

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

**Surveillance de l'impact du changement climatique
sur les indices de climat extrême dans le centre-
ouest du Nord de l'Algérie : cas du bassin du haut et
moyen Cheliff**

Réalisé par :

- SAHLI Bachir

Soutenu devant le jury :

M. MOUSSOUNI Abderzak

M. KEBLOUTI Mehdi

M. BERHAIL Sabri

Président

Examineur

Promoteur

Année universitaire : 2023/2024

Remerciements :

-Je remercie Dieu tout puissant de m'avoir donné tout de patience et de courage pour accomplir ce travail.

- J'exprime toute ma gratitude au Dr BERHAIL Sabri , enseignant à centre universitaire abdelhafid boussouf , qui a accepté de diriger ce travail. Pour la confiance et la liberté qu'il m'a accordée, tout en étant toujours très disponible, je tiens à lui exprimer ma profonde reconnaissance.

- Aussi je remercie les **enseignants M. ABDERZAK MOUSSOUNI le Président et M. KEBLOUTI Mehdi l'Examineur et M. BERHAIL Sabri** ,les jurys d'examiner ce travail .

- Mes sincères remerciements à mes enseignants qui ont contribué à ma formation

- J'adresse également mes plus vifs remerciements à mes collègues et surtout mon collègue guendouz seyyid ali

Dédicaces :

Je dédie ce modeste travail à :

- ***mon père***
- ***Ma chère mère***
- ***Ma famille et tous mes amis.***

SOMMAIRE:

Resumé

Abstract

ملخص

Abréviation

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale1

CHAPITRE 1 : synthèse bibliographique

1. Introduction.....	3
2. Changement climatique.....	3
3. SECHERESSE	4
4. ANALYSE DES TENDANCES DES PRECIPITATIONS : L'IMPORTANCE DES INDICES DE CLIMAT EXTREME.....	6

CHAPITRE 2 : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

1. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE.....	8
1.1. Situation géographique de bassin versant de Cheliff.....	8
2. CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES	9
2.1. Caractéristiques morphométriques du bassin	9
2.2. Forme du bassin versant	10
2.3. Le rectangle équivalent	10
3. LA TOPOGRAPHIE	11
4. CLIMATOLOGIE.....	13
4.1. Analyse statistique des données pluviométriques.....	13
4.2. Caractéristiques des postes pluviométriques	13
5. VARIATION DES PRECIPITATIONS ANNUELLES DANS LE TEMPS ET DANS L'ESPACE	14
6. VARIATION DES PRECIPITATIONS SAISONNIERES	15

6.1. Saison automnale	15
6.2. Saison hivernale	16
6.3. Saison printanière.....	17
6.4. Saison estivale	18
7. Conclusion	19

CHAPITRE 03 : MATERIEL ET METHODE

1. Introduction	20
2. ETUDE DE LA TENDANCE PAR LE TEST DE MANN-KENDALL	20
2.1. Estimation de l'ampleur du changement (Sen's slope estimator)	21
3. RClimDex.....	21
3.1. Téléchargement et installation de RClimDex	21
4. INDICES CLIMATIQUES	24
4.1.Indices basés sur les percentiles.....	25
4.2.Indices absolus représentant les valeurs maximum ou minimum dans une saison ou une année.....	25
4.3.Indices seuils correspondant au nombre de jours où une valeur de température ou de précipitations tombe au-dessus ou en-dessous d'un seuil fixé	25
4.4.Indices de durée représentant des périodes de chaleur, de froid, d'humidité, de sécheresse excessive, de longueur de la saison de pluies, et des périodes de douceur.....	25
4.5.D'autres indices incluent	25
5. Conclusion	26

CHAPITRE 4 : ETUDE DE LA VARIABILITE ET DE REVOLUTION DE LA PLUVIOMETRIE

1.Introduction	27
2. ETUDE DE LA TENDANCE DES PRECIPITATION	27
2.1.Tendance des précipitations annuelle	27
2.2. Tendance des précipitations saisonnière	30
2.2.1. Saison automnale	30
2.2.2. Saison hivernale	30
2.2.3. Saison printanière.....	31
2.2.4 Saison estivale	32

3. ETUDE DES TENDANCES DES PRECIPITATIONS EXTREMES.....	33
3.1. CWD (Jours de pluie consécutifs)	33
3.2. CDD (Jours secs consécutifs)	35
3.3. SDII (Indice simple d'intensité journalière).....	36
3.4.RX1day (Hauteur maximale de précipitations sur 1 jour)	38
3.5. RX5day (Hauteur maximale de précipitations sur 5 jours).....	39
3.6. R10 (Nombre de jours de fortes précipitations)	41
3.7. R20 (Nombre de très fortes précipitations)	42
3.8. R50 (Nombre de jours au-dessus de 50 mm)	44
3.9. R95p (Jours très humides)	45
3.10. R99p (Jours extrêmement humides)	47
3. 11. PRCTOT (Précipitations annuelles totales par jour de pluie)	48
4. Conclusion	50
Conclusion générale	51
Référence bibliographique	52

Résumé

Les variations spatiales et temporelles des indices de précipitations ont été analysées pour le centre-ouest du nord de l'Algérie. Cette étude couvre une période de trente ans et repose sur les relevés de treize (13) stations de mesure située dans cette région, fournies par l'Agence nationale pour les ressources hydrauliques (ANRH). Les indices extrêmes ont été calculés en se basant sur les données journalières de précipitations, conformément à la méthodologie recommandée par l'équipe d'experts sur la détection et les indices de changement climatique (ETCCDI).

Pour mener à bien les analyses, divers logiciels statistiques ont été utilisés, notamment RCLimDex, logiciel R et Mann Kendall. La base de données a été soigneusement triée et structurée plusieurs fois afin d'assurer sa compatibilité avec ces outils. Les résultats obtenus révèlent une tendance à la hausse des indices de précipitations extrêmes.

Mots-clés : Indices extrêmes, Tendance, ETCCDI, RCLimDex, Pluies extrêmes, Centre-ouest du nord de l'Algérie

Abstract :

Spatial and temporal variations in precipitation indices were analyzed for central-western northern Algeria. The study covers a thirty-year period and is based on data from thirteen (13) measuring stations in this region, supplied by the Agence Nationale pour les Ressources Hydrauliques (ANRH). Extreme indices were calculated on the basis of daily rainfall data, in accordance with the methodology recommended by the Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI).

Various statistical software packages were used to carry out the analyses, including RCLimDex, R software and Mann Kendall. The database was carefully sorted and structured several times to ensure compatibility with these tools. The results obtained show an upward trend in extreme precipitation indices.

Keywords: Extreme indices, Trend, ETCCDI, RCLimDex, Extreme rainfall, Central-western northern Algeria

ملخص:

تم تحليل التغيرات المكانية والزمانية لمؤشرات هطول الأمطار في منطقة الوسط الغربي من شمال الجزائر. تغطي هذه الدراسة فترة ثلاثين عامًا وتعتمد على بيانات ثلاث عشرة (13) محطة قياس تقع في هذه المنطقة، والتي تم توفيرها من قبل الوكالة الوطنية للموارد المائية (ANRH) تم حساب المؤشرات القصوى بناءً على بيانات هطول الأمطار اليومية، وفقًا للمنهجية الموصى بها من قبل فريق الخبراء المعني بالكشف عن تغير المناخ ومؤشراته (ETCCDI).

لاستكمال التحليلات، تم استخدام العديد من البرامج الإحصائية، بما في ذلك R و RCLIMDEX وبرنامج R و Mann Kendall. تم فرز قاعدة البيانات وهيكلتها بعناية عدة مرات لضمان توافقها مع هذه الأدوات. تكشف النتائج المستخلصة عن اتجاه تصاعدي في مؤشرات هطول الأمطار القصوى.

كلمات مفتاحية: المؤشرات المتطرفة، الاتجاهات المتطرفة، مؤشر التغير المناخي في وسط غرب الجزائر، مؤشر التغير المناخي في وسط غرب الجزائر

Liste des abréviations :

(OMM) : L'Organisation Météorologique Mondiale .

(ETCCDI) : l'Expert Team on Climat Change Détection and Indices .

(A.N.R.H) : l'Agence Nationale des Ressources Hydraulique.

(NCDC) : National Climat Data Center .

(ETCCDMI) : Expert Team on Climat Change Détection, Monitoring and Indices .

(CWD) : Jours de pluie consécutifs .

(CDD) : Jours secs consécutifs .

SDII : Indice simple d'intensité journalière .

(RX1day) : Hauteur maximale de précipitations sur 1 jour.

(RX5day) : Hauteur maximale de précipitations sur 5 jours.

(R10) : Nombre de jours de fortes précipitations.

(R20) :Nombre de très fortes précipitations.

(R50) : Nombre de jours au-dessus de 50 mm .

(R95p) : Jours très humides .

(R99p) : Jours extrêmement humides.

(PRCTOT) : Précipitations annuelles totales par jour de pluie.

Liste des figures :

Figure 1 : Situation géographique du bassin du haut et du moyen Cheliff.....	8
Figure 2 : carte des ordres du réseau hydrographique de la zone d'étude.....	9
Figure 3 : Modèle numérique de terrain du bassin du haut et du moyen Cheliff	11
Figure 4 : Raster des pentes structuré en 6 classes de la zone d'étude.....	12
Figure 5 : Localisation des stations pluviométriques dans la zone d'étude.....	13
Figure 6 : Carte de la pluie moyenne interannuelle de la zone d'étude (1980-2011).....	14
Figure 7 : Carte de la pluie moyenne pour la saison automnale (1980-2011).....	15
Figure 8 : Carte de la pluie moyenne pour la saison hivernale (1980-2011).....	16
Figure 9 : Carte de la pluie moyenne pour la saison printanière (1980-2011).....	17
Figure 10 : Carte de la pluie moyenne pour la saison estivale (1980-2011).....	19
Figure 11 : Présentation du menu déroulant dans le logiciel R.....	22
Figure 12 : Présentation de RClimDex.....	22
Figure 13 : Fenêtre de définition des paramètres d'entrée de RClimDex	23
Figure 14 : Fenêtre de sélection des indices climatiques.....	24
Figure 15 : Carte de la tendance annuelle des stations étudiées.....	29
Figure 16 : Carte de l'ampleur de la tendance des précipitations annuelles.....	29
Figure 17 : Carte des tendances de la pluviométrie de la saison de l'automne.....	30
Figure 18 : Carte des tendances de la pluviométrie de la saison de l'hiver.....	31
Figure 19 : Carte des tendances de la pluviométrie de la saison du printemps.....	32
Figure 20 : Carte des tendances de la pluviométrie de la saison de l'été.....	32
Figure 21 : Indice du Jours de pluie consécutifs (CWD) à la station GHRIB BGE.....	34
Figure 22 : Variabilité spatiale de l'indice CWD.....	34
Figure 23 : Indice du Jours secs consécutifs (CDD) à la station GHRIB BGE.....	35
Figure 24 : Variabilité spatiale de l'indice CDD.....	36
Figure 25 : Indice d'intensité journalière (SDII) à la station GHRIB BGE.....	37

Figure 27 : Variabilité spatiale de l'indice SDII.....	37
Figure 28 : Hauteur maximale de précipitations sur 1 jourà la station GHRIB BGE.....	38
Figure 29 : Variabilité spatiale de l'indice RX1day.....	39
Figure 30 : Hauteur maximale de précipitations sur 5 joursà la station GHRIB BGE.....	40
Figure 31 : Variabilité spatiale de l'indice RX5day.....	40
Figure 32 : Nombre de jours de fortes précipitations (R10)à la station GHRIB BGE.....	41
Figure 33 : Variabilité spatiale de l'indice R10.....	42
Figure 34 : Nombre de jours de très fortes précipitations (R20)à la station GHRIB BGE.....	43
Figure 35 : Variabilité spatiale de l'indice R20.....	43
Figure 34 : Nombre de jours au-dessus de 50 mmà la station GHRIB BGE.....	44
Figure 35 : Variabilité spatiale de l'indice R50.....	45
Figure 36 : Jours très humides R95pà la station GHRIB BGE.....	46
Figure 37 : Variabilité spatiale de l'indice R95p.....	46
Figure 38 : Journées extrêmement humides R99pà la station GHRIB BGE.....	47
Figure 39 : Variabilité spatiale de l'indice R99p.....	48
Figure40 : Précipitations annuelles totales par jour de pluie (PRCPTOT) à la station GHRIB BGE.....	49
Figure 41 : Variabilité spatiale de l'indice PRCPTOT.....	49

Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristique des stations pluviométriques.....	14
Tableau 2 : Indices de précipitations extrêmes (ETCCDMI).....	26
Tableau 3 : Valeurs de Z (direction) de Mann–Kendall Z et ampleur de changement (1982-2011).....	27
Tableau 4 : Résultats de calcul de l'indice CWD.....	33
Tableau 5 : Résultats de calcul de l'indice CDD.....	35
Tableau 6 : Résultats de calcul de l'indice SDII.....	36
Tableau 8 : Résultats de calcul de l'indice RX1day.....	38
Tableau 9 : Résultats de calcul de l'indice RX5day.....	39
Tableau 10 : Résultats de calcul de l'indice R10.....	41
Tableau 11 : Résultats de calcul de l'indice R20.....	42
Tableau 12 : Résultats de calcul de l'indice R50.....	44
Tableau 13 : Résultats de calcul de l'indice R95p.....	45
Tableau 14 : Résultats de calcul de l'indice R99p.....	47
Tableau 15 : Résultats de calcul de l'indice PRCTOT.....	49

INTRODUCTION GENERALE

Aujourd'hui, l'un des enjeux cruciaux pour les scientifiques, notamment les hydrologues et les climatologues, est la compréhension du changement climatique et la réduction de ses impacts négatifs. La variabilité du climat, avec ses nombreuses causes complexes, se manifeste par divers problèmes tels que la désertification, l'effet de serre, les sécheresses, la rareté de l'eau, les modifications de la composition chimique de l'eau, ainsi que l'érosion et la salinisation des sols. Ces phénomènes, tout comme les événements climatiques extrêmes, sont au cœur des préoccupations sociétales actuelles.

Le changement climatique est défini comme une modification significative de l'état moyen ou de la variabilité du climat, persistant sur une période prolongée (des décennies ou plus). Ces changements peuvent résulter de processus naturels internes, de forçages externes ou de modifications anthropiques persistantes dans la composition de l'atmosphère ou l'utilisation des terres. Les événements météorologiques extrêmes sont des phénomènes rares pour une région ou une période donnée, tels que des vagues de chaleur ou de froid, des précipitations intenses, des sécheresses, des inondations et des tempêtes violentes. Un événement de précipitation extrême est caractérisé par des précipitations dépassant un certain seuil durant une période spécifique, soit en un point précis, soit en moyenne sur une zone donnée.

Récemment, les événements climatiques extrêmes ont suscité un intérêt croissant. Bien que les précipitations soient essentielles pour les écosystèmes et les activités humaines, leurs extrêmes peuvent provoquer des ruissellements importants, des inondations et une érosion accrue. Inversement, des précipitations insuffisantes et irrégulières peuvent entraîner des sécheresses sévères et des pertes agricoles. Pour étudier ces extrêmes, l'équipe d'experts en surveillance et en indices des changements climatiques (ETCCDMI) a élaboré 27 indices climatiques extrêmes relatifs aux précipitations et à la température.

Des études mondiales ont été conduites pour analyser les événements de précipitations extrêmes. Par exemple, une enquête couvrant 15 pays du Moyen-Orient a examiné 10 indices de précipitations extrêmes, révélant des tendances significatives dans le nombre de jours de pluie et l'intensité moyenne des précipitations. De même, des recherches sur 10 événements de précipitations extrêmes ont été menées dans 14 pays d'Afrique australe et occidentale.

De nombreuses études visent à approfondir la compréhension des changements climatiques, de la variabilité climatique, et des effets de ces changements sur les événements extrêmes.

Notre travail s'articule autour de quatre chapitres principaux, comme suit :

Premier chapitre : Synthèse bibliographique

Nous réaliserons une synthèse bibliographique pour définir les concepts de climat et de changement climatique, ainsi que les causes de ces évolutions. Ce chapitre explorera également l'impact du changement climatique sur les événements extrêmes.

Deuxième chapitre : Présentation de la zone d'étude

Ce chapitre fournira une description détaillée de la zone d'étude, le bassin versant du haut et moyen Cheliff. Nous mettrons en lumière les caractéristiques climatiques, géographiques et environnementales spécifiques de cette région. Nous examinerons les conditions climatiques dominantes, les variations topographiques, les caractéristiques hydrologiques, et d'autres facteurs influençant le régime des précipitations.

Troisième chapitre : Matériaux et méthodes

Nous détaillerons les matériaux et les méthodes utilisés dans notre étude. Ce chapitre inclura la description des données pluviométriques utilisées, ainsi que les techniques d'analyse statistique appliquées pour déterminer les tendances des précipitations journalières maximales. Nous définirons également les indices climatiques et leur rôle dans le suivi des changements climatiques.

Quatrième chapitre : Résultats et discussions

Ce chapitre constituera la partie principale de notre travail. Nous présenterons les résultats obtenus et les discussions qui en découlent. Nous analyserons les tendances des précipitations, tant saisonnières qu'annuelles, en nous concentrant sur les indices de précipitations extrêmes.

1. INTRODUCTION

Le changement climatique est devenu un sujet d'actualité majeur au cours de ce siècle, avec des interrogations fréquentes des médias sur les évolutions climatiques et le réchauffement de la planète. Les pays en développement, qui dépendent de l'agriculture pluviale, sont particulièrement vulnérables aux effets du changement climatique. Les inondations et les sécheresses, parmi les événements climatiques les plus dévastateurs, causent des catastrophes dans de nombreux pays. Bien que les causes fassent encore l'objet de débats, l'augmentation des températures est un fait avéré, confirmant le réchauffement climatique global.

Récemment, les précipitations ont provoqué de violentes inondations dans plusieurs pays. En parallèle, des sécheresses ont frappé différentes régions du globe. L'impact de ces événements varie considérablement selon leur intensité et leur localisation.

L'Afrique du Nord a connu de grandes sécheresses, notamment dans les années 1940 et 1980, qui se prolongent jusqu'à aujourd'hui. Les températures et les précipitations dans cette région suivent les tendances mondiales. Après deux décennies de sécheresse, l'Algérie et le Maghreb ont récemment traversé des périodes plus humides. Cependant, ces pluies ont causé des inondations et des dégâts matériels significatifs dans les zones urbaines. La diminution des ressources en eau due à la sécheresse est devenue une préoccupation urgente en Algérie.

2. CHANGEMENT CLIMATIQUE

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

Parmi ces manifestations, on peut citer la sécheresse qui affecte les deux bandes tropicales de notre planète, en particulier les régions sahéliennes d'Afrique de l'Ouest, depuis les années 1970. L'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) a également observé un réchauffement global de 0,5 °C depuis le milieu du siècle dernier. La décennie 2001-2010 a enregistré la moyenne décennale de température la plus élevée depuis le début des relevés météorologiques.

Les études menées par la communauté scientifique ont permis d'établir des mesures précises des fluctuations climatiques et leur interprétation statistique. Plusieurs méthodes de détection des changements climatiques ont ainsi été développées.

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

- Le débit des rivières.

CHAPITRE 1 :Synthèse bibliographique

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

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

- Diminution de la pluviométrie annuelle.
- Diminution du nombre de jours de pluie.
- Diminution des débits des rivières.
- Diminution des niveaux des lacs.
- Fortes intensités de pluies et raccourcissement de la saison des pluies.

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

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

Certaines zones sont plus touchées que d'autres, par exemple l'Algérie et l'Espagne dans la partie occidentale, et la Grèce et le Moyen-Orient dans la partie orientale.

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

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

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

Ces évolutions se traduisent notamment par des changements dans l'intensité et la répartition des précipitations, ainsi que par une augmentation des phénomènes extrêmes tels que les inondations et les sécheresses. La rapidité et la constance de ces phénomènes, observées à la fois dans le temps et dans l'espace, suggèrent que cette tendance devient structurelle en corrélation avec le réchauffement climatique.

3. SECHERESSE :

D'après l'Organisation météorologique mondiale (OMM), entre 1967 et 1991, 1,4 milliards de personnes ont été touchées par des sécheresses. Selon certains scénarios de changement climatique, l'occurrence et l'impact des sécheresses pourraient augmenter dans les années à venir[1]. En 2000, une sécheresse sévère en Asie méridionale et au Proche-Orient a entraîné la perte de bétail et de nombreuses pertes humaines. Au sud de l'Afghanistan, la population entière du désert du Registrant (300 000 familles) a été contrainte de fuir lorsque leurs sources

d'eau se sont tarées. Au Pakistan, la sécheresse dans les provinces du Baloutchistan et de Sindh a été rapportée comme l'une des pires de l'histoire du pays. En Iran, 18 comtés et 28 provinces ont également été confrontés à une sécheresse grave. Le débit du fleuve de Tigre et de l'Euphrate en Iraq a diminué jusqu'à environ 20% de leur moyenne habituelle[2].

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

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

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

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

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

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

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

Une autre étude menée par Benzart [9], a examiné la persistance de la sécheresse en Tunisie en utilisant des chaînes de Markov sur des séries de pluviométrie annuelle. Cette méthode a démontré que la persistance des années sèches est plus fréquente dans les régions du nord et du centre du pays. De plus, la probabilité d'avoir deux années sèches consécutives varie de 23% à 40%, avec une croissance du sud-ouest au nord-ouest.

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

4. ANALYSE DES TENDANCES DES PRECIPITATIONS : L'IMPORTANCE DES INDICES DE CLIMAT EXTREME :

L'analyse des tendances des précipitations est essentielle pour comprendre les changements climatiques et leurs impacts sur les écosystèmes, les ressources en eau, et les sociétés humaines. Dans cette optique, l'utilisation des indices de climat extrême, tels que ceux développés par l'Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI), revêt une importance capitale.

Ces indices standardisés fournissent des outils robustes pour mesurer et comparer les variations des précipitations dans différents contextes géographiques et temporels. Ils permettent notamment d'identifier les tendances, telles que l'augmentation de l'intensité des précipitations et des événements de précipitations maximales en une seule journée, qui sont souvent associées aux changements climatiques.

Cependant, malgré l'utilité de ces indices, les études régionales révèlent parfois des schémas de précipitations incohérents. Cela s'explique en partie par la diversité des méthodes d'analyse et des échelles temporelles utilisées dans les différentes études. Par exemple, les données quotidiennes sont souvent utilisées dans les analyses globales, comme celles basées sur les indices ETCCDI. Bien que ces données fournissent une vue d'ensemble précieuse, elles peuvent masquer les tendances plus fines observées à des échelles temporelles plus courtes.

Pour pallier ces limitations, il est nécessaire d'intégrer des données sous-journalières, obtenues grâce à des technologies avancées de télédétection, dans les analyses des tendances des précipitations. Cela permettrait de mieux comprendre les phénomènes de précipitations à des échelles temporelles plus fines et de mieux appréhender les impacts des changements climatiques sur les précipitations.

En résumé, l'utilisation des indices de climat extrême, comme ceux développés par l'ETCCDI, est cruciale pour analyser les tendances des précipitations et comprendre les effets du changement climatique. Cependant, il est important de prendre en compte la diversité des méthodes et des échelles temporelles d'analyse pour obtenir une image complète et précise des changements en cours dans les régimes de précipitations.

Objectif :

L'objectif de cette étude était de calculer les **indices extrêmes** conformément à la méthodologie de l'ETCCDI, en se basant sur les données journalières de précipitations dans le centre-ouest du nord de l'Algérie sur une période de trente ans, en utilisant les données de treize stations fournies par l'ANRH. Pour atteindre cet objectif, divers logiciels statistiques tels que **RlimDex**, **R**, et **Mann Kendall** ont été utilisés. La base de données a été soigneusement triée et structurée pour assurer sa compatibilité avec ces outils.

1. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE :

1.1. Situation géographique de bassin versant de Cheliff :

Notre étude se concentre sur la zone faisant partie du bassin versant du Cheliff-Zahrez, qui représente plus de 22% de la superficie de l'Algérie du Nord. Ce bassin hydrographique est divisé en trois grands sous-bassins : le Cheliff, le plus vaste en termes de superficie en Algérie, le Zahrez, et le bassin côtier de Dahra. Le bassin du Cheliff occupe plus de 77% de la superficie totale du bassin Cheliff-Zahrez, se divisant naturellement en trois sous-bassins distincts : le bassin amont du Cheliff jusqu'au barrage de Boughzoul, le bas Cheliff et la Mina, ainsi que le haut et le moyen Cheliff. Géographiquement, notre zone d'étude se situe entre les longitudes 1° et 3°90' Est et les latitudes 35° et 36°50' Nord, avec une superficie d'environ 11 100 km² et un périmètre de 631 km (Figure 1).

