

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية
الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبو بكر بلقايد

تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



THESE

Présentée pour l'obtention du **grade de DOCTORAT 3^{ème} Cycle**

En : Hydraulique

Spécialité : Science de l'eau

Par : BESSAKLIA HANENE

Sujet

**CONTRIBUTION A L'ETUDE DE L'EVOLUTION DE LA PLUVIOMETRIE EN ALGERIE.
« CAS DE L'EXTREME EST ALGERIEN »**

Soutenue publiquement, le 27/06/2021, devant le jury composé de :

Mme Abdelbaki Cherifa	Maitre de conférences A	Univ. Tlemcen	Président
Mr Ghenim Abderrahmane Nekkache	Professeur	Univ. Tlemcen	Directeur de thèse
Mr Megnounif Abdesselam	Professeur	Univ. Tlemcen	Co-Directeur de thèse
Mr Bouanani Abderrezak	Professeur	Univ. Tlemcen	Examineur 1
Mr Boutaghane Hamouda	Maitre de conférences A	Univ. Annaba	Examineur 2

2020/202

Dédicace

*Je dédie ce modeste travail à un être que j'aime infiniment, qui m'a inspiré,
Qui a bien aimé me voir en ce jour cueillir le fruit de ses sacrifices,
Pe qui donne avec amour et tendresse et l'espoir.*

Ma mère

Source de ma propulsion vers la réussite...

Qui a été souvent d'un grand secours.

*Qu'elle trouve ici la marque de ma très vive gratitude et de ma profonde
reconnaissance, que Dieu lui accorde santé, bonheur et longue vie*

*A mon cher et tendre époux, amour de toute ma vie, Hamza ta présence à mes
côtés depuis le 1er jour de mon inscription*

*Ton dévouement et ton aide ont contribué de façon déterminante à mon succès,
Tu es la plus belle partie dans ma période de doctorat*

*A mon frère Adel et mon oncle Lazher qui m'ont encouragé tout le temps et
Mon petit frère Hakim*

A mes chères sœurs Sana et Radia

A ma tante Samira

A ma belle-mère Salima et ma belle-sœur Fatima

*A mon petit prince Foucef, tu es un véritable cadeau de dieu, la joie de ma vie,
mon rayon de soleil. Que Dieu te garde*

A toutes mes familles Bessaklia et Phikh

Remerciement

Avant toute autre chose, je tiens à exprimer ma profonde gratitude, à Dieu le tout puissant, qui m'a donné force, volonté, courage et patience pour mener à terme ce modeste travail.

Au terme de ce travail, j'adresse mes plus vifs remerciements et ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à sa réalisation.

En premier, je pense naturellement à mes deux directeurs de thèse, Mr GHENIM ABDERRAHMANE NEKKACHE d'avoir accepté de diriger ce travail avec enthousiasme et une disponibilité sans faille, malgré ses divers engagements surtout professionnels. J'apprécie son investissement et sa confiance qu'il m'a accordé tout au long du suivi de la réalisation de cette thèse. Il m'a toujours accueilli chaleureusement à son bureau au département d'hydraulique de l'université de Abou Bekr Belakid-Tlemcen, ses critiques, ses conseils et ses encouragements m'ont permis de mener à bien ce travail. Je remercie chaleureusement mon deuxième superviseur Mr MEGNOUNIF de m'avoir encadré comme 2eme directeur de thèse.

Mes sincères remerciements s'adressent aux membres de jury qui ont bien voulu accepter de lire et juger ce travail.

Je tiens à exprimer ma vive gratitude à Mr JAVIER MARTIN-VIDE de m'avoir réservé le meilleur accueil au sein du laboratoire de la Climatologie de l'université de Barcelone, Espagne et sa contribution dans mon travail de recherche.

Un merci tout particulier à Mr AZIZ BENHAMROUCHE membre dans le groupe de climatologie de Barcelone, et Chef de Filière Géographie et Aménagement du Territoire de l'Université Ferhat Abbas, Setif 1, Algérie, par son aide à l'étranger et de répondre à toutes mes questions et mes soucis.

La grande majorité de ma thèse s'est déroulé au laboratoire du groupe climat, eau, changement planétaire et systèmes naturels de l'université de Saragosse. Je remercie d'abord tous les membres du groupe pour leurs accueils chaleureux, spécialement ROBERTO SERRANO-NOTIVOLLI qui a généreusement partagé ses connaissances et ses expériences au profit de mes recherches. Il m'a fourni de nombreux commentaires et suggestions importants, notamment liés à la reconstitution des précipitations et événements extrêmes. Je

tiens également à le remercier pour sa patience, et de m'avoir accordé de son temps et pour son aide inestimable.

*Je remercie enfin mon collègue, mon ami, et mon mari, ~~SCAMZA~~
ABDESSAMAD CHIKH pour son soutien et son assistance pendant toute la
période de doctorat.*

*Je n'oublie pas de remercier mon superviseur de Master Mr ~~SCAMOUDA~~ BOUTAGHANE,
de l'Université de Badji Mokhtar d'Annaba pour sa motivation et encouragement, Il est
toujours disponible pour m'aider tout le temps.*

Liste des matières

<i>Dédicace</i>	<i>i</i>
<i>Remerciement</i>	<i>ii</i>
<i>Liste des matières</i>	<i>iv</i>
<i>Liste des tableaux</i>	<i>vii</i>
<i>Liste des figures</i>	<i>viii</i>
<i>Liste des abréviations</i>	<i>x</i>
<i>Notations</i>	<i>xi</i>
<i>Résumé</i>	<i>xiii</i>
<i>Summary</i>	<i>xv</i>
<i>ملخص</i>	<i>xvii</i>
<i>Introduction général</i>	<i>1</i>
<i>Objectif de la thèse</i>	<i>3</i>
<i>Structure de la thèse</i>	<i>4</i>
<i>Partie 1</i>	<i>5</i>
1 RECHERCHES BIBLIOGRAPHIQUES	6
1.1 Irrégularité et l'agressivité des précipitations	6
1.1.1 Travaux antérieurs sur la concentration et l'agressivité des précipitations	7
1.2 Changement dans les événements extrêmes	9
1.2.1 Précipitations extrêmes à l'échelle globale	11
1.2.2 Les précipitations extrêmes en Algérie (inondation/sécheresse)	12
1.2.2.1 Inondations	12
1.2.2.2 Sécheresses	14
1.3 Indices des précipitations extrêmes	14
1.4 Reconstruction des précipitations journalières manquantes	15
1.5 Le quadrillage(le maillage)	16
1.5.1 Travaux antérieurs sur les indices des précipitations extrêmes maillé à haute résolution	17
2 REGION D'ETUDE ET DONNEES UTILISEES	19
2.1 Description de la région d'étude	19
2.1.1 Bassin versant de la Seybouse	20
2.1.2 Côtiers Constantinois-est	21
2.1.3 Côtiers constantinois-centre	22
2.2 Les données utilisées	23
2.3 Conclusion	25
3 RECONSTRUCTION ET QUADRILLAGE DES PRECIPITATIONS JOURNALIÈRES	26
3.1 Introduction	26

3.2	Le processus de contrôle de la qualité	27
3.2.1	Calcul les valeurs de référence RV	27
3.2.2	Test de contrôle de la qualité	28
3.3	Reconstruction des précipitations journalières manquantes	29
3.4	Création du maillage	30
3.5	Validation	30
3.5.1	Validation du contrôle de la qualité	31
3.5.2	Validations de la méthode de reconstruction	33
3.5.2.1	Prévision jours secs/humides	33
3.5.2.2	Estimation de l'amplitude	34
3.6	Conclusion	36
4	INDICES DES PRECIPITATIONS UTILISEES	38
4.1	La concentration des précipitations journalières (CI)	38
4.2	La concentration des précipitations mensuelles (PCI)	43
4.3	L'agressivité des précipitations (MFI)	44
4.4	Précipitations extrêmes journalières	44
4.5	Le test de Mann-Kendall	48
4.6	Conclusion	50
Partie 2		51
5	VARIABILITE SPATIO-TEMPORELLE DES PRECIPITATIONS ANNUELLES ET SAISONNIERES DANS LE NORD-ESTALGERIEN (1970-2010)	52
5.1	Introduction	52
5.2	Précipitations annuelles	52
5.2.1	Variabilité spatiale des précipitations annuelles	52
5.2.2	Evolution temporelle et tendances spatiales des précipitations annuelles	53
5.3	Précipitations saisonnières	55
5.3.1	Variabilité spatiale des précipitations saisonnières	55
5.3.2	Evolution temporelle et tendance spatiale des précipitations saisonnières	59
5.4	Conclusion	65
6	VARIABILITE ET TENDANCES SPATIALE DE LA CONCENTRATION ET L'AGRESSIVITE DES PRECIPITATIONS	67
6.1	La concentration des précipitations journalière CI	67
6.1.1	Variabilité spatiale de CI	67
6.1.2	Tendance des concentrations des précipitations journalières CI	70
6.2	La concentration des précipitations mensuelles PCI	71
6.2.1	Variabilité spatiale des PCI	71
6.2.2	Tendance de la concentration des précipitations mensuelles PCI	72
6.3	L'agressivité des précipitations (MFI)	73
6.3.1	Variabilité spatiale des MFI	73

6.3.2	Tendance de l'agressivité des précipitations (MFI)	74
6.4	Corrélation entre les indices (CI, PCI, MFI) et les précipitations annuelles	75
6.5	Conclusion	77
7	<i>EVALUATIONS DES PRECIPITATIONS EXTREMES JOURNALIERES</i>	79
7.1	Précipitations annuelles totales par jour pluvieux (PRCPTOT)	79
7.2	Intensité journalière des précipitations (SDII)	80
7.3	Précipitations maximales sur une journée (RX1)	82
7.4	Précipitations maximales mensuelles sur cinq jours consécutifs (RX5)	83
7.5	Nombre annuel de jours pluvieux supérieurs à 10 mm (R10mm)	84
7.6	Nombre annuel de jours de précipitations supérieures à 20 mm (R20mm)	85
7.7	Durée maximale de la période sèche (CDD)	86
7.8	Durée maximale de la période humide (CWD)	87
7.9	Jours très humides et extrêmement humides (R95p R99p)	87
7.10	Conclusion	89
8	<i>EVOLUTION TEMPORELLE ET TENDANCE DES PRECIPITATIONS EXTREMES</i>	91
8.1	Précipitations annuelles PRCPTOT durant la période 1970-2010	91
8.2	Intensité journalière des précipitations (SDII)	92
8.3	Précipitations maximales annuelles en une journée (RX1)	94
8.4	Précipitations maximales annuelles sur cinq jours (RX5)	95
8.5	Nombre annuel de jours de précipitations supérieures à 10 mm (R10mm)	97
8.6	Nombre annuel de jours de précipitations supérieures à 20 mm (R20mm)	98
8.7	Durée maximale des jours secs consécutifs (CDD)	100
8.8	Maximum de jours humides (CWD)	101
8.9	Les précipitations maximales supérieures à 95 ^e centiles (R95p)	103
8.10	Les précipitations maximales supérieures au 99 ^e centile (R99p)	104
8.11	Conclusion	106
	<i>Conclusions générale</i>	108
	<i>Contributions de la thèse et perspectives</i>	114
	<i>Références bibliographiques</i>	116

Liste des tableaux

<i>Tableau 2.1 Coordonnées géographiques des stations pluviométriques</i>	<i>24</i>
<i>Tableau 3.1 Pourcentage des jours secs et humides observés et prévus.....</i>	<i>33</i>
<i>Tableau 3.2 Tableau de contingence avec le pourcentage de zéros vrai et faux des jours positifs.....</i>	<i>33</i>
<i>Tableau 3.3 Les statistiques de validation croisée (LOO-CV) séparées par des agrégats mensuels,...</i>	<i>35</i>
<i>Tableau 3.4 Les statistiques de validation croisée (LOO-CV) séparées par les altitudes (m),.....</i>	<i>36</i>
<i>Tableau 4.1 Distribution des fréquences dans les classes de 1 mm, fréquences cumulées relatives ,...</i>	<i>39</i>
<i>Tableau 4.2 indices des précipitations extrêmes calculés sur un ensemble de données quadrillées</i>	<i>45</i>
<i>Tableau 6.1 Valeurs des constantes a et b, CI, PCI et MFI, le pourcentage de précipitations.....</i>	<i>68</i>

