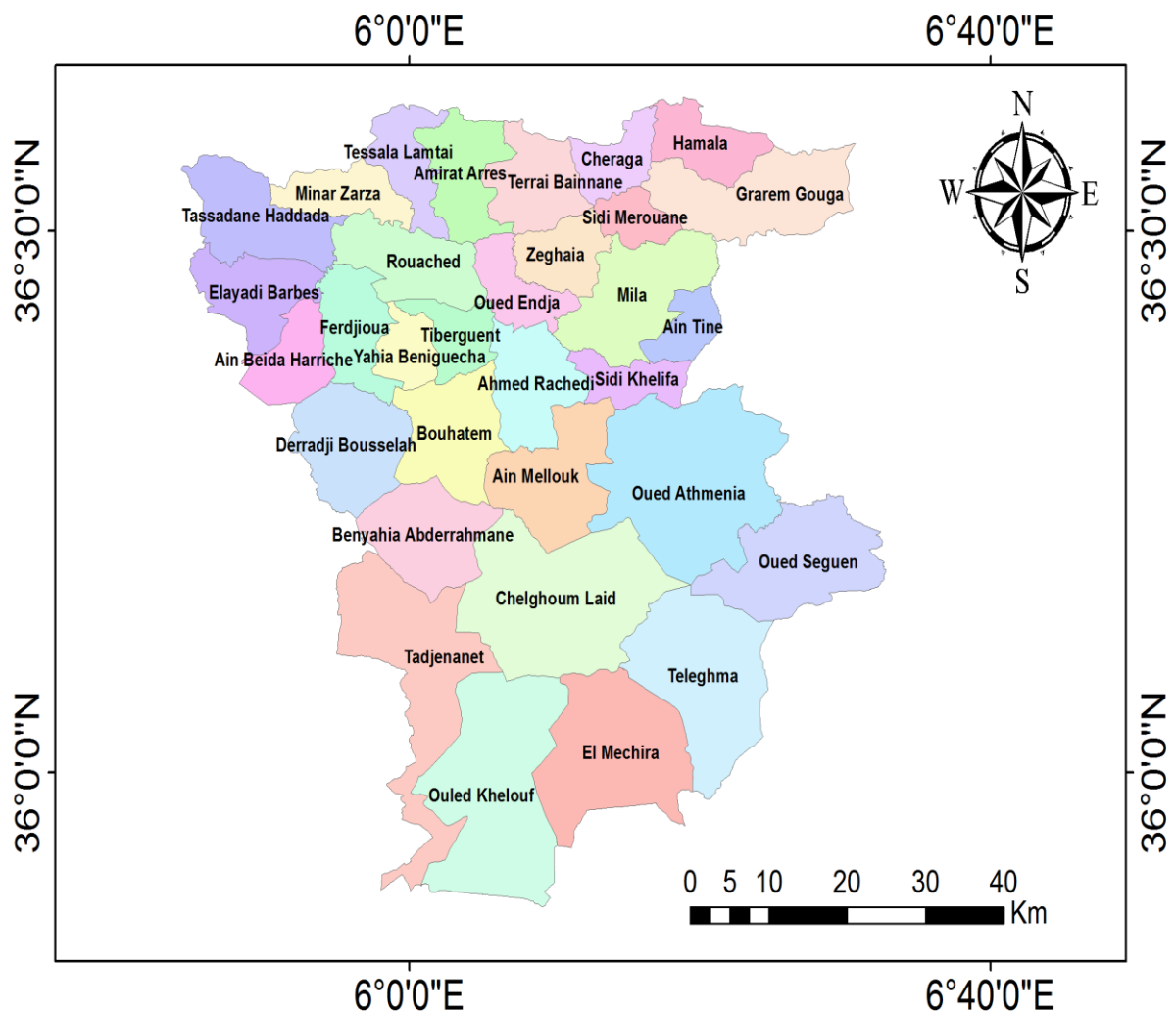


Figure 22 : le découpage administratif de la wilaya de Mila

5. ANALYSE DE LA SECHERESSE METEOROLOGIQUE DE LA WILAYA DE MILA

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 3 et 12 mois pour la wilaya de Mila sont présentées dans les tableaux 3 et 4 sur la période 1981-2021. Il est clair que les caractéristiques des sécheresses évoluent dans le temps.

Table 7 : Caractéristiques de la sécheresse sur une échelle de temps de 3 et 12 mois pour la wilaya de Mila.