Ce bassin présente un réseau hydrographique dense, avec environ 2 200 km d'oueds permanents et 5 600 km d'oueds temporaires (Figure 2). Le cours d'eau principal traversant la zone d'étude sur une longueur de 349 km est le Cheliff. La densité de drainage varie entre 0,57 et 1,54 km/km², les valeurs les plus basses étant associées aux terrains à faible pente, principalement situés dans les hautes plaines, caractérisées par de faibles précipitations et une perméabilité significative des structures lithologiques.

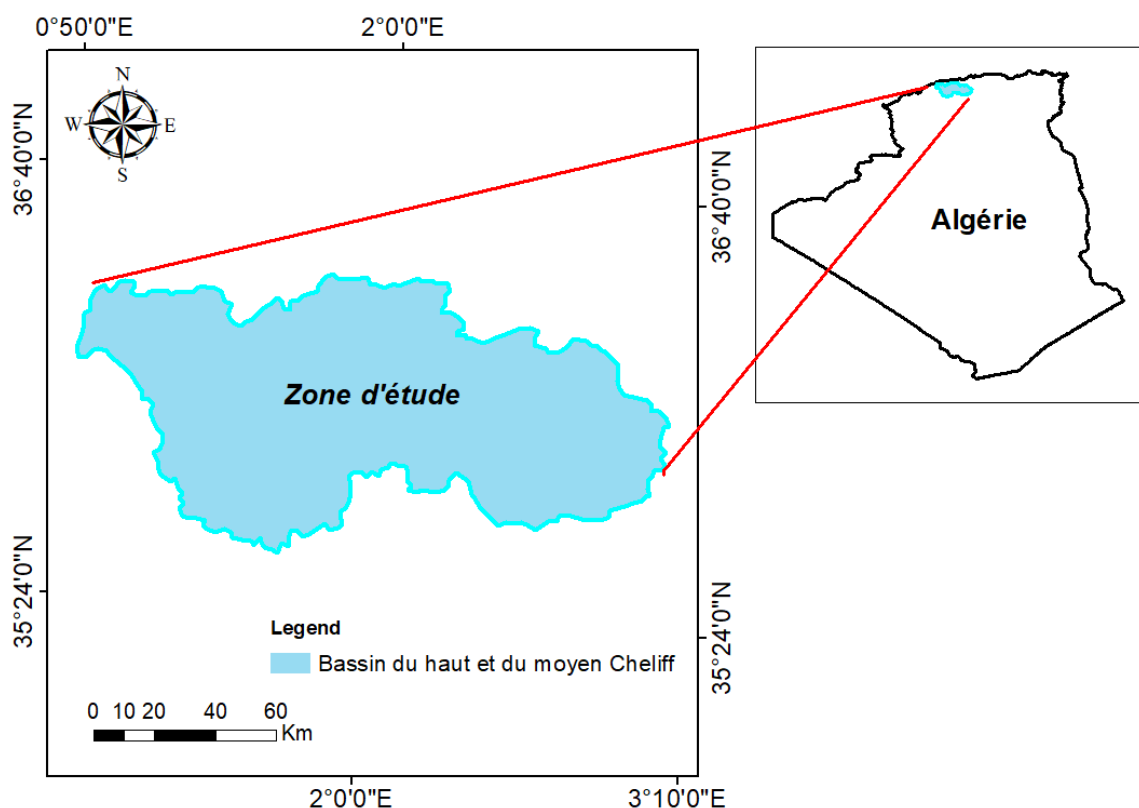


Figure 1 : Situation géographique du bassin du haut et du moyen Cheliff

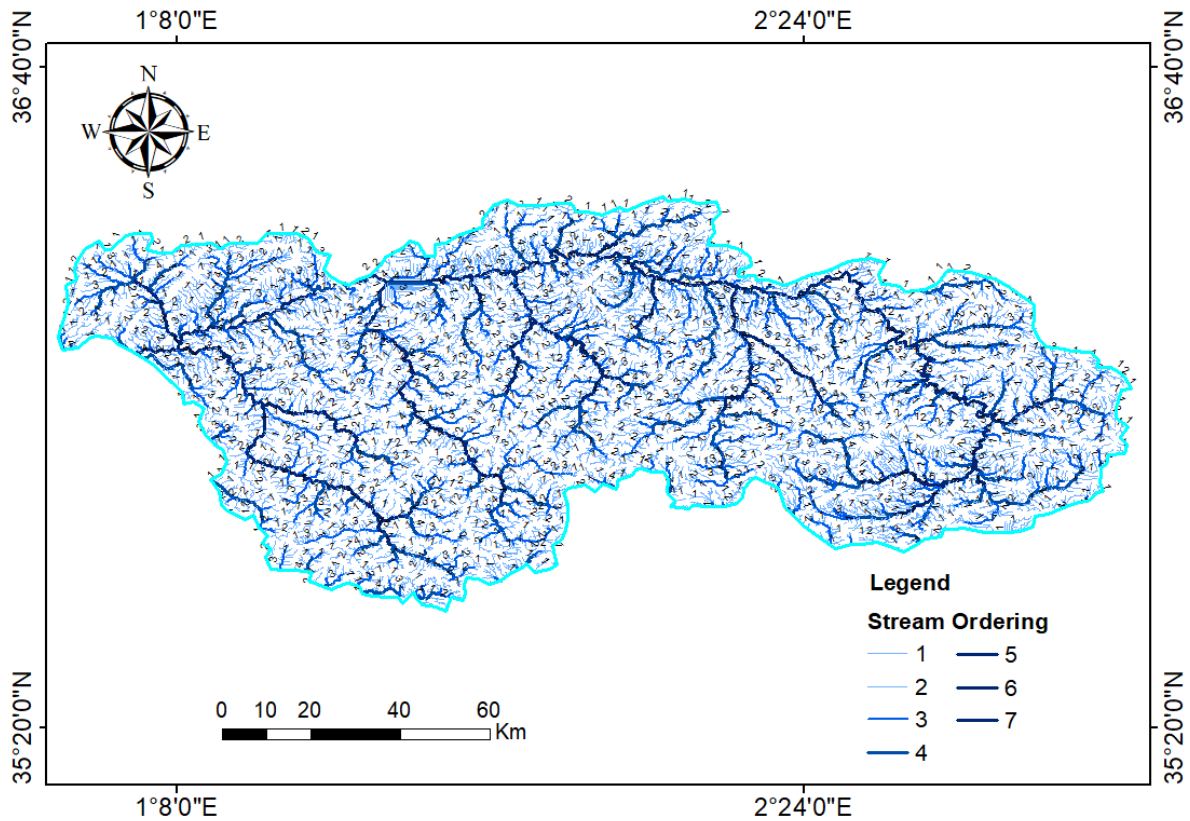


Figure 2 : carte des ordres du réseau hydrographique de la zone d'étude

2. CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES :

Le bassin versant fonctionne comme un collecteur de précipitations qui vont se transformer en plusieurs types d'écoulements tout dépend des conditions climatiques, des caractéristiques morpho métriques (forme, relief, altitude, pente, réseau de drainage...etc) et la nature du sol ainsi que le couvert végétal. Les caractéristiques qui interviennent de façon combinée pour expliquer les modalités de l'écoulement, s'apprêtent à une analyse quantitative.

2.1. Caractéristiques morphométriques du bassin :

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

➤ La surface:

La surface du sous-bassin égale à 11100 km².

➤ Le périmètre:

Le périmètre du bassin versant estimer à 631 km.

2.2Forme du bassin versant :

Il existe de nombreux indices qui permettent de caractériser les écoulements et de comparer différents bassins versants, et parmi eux, on peut mentionner l'indice de forme de Gravelius KG.

Un indice de compacité défini comme la relation entre le périmètre d'un bassinversant et le périmètre d'un cercle de même surface. Il est exprimé par l'équationsuivante :

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

Avec :

C : Indice de compacité ;

P : Périmètre du bassin versant en km.

S : Superficie du bassin versant en km².

Lorsque le coefficient C est égal à 1, cela signifie que le bassin versant à une forme parfaitement circulaire. Un coefficient de 1.12 correspond à un bassin versant carrer, et des valeurs supérieures à 1 indiquent des bassins versants de plus en plus allongés.

Dans notre cas, avec un coefficient C de 1.67, le bassin versant du haut et du moyen Cheliff est caractérisé par une forme allongée. Cette valeur indique que le bassin versant est plus allongé que le cercle équivalent, ce qui peut avoir un impact sur le temps de concentration de l'eau de ruissellement. Un bassin versant allonger peut entraîner un temps de réponse plus long pour l'écoulement des eaux de ruissellement vers le cours d'eau principal, car l'eau doit parcourir une plus grande distance avant d'atteindre le point de sortie.

Cette caractéristique de forme allongée peut également influencer d'autres processus hydrologiques tels que la vitesse d'écoulement, la réponse aux précipitations et les risques d'inondations dans certaines zones du bassin versant.

2.3 Le rectangle équivalent :

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

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

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

Avec :

C : indice de compacité ;

S : Superficie du bassin versant en km² ;

L : longueur du rectangle équivalent en km.

On obtient :

L= 271.38 km

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

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

On obtient :

B= 40.55 Km.

3. LA TOPOGRAPHIE :

Les valeurs obtenues à partir du modèle numérique de terrain topographique dans le bassin du Haut et du Moyen Cheliff fournissent des indications importantes sur la géographie de la région et peuvent influencer directement les conditions climatiques et hydrologiques.

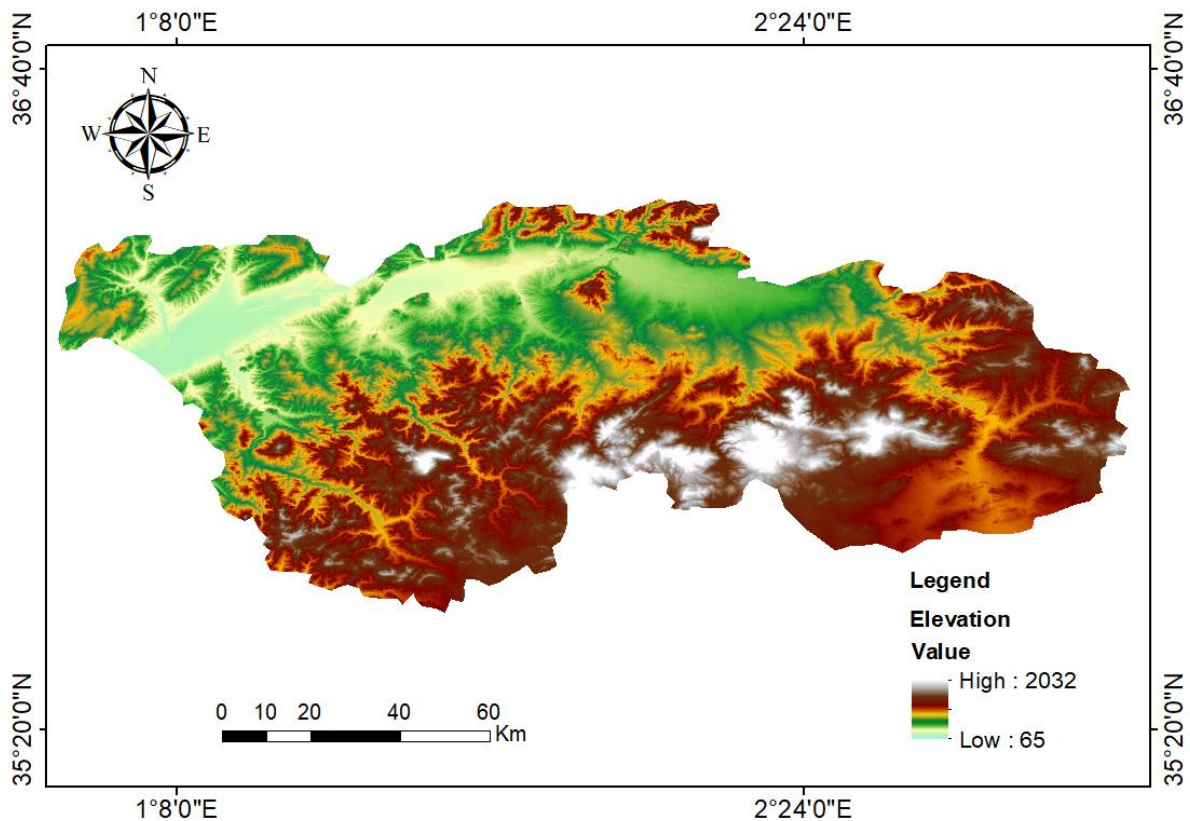


Figure 3 :Modèle numérique de terrain du bassin du haut et du moyen Cheliff

La valeur la plus élevée de 2032 mètres indique la présence d'élévations significatives dans la région. Ces hauteurs élevées peuvent correspondre à des montagnes, des plateaux ou d'autres formations topographiques importantes. Ces reliefs élevés peuvent avoir un impact sur la répartition des précipitations, la formation des nuages et les régimes de vents locaux.

La moyenne topographique de 628 mètres fournit une indication de l'altitude générale de la région. Cette moyenne peut être utilisée pour caractériser le relief global du bassin du Haut et du Moyen Cheliff. Une moyenne relativement élevée suggère une topographie vallonnée ou montagneuse, ce qui peut également influencer les schémas climatiques régionaux en termes de drainage des eaux de pluie et de formations de microclimats.

La valeur la plus basse de 65 mètres indique la présence de basses altitudes dans la région. Ces zones basses peuvent correspondre à des vallées, des plaines ou des zones humides. Les basses altitudes peuvent être sujettes à des phénomènes tels que les inondations, en particulier lors de périodes de fortes précipitations. Elles peuvent également jouer un rôle dans la régulation du climat local en favorisant la formation de brouillard ou en agissant comme des puits de chaleur.

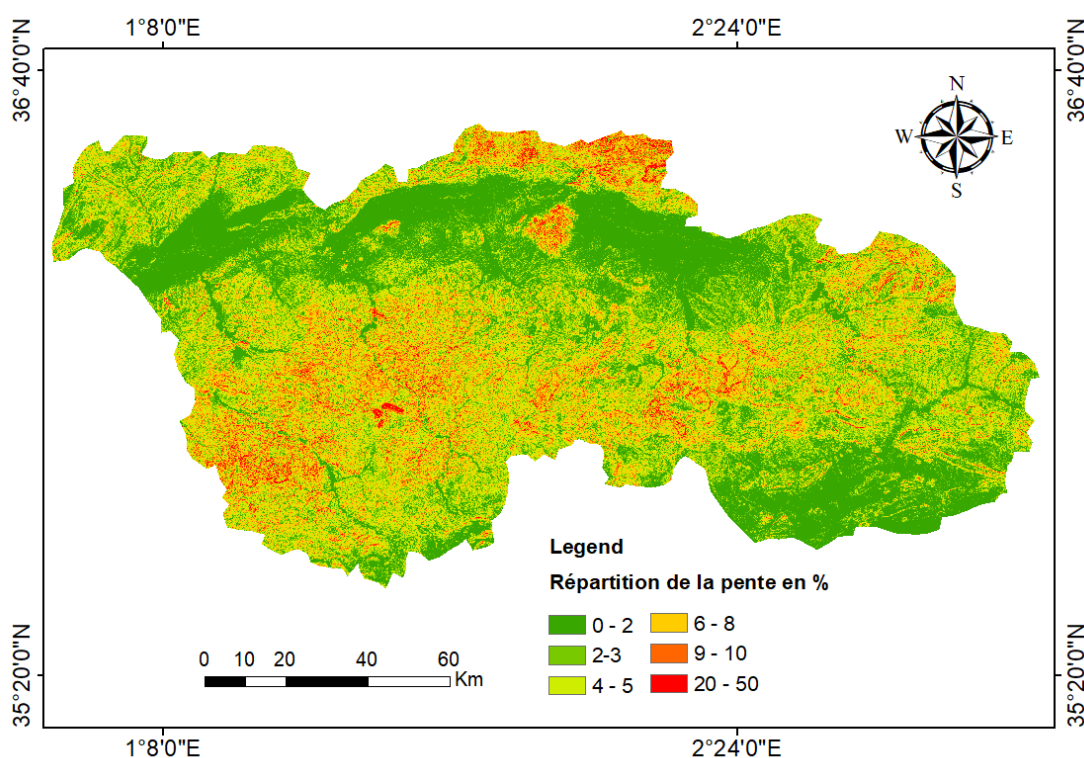


Figure 4 : Raster des pentes structuré en 6 classes de la zone d'étude

L'analyse approfondie des pentes réalisée à l'aide du logiciel ArcGIS dans la zone d'étude a permis de classer les résultats en quatre catégories distinctes, allant de 0 à 2%, 2 à 3%, 4 à 5%, 6 à 8%, 9 à 10%, et enfin 20 à 50% (Figure 4). Cette représentation cartographique offre une vision claire et détaillée des caractéristiques topographiques de la région, en mettant en évidence les variations de pente sur le terrain. Ces données sont essentielles pour évaluer les risques liés à l'érosion, au ruissellement des eaux et aux phénomènes naturels tels que les

glissements de terrain. Elles fournissent une base solide pour une planification et une gestion efficace des ressources naturelles dans la zone d'étude, permettant ainsi une meilleure prise de décision en matière d'aménagement du territoire et de protection de l'environnement.

4. CLIMATOLOGIE :

4.1 Analyse statistique des données pluviométriques :

Les données pluviométriques ont été mises à notre disposition par l'Agence Nationale des Ressources Hydraulique (A.N.R.H).Ces données sont disponibles pour 13 stations pluviométriques qui représentent des totaux pluviométriques mensuelsdans notre bassin versant.

La localisation géographique de toutes les stations pluviométriques est présentée sur une carte à partir de leurs coordonnées Lambert (figure 5).

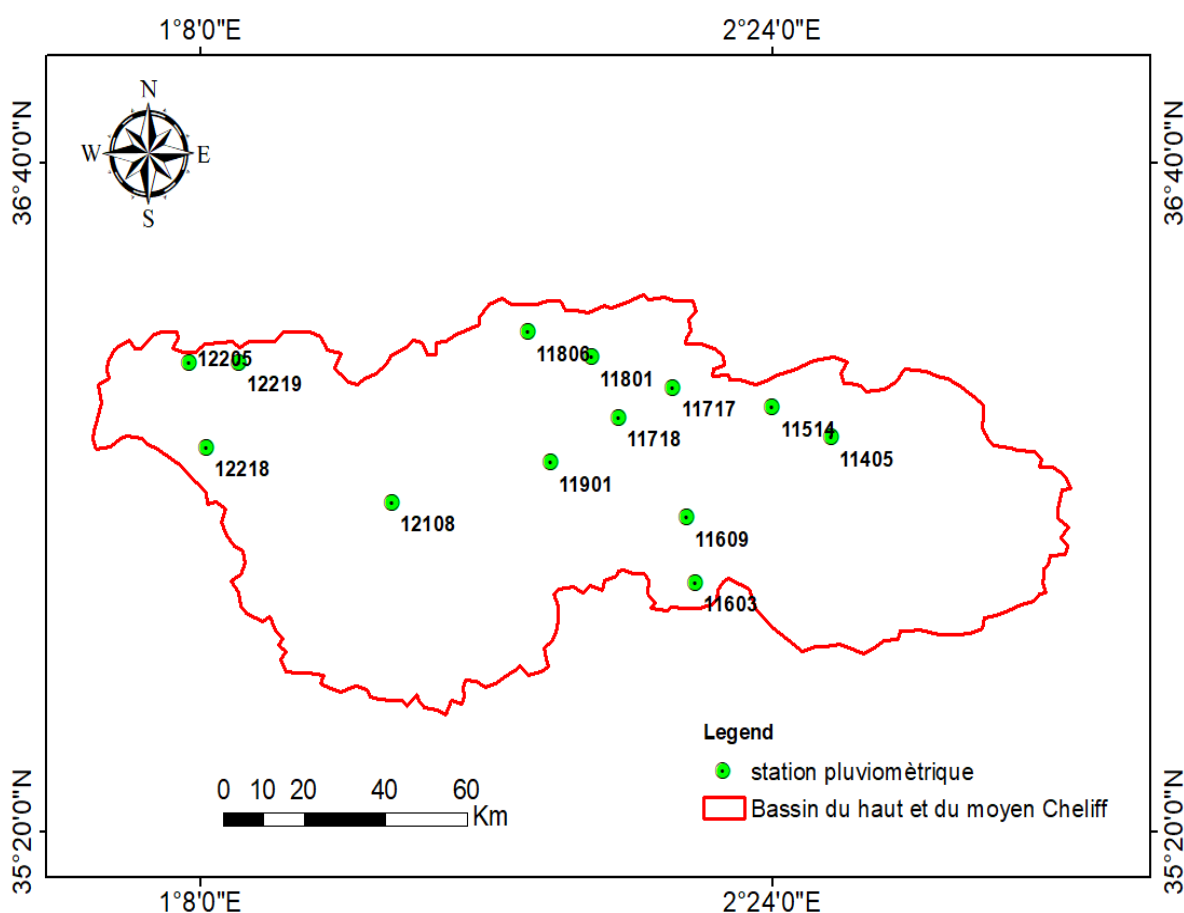


Figure 5 : Localisation des stations pluviométriques dans la zone d'étude

4.2. Caractéristiques des postes pluviométriques :

Les caractéristiques des stations pluviométriques étudiées sont empilées dans le tableau 1. Ces stations présentent une longue période d'enregistrement de données allant de 1980 à 2011.

Tableau 1 : Caractéristiques des stations pluviométriques

N°	Nom de la station	Code de la station	Longitude (°)	Latitude (°)
1	GHRIB BGE	011405	2,53	36,12
2	DJENANE B-OUADAH	011514	2,40	36,18
3	BORDJ EL AMIR AEK	011603	2,23	35,83
4	DEURDEUR BGE	011609	2,21	35,96
5	EL KHEMIS ANRH	011717	2,18	36,22
6	HARREZA BGE	011718	2,06	36,16
7	ARIB EBDA	011801	2,00	36,28
8	ELANNEB	011806	1,86	36,33
9	EL TOUAIBIA	011901	1,91	36,07
10	FODDA Barrage	012108	1,56	35,99
11	BENAIRIA	012205	1,11	36,27
12	DOMAINE SI-TAYEB	012218	1,15	36,1
13	CHLEF A.N.R.H	012219	1,22	36,27

5. 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.