Liste des figures

Figure 1.1. Représentation schématique montrant du changement sur les extrêmes de la température.....	10
Figure 1.2 Distribution des probabilités de précipitations, source : (Zhang et al., 2011) _____	11
Figure 2.1 Situation géographique de la région d'étude et les stations pluviométriques _____	19
Figure 2.2 Carte hydrographique du bassin versant de la Seybouse (ABH, 2000) _____	21
Figure 2.3 Carte hydrographique du bassin versant de côtiers constantinois-est (ABH, 2000) _____	22
Figure 2.4 Carte hydrographique de bassin versant du côtiers constantinois-centre (ABH, 1999) _____	23
Figure 3.1 Processus de contrôle de qualité. _____	29
Figure 3.2 Suppression des données par critères _____	32
Figure 3.3. Diagramme de dispersion par des coefficients de corrélation de Pearson entre les observations et les estimations des précipitations journalières.....	34
Figure 4.1 Courbe de concentration normalisée de la station de Nechmaya _____	42
Figure 5.1 Précipitations annuelles moyennes dans le NORD-EST algérien (1970-2010) _____	53
Figure 5.2 Evolution temporelle des précipitations annuelles moyennes _____	54
Figure 5.3 Tendances des précipitations moyennes annuelles dans le NORD-EST algérien (1970-2010) _____	55
Figure 5.4 Répartition en % des précipitations saisonnières et mensuelles.....	56
Figure 5.5 Distribution spatiale des précipitations d'hiver _____	57
Figure 5.6 Distribution spatiale des précipitations d'automne _____	57
Figure 5.7 Distribution spatiale des précipitations de printemps _____	58
Figure 5.8 Distribution spatiale des précipitations d'été _____	59
Figure 5.9 Évolution temporelle des précipitations saisonnières _____	60
Figure 5.10 Tendances spatiales des précipitations d'automne _____	62
Figure 5.11 Tendances spatiales des précipitations d'hiver _____	63
Figure 5.12 Tendances spatiales des précipitations de printemps _____	64
Figure 5.13 Tendances spatiales des précipitations d'été _____	65
Figure 6.1 Distribution spatiale de CI dans le NORD-EST algérien (1970-2010) _____	70
Figure 6.2 Distribution spatiale de la tendance de CI dans le NORD-EST algérien _____	71
Figure 6.3 Répartition spatiale du PCI dans le NORD-EST algérien _____	72
Figure 6.4 Répartition de la tendance des PCI dans le NORD-EST algérien _____	73
Figure 6.5 Répartition spatiale du MFI dans le NORD-EST algérien _____	74
Figure 6.6 Répartition spatiale de la tendance du MFI dans le NORD-EST algérien _____	75
Figure 6.7 Corrélation entre l'indice CI et les précipitations moyennes annuelles P _____	76
Figure 6.8 Corrélation entre l'indice PCI et les précipitations moyennes annuelles P _____	77
Figure 6.9 Corrélation entre l'indice MFI et les précipitations moyennes annuelles _____	77
Figure 7.1 Précipitations annuelles totales par jour pluvieux (PRCPTOT) _____	80

Figure 7.2	Intensité des précipitations journalières moyennes (SDII)	81
Figure 7.3	Moyenne des précipitations maximales en un jour (RX1)	82
Figure 7.4	Moyenne des précipitations maximales sur 5 jours consécutifs (RX5)	83
Figure 7.5	Nombre moyen de jours de précipitations supérieures à 10 mm (R10mm)	84
Figure 7.6	Nombre moyen de jours de précipitations supérieures à 20 mm (R20mm)	85
Figure 7.7	Moyenne du nombre maximal des jours secs consécutifs (CDD)	86
Figure 7.8	Moyenne du nombre maximal des jours pluvieux consécutifs (CWD)	87
Figure 7.9	Précipitations supérieures au 95 ^e centile (R95p)	88
Figure 7.10	Précipitations totales supérieures au 99 ^e centile R99p	89
Figure 8.1	Évolution temporelle des PRCPTOT dans le NORD-EST algérien	91
Figure 8.2	La tendance des PRCPTOT sur le NORD-EST algérien (1970-2010)	92
Figure 8.3	Évolution temporelle de SDII dans le NORD-EST algérien	93
Figure 8.4	Tendance de SDII sur le NORD-EST algérien (1970-2010)	93
Figure 8.5	Évolution temporelle des RX1 dans le NORD-EST algérien	94
Figure 8.6	Tendance des précipitations annuelles maximales sur une journée (Rx1)	95
Figure 8.7	Évolution des RX5 dans le NORD-EST algérien (1970-2010)	96
Figure 8.8	Tendance des précipitations annuelles maximales sur cinq jours (RX5)	96
Figure 8.9	Évolution des RX5 dans le NORD-EST algérien (1970-2010)	97
Figure 8.10	Tendance du nombre annuel de jours des précipitations >10 mm (R10mm)	98
Figure 8.11	Évolution des R20 mm dans le NORD-EST algérien (1970-2010)	99
Figure 8.12	Tendance du nombre annuel de jours de précipitations > 20 mm (R20mm)	99
Figure 8.13	Évolution de CDD dans le NORD-EST algérien (1970-2010)	100
Figure 8.14	Tendance du nombre maximal des jours secs consécutifs (CDD)	101
Figure 8.15	Evolution temporelle de CWD dans le NORD-EST algérien (1970-2010)	102
Figure 8.16	Tendance du nombre maximal des jours pluvieux consécutifs (CWD)	102
Figure 8.17	Evolution temporelle de R95p dans le NORD-EST algérien (1970-2010)	103
Figure 8.18	Tendance des précipitations supérieures au 95 ^e centile (R95p)	104
Figure 8.19	Evolution temporelle de R99p dans le NORD-EST algérien (1970-2010)	105
Figure 8.20	Tendance des précipitations supérieures au 99 ^e centile (R99p)	105

Liste des abréviations

ANRH : L'Agence nationale des ressources hydriques

CLIVAR: Climate Variability and Predictability project

ECAD: European Climate Assessment and Dataset project

ETCCDI: Expert Team on Climate Change Detection indices

GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change

OMM : L'Organisation Météorologique Mondiale

ONM : L'Office National de la Météorologie

ORSEC : Organisation de la Réponse de Sécurité Civile

PMRC : Programme Mondial de Recherche sur le Climat

WGS: World Geodetic System

Notations

ALT: Altitude

BP : La prédiction binomiale

C° : La température

CDD : Indice des jours secs consécutifs

CI : Indice de Concentration journalière

CWD : Indice des jours pluvieux consécutifs

DA : Dinar algérien

GLM : Les Modèles Linéaires Généralisés

H_0 : Hypothèse

Hm^3 : hectomètre cube

Km : Kilomètre

km^2 : kilomètre carré

LAT : Latitude

LON : Longitude

LOO-CV : Les statistiques de validation croisée

m : mètre

MAE : Erreur Moyenne Absolue

ME : Erreur Moyenne

MFI : Indice de Fournier Modifié

MK : Le test de Mann-Kendall

MP : Prédiction de Magnitude des précipitations

n : Nombre de cas

N_i : Nombre de jours des précipitations enregistrées dans chaque classe

o : La valeur observée

Obs : Observés

P : La valeur prédite

p : Précipitation

PCI : Indice de Précipitations mensuelles

Pi : Total des précipitations pour chaque classe

PRCPTOT : Indices des Précipitations annuelles Totales des jours pluvieux

Pred : Prévus

QC : Contrôle de la Qualité

R10mm : Indice des nombre de jours pluvieux > 10 mm

R² : Le coefficient de détermination

R20mm : Indice de nombre des jours pluvieux > 20 mm

R95p : Indice des précipitations maximale > 95^e centile

R99p : Indice des précipitations maximale > 99^e centile.

RM : Rapport des Moyennes

RR : Précipitations journalière

RSD : Rapport des écarts-types

RV : Valeur de Référence

RX1day : Indice des précipitations mensuelles maximales sur 1 jour

RX5day : Indice des précipitations mensuelles maximales sur 5 jours

SDII : Indice d'intensité simple des pluies

Z : La statistique normalisée

σ_o : L'écart-type des observations

σ_p : L'écart-type des prédictions

\bar{o} : La moyenne des observations

\bar{p} : La moyenne des estimations

β_{ni} : Les coefficients de régression

ε_t : L'erreur associée à l'estimation de la magnitude des précipitations

Résumé

Les questions de la variabilité et le changement des précipitations préoccupent les scientifiques et les décideurs politiques depuis long temps en raison de leurs conséquences immédiates et durables sur l'environnement. A cet effet, nous avons essayé de comprendre la variabilité spatio-temporelle des précipitations à l'échelle annuelles, saisonnières et journalières en utilisant un ensemble des indicateurs pluviométriques élaborés en mettant l'accent sur la résolution journalière des précipitations qui explique également la distribution des précipitations extrême, réparties sur 33 stations pluviométriques, et couvrant les trois bassins versants situés dans le NORD-EST algérien (bassins de la Seybouse, du côtiers constantinois-est et centre). Cette recherche est principalement axée sur la période 1970-2010 soit 41 ans.

L'irrégularité et l'agressivité des précipitations sont évaluées par les indices de la concentration des précipitations journalières (CI), mensuelles (PCI) et de l'indice de Fournier modifié (MFI).

Nous avons également utilisé un ensemble des indices des précipitations extrêmes basé sur des données journalières maillées avec une résolution spatiale de 1x1 km, qui nous fournissent une information diversifiée concernant la caractérisation actuelle de l'ampleur (PRCPTOT), intensité des précipitations (SDII), des fréquences (R10mm, R20mm), la longueur des séquences sèches (CDD), et humides (CWD) et l'occurrence des précipitations extrêmes (Rx1, Rx5, R95p, R99p).

La possibilité de détection du changement dans la hausse ou à la baisse de ces indicateurs est vérifiée par le test Mann-Kendall qui est recommandé par l'Organisation météorologique mondiale (ONM).

Pour cela, nous avons en premier temps appliqué le processus de la reconstruction des données manquantes et le maillage basé sur l'approche de création de valeurs de références (RV) en utilisant les modèles linéaires généralisés (GLM), en se basant sur les informations disponibles des précipitations dans les 10 stations voisines les plus proches comme variable dépendante pour chaque jour et chaque lieu, et les informations géographiques de chaque station (latitude, longitude et altitude) comme

variables indépendantes, qui nous permettent de faire un contrôle complet de la qualité des données d'origine tout en signalant et en supprimant les valeurs suspectes qui ne correspondent pas à la distribution naturelle des précipitations journalière, ensuite de remplir les valeurs manquantes dans chaque série de l'ensemble de données précédemment nettoyé. En fin, création d'un ensemble de donnée quadrillée de 1*1km avec une résolution journalière dans les nouveaux emplacements en fonction de leur latitude, longitude et altitude. Nous avons utilisé la phase finale du maillage dans l'évaluation des précipitations extrêmes et leurs tendances en raison d'un certain nombre d'avantages par rapport aux ensembles de données d'observation irrégulières.

Les résultats montrent que la concentration des précipitations journalières est sensiblement plus élevée dans les endroits où la quantité de précipitations totales est faible et ces zones de forte concentration de précipitation ont tendance à augmenter.

La saisonnalité et l'agressivité des précipitations sont élevées dans les parties EST et OUEST de la région d'étude, alors qu'une distribution moyennement saisonnière avec une faible agressivité se retrouve au SUD de la zone d'étude.

Au vu des résultats obtenus des précipitations extrêmes journalières, un gradient général croissant des indices de précipitations extrêmes du SUD vers le NORD est noté, en particulier sur le littoral et dans les régions de haute altitude. Elles sont devenues plus extrêmes en termes d'intensité et de fréquence dans une proportion du NORD-EST de l'Algérie au cours de la période d'étude, avec des tendances cohérentes vers des conditions plus humides pour tous les indices sauf l'indice des nombres des jours secs consécutifs (CDD), bien qu'elles ne soient pas statistiquement significatives dans toute la région d'étude.

Summary

The issues of variability and change in precipitation have long been of concern to scientists and policy makers because of their immediate and lasting consequences on the environment. To this end, we tried to understand the spatial and temporal variability of precipitation on an annual, seasonal and daily scale using a set of rainfall indicators developed with the emphasis on the daily resolution of precipitation which explains also the distribution of extreme precipitation, distributed over 33 rainfall stations, and covering the three watersheds located in the NORTH -EAST Algerian (Seybouse basins, Constantine's-EAST and CENTER Coastal basins). This research is mainly focused on the period 1970-2010, i.e. 41 years.

The irregularity and the aggressiveness of the precipitation are evaluated by the indices of the concentration of daily (CI), monthly (PCI) and the Fournier's modified index (MFI).

We also used a set of extreme precipitation indices based on daily gridded data with a spatial resolution of 1x1 km, which provides us with diverse information regarding the current characterization of magnitude (PRCPTOT), precipitation intensity (SDII), frequencies (R10mm, R20mm), the length of dry (CDD), and wet (CWD) sequences and the occurrence of extreme precipitation (Rx1, Rx5, R95p, R99p).

The possibility of detecting the change in the rise or fall of these indicators is verified by the Mann-Kendall test which is recommended by the World Meteorological Organization (ONM).

For this, we first applied the process of reconstruction the missing data and gridded based on the approach of creating reference values (RV) using generalized linear models (GLM), based on the information available precipitation in the 10 nearest neighboring stations as dependent variable for each day and place, and the geographical information of each station (latitude, longitude and altitude) as independent variables, which allow us to do a complete quality control original data while flagging and removing suspicious values that do not match the natural distribution of daily precipitation, then filling in missing values in each series of the previously cleaned data set. Finally, creation of a 1 * 1km grid data set with daily

resolution in the new locations according to their latitude, longitude and altitude. We used the final phase of grid in the assessment of extreme precipitation and their trends due to a number of advantages over irregular observational datasets.

The results show that the daily concentration precipitation is higher in places where the amount of total precipitation is low, and these areas of high concentration of precipitation tend to increase.