SPI 3											
No	Intensité Maximale observée			Durée la plus intense (≤ -2.0)				Durée la plus longue (≤ -1.0)			
	SPI-3	Année	Mois	D	Année	Mag	I	D	Années	M	I
1	-3.19	1994	Juil	2	1983	-5	-2.50	7	01-02	-10.16	-1.45
2	-3.19	1994	Juil	2	2008	-5.24	-2.62	6	93-94	-8.58	-1.43
3	-2.92	1994	Juil	4	1983	-9.30	-2.32	6	83	-11.71	-1.95
4	-3.04	2017	Mai	2	2017	-5.36	-2.68	6	2002	-8.68	-1.44
5	-3.04	2017	Mai	2	2017	-5.36	-2.68	6	2002	-8.68	-1.44

SPI 12											
No	Intensité Maximale observée			Durée la plus intense (≤ -2.0)				Durée la plus longue (≤ -1.0)			
	SPI-12	Année	Mois	D	Année	Mag	I	D	Années	M	I
1	-3.17	1983	Déc	3	83-84	-7.83	-2.61	10	2002	-18.28	-2.61
2	-3.05	1983	Déc	4	1994	-8.37	-2.09	31	88-90	-43.58	-1.40
3	-3.34	1983	Déc	4	1997	-8.93	-2.23	11	90	-18.51	-1.68
4	-3.19	1983	Déc	7	2017	-16.06	-2.29	17	01-02	-28.45	-1.67
5	-3.19	1983	Déc	7	2017	-16.06	-2.29	17	01-02	-28.45	-1.67

(D) : Durée de la sécheresse ; (M) : Magnitude de la sécheresse ; (I) Intensité de la sécheresse

À des échelles de temps plus longues, les sécheresses deviennent moins fréquentes mais durent plus longtemps. Les séries chronologiques du SPI sur une période de trois mois révèlent des épisodes de sécheresse importants en 1983. Des schémas similaires sont observés pour une échelle de temps de 12 mois. Comme l'indique le tableau 7, presque toutes les stations ont enregistré des pics d'intensité inférieurs à -3, ce qui correspond à une catégorie extrême. Tous ces pics d'intensité se sont produits en 1983, avec le pic le plus élevé (SPI = -3,19) en décembre de cette année, touchant le sud de la wilaya de Mila, notamment Ouled Khelouf, Tadjenanet, Mechira, Oued El Athmania, Oued Seggan et Teleghma. Cette situation a eu un impact sur les ressources en eau pour l'irrigation provenant des forages et du périmètre d'irrigation de Teleghma.

Tableau 8 : Nombre de mois et fréquences des classes de sécheresse sur une échelle de temps de 3 et 12 mois pour la wilaya de Mila.

SPI 3						
No	Nombre de mois			Fréquence (%) des classes		
	Sécheresse modérée	Sécheresse forte	Sécheresse extrême	Sécheresse modérée	Sécheresse forte	Sécheresse extrême
1	50	24	9	10.16	4.88	1.83
2	52	17	11	10.57	3.45	2.23
3	47	25	13	9.55	5.08	2.64
4	51	27	11	10.36	5.49	2.23
5	51	27	11	10.36	5.49	2.23

SPI 12						
No	Nombre de mois			Fréquence (%) des classes		
	Sécheresse modérée	Sécheresse forte	Sécheresse extrême	Sécheresse modérée	Sécheresse forte	Sécheresse extrême
1	38	35	9	7.72	7.11	1.83
2	67	25	6	13.62	5.08	1.22
3	35	28	12	7.11	5.69	2.44
4	51	15	17	10.36	3.05	3.45
5	51	15	17	10.36	3.05	3.45

La sécheresse la plus longue a duré 31 mois, de mai 1988 à octobre 1990, au centre de la wilaya. Son intensité maximale était de -3,05, avec une magnitude de -43,58 et une intensité moyenne de -1,40. Cette sécheresse a eu un impact plus significatif sur la région par rapport aux sécheresses précédemment mentionnées.

6. ANALYSE DE TENDANCE DES PERIODES SECHE ET HUMIDE :

L'application de l'analyse des tendances innovantes (ITA) dans la wilaya de Mila a révélé des résultats significatifs concernant les périodes humides de l'indice Standardized Precipitation Index (SPI). La Figure 23 et le tableau 9 présentent les calculs des tendances, fournissant des interprétations pour chaque catégorie (sévère et extrême sèche ou humide).