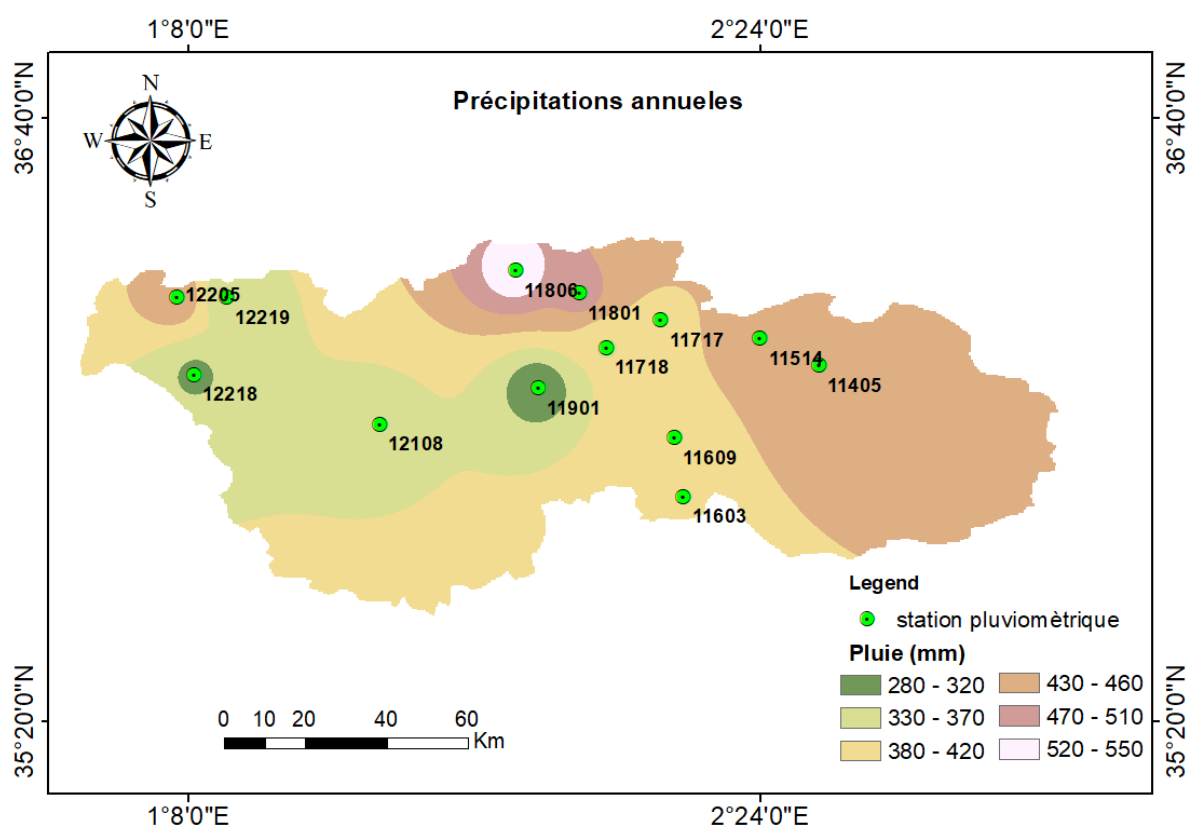


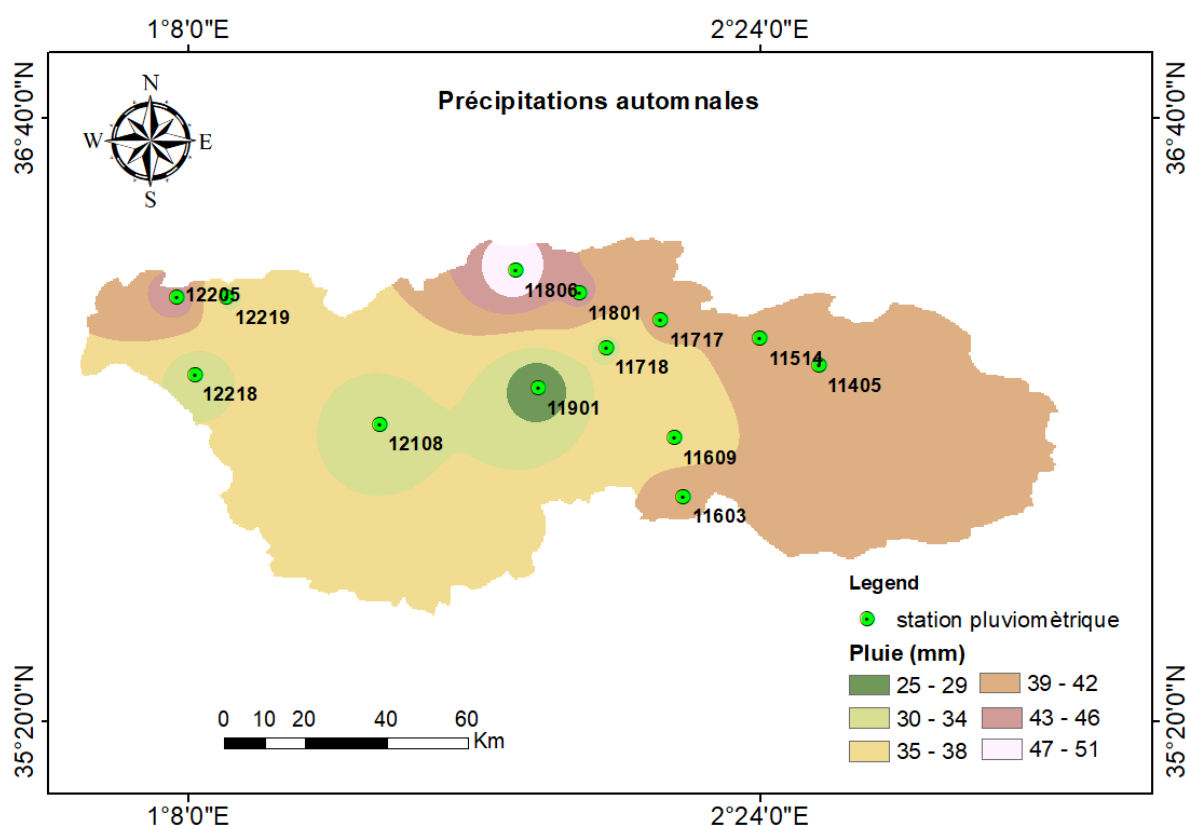
Figure 6 : Carte de la pluie moyenne interannuelle de la zone d'étude (1980-2011)

L'analyse des données des précipitations moyennes annuelles des différentes stations météorologiques dans notre zone d'étude révèle une variation significative de la pluviométrie à travers la région. Les valeurs observées s'étendent d'un minimum de 278,93 mm à El Touaibia à un maximum de 554 mm à Elanneb. Cette variation peut être attribuée à divers facteurs géographiques et climatiques tels que l'altitude, la proximité des masses d'eau, et la configuration topographique du terrain. Les stations situées à des altitudes plus élevées ou près des reliefs montagneux tendent à enregistrer des précipitations plus abondantes, tandis que les régions plus basses ou éloignées des sources d'humidité présentent des niveaux de pluviométrie plus faibles. Ces résultats ont des implications importantes pour la gestion des ressources en eau, l'agriculture et d'autres secteurs sensibles aux conditions climatiques. Une compréhension approfondie de cette variation spatiale des précipitations est cruciale pour élaborer des stratégies efficaces d'adaptation aux changements climatiques et pour assurer une utilisation durable des ressources hydriques dans la région.

6. VARIATION DES PRECIPITATIONS SAISONNIERES :

6.1. Saison automnale :

L'analyse des données des précipitations moyennes annuelles pour la saison automnale dans les différentes stations météorologiques de notre zone d'étude révèle des variations notables dans la pluviométrie au cours de cette période spécifique.

**Figure 7 :** Carte de la pluie moyenne pour la saison automnale (1980-2011)

Les valeurs observées varient de manière significative, allant de 25,16 mm à El Touaibia à 50,59 mm à Elanneb. Cette variation peut être influencée par une combinaison de facteurs, tels que la géographie locale, la circulation atmosphérique, et les phénomènes météorologiques saisonniers. Les stations situées dans des zones montagneuses ou proches des masses d'eau tendent à enregistrer des précipitations plus abondantes, tandis que celles dans des régions plus arides ou éloignées des sources d'humidité présentent des niveaux de pluviométrie plus faibles. Ces résultats fournissent des informations cruciales pour comprendre les schémas saisonniers des précipitations dans la région, ce qui est essentiel pour la planification agricole, la gestion des ressources en eau, et la prise de décisions en matière d'adaptation aux changements climatiques. Une analyse approfondie de cette variation saisonnière des précipitations peut contribuer à une utilisation plus efficace et durable des ressources naturelles dans la région.

6.2. Saison hivernale :

L'analyse des données des précipitations moyennes annuelles pour la saison hivernale dans les différentes stations météorologiques de notre zone d'étude révèle des variations marquées dans les niveaux de pluviométrie observés pendant cette période spécifique. Les résultats montrent une gamme étendue de précipitations, allant de 36,14 mm à El Touaibia à un pic de 80,93 mm à Elanneb.

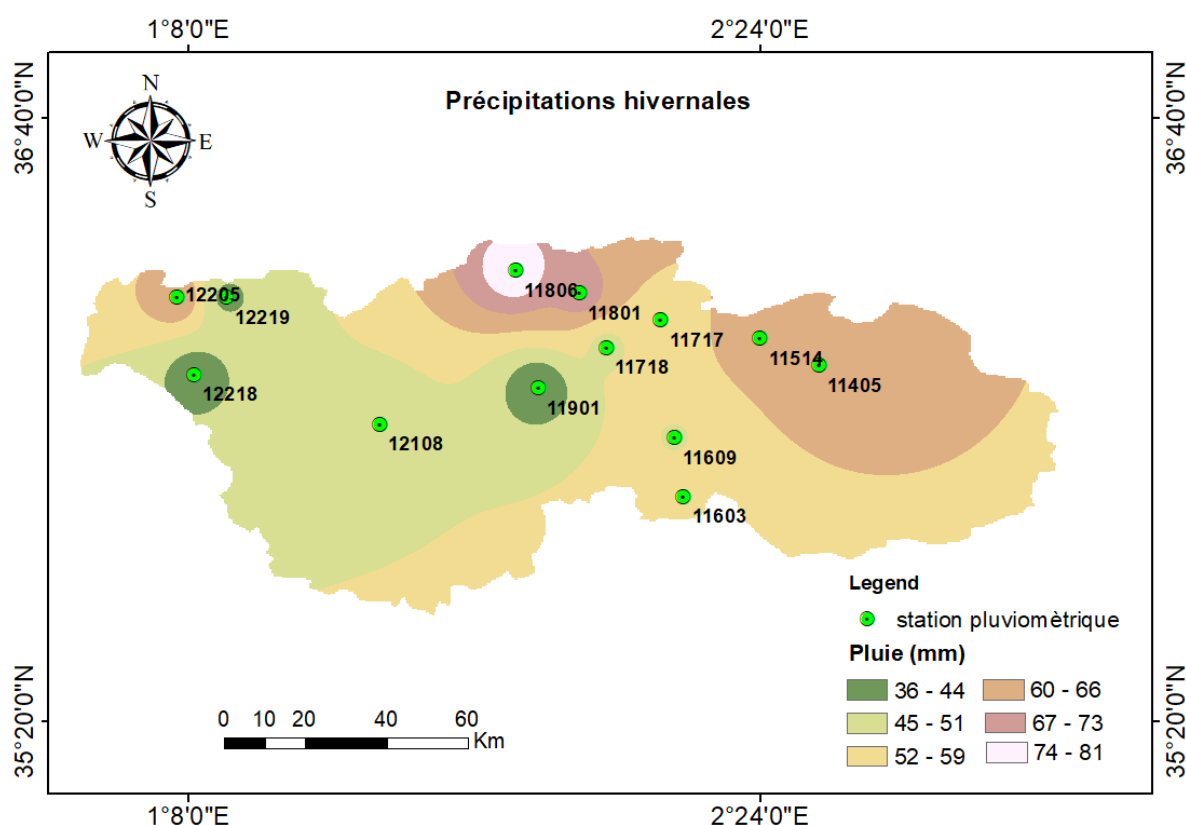


Figure 8 : Carte de la pluie moyenne pour la saison hivernale (1980-2011)

Cette variation peut être influencée par divers facteurs, tels que la position géographique, l'altitude, et les systèmes météorologiques dominants pendant la saison hivernale. Les stations situées dans des zones plus élevées ou exposées aux influences maritimes tendent à enregistrer des précipitations plus abondantes, tandis que celles dans des régions plus arides ou éloignées des masses d'air humides présentent des niveaux de pluviométrie plus faibles. Ces résultats mettent en évidence l'importance de comprendre les schémas climatiques saisonniers pour la planification des activités agricoles, la gestion des ressources en eau et la prise de décisions en matière d'adaptation aux changements climatiques dans la région. Une analyse approfondie de ces données saisonnières permettra de mieux anticiper les variations climatiques et d'adopter des stratégies appropriées pour une utilisation durable des ressources naturelles.

6.3. Saison printanière :

L'examen des données des précipitations moyennes annuelles pour la saison printanière dans les différentes stations météorologiques de notre zone d'étude met en lumière des variations significatives dans les niveaux de pluviométrie enregistrés pendant cette période spécifique. Les résultats révèlent une gamme diversifiée de précipitations, allant de 27,33 mm à El Touaibia à un maximum de 48,43 mm à Elanneb.

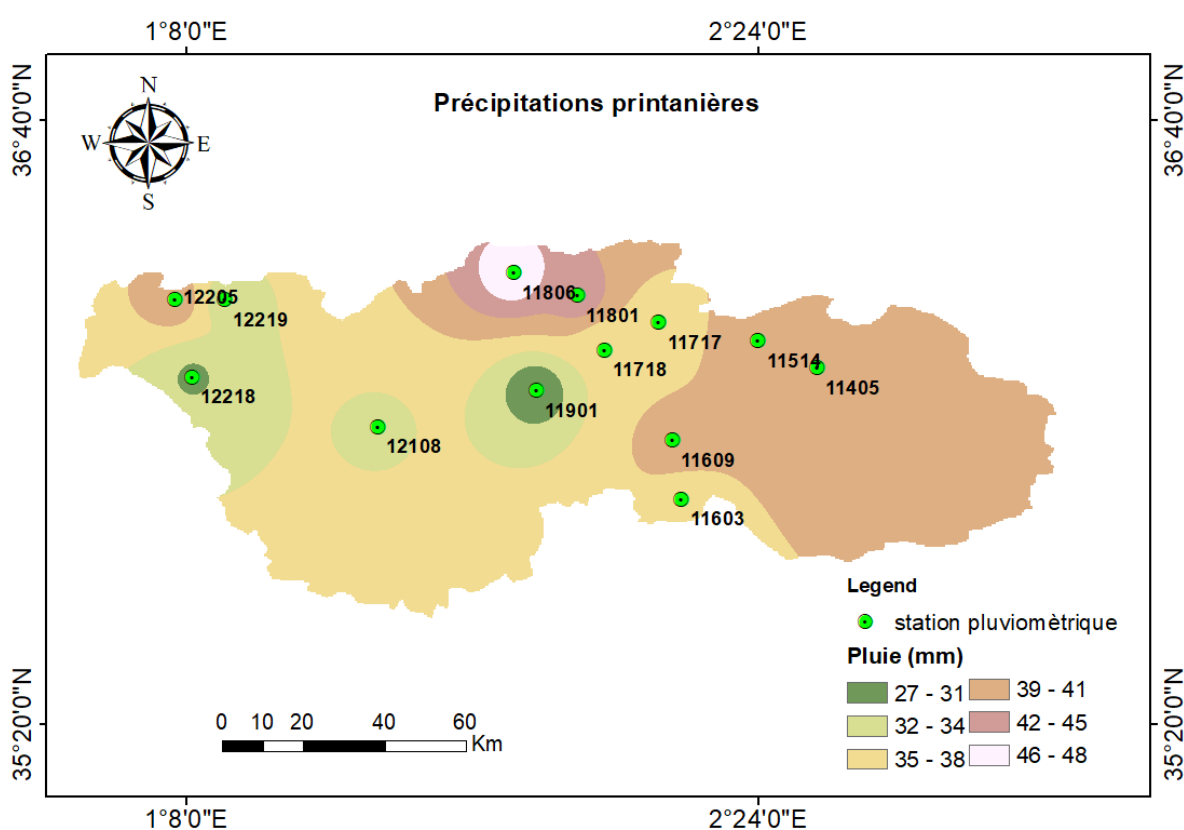


Figure 9 : Carte de la pluie moyenne pour la saison printanière (1980-2011)

Cette diversité peut être attribuée à une multitude de facteurs, notamment la géographie locale, les régimes de vents saisonniers, et la proximité des masses d'air humides. Les stations

situées dans des régions plus élevées ou exposées à des influences maritimes ont tendance à enregistrer des précipitations plus importantes, tandis que celles dans des zones plus arides ou éloignées des sources d'humidité présentent des niveaux de pluviométrie plus faibles. Ces données fournissent des informations précieuses pour évaluer les schémas climatiques saisonniers et pour prendre des décisions éclairées en matière de gestion des ressources en eau, d'agriculture et de planification urbaine. Une analyse approfondie de ces données saisonnières permettra de mieux comprendre les variations climatiques et d'élaborer des stratégies adaptatives pour faire face aux défis environnementaux dans la région.

6.4. Saison estivale :

L'analyse des données des précipitations moyennes annuelles pour la saison estivale dans les différentes stations météorologiques de notre zone d'étude révèle des niveaux de pluviométrie généralement faibles pendant cette période spécifique. Les résultats montrent des valeurs oscillant entre 2,8 mm à Benairia et 6,88 mm à Bordj El Amir Aek. Cette variation relativement limitée indique une tendance globale vers des précipitations modestes pendant les mois estivaux. Les régions étudiées présentent des conditions climatiques chaudes et sèches typiques de la saison estivale, avec des niveaux de précipitations qui sont souvent insuffisants pour répondre aux besoins en eau des écosystèmes et des activités humaines telles que l'agriculture. Ces données soulignent l'importance de la gestion prudente des ressources en eau pendant la saison estivale, ainsi que la nécessité de développer des stratégies d'adaptation pour faire face aux défis associés à la sécheresse et à la rareté des précipitations. Une compréhension approfondie de ces schémas climatiques saisonniers est essentielle pour garantir une utilisation durable des ressources naturelles dans la région et pour promouvoir la résilience face aux changements environnementaux.

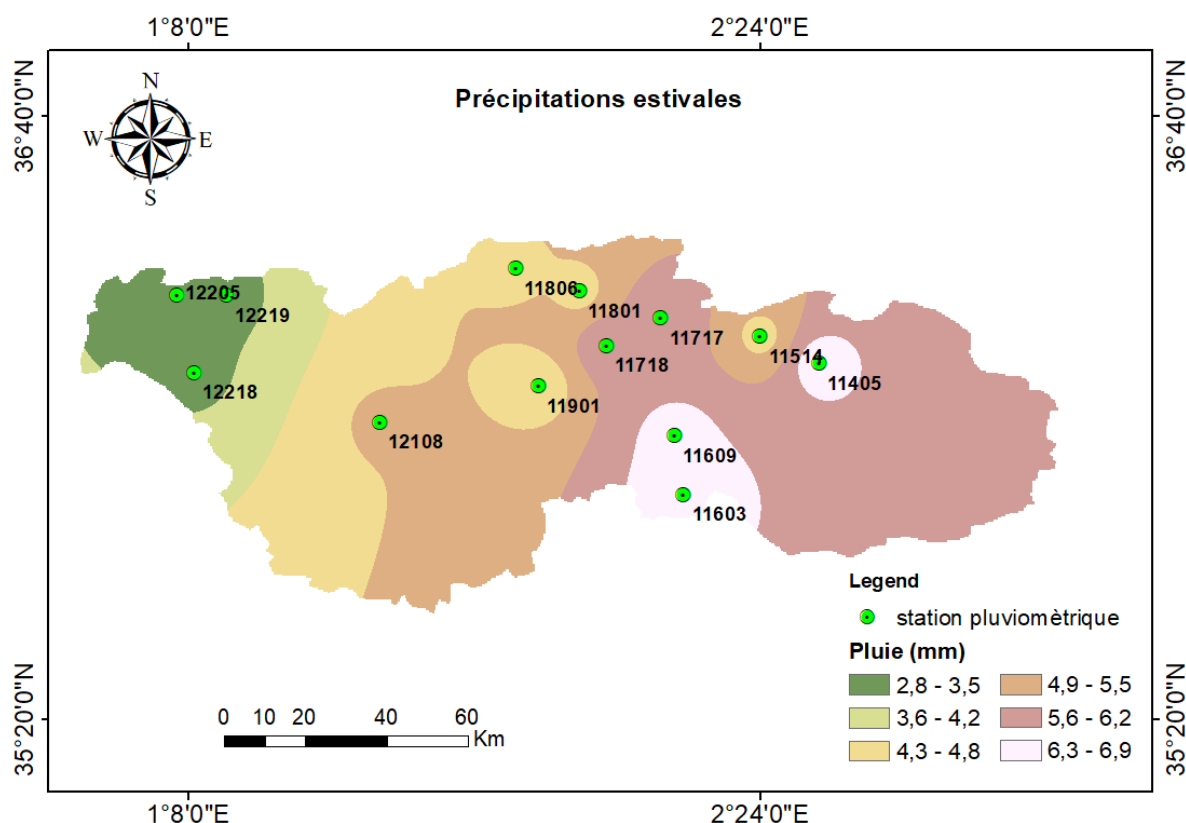


Figure 10 : Carte de la pluie moyenne pour la saison estivale (1980-2011)

7. Conclusion :

La variation des précipitations moyennes annuelles et saisonnières dans notre zone d'étude offre un aperçu précieux des schémas climatiques locaux et de leur impact sur l'environnement et les activités humaines. Les données recueillies révèlent une diversité significative des niveaux de pluviométrie à travers les différentes saisons et les différentes localités. Les précipitations annuelles varient selon les caractéristiques géographiques et climatiques de chaque région, avec des zones montagneuses et côtières souvent plus humides que les régions intérieures. Les saisons présentent également des variations distinctes, avec des hivers généralement plus humides, des printemps et des automnes intermédiaires, et des étés plus secs. Cette variabilité saisonnière est cruciale pour les activités agricoles, la gestion des ressources en eau et la planification des infrastructures. Une compréhension approfondie de ces variations permet de mieux anticiper les tendances climatiques futures et de développer des stratégies d'adaptation efficaces pour atténuer les impacts des changements environnementaux. En intégrant ces données dans les processus de prise de décision, il est possible de promouvoir une utilisation durable des ressources naturelles et de renforcer la résilience des communautés face aux défis climatiques à venir.

1. INTRODUCTION :

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

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

Le test de Mann-Kendall [11, 12] permet de tester la stabilité de la moyenne et de la variance des séries d'indices climatiques sur une période donnée. Ainsi, ce test non paramétrique est utilisé pour détecter d'éventuelles tendances dans les séries d'indices climatiques. Il s'agit d'une procédure dans laquelle on compare chaque indice de la série de base avec les indices précédents. Soit $(x_1, \dots, x_n)$ un échantillon de valeurs indépendantes issu d'une variable aléatoire x dont on cherche à évaluer la stationnarité. L'hypothèse nulle H_0 est l'hypothèse de stationnarité de la série (absence de tendance). L'hypothèse alternative H_1 correspond au non stationnarité de la série. La statistique de Mann-Kendall est définie comme suit :

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

L'ampleur de la tendance est estimée à l'aide d'un estimateur de pente basé sur la médiane non paramétrique proposé par Sen [13]. La pente de Sen est donnée par l'expression suivante :

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

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

3. RClimDex :

Le RClimDex a été développé par Xuebin Zhang et Feng Yang [14] au sein de la Direction de la recherche climatique du Service météorologique du Canada. Initialement connu sous le nom de ClimDex, il s'agissait d'un programme basé sur Microsoft Excel fournissant un progiciel convivial pour le calcul des indices des extrêmes climatiques, utilisé pour la surveillance et la détection des changements climatiques. Ce dernier avait été développé par Byron Gleason au National Climate Data Center (NCDC) de la NOAA et avait été utilisé dans les ateliers CCI/CLIVAR sur les indices climatiques à partir de 2001. L'objectif initial était de rendre ClimDex indépendant d'un système d'exploitation particulier. Il était alors naturel d'utiliser R comme plateforme, car R est un logiciel gratuit, robuste et puissant pour l'analyse statistique et les graphiques, fonctionnant sous les environnements Windows et Unix. Cela a rendu le développement de ce package basé sur R encore plus attrayant. Ainsi, RClimDex est apparu en 2004 dans sa première version, RClimDex (1.0).

RClimDex (1.0) est conçu pour fournir une interface conviviale pour calculer les indices des extrêmes climatiques. Il calcule les 27 indices de base recommandés par l'équipe d'experts CCI/CLIVAR pour la surveillance et les indices de détection des changements climatiques (ETCCDMI), ainsi que d'autres indices de température et de précipitations avec des seuils définis par l'utilisateur.

3.1. Téléchargement et installation de RClimDex

Après le téléchargement de RClimDex à partir du site Web ETCCDMI en entrant la source ("<http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI/RClimDex/rclimdex.r>"), il peut être chargé directement à partir du menu déroulant. Sélectionnez "Fichier" dans le menu RGui, puis

choisissez "Code source R". Cela ouvrira une nouvelle fenêtre contextuelle dans laquelle vous pourrez sélectionner notre code source R "rclimdex.r" dans le répertoire où le programme a été enregistré.