The seasonality and aggressiveness of precipitation are high in the EAST and WEST parts of the study region, while a moderately seasonal distribution with low aggressiveness is found in the SOUTH of the study area.

In view of the results obtained from the daily extreme precipitation, an increasing general gradient of the extreme precipitation indices from SOUTH to the NORTH is noted, in particular on the coast and in high altitude regions. They became more extreme in intensity and frequency in a proportion of NORTHEAST Algeria during the study period, with consistent trends towards wetter conditions for all indices except CDD, although that they are not statistically significant throughout the study region.

ملخص

لطالما كانت قضايا التباين والتغير في هطول الأمطار مصدر قلق للعلماء وصانعي السياسات بسبب عواقبها الفورية والدائمة على البيئة. تحقيقاً لهذه الغاية ، حاولنا فهم التباين المكاني والزمني لهطول الأمطار على نطاق سنوي وموسمي ويومي باستخدام مجموعة من مؤشرات هطول الأمطار التي تم تطويرها مع التركيز على الدقة اليومية لهطول الأمطار والتي تفسر أيضاً توزيع هطول الأمطار الشديد ، الموزعة على 33 محطة هطول الأمطار ، وتغطي مستجمعات المياه الثلاثة الواقعة في شمال شرق الجزائر (أحواض سييوس , ساحل شرق قسنطينة ووسطها). يركز هذا البحث بشكل أساسي على الفترة 1970-2010 ، أي 41 عام

يتم تقييم عدم انتظام وشدة هطول الأمطار من خلال مؤشرات تركيز هطول الأمطار اليومية والشهرية ومؤشر فورنييه المعدل.

استخدمنا أيضاً مجموعة من مؤشرات هطول الأمطار الشديدة بناءً على البيانات الشبكية اليومية بدقة مكانية تبلغ 1×1 كم، والتي توفر لنا معلومات متنوعة بشأن التوصيف الحالي للحجم وشدة هطول الأمطار، والترددات، طول التتابعات الجافة والرطوبة وحدوث الترسيب الشديد يتم التحقق من إمكانية الكشف عن التغيير في ارتفاع أو انخفاض هذه المؤشرات من خلال اختبار مان - كاندال الذي أوصت به المنظمة العالمية للأرصاد الجوية

لهذا، قمنا أولاً بتطبيق عملية إعادة بناء البيانات المفقودة والتشابك بناءً على نهج إنشاء القيم المرجعية باستخدام النماذج الخطية المعممة، بناءً على معلومات هطول الأمطار المتاحة في أقرب 10 محطات مجاورة كمتغير تابع لكل يوم وكل مكان ، والمعلومات الجغرافية لكل محطة (خطوط الطول والعرض والارتفاع) كمتغيرات مستقلة ، مما يسمح لنا بالقيام برقابة كاملة على البيانات الأصلية أثناء وضع علامة على القيم المشبوهة التي لا تتطابق مع الطبيعي وإزالتها توزيع الترسيب اليومي ، ثم ملء القيم المفقودة في كل سلسلة من مجموعة البيانات التي تم تنظيفها مسبقاً. أخيراً ، إنشاء مجموعة بيانات شبكة $1 * 1$ كم بدقة يومية في المواقع الجديدة وفقاً لخطوط العرض و الطول والارتفاع. استخدمنا المرحلة الأخيرة من الشبكة في تقييم هطول الأمطار الشديدة واتجاهاتها بسبب عدد من المزايا على مجموعات بيانات المراقبة غير المنتظمة.

تظهر النتائج أن قيم التركيز أعلى بشكل ملحوظ في الأماكن التي تكون فيها كمية هطول الأمطار الإجمالية منخفضة، وتميل مناطق التركيز العالي لهطول الأمطار إلى الزيادة الموسمية وشدة هطول الأمطار مرتفعة في الأجزاء الشرقية والغربية من منطقة الدراسة، بينما تم العثور على توزيع موسمي معتدل مع عدوانية منخفضة في جنوب منطقة الدراسة. في ضوء النتائج التي تم الحصول عليها من هطول الأمطار اليومي المتطرف ، لوحظ تزايد التدرج العام لمؤشرات هطول الأمطار المتطرفة من الجنوب إلى الشمال ، ولا سيما على الساحل وفي مناطق الارتفاعات العالية. لقد أصبحوا أكثر شدة وتكراراً في نسبة من شمال شرق الجزائر خلال فترة الدراسة ، مع اتجاهات ثابتة نحو الظروف الأكثر رطوبة لجميع المؤشرات باستثناء مؤشر الجفاف، على الرغم من أنها ليست ذات دلالة إحصائية في جميع أنحاء منطقة الدراسة.

Introduction général

Le changement climatique est un phénomène qui modifie les systèmes naturels de toutes les régions du monde, mais l'altération des extrêmes climatiques peut avoir des conséquences plus graves et plus inattendues sur les systèmes hydrologiques, naturels, et sur la société humaine. Le quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a conclu que le changement climatique avait commencé à avoir une incidence sur la fréquence, l'intensité et la durée d'événements extrêmes tels que les températures extrêmes, les précipitations extrêmes, la sécheresse, etc (IPCC, 2007). Le deuxième rapport d'expert intergouvernemental mentionne 90% de chances de fréquence accrue de fortes précipitations au 21ème siècle et une augmentation potentielle de l'écoulement des eaux pluviales sous les latitudes plus élevées de 10 à 40%, (Rosenberg et al., 2010), notamment en Amérique du NORD, en Eurasie et en Argentine. Alors que la diminution des précipitations dans les régions subtropicales et tropicales, sont particulièrement évidentes en Méditerranée, en Asie du SUD et dans toute l'Afrique (Trenberth, 2011).

L'Algérie, qui fait partie du point chaud de la Méditerranée et l'un des pays du NORD Africain, se situe sous un climat de transition de la zone tempérée chaud et la zone aride (Kottek et al., 2006). Cette position la met sous l'influence directe du climat méditerranéen au NORD et du climat désertique au SUD. Elle a une irrégularité spatio-temporels des précipitations à cause de la grande variabilité des précipitations à différentes échelles temporels qui la caractérisent et rendent très compliqué sa prédiction à moyen et long terme. Le 5e rapport du GIEC a été notée une augmentation au réchauffement de 1 à 1,25 °C de 1901 à 2010 en Algérie (Stocker et al., 2013), et les impacts attendus de la crise climatique en Algérie à l'horizon 2030 sont une augmentation de température comprise entre 0,75 et 1,5 °C, une réduction de 7 à 16% des précipitations, et une augmentation de la fréquence des événements extrêmes (épisodes secs / humides) d'environ 10 % (PNUD, 2015). (Zeroual et al., 2019) ont constaté que le taux d'expansion du climat désertique augmentera à l'avenir (XXIe

siècle), en particulier au cours de la période 2045-2098. La région est actuellement soumise à des sécheresses de plus en plus graves (Meddi and Hubert, 2003); (Bekkoussa et al., 2008); (Meddi et al., 2009). Par conséquent, il subit d'une part la dégradation progressive de ses ressources en eau et, d'autre part, des niveaux d'eau extrêmement élevés qui provoquent des inondations catastrophiques et dans les pires des cas des meurtriers (Hamadache et al., 2002); (Djellouli and Saci, 2003); (Menad et al., 2012).

Malheureusement, bien que les données des stations (point d'échantillon) constituent la source principale des études diagnostiques sur la variabilité et le changement climatiques, ces observations sont généralement présentent des données manquantes et souvent biaisées et réparties de manière hétérogène dans l'espace et dans le temps. Ils sont un réel problème pour de nombreuses applications scientifiques qui nécessitent des séries continues et complètes. Par conséquent, la valeur de l'étude climatique des précipitations extrêmes dépend de la qualité de données utilisées.

la compréhension de ces caractéristiques spatio-temporelles des précipitations et leurs changements est importante dans la future pour la gestion des ressources en eau et l'évaluation des impacts régionaux de ces changement, et pour faire face aux changement des précipitations extrêmes qui affectent chaque région du globe chaque année, causant des dommages à l'économie et à l'environnement et dans le pire des cas des pertes en vies humaines. Devant ces risques inhérents, la communauté scientifique est interpellée à une meilleure compréhension et évaluation de l'impact de ces changements notamment sur la disponibilité et la qualité de la ressource en eau. A cet effet, une des façons de caractériser la variabilité et les extrêmes climatiques est d'avoir recours à l'élaboration d'indices climatiques établis à partir des séries journalières de variables de base, comme la précipitation. La reconstitution de données de pluies manquantes au pas de temps journalière d'une résolution spatiale fine est parfois nécessaire pour l'étude des travaux des précipitations extrêmes.

Objectif de la thèse

L'objectif principale de cette étude est d'examiner la variabilité des précipitations à différentes échelles spatiale et temporelles, et les événements extrêmes à travers un ensemble des indicateurs élaboré, en se concentrant sur la fourniture de l'analyse la plus complète des précipitations extrêmes observées dans le NORD-EST algérien, basé sur une résolution journalière. Les résultats attendus de cette étude permettra de comprendre l'évolution des précipitations dans cette région.

Par conséquent, il est pratique de définir des objectifs spécifiques suivant:

- Contrôler la qualité des données utilisées et la reconstitution les séries des précipitations à un pas de temps journalier.
- Décrire la variabilité spatio-temporelle des précipitations à l'échelle annuelles et saisonnière basé sur 33 stations pluviométriques réparties dans le NORD-EST algérien.
- Étudier l'irrégularité, la saisonnalité et l'agressivité des précipitations dans la région d'étude. en se basant sur les indices de concentrations et de l'agressivité des précipitations.
- Évaluer les précipitations extrêmes journalières dans le NORD-EST de l'Algérie à l'aide d'un ensemble de données maillées à haute résolution.
- Analyser la variabilité temporelle des précipitations à travers l'étude des tendances des précipitations extrêmes maillées à haute résolution.

Structure de la thèse

La thèse est organisée en deux parties contenant 8 chapitres, la première partie se compose de 4 chapitres contenant : le premier chapitre introduit divers recherches bibliographiques et scientifiques antérieurs liés au sujet de la thèse. Le second chapitre est dédié à la présentation de la région d'étude et les données utilisé dans ce travail. Le troisième chapitre est consacré dans le but de la reconstitution des précipitations journalières et le maillage, en se basant sur les étape suivants: 1) un contrôle de qualité des données des précipitations journalière complet; 2) la reconstitution des séries de données manquants ; 3) la création de quadrillage journalière à haute résolution de 1x1 km pour l'ensemble de données des précipitations dans la région d'étude, 4) la validation des résultats de la processus de reconstitution. La présentation de la méthodologie et les indicateurs utilisé sera décrit dans le chapitre quatre.

Les différents résultats obtenus feront l'objet de la partie deux, (chapitre 5 à 8), on s'attachera dans le chapitre 5 les caractéristiques spatio-temporels des précipitations annuelles et saisonnières dans la région d'étude, l'irrégularité, la saisonnalité et l'agressivité des précipitations et leurs tendances spatiale est décrit dans le chapitre 6. Le septième chapitre est dédié sur l'évaluation spatiale des précipitations extrêmes journalières maillé, ainsi que le dernier chapitre (chapitre 8) se concentre sur l'évolution temporelle et tendances des précipitations extrêmes maillé à haute résolution dans la région d'étude. Les conclusions et les perspectives de ce travail termineront ce manuscrit.

Partie 1

- 1 **RECHERCHES BIBLIOGRAPHIQUES**

- 2 **REGION D'ETUDE ET DONNEES UTILISEES**

- 3 **RECONSTRUCTION DES PRECIPITATIONS JOURNALIÈRES**

 ET LE QUADRILLAGE

- 4 **INDICES DES PRECIPITATIONS UTILISEES**

1 RECHERCHES BIBLIOGRAPHIQUES

1.1 Irrégularité et l'agressivité des précipitations

La variabilité climatique se définit comme étant la variation de l'état moyen du climat à des échelles temporelles et spatiales du climat. Elle est souvent utilisée pour désigner les écarts des statistiques climatiques sur une période de temps donnée (par exemple un mois, une saison ou une année) par rapport aux statistiques à long terme pour la même période civile. Elle peut être due à des processus internes naturels au sein du système climatique (variabilité interne), ou à des variations de facteurs externes naturels ou anthropiques (variabilité externe). Cette variabilité est souvent perçue à travers l'irrégularité des paramètres climatiques dans leur évolution.

Dans ce cadre, Les précipitations sont l'un des paramètres climatiques les plus variables dans le temps et dans l'espace (IPCC, 2007), elles varient considérablement d'une année à l'autre et sur des décennies. Non seulement la quantité, mais aussi l'intensité, la fréquence, la durée ou le moment des précipitations peuvent changer et affecter l'environnement et la société (Trenberth, 2011). La compréhension de ces caractéristiques est important pour la gestion des ressources en eau et l'évaluer les impacts du changement climatique (Brunsell, 2010).