La position des points de dispersion des données par rapport à la ligne de non tendance 1:1 permet de déterminer si la tendance est croissante ou décroissante. En se basant sur ces points, les interprétations nécessaires sont fournies dans chaque colonne du tableau 5. La notation "(o)" indique l'absence de tendance significative, tandis que les symboles "+(-)" indiquent une augmentation (diminution) significative de la tendance.

La variabilité est évaluée en considérant la position du barycentre des deux écarts types. Si le barycentre de l'écart type se situe au-dessous (au-dessus) de la ligne de non tendance (ligne 1:1), cela indique une diminution (augmentation) de la variabilité au sein de la série d'enregistrements.

Tableau 9 : Résultats des tendances de l’SPEI par la méthode ITA

Station	SPEI_3		SPEI_9		SPEI_12		SPEI_24	
	S/E Sèche	S/E Humide	S/E Sèche	S/E Humide	S/E Sèche	S/E Humide	S/E Sèche	S/E Humide
ST_1	+	+	+	+	+	+	+	0
ST_2	+	+	+	+	+	+	+	0
ST_3	+	+	+	+	+	+	-	0
ST_4	+	+	+	+	+	+	-	+
ST_5	+	+	+	+	+	+	-	+

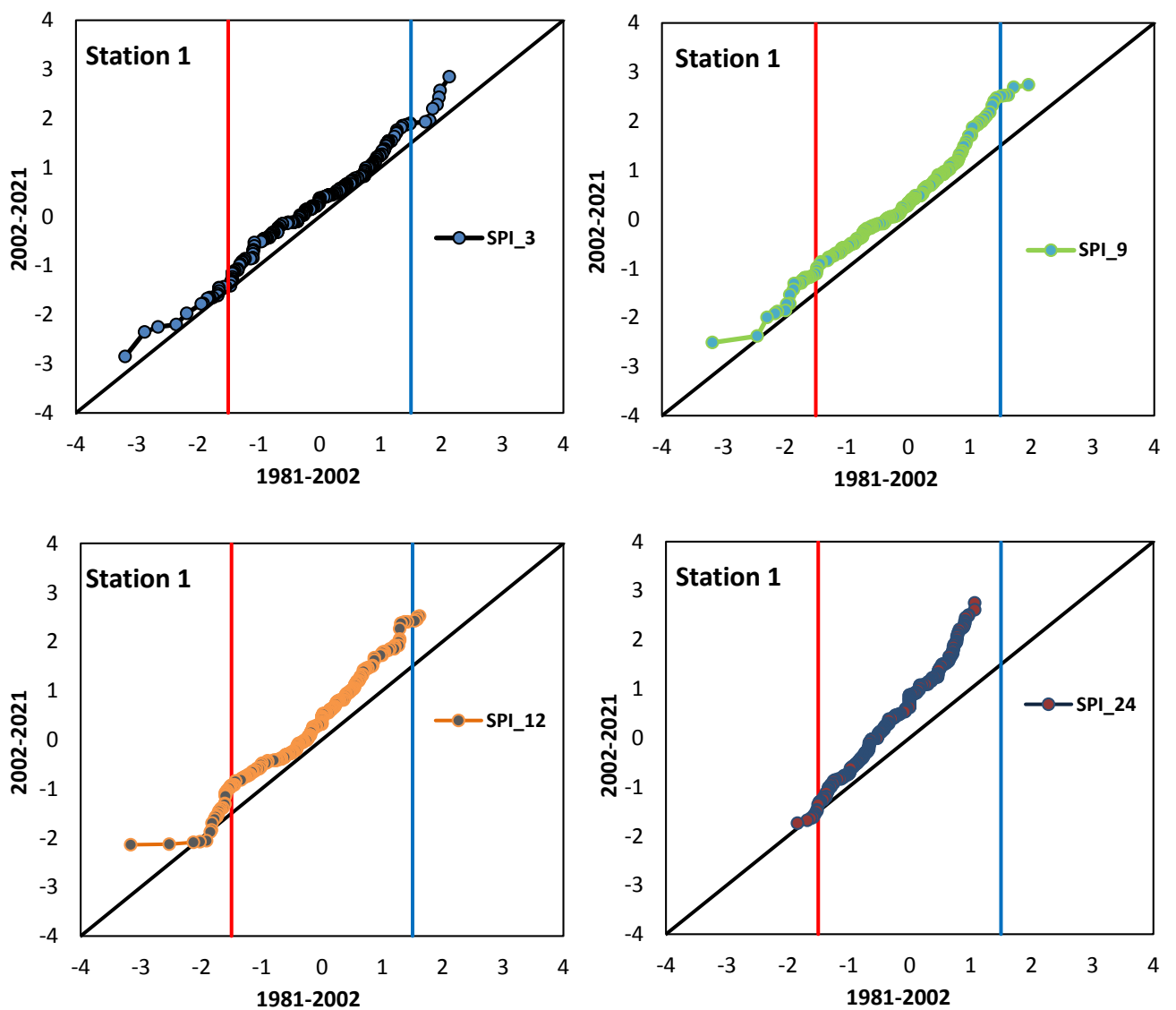


Figure 23 : Exemple des résultats de la méthode ITA pour les SPI (3, 9, 12 et 24 mois) à la wilaya de Mila.

Les résultats de l'étude révèlent une tendance positive dans les périodes humides, avec une augmentation de la fréquence ou de l'intensité des événements de pluie dans les catégories sévère et extrême de l'indice SPI. Cette tendance suggère un changement dans les régimes de précipitations au fil du temps, ce qui peut avoir des implications significatives pour les écosystèmes, l'agriculture et la gestion des ressources en eau.

Les tendances positives observées dans les périodes humides peuvent être attribuées à plusieurs facteurs potentiels. Tout d'abord, le changement climatique d'origine anthropique joue un rôle majeur. L'augmentation de la température de surface résultant du changement climatique favorise l'évaporation de l'eau, ce qui entraîne une plus grande disponibilité de vapeur d'eau dans l'atmosphère. Cela crée les conditions propices à des précipitations plus fréquentes ou plus intenses.

De plus, les changements dans l'utilisation des terres, tels que la déforestation ou l'urbanisation accrue, peuvent modifier les caractéristiques hydrologiques d'une région. Ces changements peuvent également influencer les régimes de précipitations en modifiant les schémas de circulation de l'air et en altérant la capacité des sols à retenir l'eau.