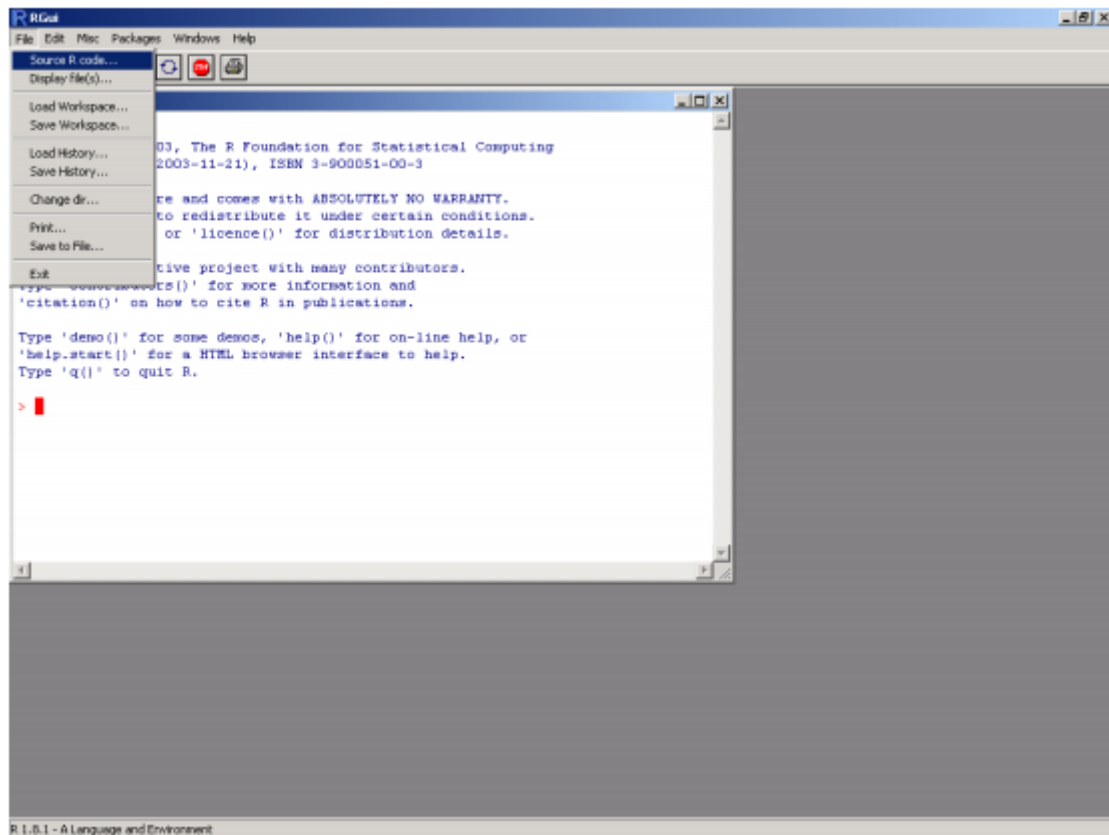


Figure 11 : Présentation du menu déroulant dans le logiciel R

Une fois que le code source a été chargé avec succès, le menu principal de RCLimDex s'affichera (figure 2).

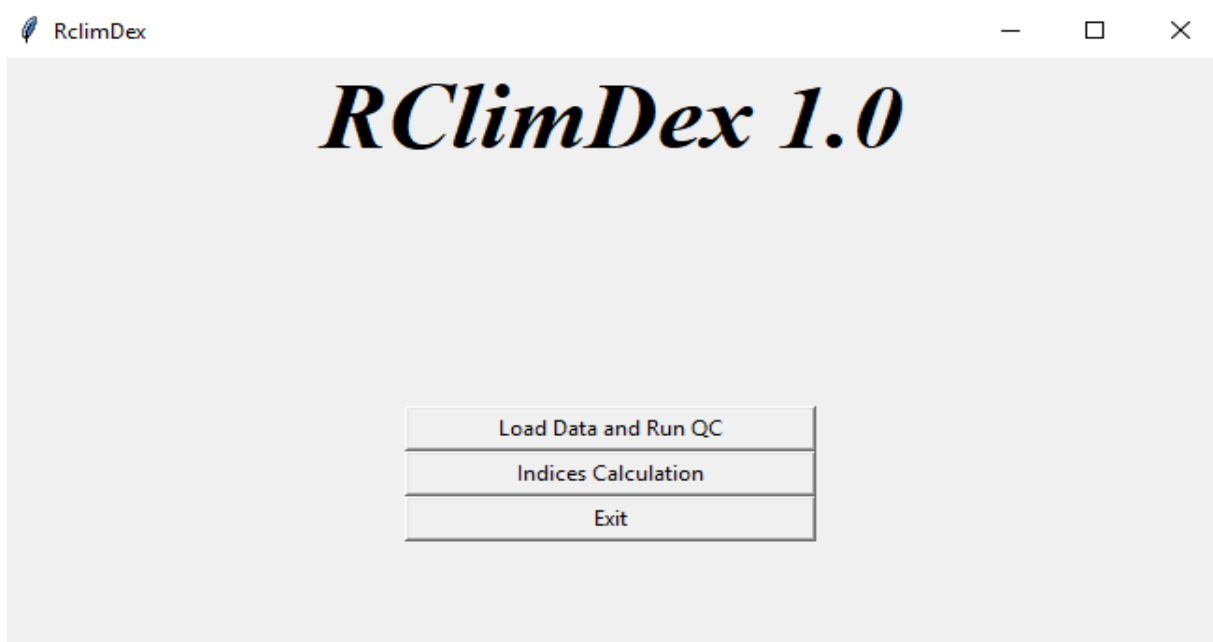


Figure 12 : Présentation de RClimDex

RClimDex requiert une vérification préalable de la qualité des données avant d'effectuer les calculs des indices. Ensuite, dans le menu principal, l'étape "Calcul des indices" invite l'utilisateur à configurer certains paramètres pour les calculs. La fenêtre "Définir les valeurs des paramètres" (figure 13) permet à l'utilisateur d'entrer la première et la dernière année de la période de référence pour le calcul du seuil, ainsi que la latitude de la station (avec une valeur négative pour l'hémisphère sud) ... Cette étape implique un traitement des données, donc quelques secondes seront nécessaires pour la terminer.

User defined parameters for Indices Calculation	
First year of base period	1961
Last year of base period	1990
Latitude of this station location	0
Longitude of this station location	0
User defined upper threshold of daily maximum temperature	25
User defined lower threshold of daily maximum temperature	0
User defined upper threshold of daily minimum temperature	20
User defined lower threshold of daily minimum temperature	0
User defined daily precipitation threshold	25

OK CANCEL

Figure 13 : Fenêtre de définition des paramètres d'entrée de RClimDex

Une fois cette étape terminée, une fenêtre apparaîtra pour permettre à l'utilisateur de sélectionner les indices qu'il souhaite calculer (figure 14).

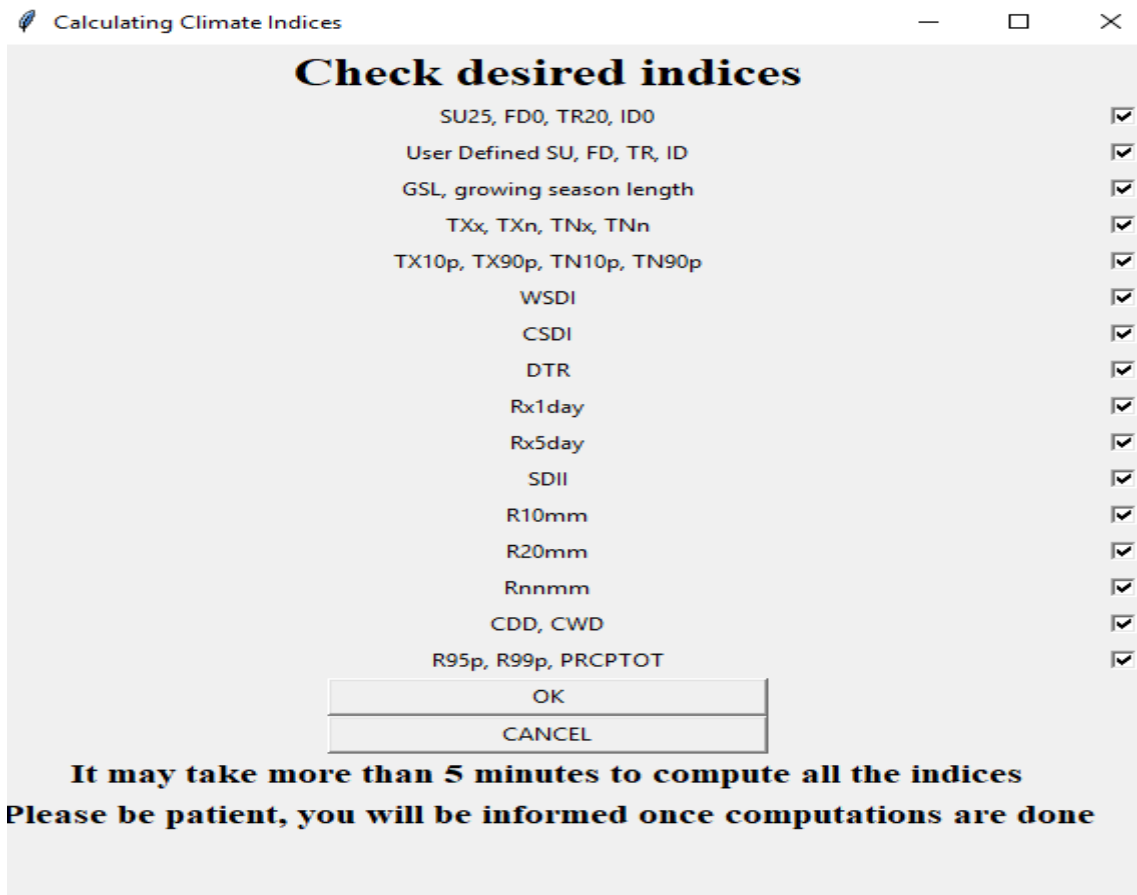


Figure 14 : Fenêtre de sélection des indices climatiques

Les séries d'indices résultantes sont stockées dans un sous-répertoire nommé "indices" au format Excel. Pour faciliter la visualisation, les séries annuelles sont tracées, accompagnées des tendances calculées à l'aide de la méthode des moindres carrés linéaires (ligne continue) et de la régression linéaire pondérée localement (ligne pointillée). Les statistiques d'ajustement de la tendance linéaire sont affichées sur les tracés. Ces graphiques sont enregistrés dans un sous-répertoire nommé "plots" au format JPEG.

4. INDICES CLIMATIQUES :

Les indices climatiques, développés par l'Organisation Mondiale de la Météorologie dans le cadre du "CC/CLIVAR Expert Team on Climate Change Detection, Monitoring and Indices (ETCCDMI)", sont un ensemble de valeurs calculées utilisées pour décrire l'état et les changements du système climatique. Ces indices permettent d'étudier statistiquement les variations des aspects climatologiques dépendantes, comme l'analyse et la comparaison des séries chronologiques, des moyennes, des extrêmes et de leurs tendances. Ils ont été développés en différentes étapes par Frich et al. [15] et Zhang et Yang [16], et ont été programmés en langage R sous le nom de RCLimDex.

Il existe 27 indices au total, répartis comme suit :

- ✓ 16 indices liés à la température
- ✓ 11 indices liés aux précipitations, issus des températures maximales et minimales ainsi que des précipitations.

Ces indices sont regroupés en 5 catégories :

4.1.Indices basés sur les percentiles :

- Occurrence des nuits froides (TN10p)
- Présence des nuits chaudes (TN90p)
- Présence de jours froids (TX10p)
- Présence de jours chauds (TX90p)
- Journées très humides (R95p)
- Jours extrêmement humides (R99p)

4.2.Indices absolus représentant les valeurs maximum ou minimum dans une saison ou une année :

- Jours les plus chauds (TXx)
- Nuits les plus chaudes (TNx)
- Jours les plus froids (TXn)
- Nuits les plus froides (TNn)
- Maximum d'un jour de précipitations (RX1j)
- Maximum de cinq jours de précipitations (RX5j)

4.3.Indices seuils correspondant au nombre de jours où une valeur de température ou de précipitations tombe au-dessus ou en-dessous d'un seuil fixé :

- Occurrence annuelle de jours de gel (FD)
- Occurrence annuelle de jours de glace (ID)
- Occurrence annuelle des jours d'été (SU)
- Occurrence annuelle des nuits tropicales (TR)
- Nombre de jours de fortes précipitations (>10 mm) (R10)
- Nombre de jours de très fortes précipitations (>20 mm) (R20)

4.4.Indices de durée représentant des périodes de chaleur, de froid, d'humidité, de sécheresse excessive, de longueur de la saison de pluies, et des périodes de douceur :

- Séquences froides (CSDI)
- Séquences chaudes (WSDI)
- Longueur de la saison douce (GSL)
- Séquences de jours secs consécutifs (CDD)
- Séquences de jours de pluie consécutifs (CWD)

4.5.D'autres indices incluent :

- Précipitation totale (PRCPTOT)
- Amplitude diurne de la température (DTR)
- Indice simple d'intensité journalière (ADII)
- Plage maximale de température (ETR)
- Contribution annuelle de jours très humides (R95p)

Pour cette étude, nous avons sélectionné onze (11) indices parmi les 27 indices climatiques disponibles (tableau 2) afin de caractériser les tendances climatiques de la région d'étude, en particulier les tendances des événements pluviométriques extrêmes.

Tableau 2 : Indices de précipitations extrêmes (ETCCDMI)

Indice	Nom de l'indicateur	Définition	Unité
RX1 day	Hauteur maximale de précipitations sur 1 jour	Précipitation totale maximale d'un jour pluvieux	mm
RX5 day	Hauteur maximale de précipitation sur 5 jours	Précipitation totale maximale sur cinq jours pluvieux consécutifs pendant l'année	mm
SDII	Indice simple d'intensité journalière	Précipitations totales annuelles divisées par le nombre de jours humides (définis comme $PRCP \geq 1,0$ mm) dans l'année	mm/j
R10	Nombre de jour de fortes précipitations	Nombre annuel des jours où de pluies $PRCP \geq 10$ mm	Jours
R20	Nombre de jour de très fortes précipitations	Nombre annuel des jours de pluies où $PRCP \geq 20$ mm	Jours
R50	Nombre de jours au-dessus de 50mm	Nombre annuel des jours de pluies où $PRCP \geq 50$ mm	Jours
CDD	Jour secs consécutifs	Nombre maximum de jours consécutifs avec $RR < 1$ mm	Jours
CWD	Jour de pluie consécutifs	Nombre maximum de jours consécutifs avec $RR \geq 1$ mm	Jours
R95p	Jours très humides	$PRCP$ total annuel lorsque $RR > 95$ e centile	mm
R99p	Journées extrêmement humides	$PRCP$ total annuel lorsque $RR > 99$ e centile	mm
PRCPTOT	Précipitations annuelles totales par jour de pluie	Précipitations totales annuelles des jours pluvieux ($RR \geq 1$ mm)	mm

Ces indices sont utilisés pour caractériser les tendances climatiques et spécifiquement les événements pluviométriques extrêmes dans la région d'étude.

5. Conclusion :

En conclusion, les indices climatiques, élaborés par l'Organisation Mondiale de la Météorologie, offrent un ensemble d'outils précieux pour l'étude des variations et des tendances du climat. Ces indices permettent d'analyser statistiquement les séries chronologiques, les moyennes, les extrêmes et les tendances des événements climatiques, offrant ainsi un aperçu approfondi des changements climatiques régionaux. En sélectionnant judicieusement les indices appropriés, les chercheurs peuvent mieux comprendre les impacts du changement climatique, notamment sur les événements pluviométriques extrêmes, et ainsi contribuer à l'élaboration de politiques d'adaptation et d'atténuation efficaces. En somme, les indices climatiques jouent un rôle crucial dans la recherche climatologique et la prise de décision en matière de gestion des risques climatiques.

1. INTRODUCTION :

L'étude de la variabilité saisonnière et annuelle est essentielle pour déterminer si les variations de la pluviométrie, qu'elles soient à la hausse ou à la baisse, sont spécifiques à une saison ou réparties sur plusieurs. Cela permet de mieux comprendre la chronologie des totaux de précipitations saisonnières au fil du temps. Cette étude vise à identifier les tendances dans les cumuls de précipitations saisonnières.

Pour ce faire, nous avons appliqué le test de Mann-Kendall aux données pluviométriques saisonnières. Étant donné que nous disposons d'échantillons assez grands ($n > 10$), nous avons utilisé une approximation à la loi normale. La présence ou l'absence d'une tendance est déterminée par l'appartenance de la valeur du Z à la zone de rejet. Nous avons utilisé un test unilatéral avec un seuil de signification de 0,05.

2. ETUDE DE LA TENDANCE DES PRECIPITATION :**2.1 Tendance des précipitations annuelle :**

Selon le test MK, les valeurs Z et les pentes des précipitations saisonnières et annuelles de Sen ont été calculées sur une période de 30 ans entre 1982 et 2011 dans le bassin du haut et moyen Cheliff. Les résultats sont présentés dans le Tableau 3. La tendance à la hausse est indiquée par une valeur Z positive, tandis que la tendance à la baisse est représentée par une valeur Z négative.

Tableau 3 : Valeurs de Z (direction) de Mann–Kendall Z et ampleur de changement (1982-2011)

N°	Code de Station	Automne		Hiver		Printemps		Eté		Annuel	
		Z_value	Sen Slope	Z_value	Sen Slope	Z_value	Sen Slope	Z_value	Sen Slope	Z_value	Sen Slope
1	011405	1,21	0,57	1,00	0,52	0,64	0,28	-0,61	-0,05	1,39	0,29
2	011514	1,20	0,57	0,75	1,10	1,52	1,41	-1,92	-0,10	1,27	0,51
3	011603	-0,57	-0,17	-0,86	-0,50	0,54	0,32	0,02	0,00	-0,50	-0,17
4	011609	2,14	1,76	0,02	0,00	0,34	0,02	0,95	0,14	-0,74	-0,08
5	011717	1,39	0,58	0,82	0,51	0,57	0,18	-1,28	-0,13	1,21	0,17
6	011718	2,71	0,90	0,96	0,52	1,14	0,49	-0,89	-0,10	2,14	0,40
7	011801	1,57	0,57	1,07	0,83	0,20	0,12	-1,16	-0,09	0,86	0,25
8	011806	-0,43	-0,34	-0,36	-0,24	-0,11	-6,00	-1,54	-0,15	-0,93	-0,23
9	011901	1,78	0,51	2,28	0,80	0,89	0,36	-0,77	-0,06	3,09	0,37
10	012108	0,34	0,11	0,38	0,00	0,08	0,00	-0,64	-0,06	0,04	0,00
11	012205	-0,04	0,00	0,31	0,09	0,79	0,25	0,36	0,00	-0,85	-0,12
12	012218	1,18	0,42	1,89	0,69	0,99	0,33	-0,95	-0,03	1,80	0,32
13	012219	0,57	0,26	1,24	0,67	1,78	0,45	-0,56	-0,01	1,28	0,23

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

D'après le tableau 3, il est clair qu'il y a une variation dans les tendances des précipitations observées dans différentes saisons et sur l'ensemble de l'année.

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

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

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

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

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

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

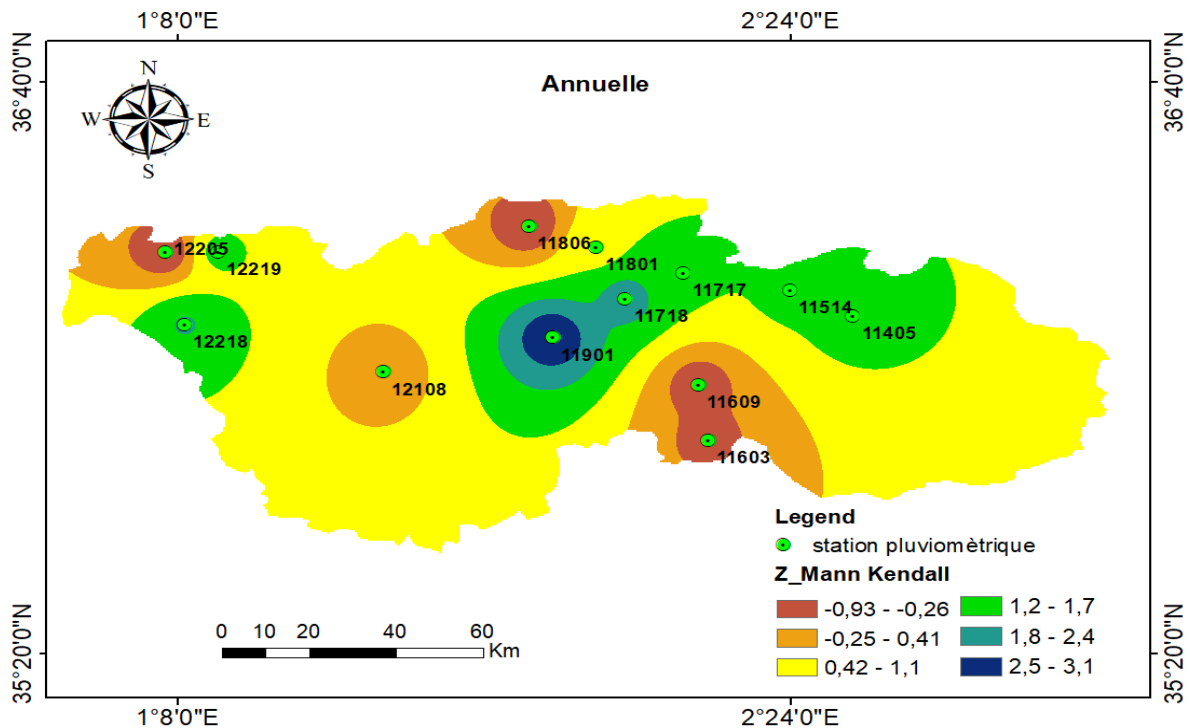


Figure 15 : Carte de la tendance annuelle des stations étudiées

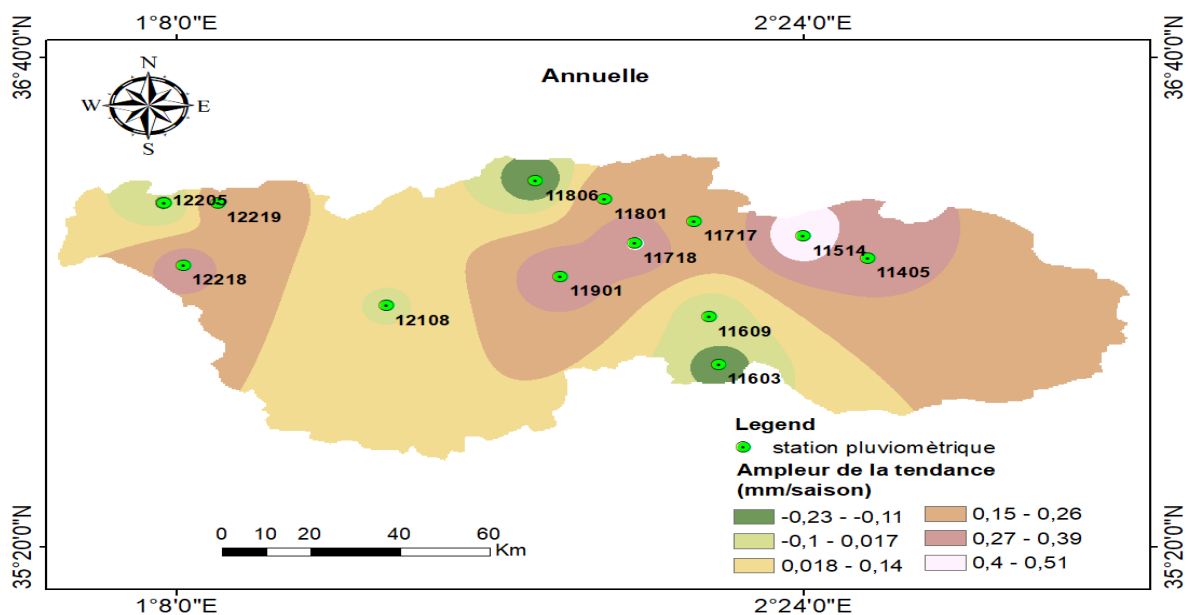


Figure 16 : Carte de l'ampleur de la tendance des précipitations annuelles

À l'échelle annuelle, les résultats montrent une prédominance de tendances positives. Parmi les 13 stations, 8 stations (62 %) affichent une tendance positive et 2 stations (15 %) montrent une tendance significative positive. Trois stations (23 %) présentent une tendance négative. Par exemple, la station 011718 affiche une tendance significative positive avec une pente de Sen de 0.040, indiquant une augmentation des précipitations annuelles. Ces résultats suggèrent une tendance générale à l'augmentation des précipitations annuelles dans la région, ce qui pourrait avoir des implications importantes pour la gestion des ressources en eau et l'adaptation au changement climatique.