En effet, la pluviométrie par son intensité peut être le moteur de l'érosion des sols (Michiels et al., 1992). Cette dernière diminue la fertilité des sols, change les conditions de croissance des plantes, gêne les pratiques agricoles et cause un alluvionnement rapide des ouvrages hydrauliques (Scholz et al., 2008); (Alijani et al., 2008). Une concentration élevée des précipitations représentée par de forts pourcentages de la précipitation annuelle totale en quelques jours très pluvieux, peut être le potentiel de déclencher tous ou une partie des phénomènes déjà cités (Coscarelli and Caloiero, 2012); (Huang et al., 2014). Dans ce contexte, plusieurs méthodes basées sur des approches statistiques ou sous forme d'indices permettent de décrire la

variabilité pluviométrique en se basant sur l'information journalière et mensuelle des précipitations. A cet effet, nous avons pris en compte l'indice de concentration journalière (Ci) mis au point par (Martin-Vide, 2004) comme un indice statistique, qui permet de décrire la variabilité pluviométrique et peut être utilisé pour évaluer l'irrégularité, le montant variable des précipitations journalières, à savoir la contribution des jours pluvieux et la quantité totale.

D'autres indices basés sur des moyennes mensuelles des précipitations ont été proposés, tels que l'indice de précipitations mensuelles (PCI), développé par (Oliver, 1980), qui permet de quantifier l'hétérogénéité et la saisonnalité mensuelle des précipitations au cours de l'année hydrologique. Oliver (1980) affirme que le PCI a une utilité potentielle pour la climatologie appliquée, Il a calculé le PCI dans différentes régions telles que l'Afrique, les États-Unis et l'Australie. Cet indice facilite la régionalisation et peut être utile dans les études agro climatiques et le bilan hydrique (Llano, 2017). De même, l'indice de Fournier modifié (MFI) par (Arnoldus, 1980) est souvent utilisé pour évaluer l'agressivité des précipitations et ses effets sur l'érosion des sols (LUIS et al., 2010).

1.1.1 Travaux antérieurs sur la concentration et l'agressivité des précipitations

L'étude de la concentration et l'agressivité des précipitations, est un problème majeur à cause, entre autres, des problèmes hydrologiques résultant de la forte intensité et la mauvaise répartition temporelle des précipitations dans les différentes régions du monde. (Martin-Vide, 2004) A étudié la concentration des précipitations journalière (CI) dans 32 stations météorologiques à travers l'Espagne péninsulaire pour la période 1951 à 1990, Il a constaté que 25 % des jours pluvieux représente environ 75% du volume total annuel des précipitations et aussi des valeurs élevées de concentration journalière de précipitation sont situés sur la côte orientale de la péninsule ibérique, et le reste du pays, qui présente des quantités journalières plus régulière. Tandis que, (LUIS et al., 2010) ont analysé les tendances des précipitations annuelles totales, de l'indice de PCI et de MFI,

leurs résultats indiquaient une diminution des précipitations annuelles et une augmentation du PCI et également prédominante dans la péninsule ibérique de Méditerranée au cours de la période 1951-2000, ainsi, une diminution de l'érosivité des précipitations est détectée. (Alijani et al., 2008) Confirme la nature, la fréquence et l'irrégularité des précipitations journalières en Iran, en analysant les CI à travers 90 séries des précipitations journalières. Leurs étude a indiqué qu'au moins 20% du pays est exposé à un risque de précipitations extrêmes, et les précipitations ont tendance à être irrégulières et intense à travers beaucoup d'Iran. Alors que dans la Chine, (Zhang et al., 2009) ont étudié la modification des propriétés de CI dans le bassin de la rivière des Perles, par 42 stations météorologiques au cours de la période 1960-2005. Les résultats de cette étude a montré que la plupart des parties de la rivière des bassin Perles sont caractérisés par une augmentation significative des précipitations après 1990 et que le bassin de la rivière des Perles est susceptible d'être associé au conséquences du réchauffement climatique bien mis en évidence. Ainsi que (Li et al., 2010) ont estimé les valeurs de CI dans le bassin de la rivière Kaidu en Chine à partir de 50 séries des précipitations journalières au cours de la période 1961-2008, ils ont trouvés que les valeurs CI de précipitation sont nettement plus élevées dans les endroits où les précipitations totales et le nombre de jours de pluie sont plus faibles. En Malisie, l'étude de (Suhaila and Jemain, 2011) présente l'analyse spatiale journalière de l'intensité des précipitations et de la concentrations (CI) sur Peninsularmalaisie par l'utilisation de 50 séries journalières des précipitations. Leurs résultats montrent que les précipitations journalières confirment qu'un grand nombre de jours pluvieux proviennent d'événements de faible intensité mais ne contribuent qu'à un faible pourcentage des pluies totales. D'autre part, une faible fréquence de jours de pluie avec des événements d'intensité élevée contribue le plus grand pourcentage de pluie totale. En Europe, (Cortesi et al., 2012) ont étudié la structure statistique de précipitations journalières à travers le CI, sur la base de 530 précipitations journalières pour la période 1971-2010. Ils ont trouvé que la latitude et la distance de la

mer semblent jouer un rôle majeur sur la distribution spatiale de CI, à l'échelle sous-régionale, le relief joue également un rôle important. Dans le SUD d'Italie (Calabre) au cours de la période 1916-2006, (Coscarelli and Caloiero, 2012) ont étudié les caractéristiques spatio-temporels de la concentration des précipitations journalières CI et mensuelles PCI, ils ont montré une distribution temporelle très hétérogène de précipitations journalières, caractérisé dans la partie orientale de la région dans lequel un quart des jours pluvieux représente près des trois quarts de la quantité pluviométrique totale tombé. En Algérie, (Benhamrouche et al., 2015) ont analysé le CI dans 42 pluviomètres étalés sur le territoire algérien, leurs résultats ont permis l'identification de trois zones climatiques, avec une concentration plus marqués dans la région SUD de l'Algérie. En Turquie, (Apaydin et al., 2006) ont évalué le potentiel érosif des précipitations et leur impact sur l'érosion en calculant le MFI dans le SUD-EST de l'Anatolie. Ils ont conclu que l'utilisation de MFI était utile pour déterminer le potentiel des précipitations pour causer l'érosion des sols, en leur fournissant des informations sur la variabilité totale à long terme de la quantité de précipitations reçue. (Meddi, 2013) A analysé l'impact de la variabilité de la concentration spatiale et temporelle et de l'agressivité des précipitations dans douze bassins versants de l'OUEST algérien entre 1930 et 2007. Son résultat a montré une tendance négative des deux variables et une diminution de 20% des précipitations annuelles et de l'indice de Fournier modifié.

1.2 Changement dans les événements extrêmes

Un événement météorologique extrême est défini selon le quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (IPCC, 2007) comme un événement rare dans un lieu et une période précis de l'année. La figure 1.1 montre comment la distribution de fréquence d'un paramètre climatique observé comme la température, dont la densité de probabilité appartient à la distribution gaussienne, sur une période de temps et pour un point ou une zone donnée devrait varier.

Les extrêmes sont définis comme des dépassements d'un seuil fixe. Ils se regroupent dans les queues de la distribution (les surfaces bleues et rouges sous la courbe correspondent respectivement aux extrêmes froids et chauds). Une simple hausse de la température moyenne (Fig. 1.1a) signifie qu'il fait plus souvent extrêmement chaud et plus rarement extrêmement froid. C.-à-d., s'il y a un changement de la valeur moyenne, alors il y aura un déplacement de la distribution entière vers un climat plus chaud, (une augmentation des jours chauds et une diminution du nombre de jours froids). Une augmentation de la variance de la température sans déplacement de la moyenne implique une augmentation des extrêmes aux deux extrémités de la courbe de distribution de fréquence (figure 1.1b). Cependant, lorsque la moyenne et la variance changent en même temps (figure 1.1c), la probabilité des extrêmes des deux côtés sera affectée, ce qui entraîne dans cet exemple un changement d'asymétrie vers la partie la plus chaude de la distribution d'où moins d'épisodes de froid.

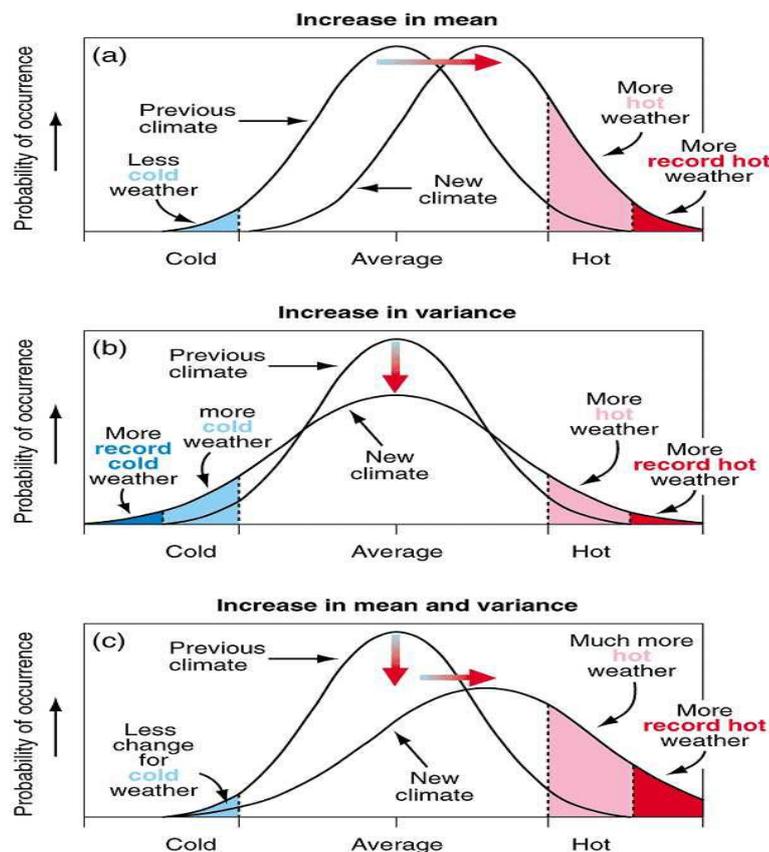


Figure 1.1. Représentation schématique montrant l'effet possible du changement sur les extrêmes de la température: (a) croissance de la température moyenne, (b) augmentation de variance et (c) combinaison des deux, source : (IPCC, 2001)

Ce n'est pas le cas pour d'autres variables qui ne sont pas normalement distribuées comme les précipitations qui ont une distribution exponentielle négative et sont donc beaucoup plus compliquées. Par exemple le changement de la moyenne peut entraîner un changement de la variance. La figure 1.2 présente la distribution des probabilités des précipitations. On assiste généralement à plus de jours avec des précipitations relativement légères et très rarement des événements de précipitations extrêmement fortes, ce qui signifie que leur probabilité d'occurrence est faible.

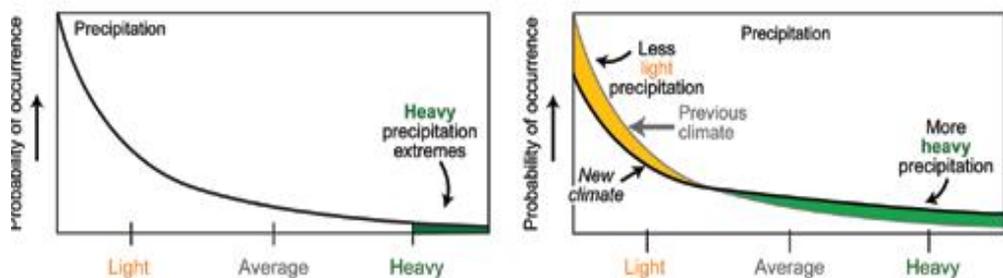


Figure 1.2 Distribution des probabilités de précipitations, source : (Zhang et al., 2011)

1.2.1 Précipitations extrêmes à l'échelle globale

Les précipitations extrêmes étant l'un des principaux déclencheurs de catastrophes naturelles, telles que les crues soudaines, les inondations urbaines, les glissements de terrain, l'érosion des sols et la destruction des cultures (Santos et al., 2018). De nombreuses études ont été consacrées aux changements des précipitations dans plusieurs régions du monde. En Europe, la plupart des analyses des précipitations extrêmes observées ont montré une forte augmentation durant plusieurs décennies au siècle dernier (Klein Tank and Können, 2003) ;(Alexander et al., 2006). En Chine, l'étude de Zhang and Cong (2014) a révélé que l'intensité des précipitations présente une tendance à la hausse significative, tandis que la fréquence des précipitations indique une tendance à la baisse significative. En Afrique centrale, l'étude d'Aguilar et al. (2009) a montré une décroissance dans les extrêmes froids et une croissance dans les extrêmes chauds. Ils indiquent également une diminution des précipitations annuelles totales et de la quantité des précipitations d'événements extrêmes. En effet, la région méditerranéenne, apparaît de plus en plus comme l'un des principaux «

points chauds » régionaux du changement climatique, et devrait connaître l'assèchement le plus important parmi 26 régions du monde (Giorgi, 2006). Elle est considérée comme une zone de transition située entre le climat modéré des latitudes moyennes européennes et le climat semi-aride et aride de l'Afrique du NORD et du Moyen-Orient. Cette région est caractérisée par la survenue remarquable d'événements synoptiques avec des précipitations exceptionnellement intenses (Lionello et al., 2006). (Raymond et al., 2016) ont montré une baisse du nombre de jours de pluie particulièrement marquée dans le NORD du Portugal et de l'Algérie, au NORD-EST de l'Anatolie, au SUD-OUEST et SUD-EST des Balkans et sur une majeure partie de l'Italie. De même (Alpert, 2002) a signalé une augmentation de fortes précipitations en Italie et en Espagne entre 1951 et 1995 associée à une diminution des pluies totales annuelles. Aussi, (Tang et al., 2018) ont montré une forte diminution des tendances des précipitations annuelles sur la région méditerranéenne a été détectée depuis le début du 20e siècle.