Les résultats de l'analyse de la tendance de l'indice SPI à 24 mois, en utilisant la méthode ITA, ont révélé une tendance inverse par rapport aux périodes précédentes (3, 9 et 12 mois). En effet, 60% des stations étudiées ont montré une augmentation de la sévérité de la sécheresse, tandis que 40% ont montré une augmentation de la condition humide.

Les indices SPI à 12 et 24 mois sont généralement utilisés comme des indicateurs indirects pour évaluer la gestion des ressources en eau. Dans le contexte du changement climatique, les évaluations mondiales suggèrent que les sécheresses peuvent à la fois augmenter et diminuer à l'avenir, en fonction de l'emplacement géographique. Cela signifie que certaines régions peuvent connaître des sécheresses plus sévères, tandis que d'autres peuvent bénéficier d'une augmentation des conditions humides.

Ces tendances inverses observées dans les périodes sèches à long terme ont des implications importantes pour les ressources en eau utilisées pour l'irrigation, notamment les forages et le périmètre d'irrigation de Teleghma. Si les sécheresses augmentent dans la région, cela pourrait entraîner une diminution de la disponibilité des ressources en eau pour l'irrigation, ce qui pourrait avoir un impact négatif sur l'agriculture et la productivité des cultures.

En conclusion, l'analyse de la tendance de l'indice SPI à 24 mois a révélé une tendance inverse par rapport aux périodes précédentes, avec une augmentation de la sévérité de la sécheresse dans une majorité de stations. Ces résultats soulignent l'importance de prendre en compte les variations régionales et les évolutions à long terme lors de la gestion des ressources en eau pour l'irrigation et la planification agricole dans la région de Teleghma.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de notre étude est de comparer les résultats des indices de sécheresse SPI (Standardized Precipitation Index) et SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index) à différentes échelles de temps (3, 9, 12 et 24 mois) dans le Nord-Est de l'Algérie. Nous avons utilisé plusieurs méthodes d'analyse pour évaluer l'association et le degré d'accord entre ces deux indices.

Tout d'abord, nous avons utilisé le graphique de Bland et Altman afin de comparer les valeurs obtenues à partir des deux indices. Cette méthode nous a permis de vérifier s'il existe des biais systématiques ou des erreurs significatives entre les mesures fournies par les deux indices. Ensuite, nous avons calculé le coefficient de corrélation de Pearson pour évaluer la relation linéaire entre les deux indices. Enfin, nous avons utilisé le test de Kappa de Cohen pour évaluer le niveau d'accord entre les deux indices en termes de classification des conditions de sécheresse.