2.2 Tendances des précipitations saisonnière :

2.2.1 Saison automnale :

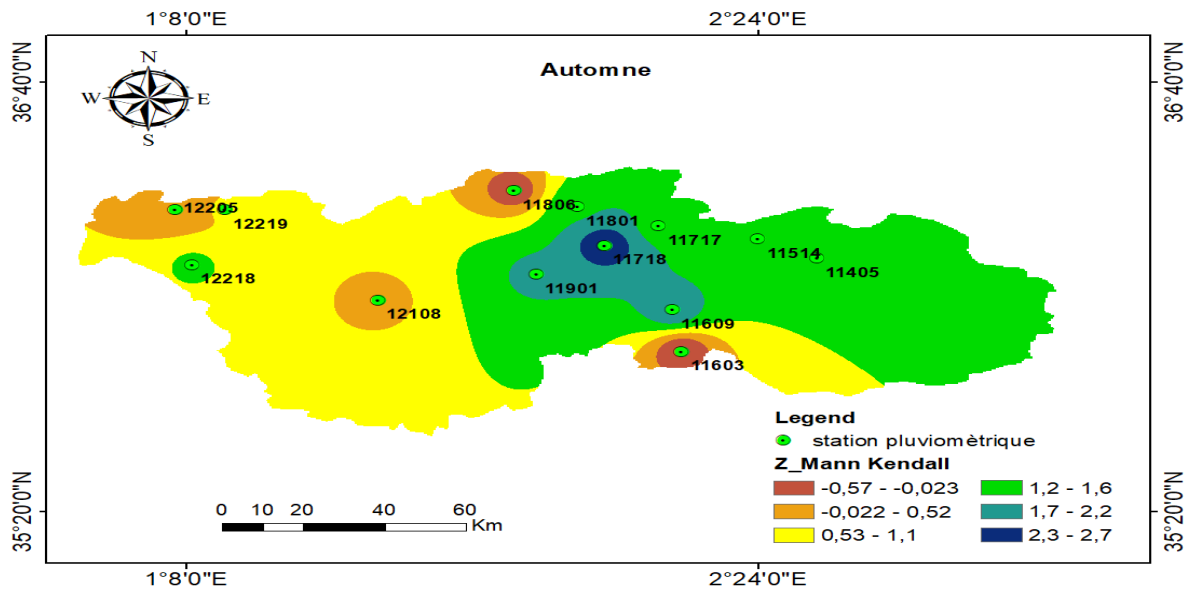


Figure 17 : Carte des tendances de la pluviométrie de la saison de l'automne

Les résultats des tests de Mann-Kendall appliqués aux précipitations automnales montrent une tendance majoritairement positive. Parmi les 13 stations analysées, 10 stations (soit environ 77 %) affichent une tendance positive, tandis que 2 stations (15 %) montrent une tendance significative positive et une seule station (8 %) présente une tendance négative. Par exemple, la station 011405 affiche une pente de Sen de 0.057, indiquant une augmentation des précipitations automnales. Cela suggère que la majorité des stations connaissent une augmentation des précipitations automnales, ce qui peut avoir des implications positives pour l'agriculture mais peut aussi augmenter le risque d'inondations.

2.2.2 Saison hivernale :

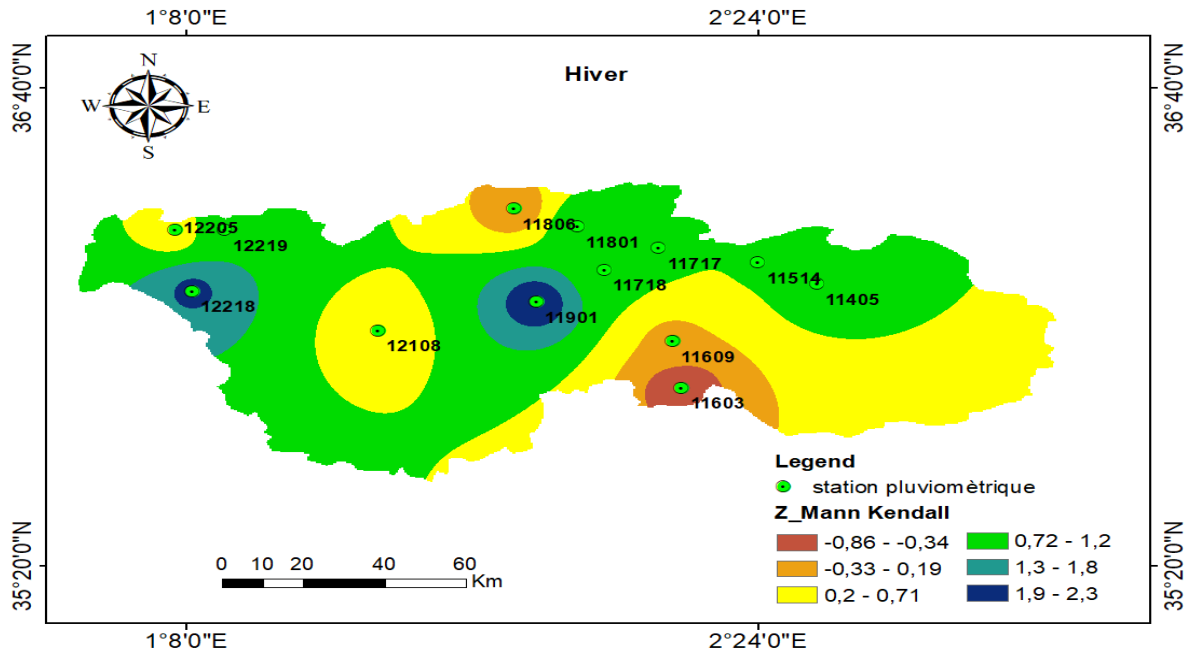


Figure 18 : Carte des tendances de la pluviométrie de la saison de l'hiver

Pour les précipitations hivernales, les tendances sont également majoritairement positives. Sur les 13 stations, 9 stations (69 %) présentent une tendance positive et 2 stations (15 %) montrent une tendance significative positive. Deux stations (15 %) affichent une tendance négative. Par exemple, la station 011514 a une pente de Sen de 0.11, indiquant une augmentation des précipitations hivernales. Ces résultats suggèrent que la majorité des stations connaissent une augmentation des précipitations hivernales, ce qui peut contribuer à une meilleure recharge des nappes phréatiques mais peut aussi poser des défis en termes de gestion des crues hivernales.

2.2.3 Saison printanière :

Les précipitations printanières montrent une tendance positive dans la plupart des stations. Sur les 13 stations, 10 stations (77 %) affichent une tendance positive et aucune station ne montre de tendance significative positive. Trois stations (23 %) présentent une tendance négative. Par exemple, la station 011514 affiche une pente de Sen de 0.141, indiquant une augmentation des précipitations printanières. Ces résultats indiquent que le printemps voit généralement une augmentation des précipitations dans la région, ce qui peut être bénéfique pour les cultures de printemps mais peut aussi augmenter le risque de précipitations excessives.

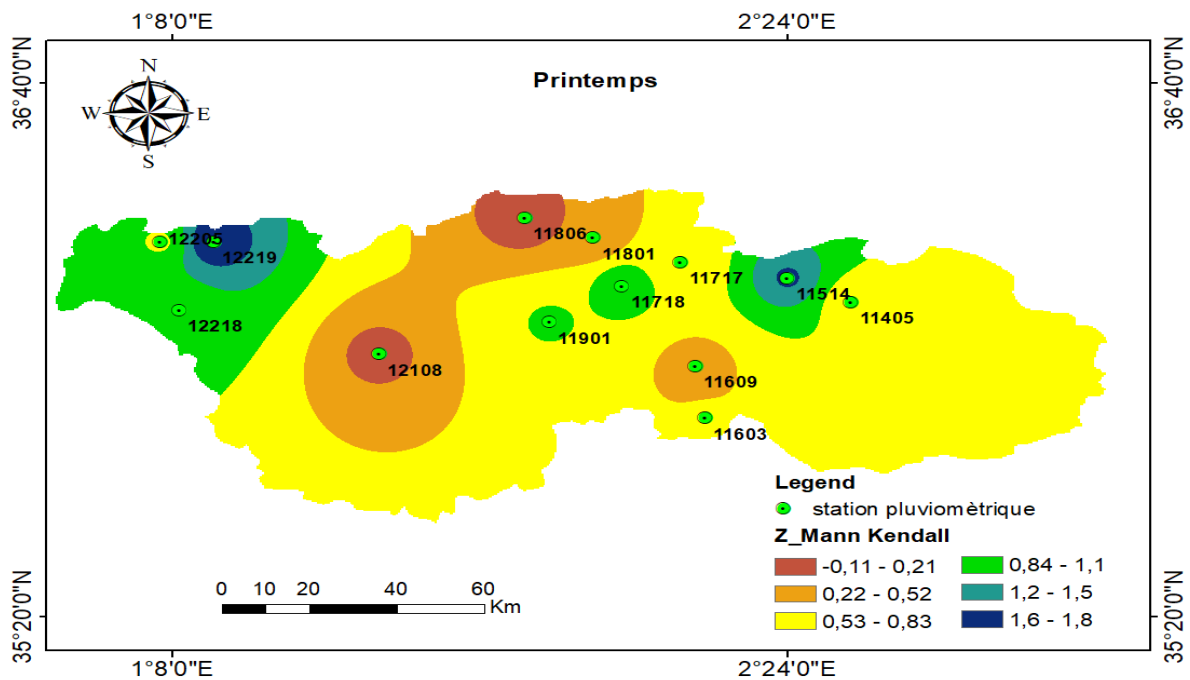


Figure 19 : Carte des tendances de la pluviométrie de la saison du printemps

2.2.4 Saison estivale :

Les précipitations estivales montrent une plus grande variabilité dans les tendances. Sur les 13 stations, 5 stations (38 %) affichent une tendance positive et 2 stations (15 %) montrent une tendance significative positive. Cependant, 6 stations (46 %) présentent une tendance négative. Par exemple, la station 011609 montre une tendance positive avec une pente de Sen de 0.014, tandis que la station 011405 affiche une tendance négative avec une pente de Sen de -0.005. Ces résultats suggèrent une diminution des précipitations estivales dans plusieurs stations, ce qui pourrait aggraver les conditions de sécheresse estivale dans ces zones.

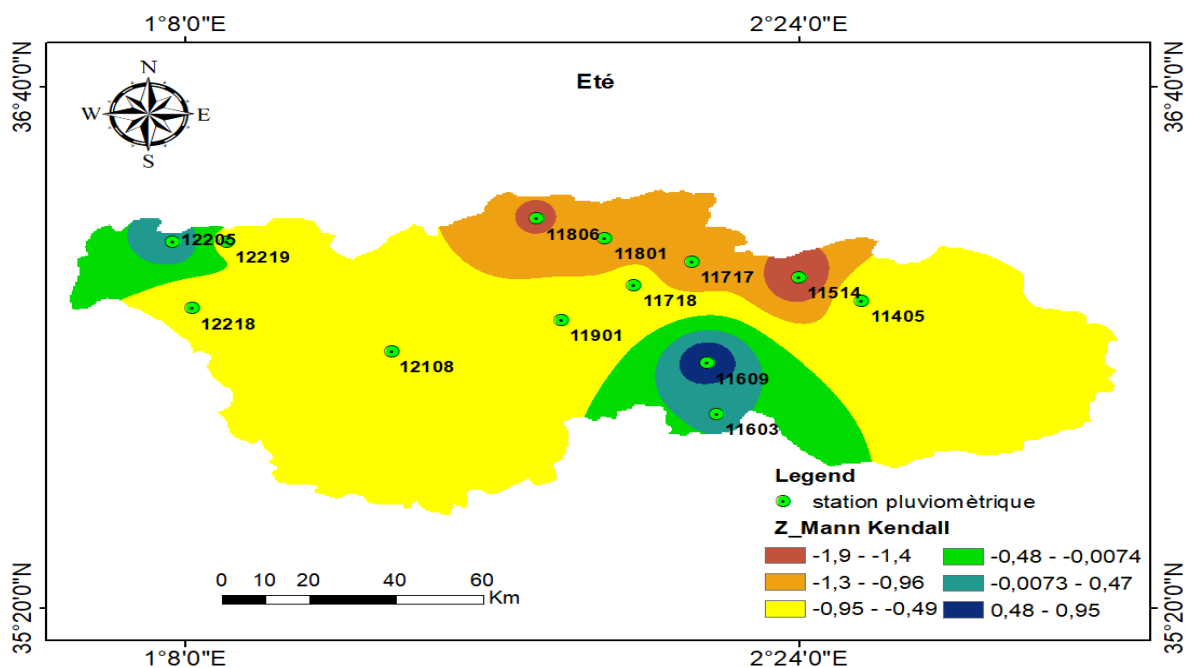


Figure 20 : Carte des tendances de la pluviométrie de la saison de l'été

3. ETUDE DES TENDANCES DES PRECIPITATIONS EXTREMES :

Les indices climatiques, calculés pour décrire l'état et les changements du système climatique, permettent d'analyser statistiquement les variations des éléments climatologiques, notamment à travers l'examen et la comparaison des séries chronologiques, des moyennes, des extrêmes et des tendances.

Pour étudier l'évolution et les tendances des précipitations extrêmes, nous avons utilisé les indices recommandés par l'Organisation météorologique mondiale et la communauté scientifique internationale dans le cadre du projet ETCCDMI, déterminés par le logiciel RClimDex. Cette étude s'est concentrée sur les indices climatologiques les plus couramment utilisés, facilitant les comparaisons avec d'autres recherches similaires sur les extrêmes climatiques. Nous avons ainsi analysé onze indices liés aux précipitations moyennes, aux périodes sèches, au nombre d'événements de fortes précipitations, ainsi qu'au nombre de jours pluvieux et secs, à savoir : PRCTOT, SDII, CDD, CWD, R10, R20, R50, R95p, R99p, RX1j et RX5j.

Les indices climatiques développés par l'équipe d'experts sur la Détection, la Surveillance et les Indices du Changement Climatique ont été calculés pour mieux caractériser et comprendre les changements climatiques dans notre zone d'étude. Ces indices, basés sur des données journalières de précipitations, permettent de caractériser les événements pluvieux dans le bassin du haut et moyen Cheliff.

Dans cette étude, onze indices climatiques ont été retenus en raison de leur potentiel impact sur la disponibilité des ressources en eau et la productivité agricole dans notre zone.

3.1. CWD (Jours de pluie consécutifs) :

Les résultats dans le tableau 4 montrent que la majorité des stations dans le bassin du haut et moyen Cheliff, présentent une tendance positive pour l'indice CWD. Cela signifie qu'il y a une augmentation du nombre de jours de pluie consécutifs, indiquant des périodes prolongées de précipitations. Cette tendance peut être bénéfique pour l'agriculture en augmentant l'humidité du sol, mais elle peut également augmenter le risque d'inondations si les systèmes de drainage ne sont pas adéquats. Une seule station, DEURDEUR BGE, montre une tendance négative, indiquant des périodes de pluie moins prolongées.

Tableau 4 : Résultats de calcul de l'indice CWD

Indice	Nom de la station	Code de la station	Sen's slope	STD Slope	p-value
CWD Jours de pluie consécutifs	GHRIB BGE	11405	0.121	-0.143	0.928
	DJENANE B-OUADAH	11514	-0.017	0.074	0.820
	BORDJ EL AMIR AEK	11603	-0.025	0.044	0.581
	DEURDEUR BGE	11609	0.168	0.042	0.01
	EL KHEMIS ANRH	11717	-0.025	0.026	0.346
	HARREZA BGE	11718	0.007	0.03	0.804
	ARIB EBDA	11801	0.042	0.043	0.333
	ELANNEB	11806	-0.114	0.072	0.131
	EL TOUAIBIA	11901	0.021	0.042	0.624
	FODDA Barrage	12108	0.029	0.064	0.662

BENAIRIA	12205	-0.002	0.027	0.949
DOMAINE SI-TAYEB	12218	-0.025	0.026	0.346
CHLEF A.N.R.H	12219	0.062	0.058	0.071

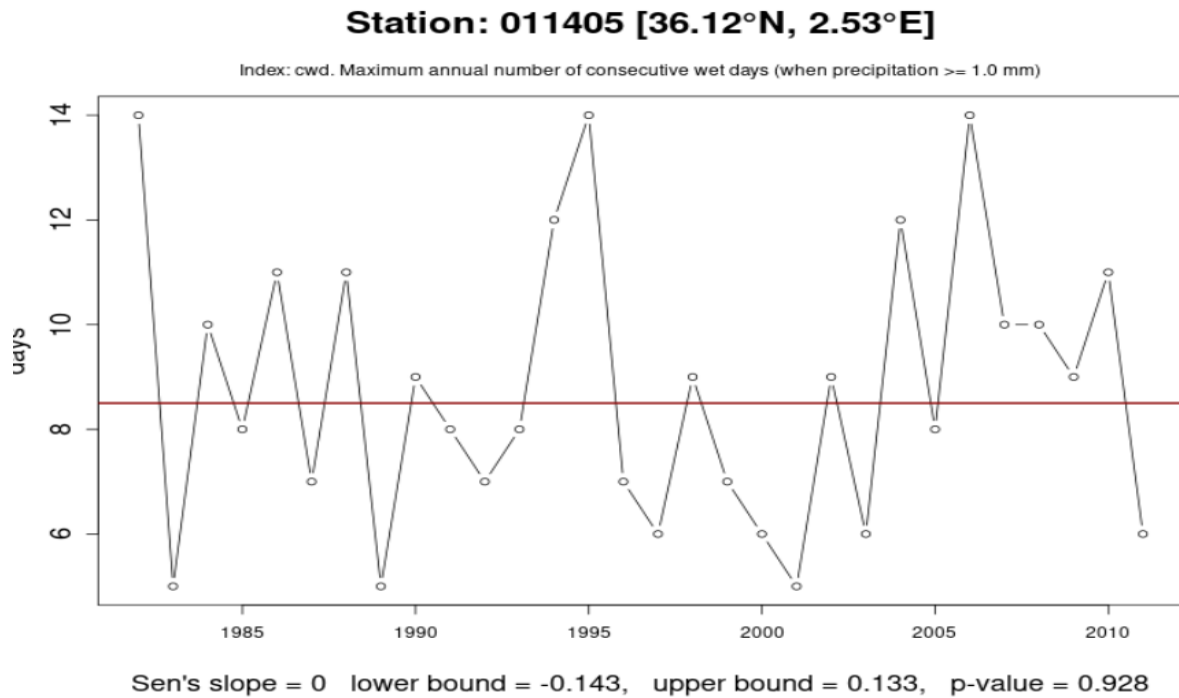


Figure 21 : Indice du Jours de pluie consécutifs (CWD)à la station GHRIB BGE

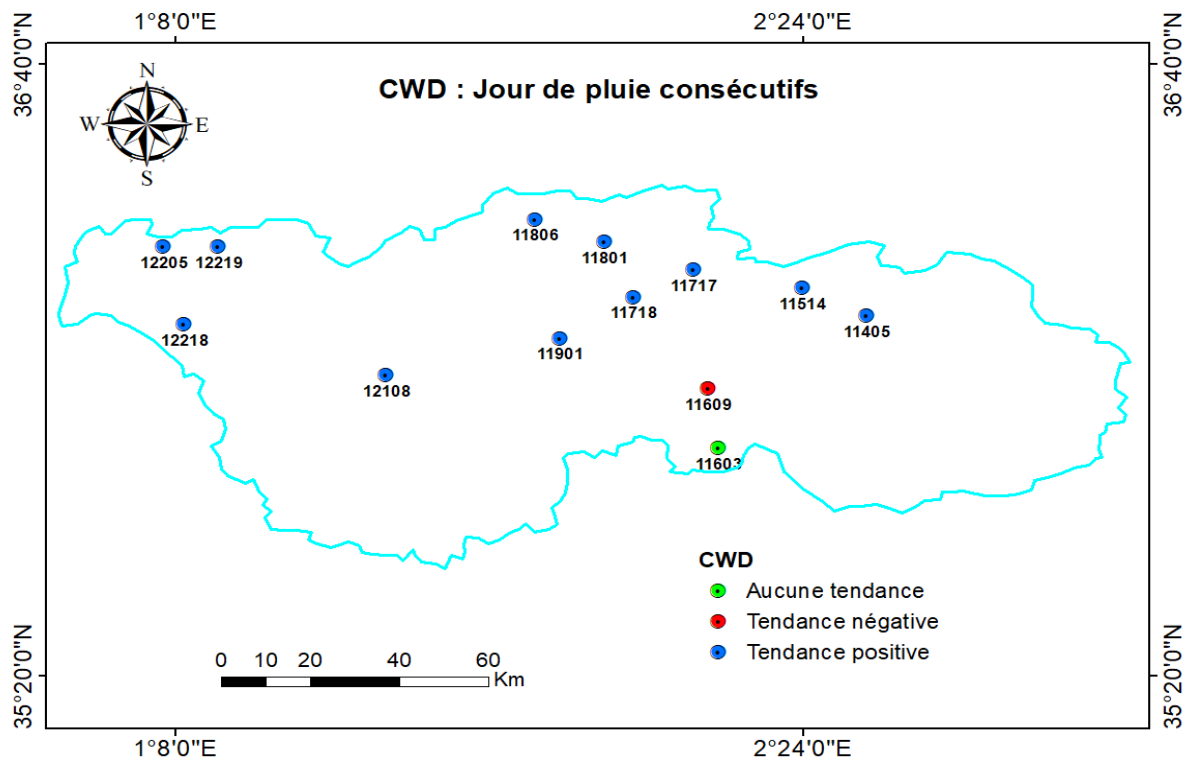


Figure 22 : Variabilité spatiale de l'indice CWD

3.2. CDD (Jours secs consécutifs)

La majorité des stationsmontrent une tendance positive pour l'indice CDD, ce qui indique une augmentation du nombre de jours secs consécutifs. Cela suggère des périodes de sécheresse plus longues, ce qui peut avoir des impacts négatifs sur les ressources en eau et l'agriculture, augmentant le stress hydrique. Cependant, deux stations, DEURDEUR BGE et FODDA Barrage, présentent une tendance négative, indiquant des périodes sèches plus courtes, ce qui pourrait être moins problématique pour ces zones spécifiques.