1.2.2 Les précipitations extrêmes en Algérie (inondation/sécheresse)

1.2.2.1 Inondations

En Algérie, les pluies extrêmes sont à l'origine d'inondations qui se manifestent de façon catastrophique, dont les plus meurtrières ont été celles de l'automne 2001 (Djellouli and Saci, 2003). Le potentiel d'impacts catastrophiques dans cette année a été également énorme. Selon l'étude de (Llasat et al., 2010), au total 185 inondations ont été enregistrées entre 1990 et 2006 dans la région méditerranéenne, dont le plus grand nombre de victimes se trouve en Algérie, principalement à la suite de l'événement de novembre 2001. Faisant de 900 victimes (Sumi, 2021) et des dégâts catastrophiques. Les pluies abattues sur Alger (Bab el Oued) entre le 9 et le 11 Novembre 2001 par un cumul des précipitations égal à 262 mm dont 204 mm en 24 heures sont enregistrées à la station de Bouzaréah (LAROUCI, 2008).

En outre, ce n'est pas parce que les villes sahariennes de l'Algérie sont situées dans un milieu caractérisé par son aridité qu'elles ne soient pas susceptibles d'être frappées sévèrement par des événements extrêmes, comme ce fut le cas en 2008. Elles ont été touchées par plusieurs inondations dont celle du 1er Octobre 2008 à Ghardaïa faisant de 50 morts, et causé la mort de 12 personnes à Bechar (Sumi, 2021) et des dommages importants des infrastructures de base, a conséquence d'un cumul de deux jours de précipitations égales à 90 mm (Hadeid, 2018).

A l'extrême NORD-EST algérien, la région a connu plusieurs inondations récurrentes catastrophiques, dont la plus dangereuse est celle de Skikda entre le 28 et le 31 Décembre 1984 qualifiée comme exceptionnelle. La précipitation journalière maximale a atteint 137 mm à Zardezas, 97,6 mm à El Harrouch et 111,2 mm à Ramdane Djamel (LAROUCSI, 2008). Elle a causé 11 décès, d'importants dégâts matériels, l'immersion plus de 400 hectares, ainsi que l'enclavement de la ville pendant 10 jours (LAROUCSI, 2008). En Février 2012, la région d'El Tare a reçu des pluies abondantes égales à 133 mm en trois jours consécutives (El Moudjahid, Edition du 20/03/2012). Cet événement extrême a causé trois morts et des dégâts en constructions et terrains agricoles d'environ 2 milliards de DA (ABDEDDAIM, 2018). La région d'Annaba aussi, a connue des dégâts catastrophiques à la conséquence des précipitations extrêmes. A titre d'exemple, en Novembre 1982, on a enregistré 47 décès (Sumi, 2021). De plus, en Décembre 2005, un cumul des précipitations journalières de 135,9mm et 61,5mm, enregistrées le 13 décembre aux stations de Seraidi et les salines a été à l'origine des inondations du 13 au 14 décembre, durant lesquelles le Plan ORSEC (Organisation de la Réponse de Sécurité Civile) a été déclenché. L'alerte a causé des ruptures de canalisations d'eau potable et des conduites d'eaux usées. Les besoins alimentaires et vestimentaires des sinistrés ont été évalués à 1,2 millions de DA (LAROUCSI, 2008).

1.2.2.2 Sécheresses

De l'autre côté, la sécheresse est également une préoccupation majeure en Algérie. Ce phénomène est apparu entre les années 1970 et 1980 surtout dans la région NORD-OUEST. Plusieurs études ont chiffré ces déficits. (Ghenim and Megnounif, 2013) ont détecté l'apparition d'une période déficitaire (-30%) depuis les années 70 dans le bassin versant de Meffrouche. (Meddi and Meddi, 2009) Ont remarqué la baisse des précipitations au début des années 1940 et au milieu des années 1970, avec une réduction de la pluviométrie dépassant 36 % dans la région de Mascara et à l'extrême OUEST. En revanche, elle est de l'ordre de 20 % dans la plaine de la Mitidja. (Talia et al., 2011) Ont distingué une chute brutale de la pluviométrie au cours de la décennie 1970-1980 à l'OUEST et au centre des hauts plateaux.

Les résultats de (Belarbi et al., 2017) ont révélé une modification du régime des précipitations se traduisant nettement par une tendance à la baisse de 25% survenue au milieu des années 1970 dans le bassin versant de l'Oued Sebdo. Au NORD-EST algérien, Khwaldia (2014) a montré que les décennies 1980 et 1990 sont déficitaires dans le bassin de Mejerda, avec une augmentation des précipitations remarquée durant la période 2001-2007. Ainsi, l'analyse des fractions pluviométriques journalières met en évidence une tendance à l'augmentation des pluies fortes supérieures à 20 mm après les années de rupture. (Khezazna et al., 2017) Ont montré que les indices de sécheresse estimés indiquent que le bassin versant de Seybouse a connu dans le passé une longue période sèche avec une sévérité modérée suivie d'une longue période humide dans la majorité de la zone d'étude.

1.3 Indices des précipitations extrêmes

L'un des moyens envisagés pour détecter et décrire de façon synthétique le changement climatique, ses conséquences et les mesures d'adaptation, est l'élaboration d'indices climatiques (Karl et al., 1999). Ces indices sont de plus en plus recommandés pour les analyses des extrêmes climatiques

(Zhang et al., 2011). Ils présentent l'avantage de traduire les résultats des simulations sous une forme directement exploitable pour discuter les résultats obtenus avec ceux des autres localités même dans des conditions climatiques différentes. Ils sont utilisés généralement par les scientifiques dans leurs tentatives de caractériser et de comprendre divers processus climatiques liés au temps et suivre les fluctuations des éléments météorologiques à long terme.

De nombreux indices climatiques ont été définis par la communauté des climatologues. Le projet Climate Variability and Predictability (Clivar) du Programme Mondial de Recherche sur le Climat (PMRC) de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) a proposé une liste de divers indices. Certains d'entre eux sont repris et calculés pour différentes séries dans le cadre du projet européen European Climate Assessment and Data set (ECAD) dont le site Internet présente une liste descriptive complète des indices (<http://eca.knmi.nl/indicesextremes/indicesdictionary.php#>) de 75 indices correspondant aux différents aspects du changement climatique.

Dans ce cadre, l'équipe d'experts sur la détection des changements climatiques et les indices (Expert Team on Climate Change Detection indices ETCCDI) a mis au point un ensemble de 27 indices dérivés des données journalières sur les températures et les précipitations (http://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml). Ils sont conçus pour permettre la surveillance continue des changements de fréquence et / ou d'intensité des événements extrêmes en se concentrant sur les événements qui se produisent généralement plusieurs fois par an (Zhang et al., 2011). Ceci leur confère des propriétés statistiques plus robustes que les mesures extrêmes suffisamment éloignées des queues de la distribution pour ne pas être observées pendant certaines années (Alexander et al., 2006).

1.4 Reconstruction des précipitations journalières manquantes

Les données pluviométriques mesurées directement sur le terrain par les services météorologiques nationaux ont l'avantage de fournir souvent de longues séries d'observations indispensables à la détection des

changements observés, mais elles présentent en contrepartie certaines limites comme par exemple souvent la présence de valeurs manquantes. Ces lacunes peuvent être la conséquence de différents problèmes d'enregistrement, comme une défaillance mécanique dans le cas des pluviomètres automatiques, une absence temporaire d'observateurs dans le cas de pluviomètres manuels ou encore l'arrêt temporaire et/ou définitif de la mesure.

La reconstitution des séries climatiques historiques suscite ces dernières années un intérêt croissant, qu'il s'agisse d'étudier la variabilité des climats du passé, de positionner le changement climatique dans le long terme, ou encore d'améliorer la connaissance des épisodes extrêmes dans le cadre de la prévention des risques naturels (Notivoli et al., 2016).

Actuellement, les précipitations journalières sont l'une des variables les moins étudiées dans la reconstruction du climat en dépit de l'énorme importance qu'elles ont dans l'analyse des événements extrêmes (Easterling et al., 2000). Dans ce contexte, pour résoudre ces problèmes et construire une base de données fiable pour l'analyse des précipitations journalière, un processus de contrôle de la qualité des données et de la reconstruction des précipitations est nécessaire.

1.5 Le quadrillage(le maillage)

Au cours de dernières décennies, il y a eu une demande croissante de jeux de données quadrillés à haute résolution (dans le temps et dans l'espace), dans différents secteurs, notamment l'hydrologie, l'agriculture et la santé (Herrera et al., 2012), aussi, la plupart des études ont porté sur la création de climatologies ou l'évaluation des tendances dans les précipitations, où ils ont utilisé une résolution temporelle mensuelle (Perry and Hollis, 2005); (Caramelo and Orgaz, 2007); (González-Hidalgo et al., 2011). Tandis que, l'augmentation de la résolution temporelle d'une échelle mensuelle ou annuelle à une échelle journalière permet d'analyser d'autres composantes pertinentes du climat, telles que les précipitations extrêmes ou la durée et l'intensité des périodes sèches qui précèdent la plupart des processus hydrologiques annuels (Serrano-Notivoli et al., 2017). A cet égard. L'analyse

et la caractérisation des précipitations extrêmes nécessitent un ensemble des données journalières quadrillées à l'échelle spatiale fine en raison des variations abruptes de cette variable dans le temps et dans l'espace (Herrera et al., 2012).

Pour cela, Les données quadrillées présentent un certain nombre d'avantages par rapport aux ensembles de données d'observation irrégulières, ils conviennent mieux à la représentation de variables spatialement continues et donnent des cartes plus satisfaisantes que celles représentant des nuages de points irréguliers (Beguería et al., 2016), De plus, ils permettent d'obtenir les meilleures estimations possibles des variables climatiques en des lieux éloignés des stations d'observation, ce qui permet d'étudier le climat local dans des régions où les données sont rares (Haylock et al., 2008b). et représentent avec précision les événements extrêmes(Ensor and Robeson, 2008).

1.5.1 Travaux antérieurs sur les indices des précipitations extrêmes maillé à haute résolution

Une maille est un ensemble de paires de coordonnées équidistantes les unes des autres qui couvrent une certaine surface, et dont la conversion en pixels à l'équidistance entre les points donne lieu à un raster. Les ensembles de données des précipitations quadrillées d'une résolution journalière sont des outils utiles pour la gestion des terres, et leur disponibilité sur une région complète peut être utile dans de nombreux autres domaines en raison de la pertinence des précipitations dans de nombreuses disciplines comme l'hydrologie (par exemple dans la gestion des ressources en eau à l'échelle du bassin versant)(Serrano-Notivoli et al., 2017). Ils ont été développées au niveau mondial (Menne et al., 2012) ou régional (Haylock et al., 2008a); (Klok and Klein Tank, 2009). À de nombreuses fins scientifiques et pratiques des indices de précipitations extrêmes sur des grilles d'espacement régulières à l'échelle journalière sont souvent nécessaires (Alexander et al., 2006).

En effet, des recherches antérieures sur l'utilisation des données maillées pour étudier les précipitations extrêmes ont été consacrées dans plusieurs

régions. (Alexander et al., 2006) et (Donat et al., 2013) ont étudié les tendances des extrêmes des précipitations mondiales sur la base d'un ensemble de données des précipitations journalières quadrillées. Ils ont constaté des tendances à la hausse dans la plupart des régions. Ainsi, (Donat et al., 2013) ont indiqué l'existence de plus de zones avec des tendances à la hausse significative dans les quantités, l'intensité et la fréquence des précipitations extrêmes que les zones avec des tendances à la baisse. (Rajeevan et al., 2008) Ont analysé la variabilité et les tendances des événements pluviométriques extrêmes en Inde à l'aide de 104 années de données de précipitations journalières maillées. Ils ont montré des variations interannuelles et inter-décennales de la fréquence des événements pluviométriques extrêmes importantes avec une tendance significative de 6% par décennie. (King et al., 2013) Ont testé l'efficacité de l'utilisation de données maillées pour examiner les caractéristiques des précipitations extrêmes en Australie. Ils ont conclu que le produit quadrillé peut être utilisé dans des études sur les tendances et la variabilité des précipitations extrêmes dans une grande partie de l'Australie. (Chaney et al., 2014) Ont développé d'un ensemble de données météorologiques journalières quadrillées à haute résolution sur l'Afrique subsaharienne pour analyser les tendances des extrêmes climatiques. Leurs résultats ont suggéré des changements dans les précipitations annuelles moyennes et les épisodes de fortes précipitations et ne sont significatifs que dans les régions touchées par les sécheresses au Sahel des années 1970 et 1980. (Serrano-Notivoli et al., 2017) Ont construit un jeu de données de précipitations maillées journalières à haute résolution en Espagne pour étudier la fréquence et l'intensité des événements extrêmes. Ils ont montré des valeurs élevées de la fréquence et de l'intensité événements extrêmes dans la côte méditerranéenne et la chaîne centrale.