Par ailleurs, nous avons appliqué la méthode ITA (Innovative Trend Analysis) afin d'identifier les tendances des conditions de sécheresse sévère et extrême. Cette méthode nous a permis de détecter les changements significatifs dans les séries temporelles et d'analyser l'évolution des conditions de sécheresse sur la période étudiée.

Les résultats de notre étude ont démontré une association positive et significative entre les indices SPI et SPEI à différentes échelles de temps. Les valeurs de corrélation ($R > 0.90$) soulignent une relation étroite entre les deux indices, suggérant qu'ils fournissent des informations similaires sur les conditions de sécheresse dans la zone étudiée.

Cependant, malgré cette forte corrélation, le SPEI s'est avéré plus performant que le SPI dans la détection des sécheresses, l'évaluation de leur gravité et la détection des conditions extrêmes. Cette supériorité du SPEI s'explique par le fait qu'il intègre l'évapotranspiration potentielle (ETP) dans son calcul. L'inclusion de l'analyse de l'ETP permet une meilleure représentation de l'interaction entre les précipitations et l'évaporation, ce qui est essentiel pour évaluer les conditions hydriques réelles et leur impact sur les ressources en eau disponibles.

Les variations de l'ETP influent sur le bilan hydrique de la zone étudiée, notamment sur les écoulements de surface et les besoins en eau naturels. Ainsi, des augmentations de l'ETP peuvent avoir des conséquences négatives sur les rendements agricoles dans cette zone, où l'agriculture dépend principalement des précipitations. En conséquence, l'exigence évaporative, prise en compte par le SPEI, devient un élément essentiel pour définir les conditions de sécheresse dans la région.

Les résultats de notre étude indiquent que le SPEI est un outil d'évaluation de la sécheresse plus robuste que le SPI. Cependant, il est important de souligner l'importance du SPI, car il présente un bon accord avec le SPEI dans notre analyse. Par conséquent, le SPI peut être utilisé lorsque les données de température ne sont pas disponibles pour calculer le SPEI. En conclusion, la plupart des travaux antérieurs sur la sécheresse en Algérie se sont concentrés sur l'utilisation de l'indice SPI et aucune étude ne s'est penchée sur l'utilisation de l'indice SPEI.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] Pruneau et al, (2004). Guide pédagogique d'éducation au changement climatique. Université de Moncton, groupe de recherche littoral et vie.
- [2] ADEM, (2015). Agence De l'Environnement du Ministère De L'Energie, le changement climatique paris.
- [3] GIEC et OMM, (2007). Bilan 2007 des changements climatiques.
- [4] Wilhite, D.A., (2000). Drought as a Natural Hazard: Concepts and Definitions. Drought: A Global Assessment Routledge, London, UK.
- [5] Soro, G.E.; Anouman, D. G.L.; Goula, BI T.A.; Srohorou, B. et Savane, I., (2014). Caractérisation des séquences de sécheresse météorologique à diverses échelles de temps en climat de type soudanais : Cas de l'extrême Nord-ouest de la Cote d'ivoire. Larhyss/Journal, 18, 107-124.
- [6] Obassi, G.O., (1994). WMO's Role in the International Decade for Natural Disaster Reduction. Bulletin of American Meteorological Society, 75, 1655–1661.
- [7] FAO, juillet 1996. La planification des stratégies contre les effets de la sécheresse.
- [8] OMM, 2006. Suivi de la sècheresse, progrès et enjeu futur. ISBN 92-63-21006-3.
- [9] Organisation météorologique mondiale (OMM) et Partenariat mondial pour l'eau (GWP), (2016). Manuel des indicateurs et indices de sécheresse (M. Svoboda et B.A. Fuchs), Programme de gestion intégrée des sécheresses, Integrated Drought Management Programme Tools and Guidelines Series 2, Genève.
- [10] Monteith, J.L., (1965). Evaporation and environment: the state and movement of water in living organisms. Symp. Soc. Exp. Biol. 19, 205–234.
- [11] Mavromatis, T., (2007). Drought index evaluation for assessing future wheat production in Greece. Int. J. Climatol., 27, 911–924.
- [12] Vicente-Serrano SM, Begueria S, Lopez-Moreno JI (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. J. Clim 23:1696–1718
- [13] Dechemi N. Bermad A. Hamriche A. (1994). Simulation des débits moyens mensuels en zone semi-aride par l'analyse en composantes principales. Hydrol. continent., 19, 1, 17-24
- [14] Bougara H, Hamed KB, Borgemeister C, Tischbein B, Kumar N (2020). Analyzing Trend and Variability of Rainfall in Northwestern Algeria. Atmosphere. 11(4):347.