Tableau 5 : Résultats de calcul de l'indice CDD

Indice	Nom de la station	Code de la station	Sen's slope	STD Slope	p-value
CDD Jours secs consécutifs	GHRIB BGE	11405	-0.571	-1.148	0.054
	DJENANE B-OUADAH	11514	0.187	0.387	0.633
	BORDJ EL AMIR AEK	11603	-0.997	0.516	0.064
	DEURDEUR BGE	11609	-0.307	0.441	0.492
	EL KHEMIS ANRH	11717	00	0.494	1.00
	HARREZA BGE	11718	0.571	0.450	0.216
	ARIB EBDA	11801	0.689	0.641	0.294
	ELANNEB	11806	0.071	0.355	0.843
	EL TOUAIBIA	11901	0.016	0.587	0.979
	FODDA Barrage	12108	-0.768	0.338	0.03
	BENAIRIA	12205	-0.307	0.441	0.490
	DOMAINE SI-TAYEB	12218	-0.792	0.461	0.096
	CHLEF A.N.R.H	12219	-0.556	0.623	0.26

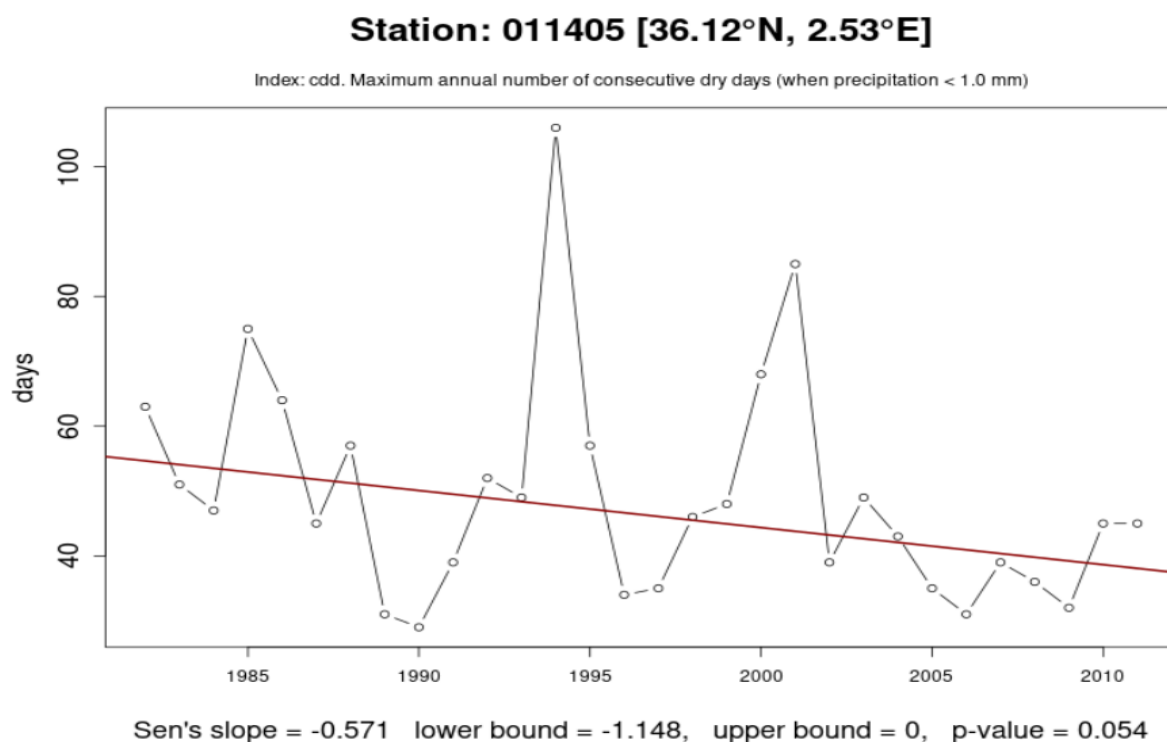


Figure 23 : Indice du Jours secs consécutifs (CDD) à la station GHRIB BGE

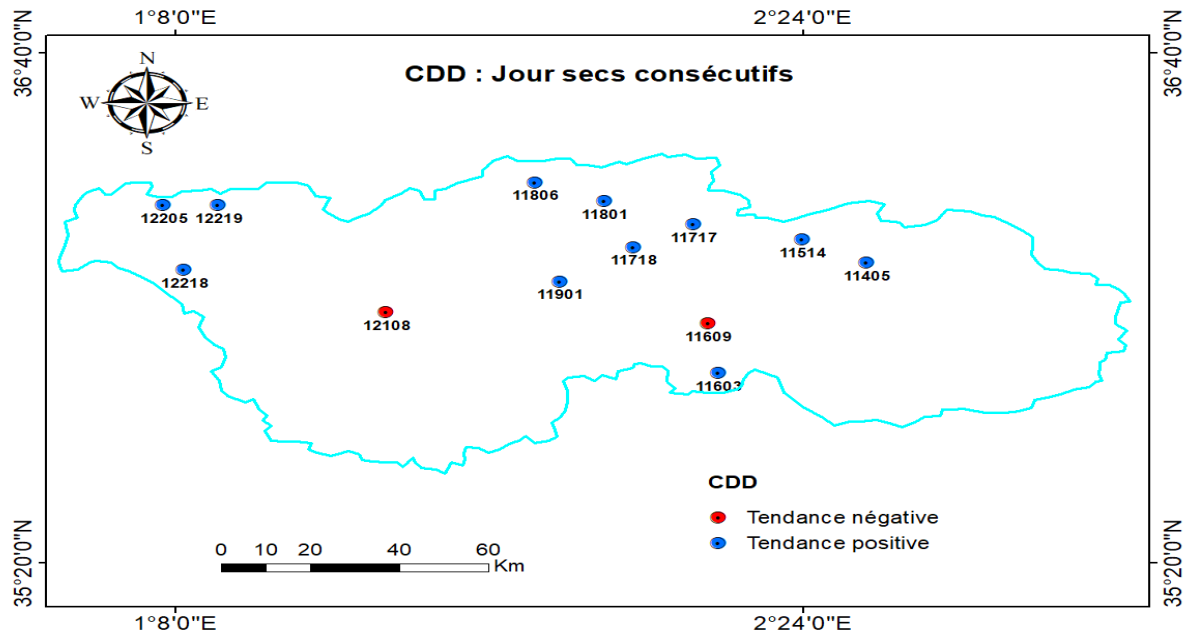


Figure 24 : Variabilité spatiale de l'indice CDD

3.3. SDII (Indice simple d'intensité journalière)

L'indice SDII montre des tendances variées parmi les stations. Plusieurs stations, y compris DEURDEUR BGE, EL KHEMIS ANRH, et FODDA Barrage, affichent une tendance positive, suggérant une augmentation de l'intensité moyenne des précipitations. Cela pourrait indiquer des pluies plus intenses, même si elles sont moins fréquentes. En revanche, des stations comme GHRIB BGE, DJENANE B-OUADAH, et ARIB EBDA montrent une tendance négative, indiquant une diminution de l'intensité des précipitations. La station EL TOUAIBIA ne montre aucun changement significatif, ce qui indique une stabilité dans l'intensité journalière des précipitations.

Tableau 6 : Résultats de calcul de l'indice SDII

Indice	Nom de la station	Code de la station	Sen's slope	STD Slope	P-value
SDII Indice simple d'intensité journalière.	GHRIB BGE	11405	0.023	0.015	0.187
	DJENANE B-OUADAH	11514	-0.165	0.058	0.011
	BORDJ EL AMIR AEK	11603	0.116	0.027	00
	DEURDEUR BGE	11609	0.008	0.044	0.857
	EL KHEMIS ANRH	11717	0.032	0.018	0.089
	HARREZA BGE	11718	0.011	0.038	0.778
	ARIB EBDA	11801	-0.107	0.049	0.039
	ELANNEB	11806	0.064	0.063	0.322
	EL TOUAIBIA	11901	0.048	0.024	0.054
	FODDA Barrage	12108	0.076	0.051	0.154
	BENAIRIA	12205	0.015	0.018	0.413
	DOMAINE SI-TAYEB	12218	0.032	0.018	0.089
	CHLEF A.N.R.H	12219	0.029	0.061	0.175

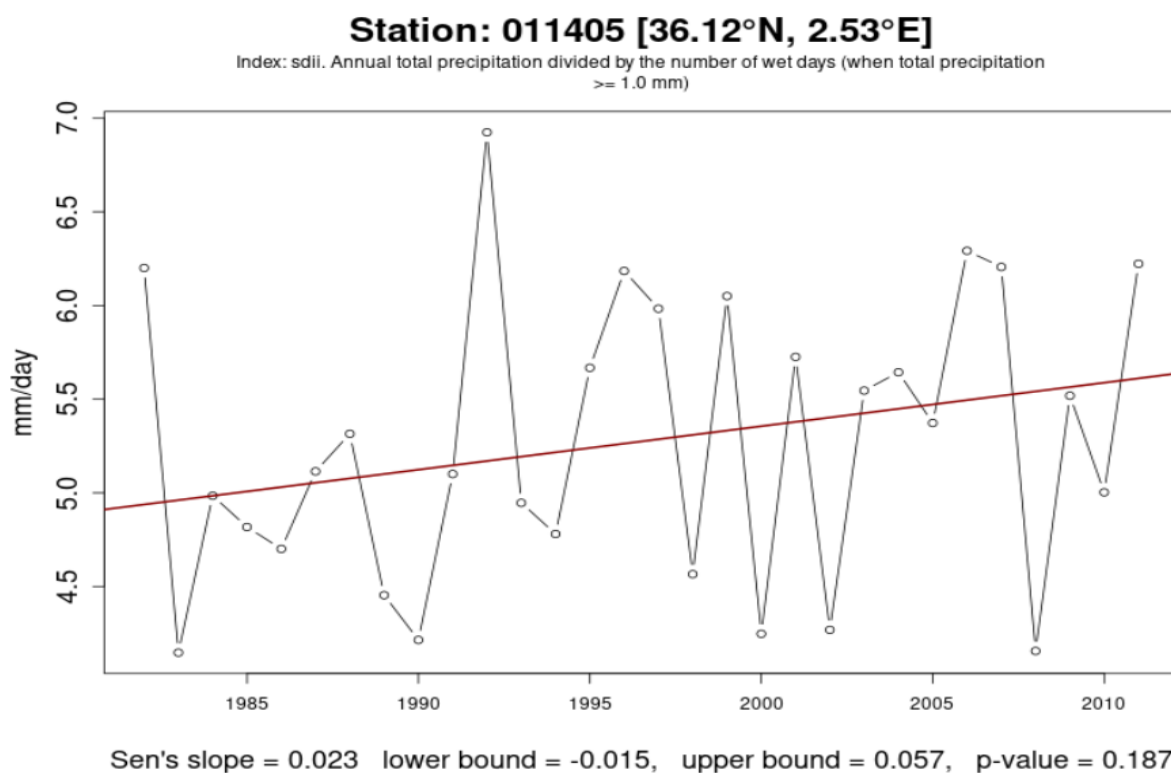


Figure 25 : Indice d'intensité journalière (SDII) à la station GHRIB BGE

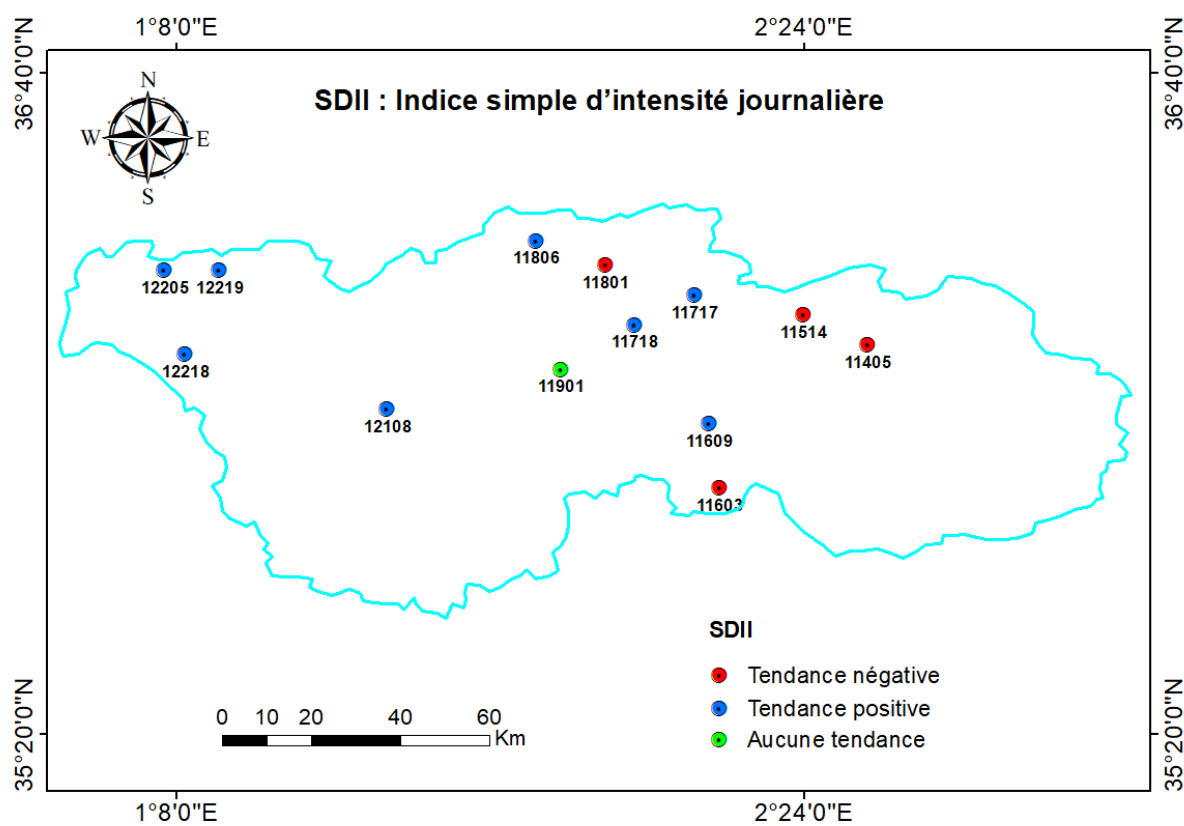


Figure 27 : Variabilité spatiale de l'indice SDII

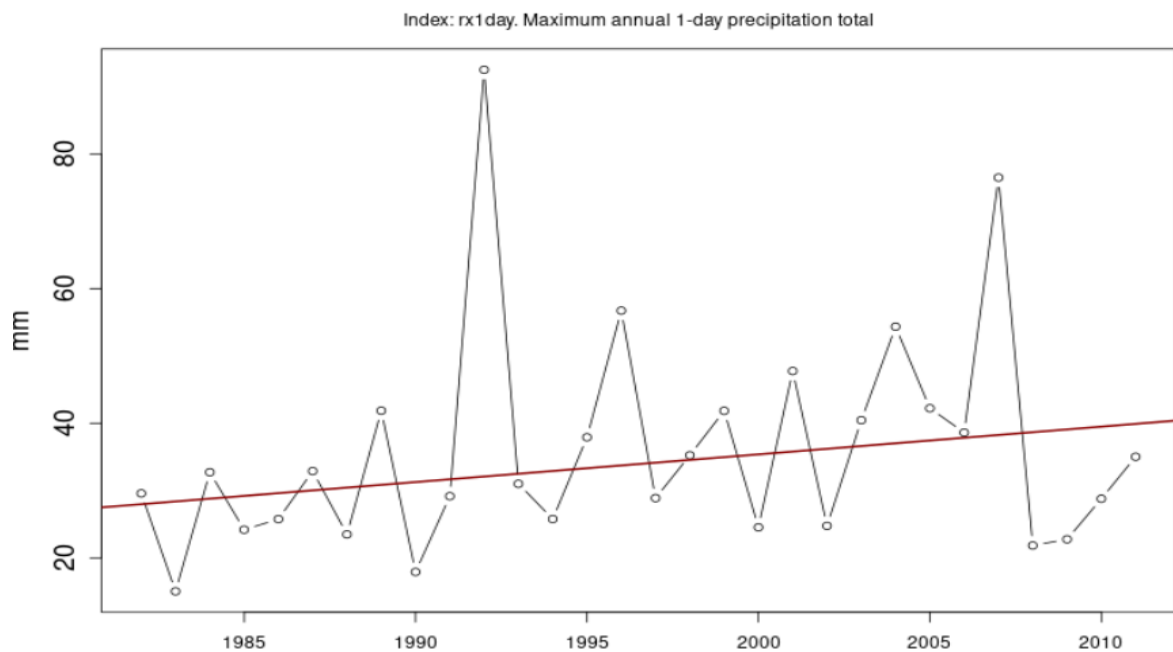
3.4. RX1day (Hauteur maximale de précipitations sur 1 jour) :

Presque toutes les stations, sauf ARIB EBDA, montrent une tendance positive pour l'indice RX1day, ce qui signifie une augmentation des précipitations maximales sur un jour. Cela indique que les épisodes de pluie deviennent plus intenses, augmentant le risque d'inondations soudaines et d'autres impacts liés à des précipitations extrêmes. La tendance négative observée à ARIB EBDA suggère une réduction de ces événements intenses dans cette station particulière.

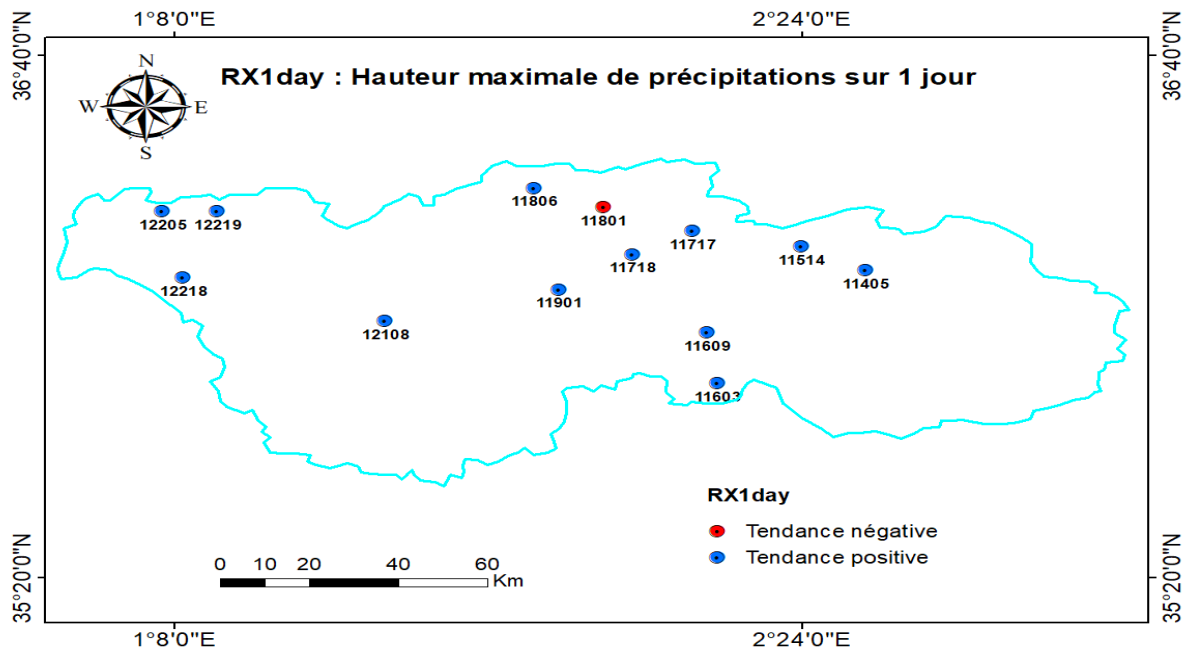
Tableau 8 : Résultats de calcul de l'indice RX1day

Indice	Nom de la station	Code de la station	Sen's Slope	STD Slope	p-value
RX1day Hauteur maximale de précipitations sur 1 jour	GHRIB BGE	11405	0.411	-0.131	0.187
	DJENANE B-OUADAH	11514	0.227	0.779	0.775
	BORDJ EL AMIR AEK	11603	0.025	0.351	0.944
	DEURDEUR BGE	11609	-0.111	0.308	0.724
	EL KHEMIS ANRH	11717	0.451	0.327	0.176
	HARREZA BGE	11718	-0.107	0.217	0.625
	ARIB EBDA	11801	-1.161	0.452	0.016
	ELANNEB	11806	-0.479	0.494	0.343
	EL TOUAIBIA	11901	0.437	0.335	0.201
	FODDA Barrage	12108	1.622	0.897	0.088
	BENAIRIA	12205	0.574	0.326	0.089
	DOMAINE SI-TAYEB	12218	0.699	0.327	0.176
	CHLEF A.N.R.H	12219	0.289	0.231	0.164

Station: 011405 [36.12°N, 2.53°E]



Sen's slope = 0.411 lower bound = -0.131, upper bound = 0.935, p-value = 0.187

Figure 28 : Hauteur maximale de précipitations sur 1 jour à la station GHRIB BGE**Figure 29** : Variabilité spatiale de l'indice RX1day

3.5. RX5day (Hauteur maximale de précipitations sur 5 jours)

Toutes les stations montrent une tendance positive pour l'indice RX5day, indiquant une augmentation des précipitations maximales sur une période de cinq jours. Cette tendance suggère des périodes de pluies prolongées et plus intenses, ce qui peut avoir des implications importantes pour la gestion des ressources en eau et la prévention des inondations dans le bassin du haut et moyen Cheliff.

Tableau 9 : Résultats de calcul de l'indice RX5day

Indice	Nom de la station	Code de la station	Sen's slope	STD Slope	p-value
RX5day Hauteur maximale de précipitations sur 5 jours	GHRIB BGE	11405	0.678	-0.376	0.175
	DJENANE B-OUADAH	11514	-0.844	1.166	0.479
	BORDJ EL AMIR AEK	11603	0.384	0.486	0.436
	DEURDEUR BGE	11609	0.791	0.813	0.341
	EL KHEMIS ANRH	11717	0.086	0.668	0.898
	HARREZA BGE	11718	0.135	0.525	0.799
	ARIB EBDA	11801	-0.971	0.791	0.231
	ELANNEB	11806	-2.036	1.245	0.116
	EL TOUAIBIA	11901	0.151	0.452	0.742
	FODDA Barrage	12108	2.763	1.818	0.147
	BENAIRIA	12205	1.036	0.564	0.077
	DOMAINE SI-TAYEB	12218	0.086	0.668	0.898
	CHLEF A.N.R.H	12219	0.43	0.568	0.354

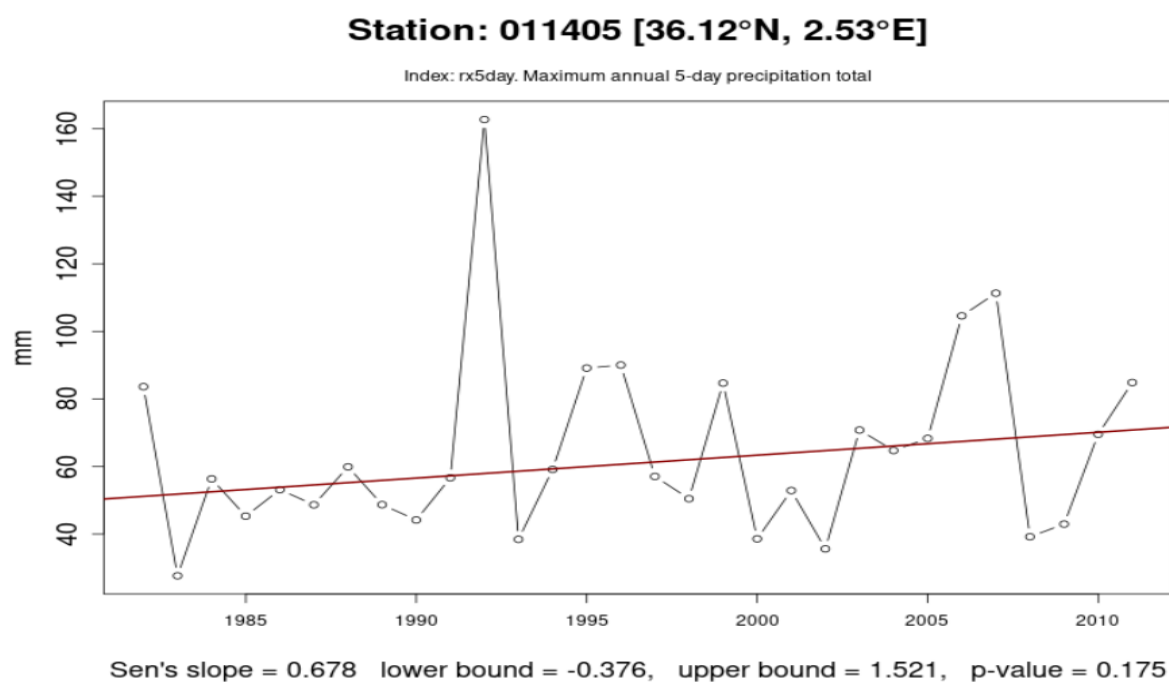


Figure 30 : Hauteur maximale de précipitations sur 5 jours à la station GHRIB BGE

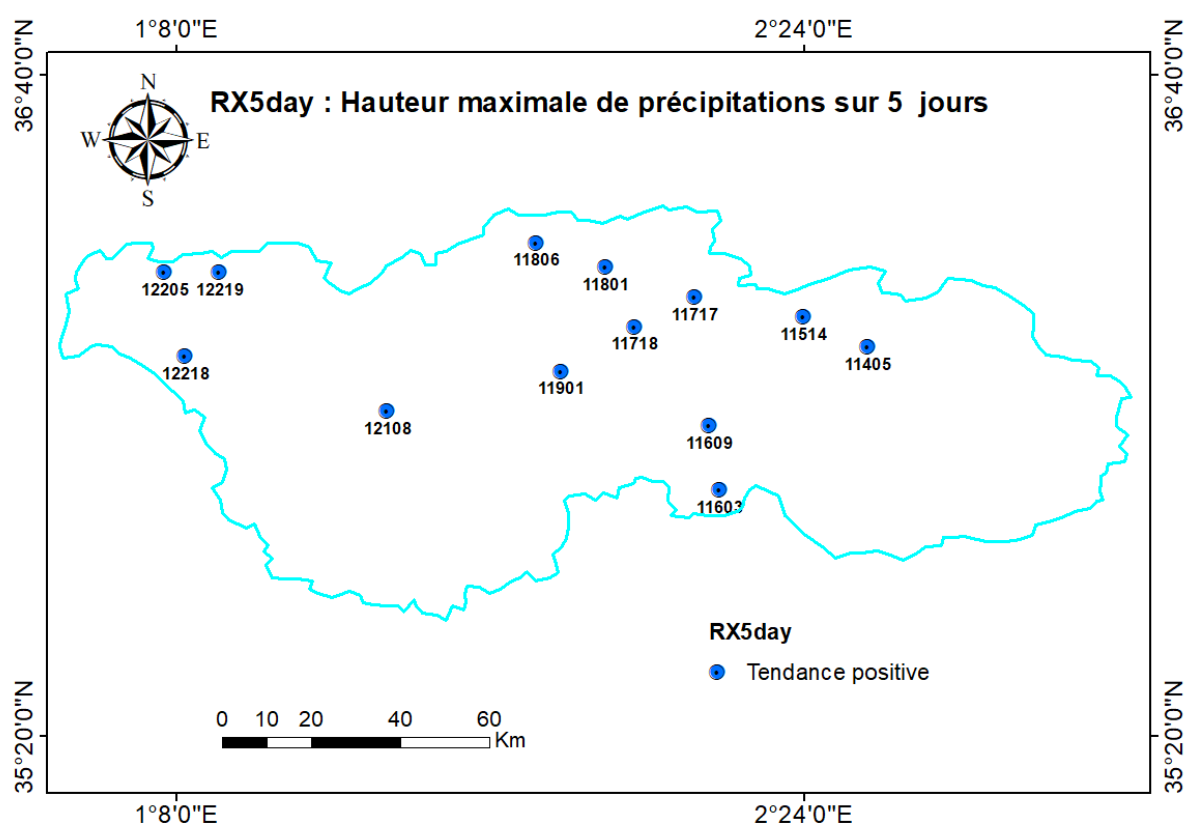


Figure 31 : Variabilité spatiale de l'indice RX5day

3.6. R10 (Nombre de jours de fortes précipitations) :

La majorité des stations montrent une tendance positive pour l'indice R10, ce qui indique une augmentation du nombre de jours avec de fortes précipitations. Cela suggère que les événements de précipitation intense deviennent plus fréquents. Cependant, certaines stations, comme BORDJ EL AMIR AEK et ARIB EBDA, montrent une tendance négative, indiquant une réduction de ces jours de fortes précipitations. Ces variations peuvent refléter des différences locales dans les conditions climatiques.