2 REGION D'ETUDE ET DONNEES UTILISEES

2.1 Description de la région d'étude

La région concernée par cette étude (figure 2.1) est située dans le littoral du NORD-EST algérien, entre les longitudes 6°6' et 8°40'E et les latitudes 35°46' et 37°5'N. Elle couvre complètement les 3 bassins versants de la Seybouse et les côtières constantinois-est et centre avec une surface totale de 15256 km². Elle est limitée au NORD par la méditerranée, à l'est par la frontière tunisienne, au SUD par les hauts plateaux constantinois, au SUD-OUEST par le bassin de Kebir Rhumel, et au SUD-EST par le bassin de la Mejerda. C'est une partie intégrante de l'Atlas Tellien, dont la géomorphologie est composée d'une chaîne de montagnes, de plaines et de bassins versants.

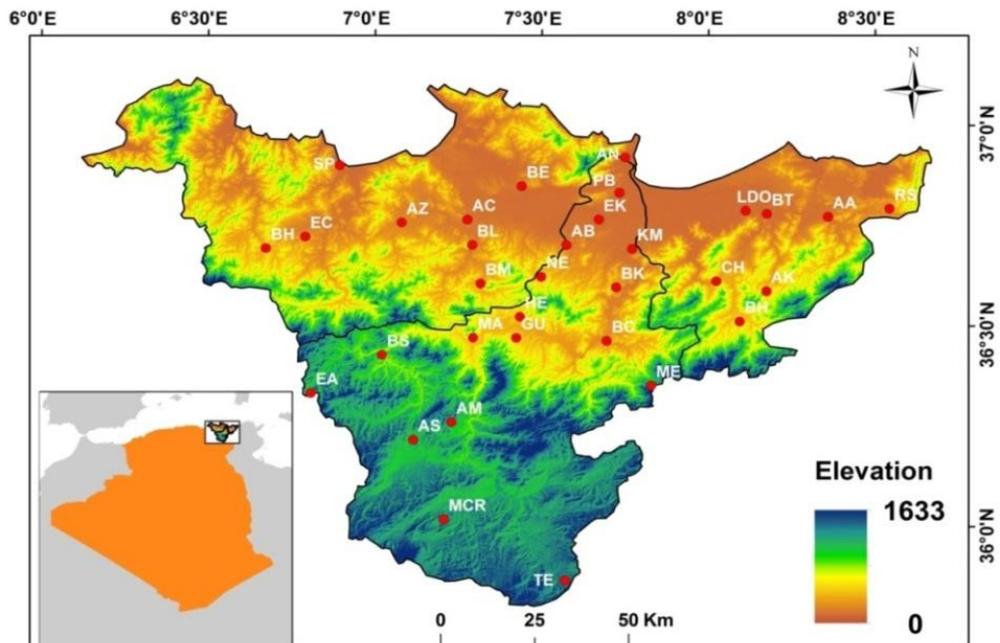


Figure 2.1 Situation géographique de la région d'étude et les stations pluviométriques

Elle se caractérise par deux formes de relief principales, le massif d'Edough dans la province d'Annaba et le massif de Cheffia dans la province d'El Taref. Son climat typiquement méditerranéen, est caractérisé par deux saisons, des étés secs et chauds, et des hivers doux et pluvieux (Kottek et al., 2006).

Son réseau hydrographique est dominé par la Seybouse, l'un des plus importants oueds d'Afrique du NORD en termes de longueur et de nombre de ses affluents (Khanchoul, 2006).

Le NORD-EST algérien reçoit en moyenne des quantités annuelles de précipitations variant de 300 à 1500 mm. Elle se caractérise comme l'une des régions les plus pluvieuses du pays (Meddi and Toumi, 2015). Le maximum des précipitations annuelles dépassant les 1500 mm est enregistré dans le massif de l'Edough situé à Annaba (Touazi and Laborde, 2004). La température moyenne se situe entre 8 °C et 15 °C en hiver et 25°C en été.

2.1.1 Bassin versant de la Seybouse

Le bassin de la Seybouse (figure 2.2) occupe une superficie de 6471 km². Son cours d'eau prend naissance dans les hautes plaines des Sellaoua et Haracta et se termine au NORD dans la mer Méditerranée après un parcours de 160 km (Khanchoul, 2006) avec des ramifications atteignant les 3000 km. Il est formé par la confluence de l'oued Bouhamdane (90 km) et l'oued Cherf (88 km) au niveau de Madjez Amar à l'OUEST de Guelma et reçoit deux autres affluents d'importance inégale : l'oued Mellah affluent issu du versant NORD-OUEST des monts arrosés de la Medjerda (Mebarki, 2005). Puis, la Seybouse change sa direction pour rejoindre au NORD oued Ressoul à Ain Berda, jusqu'à son embouchure, qui se trouve à Sidi Salem dans la plaine littorale d'Annaba. Le bassin de la Seybouse se caractérise par un relief fort et contrasté à pentes fortement inclinées. Il est ainsi divisé en trois terrasses physiographiques bien distinctes constituées de six sous bassins: le bassin de haute Seybouse est une région montagneuse formée d'une chaîne imposante, au relief accidenté, c'est l'Atlas Tellien. Il est constitué par 03 sous bassins : Le sous bassin de oued Cherf amont (code 14-01), le sous bassin de oued Cherf aval (code 14-02) et le sous bassin de oued Bouhamdane (code 14-03). La moyenne de la Seybouse se compose du sous bassin de oued Mellah (code 14-05) qui est formé de la confluence des oueds Sekaka et Rirane traversant une région très accidentée aux

versants fortement escarpés, du sous bassin moyen de Guelma (code 14-04) et la basse Seybouse qui est constituée du sous bassin maritime (code 14-06) et dessinant le chevelu hydrographique du bassin de l’oued Ressoul à Ain Berda jusqu’à son rejet (ABH, 1999).

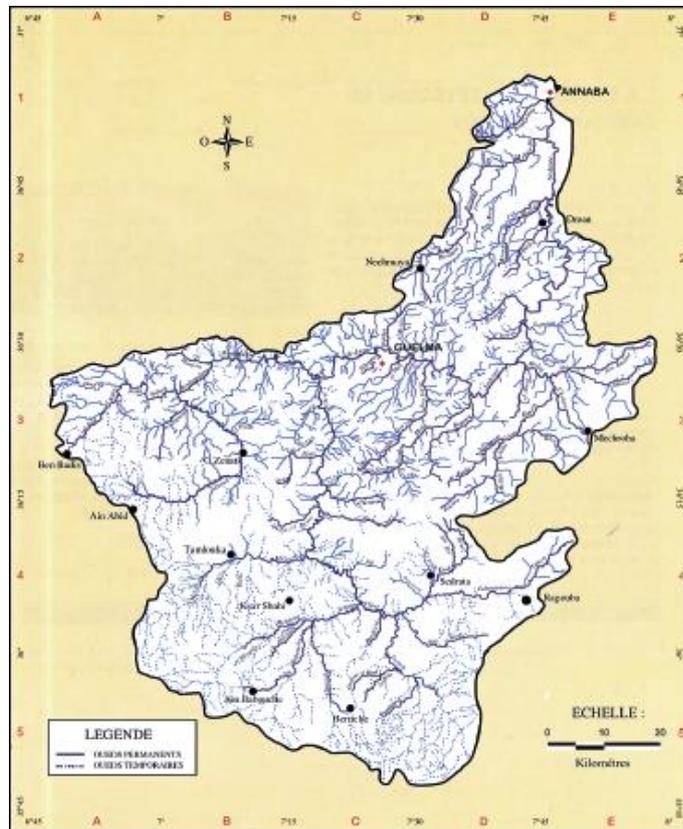


Figure 2.2 Carte hydrographique du bassin versant de la Seybouse (ABH, 2000)

2.1.2 Côtiers Constantinois-est

Le bassin versant Côtier Constantinois-est occupe une surface de 3203 km² à l’extrême NORD-EST algérien (figure 2.3), soit 27,83 % de la superficie totale du bassin côtiers Constantinois. Il constitue l’un des plus grands réservoirs d’eaux superficielles et souterraines dans le NORD de l’Algérie (ABH, 2000). Le bassin est subdivisé en quatre sous-bassins: le sous bassin Côtier Oued la Kalle (code 03-18), le sous bassin Côtier Ramel-Souk (code 03-16), le sous bassin Côtier Oued Mafragh (code 03-17) et le sous bassin Côtier Bounamoussa (code 03-15). Le réseau hydrographique est très développé, dominé par des zones humides (lac Tonga ; lac Melah ; lac Oubeira ; lac des oiseaux) dont certaines sont classées par la Convention

Ramsar (du nom d'une ville iranienne), signée le 2 février 1971 par plusieurs pays dont l'Algérie. Le chevelu hydrographique totalise une longueur de plus de 1760 km dont le principal est celui d'El Kébir-est avec une longueur de plus de 35 km (REZAK, 2014).

Les oueds Bounamoussa à l'OUEST et El kébir-est à l'est sont les principales sources d'eau du bassin versant dont la confluence conduit à l'oued Mafragh. Les oueds Guergour, Bouhalloufa et Boulathan affluents de l'oued El Kébir. Le bassin versant de l'Oued Mafragh et les côtières de la Calle (El Kala) font la totalité du bassin versant côtiers Constantinois-est et forment par conséquent le versant NORD du dernier tronçon de la chaîne septentrionale de l'Atlas Tellien. Le bassin Côtiers Constantinois-est compte quatre barrages d'une capacité de 269 Hm³ et 24 retenues collinaires destinées à l'irrigation (ABH, 2000).

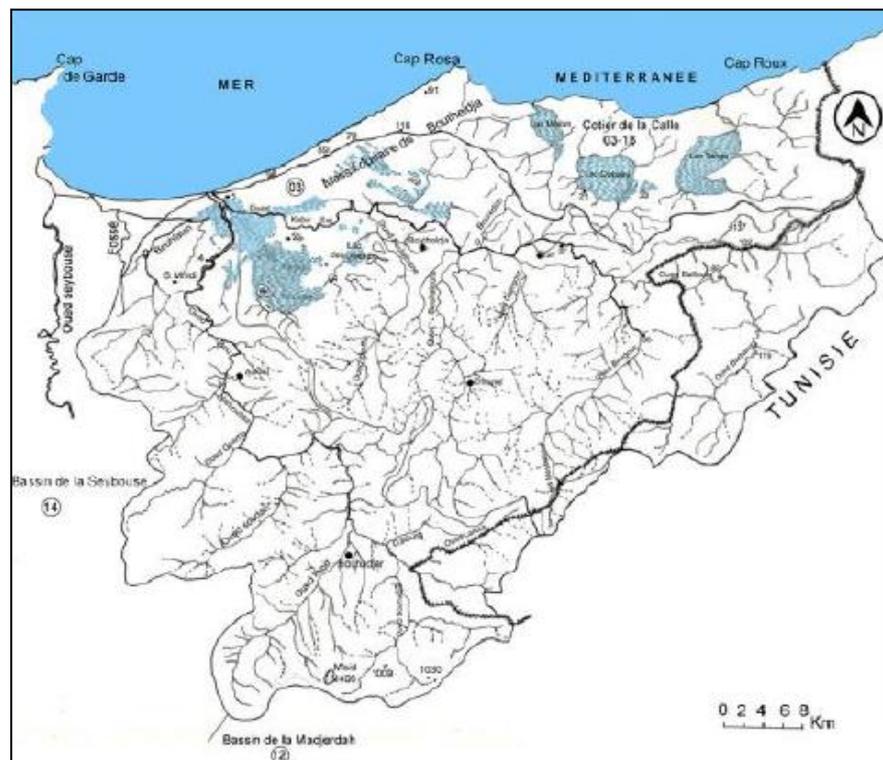


Figure 2.3 Carte hydrographique du bassin versant de côtières constantinois-est (ABH, 2000)

2.1.3 Côtiers constantinois-centre

Le bassin Côtiers Constantinois centre qui a une superficie de 5582 km², est répartie en 9 sous bassins (figure 2.4). Son chevelu hydrographique assez dense, totalise de plus de 4200 km (ABH- CSM, 2012). Il compte plusieurs

cours d'eau importants dont l'écoulement est permanent. Ils sont formés d'est en OUEST principalement par les oueds des sous bassins de oued Safsaf (plus de 50 km), oued Guebli et Kébir-OUEST (plus de 40 km) qui coule quasi-parallèlement au versant NORD-tellien jusqu'à son rejet dans la Méditerranée. Ce bassin abrite le lac Fetzara qui est une dépression fermée. Le bassin s'allonge dans le sens est-OUEST sur 17 km de long et sur 13 km dans sa plus grande largeur. Les eaux du lac Fetzara proviennent des Oueds El Hout, El Mellah et Zied ainsi que celles qui se déversent le long des pentes périphériques. Le drainage du site se fait au moyen d'un canal principal dont les eaux d'évacuation se déversent dans l'Oued Medjouba puis dans l'Oued Seybouse qui débouche dans la mer (REZAK, 2014). Le bassin versant Côtiers Constantinois Centre compte quatre barrages d'une capacité totale de 312 Hm³ et 101 retenues collinaires dont la plupart sont destinées à l'irrigation.