- [15] MOKADMI Saleh., (2012). Etude hydrologique et modélisation du transport solide en suspension dans le sous bassin versant de l'oued Mekerra. Mémoire de Magister, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, p.153.
- [16] Benarfa N, Louadi K, Maghni N, Aguib S, Terzo M, Berchi S, Benachour K (2008) Les Hyménoptères Apoidea de l'Algérie orientale avec une liste d'espèces et comparaison avec les faunes ouestpaléarctiques. Bulletin de la Société entomologique de France, pp 459-472
- [17] Beguería S., Vicente-Serrano S.M., Reig F., Latorre B. (2014). Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: Parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *Int. J. Climatol.*, 34, 3001–3023.
- [18] Thornthwaite C.W., (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.*, 55–94.
- [19] Bland JM, Altman DG (1986) Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *Lancet* 1(8476):307–310.
- [20] Giavarina D (2015) Understanding Bland Altman analysis. *Biochem Med* 25(2):141–151.
- [21] Kaira A (2017) Decoding the Bland–Altman plot: basic review. *J Pract Cardiovasc Sci* 3(1):36.
- [22] Watson PF, Petrie A (2010) Method agreement analysis: a review of correct methodology. *Theriogenology* 73(9):1167–1179.
- [23] Fleiss J (1972) Measuring nominal scale agreement among many raters. *Psychol Bull* 76(5):378–382.
- [24] Viera AJ, Garrett JM (2005) Understanding interobserver agreement: the kappa statistic. *Fam Med* 37(5):360–363.
- [25] Cohen J (1960) A coefficient of agreement for nominal scale. *Educ Psychol Meas* 20(1):37–46.
- [26] Vergni L, Todisco F and Di Lena B (2021) Evaluation of the similarity between drought indices by correlation analysis and Cohen's Kappa test in a Mediterranean area. *Natural Hazards* 108 (2): 2187–2209.
- [27] Şen Z (2012). An innovative trend analysis methodology. *J Hydrol Eng* 17(9):1042–1046.
- [28] Caloiero T (2018) SPI trend analysis of New Zealand applying the ITA technique. *Geosciences* 2018(8):101.
- [29] Uddin MJ, Hu J, Islam ARMT, Eibek KU, Nasrin MZ. (2020) A comprehensive statistical assessment of drought indices to monitor drought status in Bangladesh. *Arab J Geosci* 13:323.
- [30] Adnan S, Ullah K, Shuanglin L, Gao S, Khan AH, Mahmood R (2018) Comparison of various drought indices to monitor drought status in Pakistan. *Clim Dyn* 51:1885–1899.

- [31] Bayissa Y, Maskey S, Tadesse T, Van Andel SJ, Moges S, Van Griensven A, Solomatine D (2018) comparison of the performance of six drought indices in characterizing historical drought for the Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Geosciences* 8(3):81.
- [32] Homdee T, Pongput K, Kanae S. A (2016) A comparative performance analysis of three standardized climatic drought indices in the Chi River basin, Thailand. *Agric Nat Resour* 50(3):211–219.
- [33] Kamruzzaman M, Cho J, Jang MW, Hwang S. (2019) Comparison of the applicability of SPI and EDI drought indices to Bangladesh weather drought assessment. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 61(1):145–159.
- [34] Mahmoudi P, Rigi A, Kamak MM. (2019) A comparative study of precipitation-based drought indices with the aim of selecting the best index for drought monitoring in Iran. *Theor Appl Climatol* 137:3123–3138.
- [35] Cook BI, Smerdon JE, Seager R, Coats S. (2014) Global warming and 21st century drying. *Clim. Dyn* 43(9-10): 2607-2627.
- [36] Ankrah J (2021) Comparative assessment of standard precipitation index and standard precipitation evapotranspiration index as drought evaluation tools in Coastal Winneba-Ghana. *Journal of Geography, Environment and Earth Science International* 25(6): 39-54.
- [37] Doğan NÖ (2018) Bland-Altman analysis: A paradigm to understand correlation and agreement. *Turkish Journal of Emergency Medicine* 18(4):139-141.