Tableau 10 :Résultats de calcul de l'indice R10

Indice	Nom de la station	Code de la station	Sen's slope	STD Slope	p-value
R10 Nombre de jours de fortes Précipitations	GHRIB BGE	11405	0.222	00	0.099
	DJENANE B-OUADAH	11514	-0.075	0.153	0.628
	BORDJ EL AMIR AEK	11603	0.311	0.109	0.008
	DEURDEUR BGE	11609	0.684	0.186	0.001
	EL KHEMIS ANRH	11717	0.095	0.088	0.286
	HARREZA BGE	11718	0.006	0.136	0.965
	ARIB EBDA	11801	-0.429	0.152	0.009
	ELANNEB	11806	-0.053	0.175	0.764
	EL TOUAIBIA	11901	0.052	0.101	0.607
	FODDA Barrage	12108	0.135	0.161	0.408
	BENAIRIA	12205	0.112	0.085	0.203
	DOMAINE SI-TAYEB	12218	0.847	0.302	0.01
	CHLEF A.N.R.H	12219	0.701	0.125	0.368

Station: 011405 [36.12°N, 2.53°E]

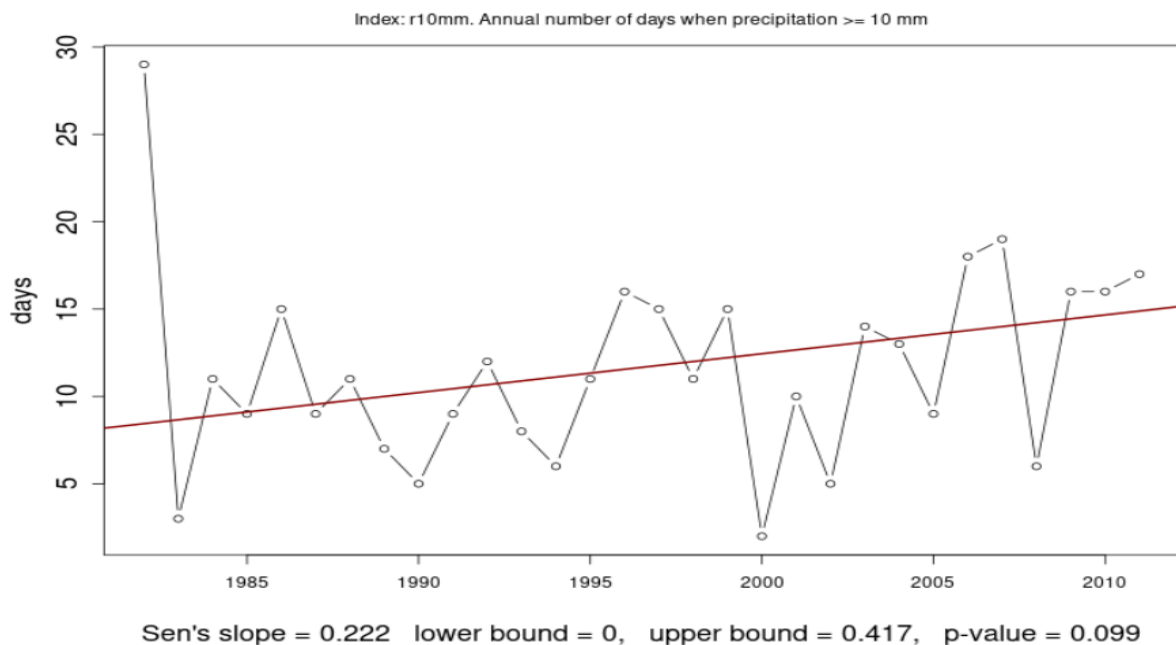


Figure 32 : Nombre de jours de fortes précipitations (R10)à la station GHRIB BGE

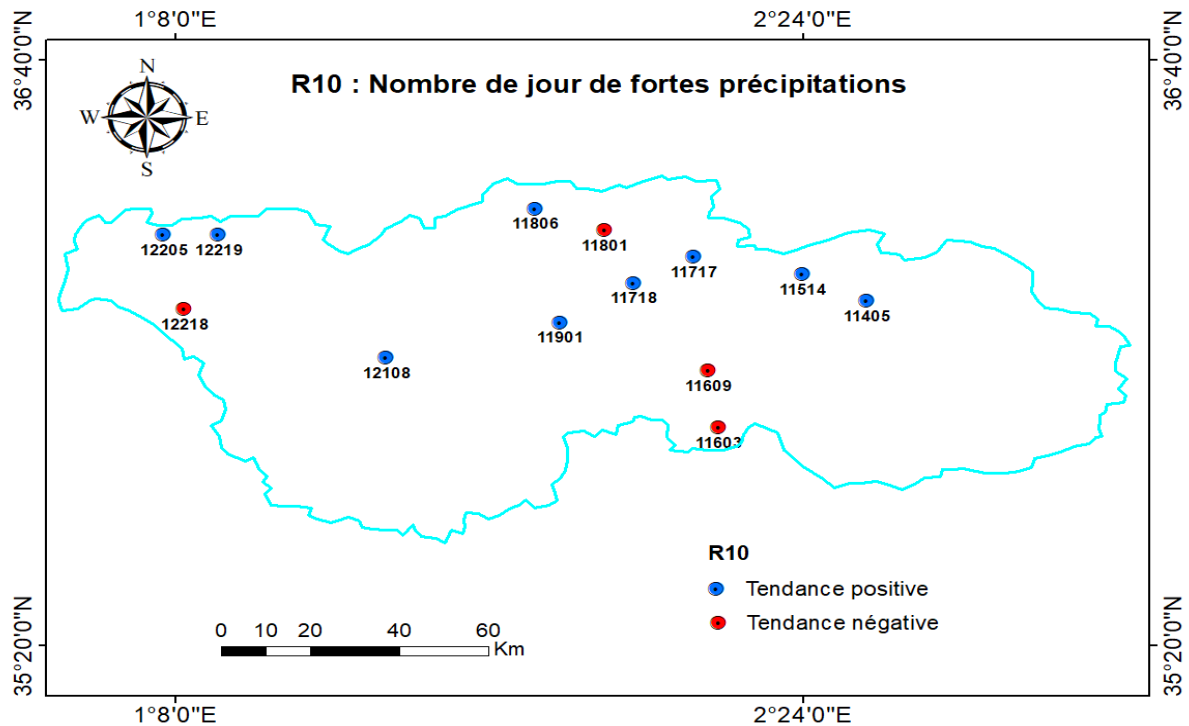


Figure 33 : Variabilité spatiale de l'indice R10

3.7. R20 (Nombre de très fortes précipitations) :

Pour l'indice R20, la plupart des stations montrent une tendance positive, indiquant une augmentation des jours de très fortes précipitations. Cela pourrait signaler une intensification des événements de précipitation extrême dans la région. Toutefois, quelques stations, y compris BORDJ EL AMIR AEK et HARREZA BGE, montrent une tendance négative, tandis que ELANNEB ne présente aucun changement significatif. Ces différences soulignent la variabilité locale des précipitations extrêmes.

Tableau 11 : Résultats de calcul de l'indice R20

Indice	Nom de la station	Code de la station	Sen's slope	STD Slope	p-value
R20 Nombre de très fortes Précipitations	GHRIB BGE	11405	0.036	00	0.229
	DJENANE B-OUADAH	11514	-0.133	0.067	0.017
	BORDJ EL AMIR AEK	11603	0.351	0.111	0.004
	DEURDEUR BGE	11609	0.048	0.045	0.287
	EL KHEMIS ANRH	11717	0.001	0.082	0.988
	HARREZA BGE	11718	-0.223	0.081	0.011
	ARIB EBDA	11801	-0.075	0.095	0.441
	ELANNEB	11806	0.035	0.057	0.541
	EL TOUAIBIA	11901	0.161	0.121	0.197
	FODDA Barrage	12108	0.03	0.04	0.456
	BENAIRIA	12205	0.048	0.045	0.287
	DOMAINE SI-TAYEB	12218	0.436	0.168	0.016
	CHLEF A.N.R.H	12219	0.053	0.052	0.045

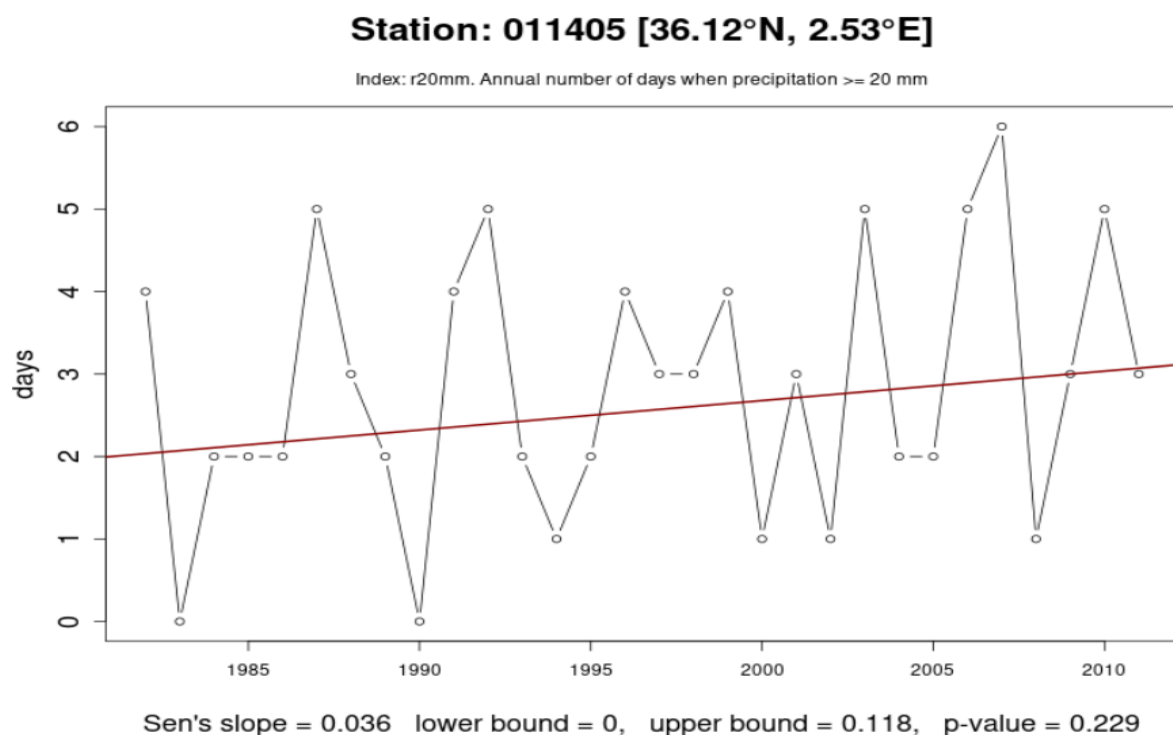


Figure 34 : Nombre de jours de très fortes précipitations (R20) à la station GHRIB BGE

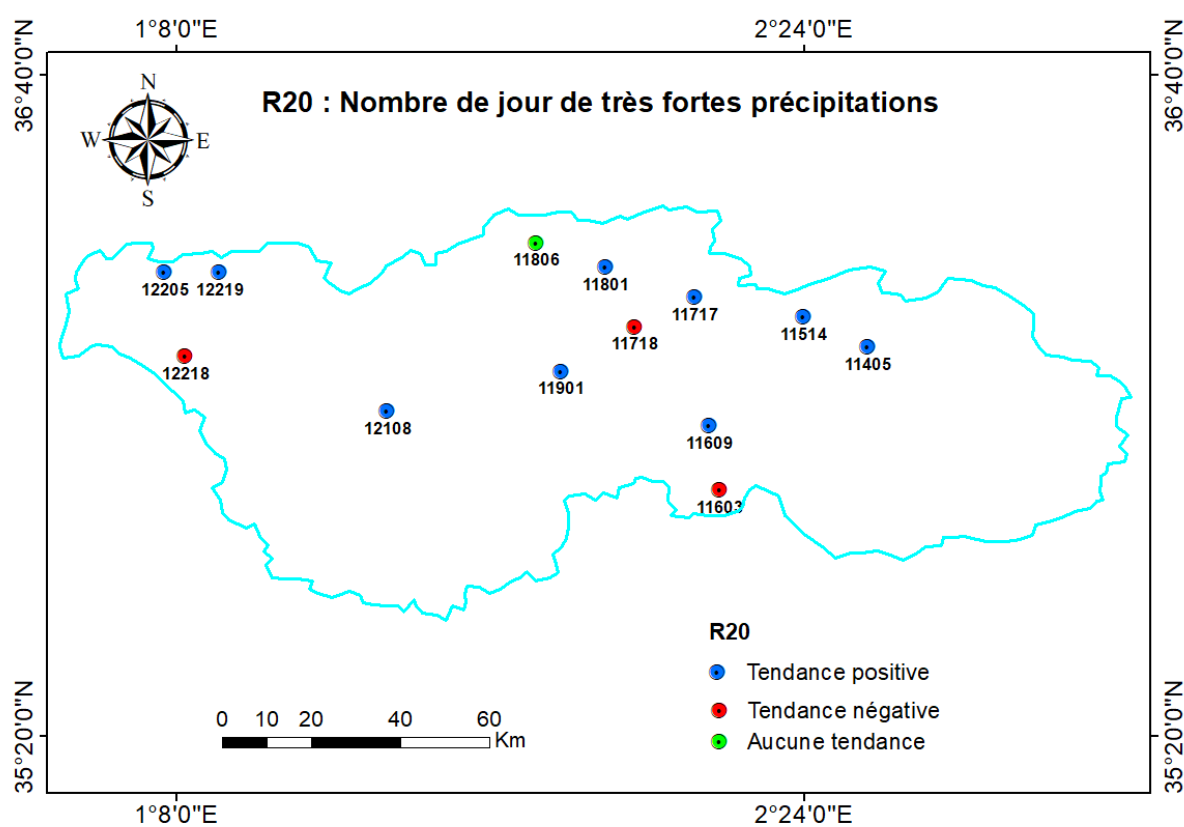


Figure 35 : Variabilité spatiale de l'indice R20

3.8. R50 (Nombre de jours au-dessus de 50 mm) :

La majorité des stations montrent une tendance positive pour l'indice R50, indiquant une augmentation des jours avec des précipitations supérieures à 50 mm. Cette tendance peut être associée à une augmentation des événements de précipitation intense, posant des défis pour la gestion des inondations. Cependant, la station DOMAINE SI-TAYEB montre une tendance négative, et les stations GHRIB BGE et ARIB EBDA ne montrent aucun changement significatif, indiquant une stabilité dans cette mesure.

Tableau 12 : Résultats de calcul de l'indice R50

Indice	Nom de la station	Code de la station	Sen's slope	STD Slope	p-value
R50 Nombre de jours au-dessus de 50 mm	GHRIB BGE	11405	00	00	0.152
	DJENANE B-OUADAH	11514	0.002	0.021	0.934
	BORDJ EL AMIR AEK	11603	0.002	0.009	0.866
	DEURDEUR BGE	11609	-0.01	0.015	0.505
	EL KHEMIS ANRH	11717	0.003	0.012	0.821
	HARREZA BGE	11718	-0.001	0.009	0.896
	ARIB EBDA	11801	-0.037	0.019	0.059
	ELANNEB	11806	0.001	0.025	0.982
	EL TOUAIBIA	11901	0.028	0.019	0.138
	FODDA Barrage	12108	0.015	0.012	0.202
	BENAIRIA	12205	0.003	0.012	0.821
	DOMAINE SI-TAYEB	12218	0.021	0.010	0.042
	CHLEF A.N.R.H	12219	00	0.008	0.31

Station: 011405 [36.12°N, 2.53°E]

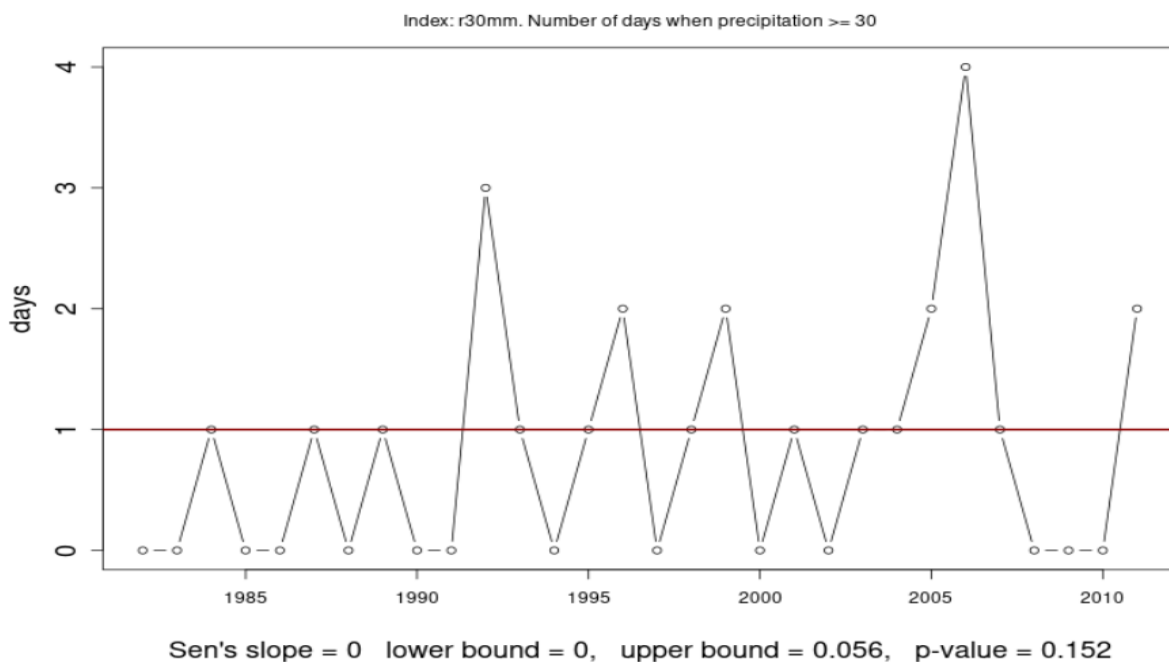


Figure 34 : Nombre de jours au-dessus de 50 mm à la station GHRIB BGE

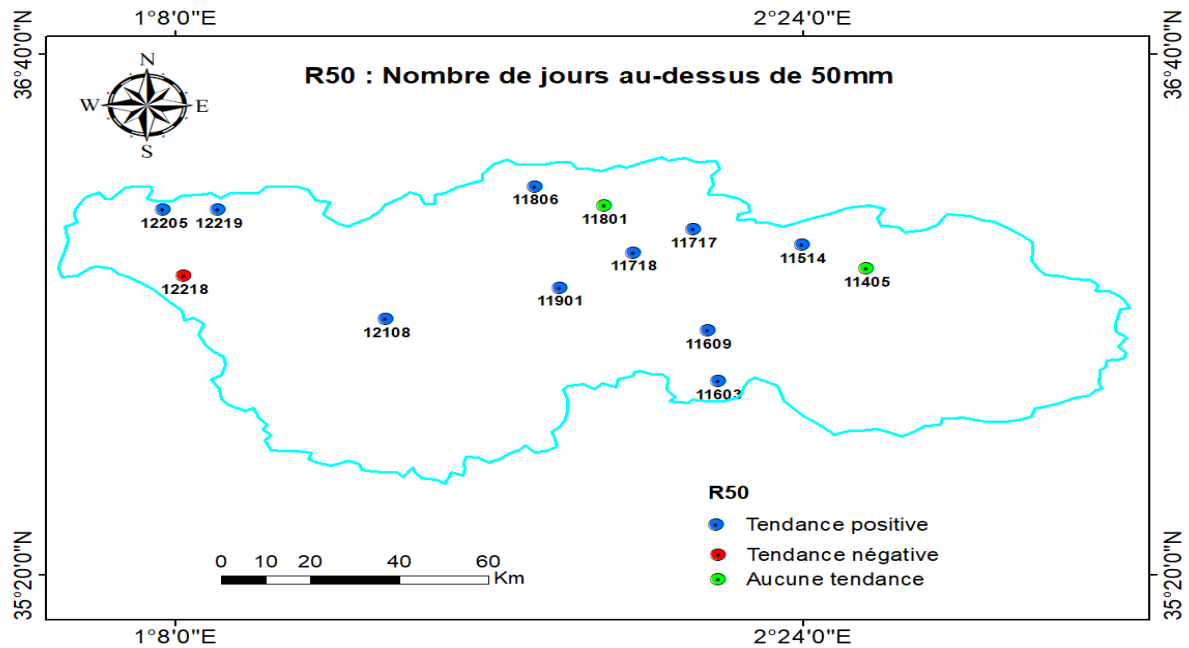


Figure 35 : Variabilité spatiale de l'indice R50

3.9. R95p (Jours très humides) :

Pour l'indice R95p, la majorité des stations montrent une tendance positive, indiquant une augmentation des jours très humides. Cela suggère une augmentation des jours avec des précipitations élevées, ce qui peut affecter l'hydrologie régionale et augmenter les risques d'inondation. Quelques stations, telles que DEURDEUR BGE et ARIB EBDA, montrent une tendance négative, indiquant une diminution de ces jours.