Figure 2.4 Carte hydrographique de bassin versant du côtiers constantinois-centre (ABH, 1999)

2.2 Les données utilisées

Ce travail est basé sur 33 séries des précipitations journalières réparties dans la zone d'étude. Elles proviennent de la banque de données de l'Agence nationale des ressources hydriques (ANRH) (bureaux d'Alger et de Constantine) et de l'Office National de la Météorologie (ONM). De nombreuses séries pluviométriques ont des données manquantes et n'ont

pas la même période de début et de fin. Ces lacunes peuvent aller d'une journée à plusieurs mois, jusqu'à des années. La majorité des mesures ont débuté à partir de 1970. Ces contraintes nous ont obligés à restreindre notre étude à la période 1970-2010 afin de mettre en évidence les tendances climatiques récentes. La qualité des données rassemblées diffère d'une station à l'autre. Néanmoins, obtenir des séries chronologiques presque complètes au niveau des différentes stations a été le souci majeur qui nous a animés.

La base de données utilisée dans ce travail comporte au total une moyenne de 14,8 % de valeurs manquantes. En effet, l'étude des précipitations et leur évolution dépend de la qualité des données utilisées. Ceci nécessite la mise en œuvre d'un contrôle de qualité des données des précipitations et la reconstruction des données manquantes pour avoir des séries autant que possible exemptes des lacunes.

La répartition des stations pluviométriques est illustrée dans la figure 2.1 et le tableau 2.1 donne les coordonnées géographiques et % des lacunes dans chaque station durant la période 1970-2010.

Tableau 2.1 Coordonnées géographiques des stations pluviométriques utilisées, périodes d'observation et % des lacunes (1970-2010)

Code	Station	Code Map	LON_ WGS	LAT_ WGS	ALT (m)	Nombre d'années observées	% des lacunes
31102	BEKOUCHE LAKHDAR	BL	7.3	36.69	80	41	0
31105	BOUATI MAHMOUD	BM	7.32	36.59	150	41	0
31106	AZZABA	AZ	7.09	36.74	91	41	0
31201	AIN CHERCHAR	AC	7.28	36.76	34	41	0
31302	BERRAHAL	BE	7.44	36.84	33	41	0
31415	ANNABA	AN	7.75	36.91	50	41	0
140108	AIN SNOB	AS	7.14	36.2	879	13	69.1
140113	MTA CHEIKH RABAH	MCR	7.24	36	865	22	47.8
140115	TERRAGUELT	TE	7.6	35.87	868	34	16.9
140205	AIN MAKHLOUF	AM	7.25	36.25	830	23	43.9
140302	BORDJ SABATH	BS	7.04	36.41	525	28	32.5
140304	EL ARIA (BEN BADISS)	EA	6.05	36.31	807	15	64.6
140313	MEDJAZ AMAR	MA	7.31	36.46	333	33	19.5

140403	HELIOPOLIS	HE	7.45	36.51	259	41	0
140412	GUELMA	GU	7.44	36.46	304	41	0
140502	MECHROHA	ME	7.84	36.35	750	35	14.2
140505	BOUCHEGOUF	BC	7.71	36.46	87	41	0
140605	NECHMAYA	NE	7.51	36.61	284	41	0
140606	AIN BERDA	AB	7.59	36.69	100	41	0
140607	BOUKHAMOUZA	BK	7.74	36.59	140	41	0
140609	EL KERMA	EK	7.67	36.76	15	41	0
140611	KEF MOURAD	KM	7.77	36.7	20	41	0
140631	PONT BOUCHET	PB	7.74	36.83	3	35	14.6
30705	BOU HALLOUFA	BH	6.68	36.67	165	32	22.2
30801	SKIKDA PORT	SP	6.9	36.88	2	40	2.5
30908	EMDJEZ CHICH	EC	6.8	36.7	104	28	33.1
31503	BOUHADJAR	BH	8.1	36.51	300	41	0
31501	CHEFFIA (BGE)	CH	8.03	36.62	170	41	0
31601	AIN ASSEL	AA	8.37	36.77	35	41	0
31602	ROUM SOUK	RS	8.54	36.79	150	41	0
31604	AIN KERMA	AK	8.18	36.59	280	41	0
31717	LAC DES OISEAUX	LDO	8.12	36.79	6	19	53.7
31718	BOUTELDJA	BT	8.19	36.78	25	19	53.7

2.3 Conclusion

Ce chapitre présente la région d'étude et les données utilisées dans cette thèse. Nous avons choisi les 3 bassins versants de Seybouse et les Côtiers constantinois-EST et CENTRE d'une superficie totale de 15256 km² situés dans l'extrême NORD-EST algérien, Cette région est caractérisée la plus pluvieuse en Algérie. Elle a une forte variabilité spatio-temporelle des précipitations, et est caractérisée par un climat méditerranéen.

Une base de données de 33 séries des précipitations journalières a été utilisée et réparties dans la région d'étude durant la période de 1970-2010. Cette base de données comporte au total une moyenne de 14,8 % de valeurs manquantes.

3 RECONSTRUCTION ET QUADRILLAGE DES PRÉCIPITATIONS JOURNALIÈRES

3.1 Introduction

Le processus de reconstruction et de maillage des données manquantes des précipitations journalières a été appliqué suivant la méthode proposée par (Serrano-Notivoli et al., 2017a),(Serrano-Notivoli et al., 2017b) qui consiste à la création des valeurs de référence RV permettant de faire:

- 1) Contrôle de qualité des données d'origine en signalant et supprimant les données suspectes qui ne correspondent pas à la répartition des précipitations de chaque jour,
- 2) Remplir les valeurs manquantes dans chaque série de l'ensemble de données précédemment nettoyées,
- 3) Création d'une grille de données dans n'importe quel emplacement en fonction de leur latitude, longitude et altitude.

Le principal avantage de la méthode décrite ici est que tous les calculs sont faits pour chaque jour et lieu de manière indépendante, de sorte qu'il n'y ait pas de problèmes de besoin pour les séries de durées réduites, Aussi, la méthode comporte une grande flexibilité pour s'adapter aux spécificités et caractéristiques des situations de précipitations à différents jours afin de fournir une amélioration des connaissances détaillées sur le comportement des précipitations journalières,

Le processus de la reconstitution et le quadrillage est établi en utilisant le paquet reddPrec R disponible gratuitement depuis le logiciel R officiel : ([http://cran,r project,org/web/packages/reddPrec/index,html](http://cran.r-project.org/web/packages/reddPrec/index.html)).

3.2 Le processus de contrôle de la qualité

3.2.1 Calcul des valeurs de référence RV

Dans la première phase, le contrôle de qualité et la reconstruction des données manquantes sont basés sur le calcul des valeurs de référence RV selon les informations disponibles dans les stations voisines les plus proches, pour chaque jour et chaque emplacement. Les modèles linéaires généralisés (GLM) sont utilisés pour calculer les RV en utilisant les données des précipitations (occurrence et magnitude) des 10 stations les plus proches les unes des autres comme variable dépendante, et les informations géographiques de chaque station (latitude, longitude et altitude) comme variables indépendantes. Cette méthode fait un usage optimal de toutes les informations disponibles, ne dépend pas de la longueur des séries des précipitations et préserve la variabilité locale de la distribution des précipitations,

Chaque RV individuel est basé sur deux valeurs prédites :

- 1) une prédiction binomiale (BP) de la probabilité d'occurrence d'une journée humide, et
- 2) une prédiction de magnitude des précipitations (MP), dans le cas où une journée humide est prédite.

Les deux paramètres sont calculés avec une régression logistique multiple qui utilise les caractéristiques topographiques et géographiques des stations comme variables indépendantes, tels que :

$$PB_{i,l} = \beta_{0,i,l} + \beta_{1,i,l} alt_1 + \beta_{2,i,l} lat_1 + \beta_{3,i,l} lon_1 + \varepsilon_{i,l} \quad 3.1$$

Où $\beta_{n,i,l}$ sont les coefficients de régression; alt, lat et lon sont l'altitude, la latitude et la longitude, respectivement des 10 stations voisines avec des observations du jour considéré et $\varepsilon_{i,l}$ est le terme d'erreur.

L'équation 3.1 de $PB_{i,l}$ ajustée aux moindres carrés, basée sur en fonction des données (journée humide ou sèche observée), codifiés comme une variable binomiale pour calculer la probabilité d'occurrence de précipitations le jour i et au lieu l.

Le MP est estimée au moyen d'un modèle de régression logistique multivariée quasi-binomiale utilisant les amplitudes des précipitations observées aux stations voisines:

$$MP_{i,l} = \beta_{4i,l} + \beta_{5i,l}alt_1 + \beta_{6i,l}lat_1 + \beta_{7i,l}lon_l + \varepsilon_{2i,l} \quad 3.2$$

où $\beta_{n_i,l}$ sont des coefficients de régression et $\varepsilon_{2i,l}$ est l'erreur associée à l'estimation de la magnitude des précipitations.

La valeur finale du RV est déterminée par la combinaison de PM et PB, en utilisant une valeur seuil de $BP_{i,l} \geq 0.5$ pour déterminer le jour pluvieux :

$$RV = \begin{cases} MP \forall BP \geq 0.5 \\ 0 \quad \forall BP < 0.5 \end{cases} \quad 3.3$$

Le seuil de 0,5 permet d'estimer la probabilité d'occurrence des jours de pluie prévus. Si la valeur PB est inférieure à 0,5, on considère que la journée est sèche dans un lieu donnée et le RV attribué est donc nul. Si, au contraire, le PB est supérieur ou égal à 0,5, on considère que la journée est humide et RV prendra la valeur PM prévue.

3.2.2 Test de contrôle de la qualité

Dans une seconde phase, ces RV trouvés ont été utilisés pour développer un test de contrôle de qualité, en comparant ceux-ci avec les données d'origine des précipitations journalières, afin de détecter et de supprimer les données suspectes (humide/sèche) et les valeurs aberrantes, qui répondent à l'un des cinq critères proposés par (Notivoli et al., 2016) :

- (1) QC.1, Données suspectes (conditions humides isolées): la valeur observée était au-dessus de zéro et toutes les 10 observations les plus proches étaient nulles;
- (2) QC.2, Zéro Suspect (condition sèche isolée): la valeur observée était égale à zéro et toutes les 10 plus proches observations étaient au-dessus de zéro;
- (3) QC.3, Valeur aberrante: l'ampleur de la valeur observée était 10 fois plus élevée ou plus basse que celle prédite par les 10 observations les plus proches;

(4) QC.4, Jour sec Suspect: la valeur observée était nulle, la probabilité de pluie était supérieure à 99%, et l'ampleur prédite était supérieure à 5 mm; et

(5) QC.5, Jour humide Suspect: valeur observée supérieure à 5 mm, la probabilité sèche était supérieure à 99% et l'ampleur prédite était inférieure à 0,1 mm,

Ces critères de contrôle de qualité sont appliqués à toutes les données observées avec la suppression des valeurs suspectes. Ce processus est répété en utilisant la base de données nettoyée de l'étape précédente jusqu'à ce qu'aucune autre observation ne soit détectée.

La figure 3.1 présente le schéma général du processus de contrôle de qualité.

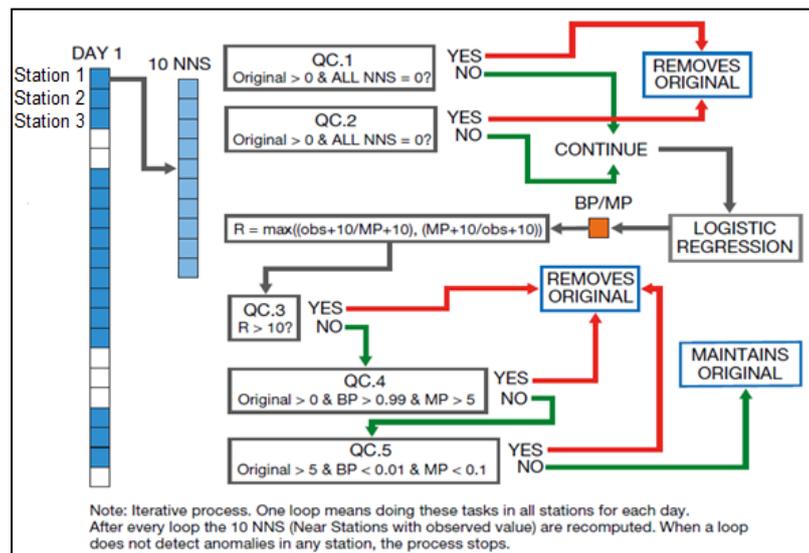


Figure 3.1 Processus de contrôle de qualité. BP: prédiction binomiale; MP: Prédiction de l'ampleur Source : (Serrano-Notivoli et al., 2017b)

3.3 Reconstruction des précipitations journalières manquantes

Dans une phase finale, les VR sont calculés à nouveau en utilisant comme point de départ la base de données corrigée des valeurs suspectes pour combler les lacunes manquantes dans la série,

Pour préserver les particularités de la série originale et éviter d'inclure l'inhomogénéité dans la dimension temporelle, une correction est nécessaire consistant à multiplier le RV par un coefficient de correction calculé comme le rapport entre les moyennes mensuelles des précipitations

journalières de toutes les valeurs observées Obs_m , et la moyenne des données prédites RV_m ,

Les coefficients de correction sont calculés pour chaque valeur mensuelle indépendamment pour éviter les biais dus à la variation saisonnière:

$$RV_{c_{i,m}} = RV_{i,m} \times (\overline{Obs_m}) / (\overline{RV_m}) \quad 3.4$$

Cela permet aux séries RV produites d'avoir la même moyenne que celle des données observées dans la série candidate.