Tableau 13 : Résultats de calcul de l'indice R95p

Indice	Nom de la station	Code de la station	Sen's slope	STD Slope	p-value
R95p Jours très humides	GHRIB BGE	11405	1.60	-1.261	0.269
	DJENANE B-OUADAH	11514	-3.153	1.935	0.122
	BORDJ EL AMIR AEK	11603	2.705	1.715	0.127
	DEURDEUR BGE	11609	4.973	2.006	0.020
	EL KHEMIS ANRH	11717	0.917	1.274	0.476
	HARREZA BGE	11718	-2.375	1.525	0.131
	ARIB EBDA	11801	-4.512	1.619	0.010
	ELANNEB	11806	-1.84	-2.012	0.371
	EL TOUAIBIA	11901	2.001	1.796	0.273
	FODDA Barrage	12108	2.532	3.534	0.482
	BENAIRIA	12205	1.678	1.212	0.176
	DOMAINE SI-TAYEB	12218	0.917	1.274	0.476
	CHLEF A.N.R.H	12219	1.473	1.309	0.193

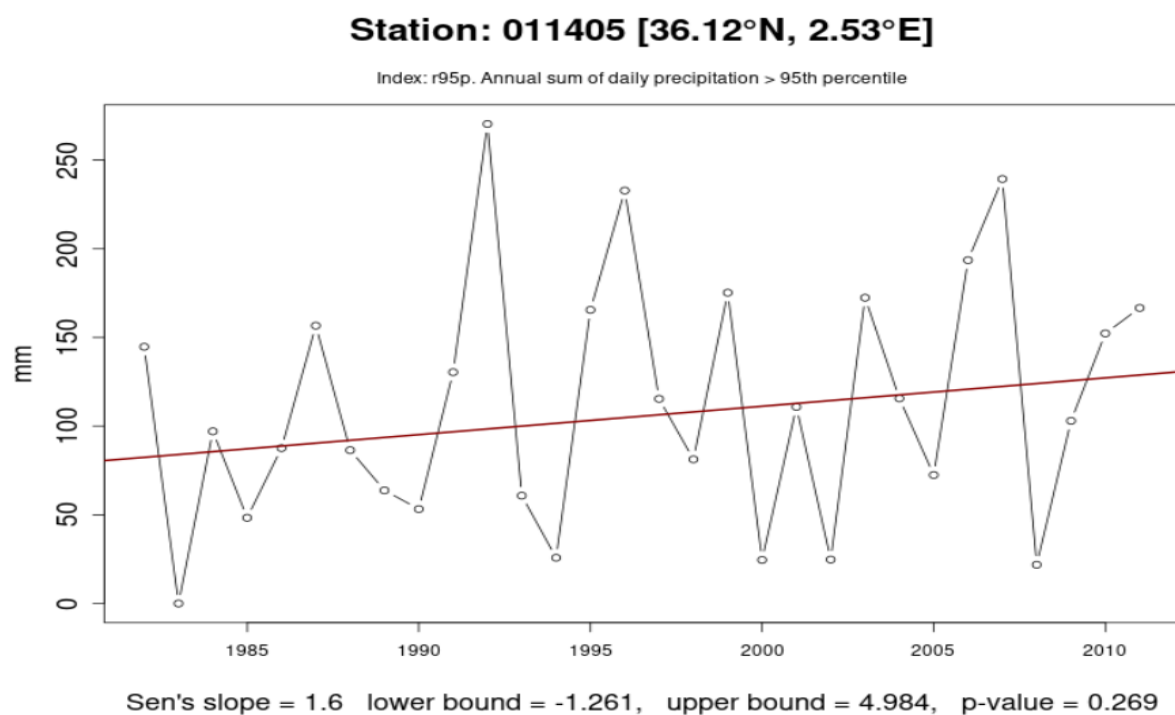


Figure 36 : Jours très humides R95p à la station GHRIB BGE

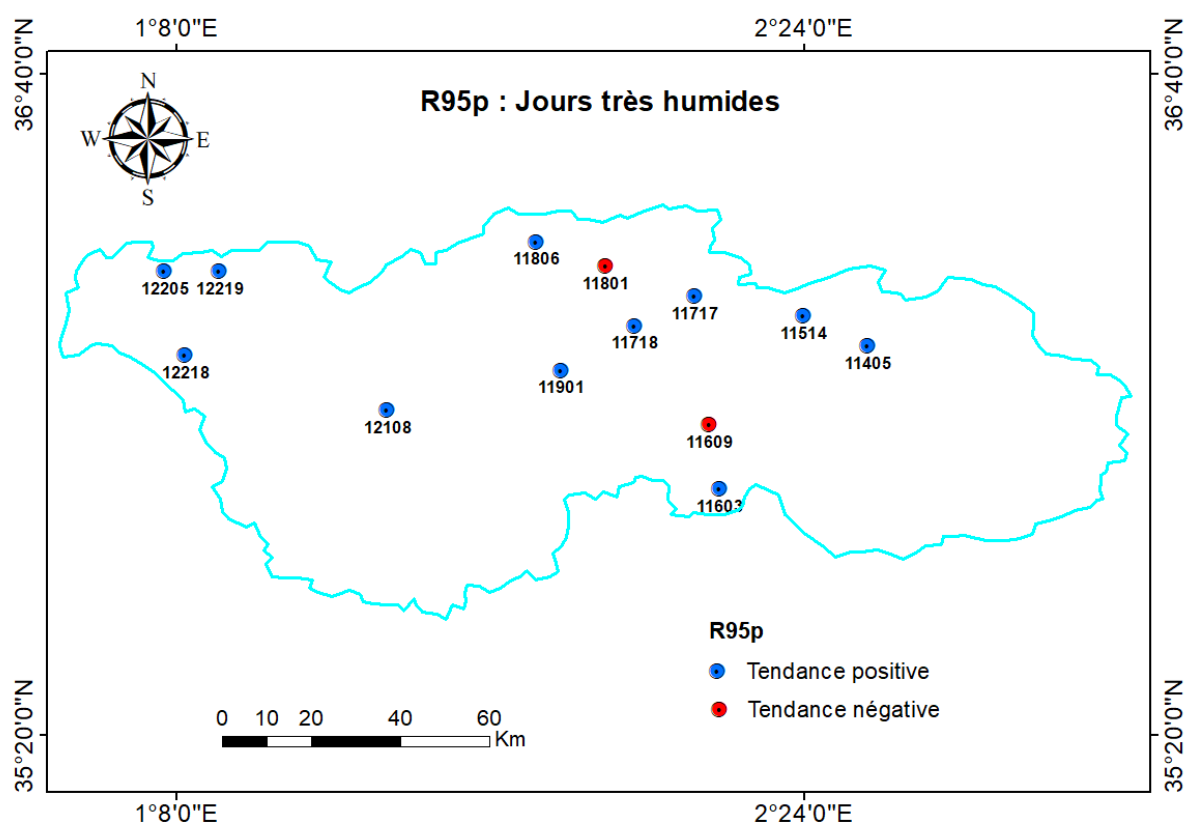


Figure 37 : Variabilité spatiale de l'indice R95p

3.10. R99p (Jours extrêmement humides) :

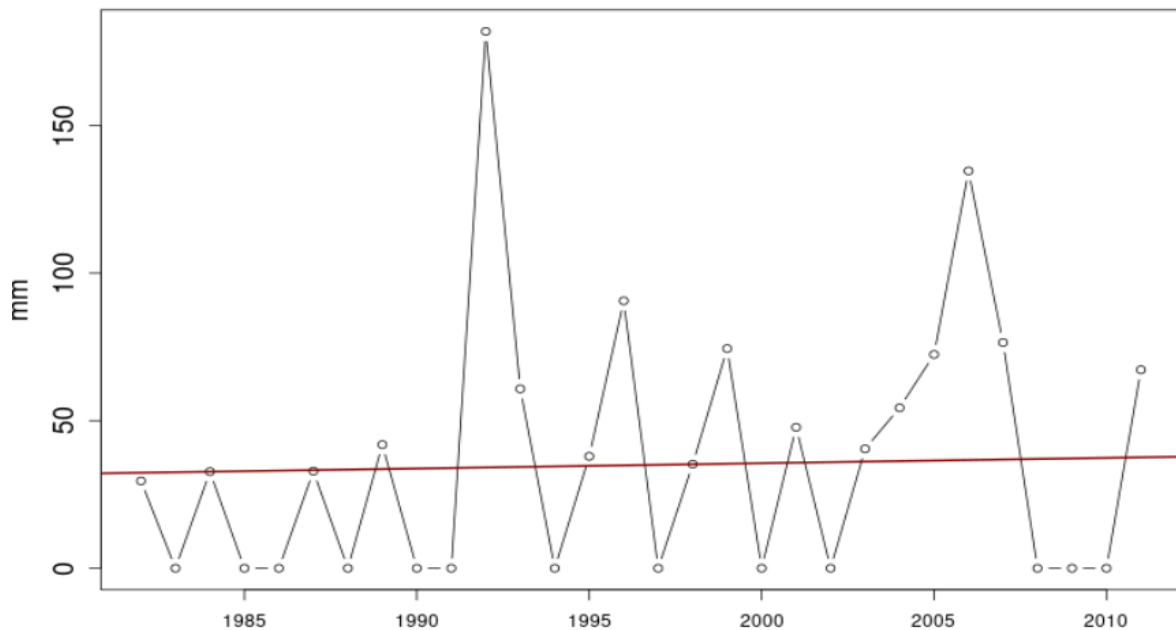
Toutes les stations montrent une tendance positive pour l'indice R99p, suggérant une augmentation des jours extrêmement humides. Cela indique que les événements de précipitations très intenses deviennent plus fréquents dans le bassin du haut et moyen Cheliff, ce qui peut avoir des impacts significatifs sur l'infrastructure, l'agriculture, et la gestion de l'eau.

Tableau 14 : Résultats de calcul de l'indice R99p

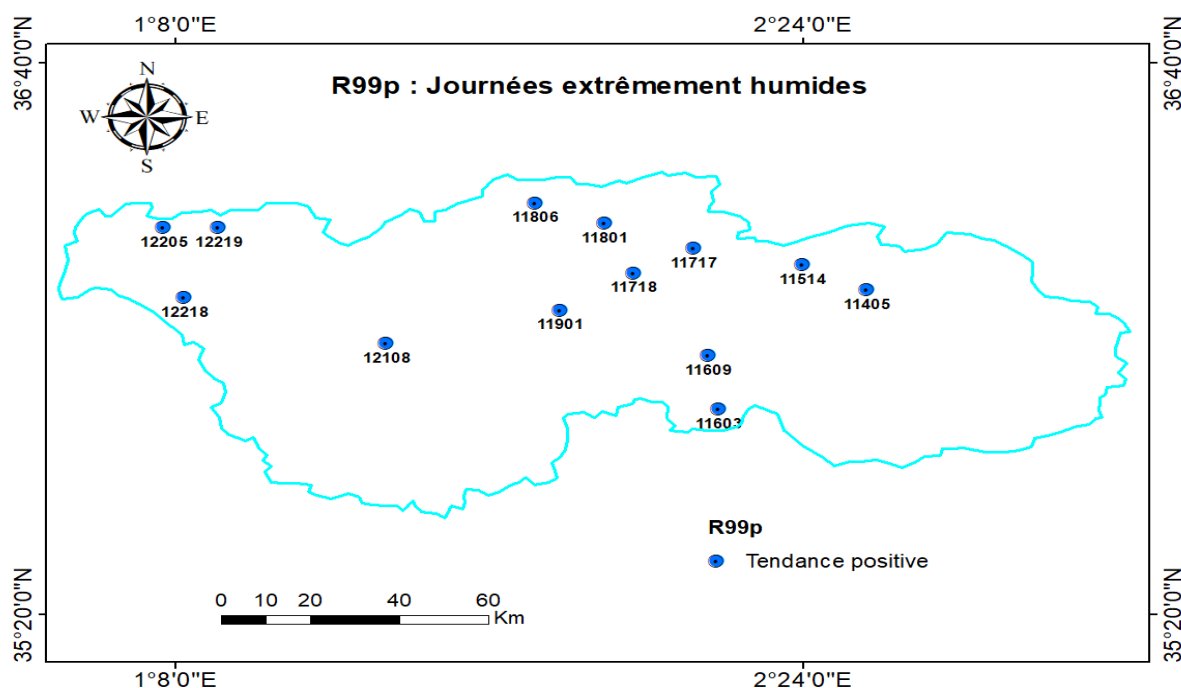
Indice	Nom de la station	Code de la station	Sen's slope	STD Slope	p-value
R99p Journées extrêmement humides	GHRIB BGE	11405	0.18	00	0.136
	DJENANE B-OUADAH	11514	-0.381	1.791	0.824
	BORDJ EL AMIR AEK	11603	1.481	0.819	0.082
	DEURDEUR BGE	11609	-0.810	0.910	0.382
	EL KHEMIS ANRH	11717	0.430	0.841	0.613
	HARREZA BGE	11718	-0.586	0.798	0.469
	ARIB EBDA	11801	-1.984	1.125	0.09
	ELANNEB	11806	-2.039	1.516	0.192
	EL TOUAIBIA	11901	1.441	1.010	0.163
	FODDA Barrage	12108	2.103	1.953	0.294
	BENAIRIA	12205	1.290	0.823	0.127
	DOMAINE SI-TAYEB	12218	0.431	0.841	0.613
	CHLEF A.N.R.H	12219	00	0.05	0.151

Station: 011405 [36.12°N, 2.53°E]

Index: r99p. Annual sum of daily precipitation > 99th percentile



Sen's slope = 0.18 lower bound = 0, upper bound = 2.462, p-value = 0.136

Figure 38 : Journées extrêmement humides R99pà la station GHRIB BGE**Figure 39 : Variabilité spatiale de l'indice R99p**

3. 11. PRCTOT (Précipitations annuelles totales par jour de pluie) :

L'indice PRCTOT montre une tendance positive dans toutes les stations, indiquant une augmentation des précipitations annuelles totales par jour de pluie. Cette tendance suggère une augmentation générale des précipitations dans la région, ce qui peut être bénéfique pour les ressources en eau, mais aussi poser des défis pour la gestion des excès d'eau et les risques d'inondation.

Tableau 15 : Résultats de calcul de l'indice PRCTOT

Indice	Nom de la station	Code de la station	Sen's slope	STD Slope	P-value
PRCTOT Précipitations annuelles totales par jour de pluie	GHRIB BGE	11405	4.111	-2.919	0.199
	DJENANE B-OUADAH	11514	3.467	2.184	0.121
	BORDJ EL AMIR AEK	11603	-1.777	3.375	0.605
	DEURDEUR BGE	11609	6.009	3.073	0.061
	EL KHEMIS ANRH	11717	1.021	2.384	0.671
	HARREZA BGE	11718	-1.291	3.123	0.682
	ARIB EBDA	11801	-2.232	4.026	0.585
	ELANNEB	11806	0.756	2.403	0.755
	EL TOUAIBIA	11901	4.418	5.002	0.388
	FODDA Barrage	12108	2.232	2.262	0.331
	BENAIRIA	12205	1.021	2.384	0.671
	DOMAINE SI-TAYEB	12218	4.581	2.786	0.086
	CHLEF A.N.R.H	12219	4.741	-0.658	0.087

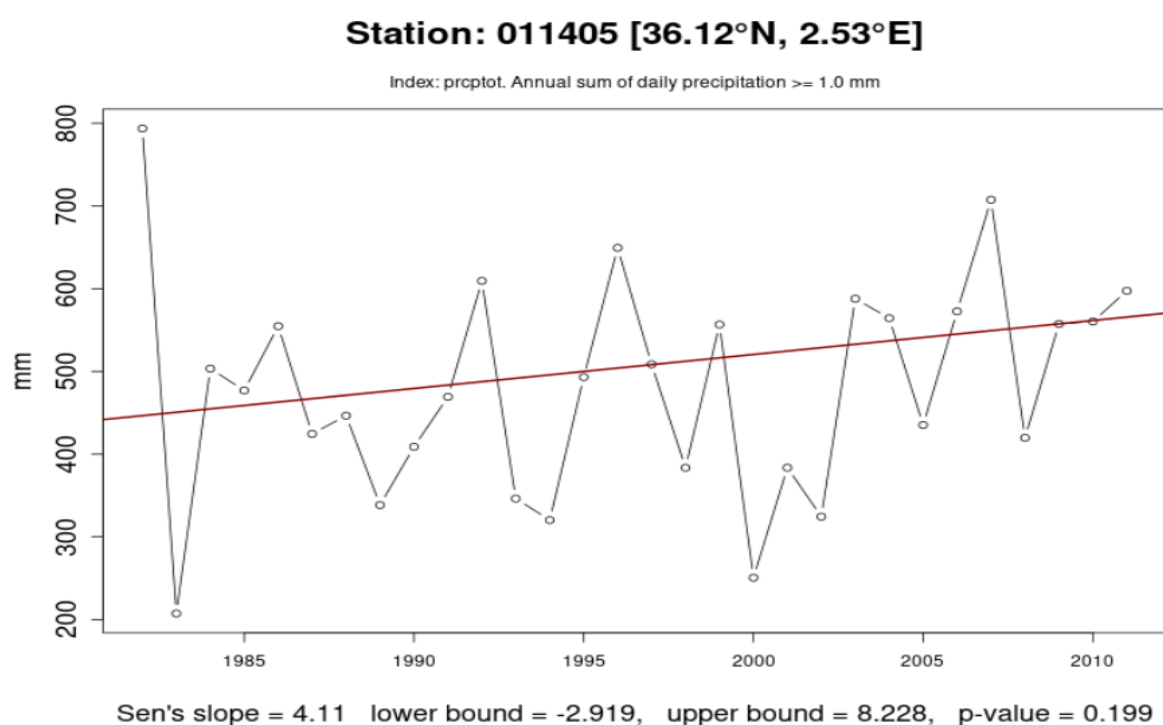


Figure40 : Précipitations annuelles totales par jour de pluie (PRCPTOT) à la station GHRIB BGE

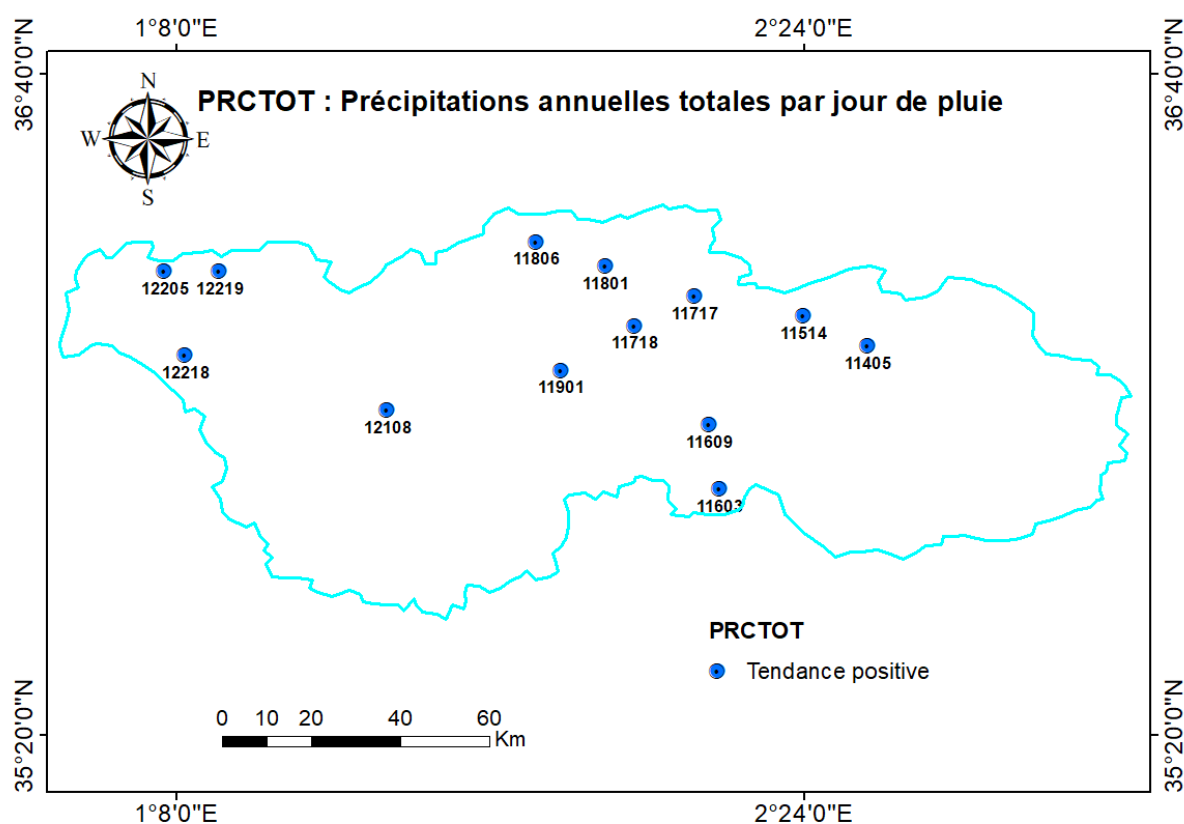


Figure 41 : Variabilité spatiale de l'indice PRCPTOT

Conclusion :

L'analyse des indices de pluie extrême dans le bassin du haut et moyen Cheliff montre des tendances à la hausse pour la majorité des indices de précipitation, indiquant une intensification et une augmentation des événements de précipitation extrême. Ces résultats sont essentiels pour la planification et la gestion des ressources en eau, l'agriculture, et la préparation aux risques climatiques dans la région. Les variations locales observées nécessitent une attention particulière pour adapter les stratégies de gestion en fonction des spécificités de chaque station.

CONCLUSION GENERALE

Cette mémoire de fin d'études de Master porte sur le bassin versant du haut et moyen Cheliff, en se concentrant sur l'impact du changement climatique sur cette région spécifique. Notre recherche aborde de manière approfondie les causes du changement climatique ainsi que ses conséquences, notamment en ce qui concerne les événements de précipitations extrêmes.

Nous avons réalisé une analyse détaillée des caractéristiques climatiques, géographiques et environnementales du bassin versant du haut et moyen Cheliff. En utilisant des données pluviométriques et des techniques d'analyse statistique, nous avons identifié des tendances significatives dans les précipitations journalières maximales. Les résultats révèlent une intensification et une augmentation des événements de précipitations extrêmes, ce qui a des implications directes pour la gestion des ressources en eau, l'agriculture et la préparation aux risques climatiques dans cette région.

Cette étude met en évidence l'importance d'une gestion adaptative des ressources en eau et des stratégies agricoles pour atténuer les risques associés au changement climatique. Les variations locales observées nécessitent une attention particulière pour adapter les stratégies de gestion en fonction des spécificités de chaque station. En comprenant mieux les particularités locales, il est possible de développer des réponses plus résilientes et efficaces face aux défis posés par les changements climatiques.

En conclusion, notre recherche souligne la nécessité d'une planification proactive et durable pour faire face aux impacts du changement climatique dans le bassin versant du haut et moyen Cheliff. Les résultats obtenus sont essentiels pour améliorer la préparation et la résilience de cette région face aux futures variations climatiques.

Références bibliographiques

- [1] Obassi G.O. (1994). WMO's Role in the International Decade for Natural Disaster Reduction. *Bulletin of American Meteorological Society*, 75-9.
- [2] Watson, R.T., Zinyowera, M.C. et Moss, R.H., (1997). The Regional Impacts of Climate Change : An Assessment of Vulnerability. - Intergovernmental panel in Climate Change (IPCC), Working Group II, Special Report, November 1997.
- [3] Paturel J.E., Boubacar I. et L'Aour A., (2004). Evolution de la pluviométrie annuelle en Afrique de l'Ouest et centrale au XXème siècle. *Sud Sciences and Technologies*. N°13, pp 40 – 46.
- [4] L'Hôte Y., Mahé G., Somé B. et Triboulet J.P., (2002). Analysis of a Sahelian annual rainfall index from 1896 to 2000 ; the drought continues. *Journal des sciences Hydrologiques*, 47(4), 563-572.
- [5] Assani A., (1999). Analyse de la variabilité temporelle des précipitations (1916-1996) à Lubumbashi (Congo-Kinshasa) en relation avec certains indicateurs de la circulation atmosphérique (oscillation australe) et océanique (El Niño/La Niña). *Sécheresse*, 10(4), pp 245- 252.
- [6] Kadi D., (1995). Contribution à l'étude de la sécheresse sur le littoral algérien par le biais de traitement des données pluviométriques et la simulation, Thèse de Magister, Ecole nationale polytechnique d'Alger.
- [7] Mahé G., L'Hôte Y., Olivry J., Wotling G., (2001). Trends and discontinuities in regional rainfall of west and central Africa. *J. Sci. Hydrol.*, vol. 46, n° 2, pp.211–226.
- [8] Bergaoui. M et al., (2001). Caractérisation de la sécheresse météorologique: cas du bassin versant de Siliana en Tunisie. *Rev. Sécheresse*. Vol. 12 n°4. p. 205-213.
- [9] Benzarti Z., Hbaieb H. (2001). Etude de la persistance de la sécheresse en Tunisie par utilisation des chaînes de Markov (1909-1996), *Sécheresse*, 4(12): 215-220.
- [10] Kingumbi A. (2006). Modélisation hydrologique d'un bassin versant affecté par des changements d'occupation. Cas du Merguellil en Tunisie centrale. Thèse de l'Ecole Nationale d'Ingenieurs de Tunis, Tunisie, 199p.
- [11] Mann HB (1945) Nonparametric tests against trend. *Econometrica* 13:245–259.
- [12] Kendall MG (1975) Rank correlation methods. 4th ed. London, UK. Charles Griffin. ISBN 0852641990 pp. 202.

Références bibliographiques

- [13] Sen PK (1968) Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau. J Am Stat Assoc 63:1379–1389.
- [14] Xuebin Zhang et Yang Feng, (2004). User Manual RClmDex (1.0).
- [15] Frich, P., Alexander, L. V., Della-Marta, P., Gleason, B., Haylock, M., Tank, A. M. G., & Peterson, T. (2002). Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Climate Research*, 19(3), 193–212.
- [16] Zhang, X. B., & Yang, F. (2004). Rclimdex (1.0) user manual. Downsview, Canada: Climate Research Branch. Environment Canada. Récupéré du site <http://acmad.net/rcc/procedure/RClmDexUserManual.pdf>