3.4 Création du maillage

Dans cette étape, Pour calculer les bases de données au format grille, on applique la même procédure à un ensemble de paires de coordonnées régulièrement distribué.

Le processus de quadrillage était le même que celui utilisé pour remplir les valeurs manquantes dans les séries originales. À ce stade, les séries de données remplies ont été utilisées pour calculer le RV dans les nouveaux emplacements en utilisant leurs valeurs d'altitude, de latitude et d'altitude, Les amplitudes des précipitations à chaque emplacement ont été estimées en utilisant les mêmes 10 stations les plus proches chaque jour, de sorte qu'il n'était pas nécessaire d'effectuer une correction ultérieure (Serrano-Notivoli et al., 2017a).

3.5 Validation

La validation de la méthode de reconstruction pour objectif d'évaluer l'accord entre les observations enregistrées dans les séries des précipitations journalières réparties dans le NORD-EST algérien, durant la période entre 1970 et 2010 et les prédictions correspondantes, calculées pour chaque emplacement et temps des valeurs observées, sur la base de 3 analyses statistiques différentes :

Tel que MAE : l'erreur absolue moyenne est calculée comme la moyenne des différences absolues entre les valeurs prédites et observées, il fournit des informations sur l'ampleur des erreurs, quel que soit leur signe :

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |p_i - o_i| \quad 3.5$$

Où p est la valeur prédite, o est la valeur observée, et n est le nombre de cas,

Le ME : erreur moyenne est la moyenne des différences entre les valeurs prédites et observées, il donne aussi le biais (la tendance à la sous-estimation ou à la sur-prédiction):

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_i - o_i) \quad 3.6$$

Ces statistiques ont été appliquées d'une part aux valeurs journalières en divisant l'ensemble de la base de données (seules les observations supérieures à zéro) en déciles en fonction de la distribution des valeurs observées, et d'autre part aux valeurs mensuelles (en considérant uniquement les valeurs prédites pour les observations disponibles) de la méthodologie pour les précipitations.

Enfin, le rapport des moyennes (RM) et le rapport des écarts-types (RSD) ont été appliqués suivant les équations 3.11 et 3.12. Ces techniques renseignent sur le biais dans l'estimation de la moyenne et la variance des données, représentant la valeur 1 comme une série non biaisée :

$$RM = \frac{\bar{p}}{\bar{o}} \quad 3.7$$

$$RSD = \frac{\sigma_p}{\sigma_o} \quad 3.8$$

Où \bar{p} est la moyenne des estimations, \bar{o} est la moyenne des observations, σ_p est l'écart-type des prédictions, et σ_o est l'écart-type des observations.

Ces deux statistiques ont été appliquées uniquement aux totaux mensuels et annuels car la distribution des précipitations journalières est anormale, de sorte que ces techniques ne sont pas adéquates dans ce cas.

3.5.1 Validation du contrôle de la qualité

La procédure du contrôle a été utilisée pour améliorer la qualité et la cohérence des données pour l'ensemble des séries pluviométriques

utilisées, Les données d'origine ont été soumises à un contrôle de qualité et toutes les données suspectes ont été éliminées, Nous avons utilisé les observations journalières relatives un ensemble de 33 stations pluviométriques, bien que beaucoup d'entre elles avaient des séries de données courtes, Un pourcentage de 14,80 des lacunes dans les observations des précipitations journalières originales ont été marqué par le test de contrôle de qualité en moyenne annuelle de toutes les données, Après l'utilisation du test du contrôle de qualité, nous avons trouvé 18,58% des données lacunaires, ce qui signifie que le processus de contrôle de qualité a marqué et supprimé un rapport égal à 3,78%.

La figure 3.2 présente les données supprimées par critère, une augmentation des lacunes significatives a été observée durant la période 1995-1998, spécifiquement plus élevée durant l'année 1997 (6,7%), tandis que la plus faible en 1985 (3%).

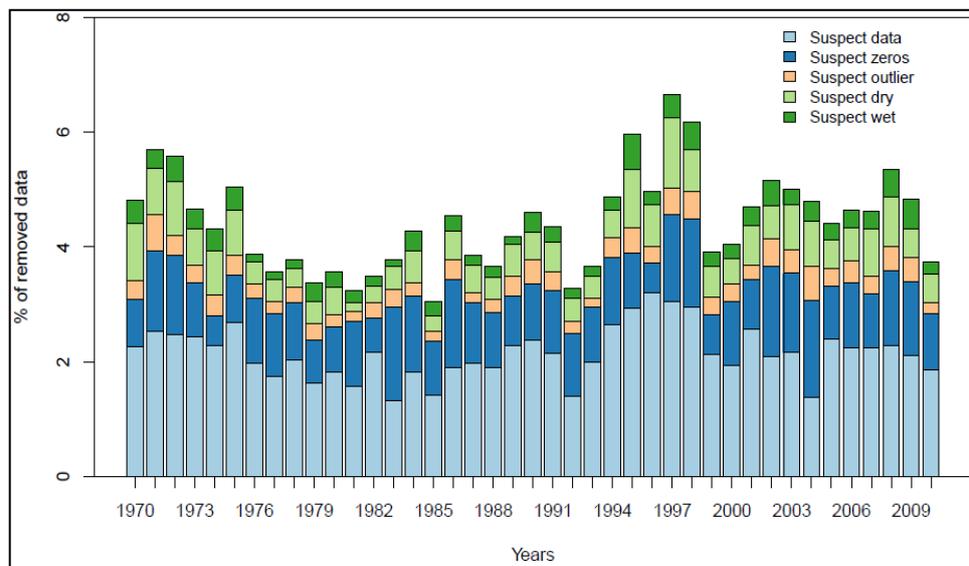


Figure 3.2 Suppression des données par critères (données suspectes, zéro suspect, valeur aberrante suspectée, jour sec suspect et jour humide suspect)

Les taux de rejet le plus élevé est trouvé dans le critère QC,1 des données suspectes surtout au cours de la période (1995-1998) et dans QC,2, Les valeurs suspectes des jours secs QC,4 sont plus fréquents que les valeurs suspectes des jours humides QC,5. Les faibles valeurs détectées représentaient les valeurs aberrantes QC,3.

L'ensemble des données originales comptait **421037** observations, De ce nombre, 323603 (76,85%) étaient des zéros, tandis que le nombre des données prévues était de 402357. Avec un nombre de zéros dans l'ensemble des données prédites finales égal à 324624 (80,68%), (Tableau 3.1). La somme totale des précipitations observées était de 633865,2 mm et les précipitations prévues sont égales à 633861,3 mm.

Tableau 3.1 Pourcentage des jours secs et humides observés et prévus

	Précipitation=0 mm	Précipitation > 0 mm	Total
Observés	76,85 %	23,15 %	100 %
Prévus	80,68 %	19,32 %	100 %

3.5.2 Validations de la méthode de reconstruction

3.5.2.1 Prévission jours secs/humides

Les résultats de comparaison des pourcentages de prédictions positives (humides) et négatives (sèches) sur les pourcentages des observations positives et négatives respectivement donnent des informations sur la précision de la prévision du jour humide et sec (tableau 3.2).

Tableau 3.2 Tableau de contingence avec le pourcentage de zéros vrai et faux des jours positifs (humides) et négatifs (secs), En gras la précision des vrais positifs

	Obs=0 mm	Obs>0 mm
Pred=0 mm	94,10%	25,08%
Pred>0 mm	5,90%	74,92%
Total	100%	100%

Un taux de 74,92 % de vrais positifs a été obtenu (Pred>0, Obs>0) représentant les Jours humides correctement prédits, Le taux des vrais négatifs (Pred=0, Obs=0) représente correctement les jours secs bien prédits qui étaient très élevés 94,10%, Les faux négatifs (prévision humide sur les jours secs) prédits incorrectement (Pred=0, Obs>0) et les faux positifs prédits incorrectement (Pred>0, Obs=0), représentent respectivement

undes taux de 25,08% et 5,90%, qui correspondent à la prévision des précipitations dans les jours avec de faibles quantités.

3.5.2.2 Estimation de l'amplitude

Une fois les données originales filtrées, nous les utilisons pour estimer les valeurs des précipitations (RV) des jours où la valeur est manquante, Pour valider les valeurs estimées convenant à chaque série, nous calculons également le RV pour ces jours avec des observations et nous les comparons, La figure 3,3 montre les diagrammes de dispersion et les coefficients de Pearson entre les valeurs observées et prédites basées sur les points des stations météorologiques utilisées et les agrégations journalières.

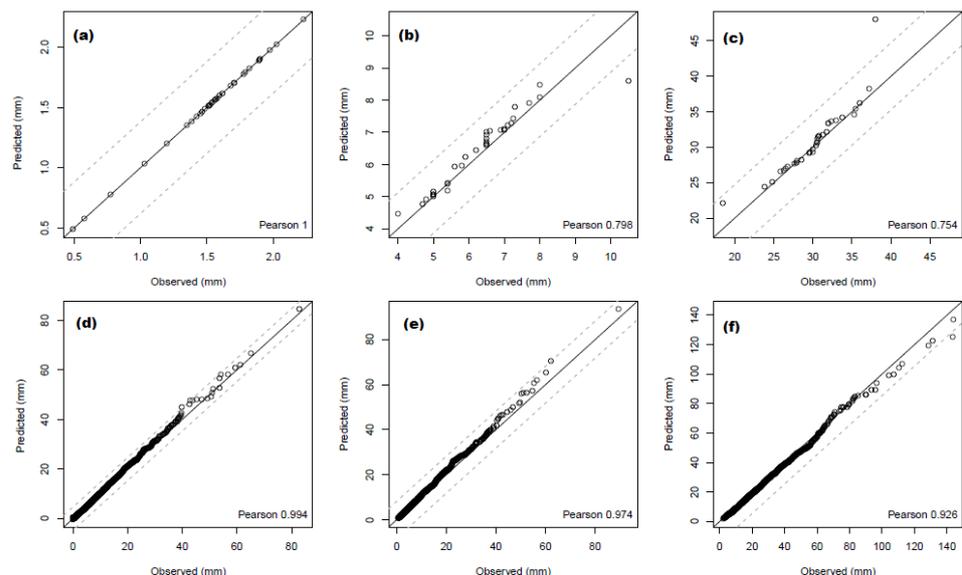


Figure 3.3. Diagramme de dispersion par des coefficients de corrélation de Pearson entre les observations et les estimations des précipitations journalières dans le NORD-EST de l'Algérie, (a) Moyens journalières par stations, (b) Moyens journalières par stations ne considérant que les jours de pluie, (c) 95e percentile des précipitations par stations ne considérant que les jours de pluie, (d) Moyens journalières des précipitations par jours, (e) Moyens journalières par jours en ne considérant que les jours de pluie, (f) 95e percentile des précipitations par jours en ne considérant que les jours de pluie.

En général, les diagrammes de dispersion présentent un très bon ajustement entre les valeurs prédites et observées. La figure (3.3a) montre une correspondance presque parfaite dans les précipitations moyennes journalières par station. Dans ce cas, la corrélation maximale est atteinte

entre les valeurs observées et les prédites (coefficient de Pearson=1), cependant, il y a une légère diminution des précipitations moyennes journalières par station pour les jours pluvieux, ainsi que dans le 95e percentile des précipitations par station pour les jours pluvieux, elles sont respectivement égales à 0,798 et 0,754 (figure 3,3b, 3,3c). En revanche, les valeurs du coefficient de corrélation de Pearson sur l'échelle journalière ont montré une meilleure concordance, soit 0,994, 0,974 et 0,926, respectivement, dans les moyennes journalières de précipitations par jour (sec et pluvieux), les moyennes journalières de précipitations par jour pluvieux, et le 95e percentile des précipitations par jour de pluie (figure 3,3d, 3,3e, 3,3f).

Tableau 3.3 Les statistiques de validation croisée (LOO-CV), qui montrent la qualité de l'ajustement entre les observations et les estimations d'agrégats mensuels, MAE: erreur absolue moyenne; ME: erreur moyenne; RM: rapport des moyennes; RSD: rapport des écarts types, coefficient de Pearson

Month	Range (mm)	MAE (mm)	ME (mm)	RM	RSD	Pearson
Jan	0 to 34,5	1,63	0,02	1	0,99	0,91
Fev	0 to 30,3	1,48	0,01	1	1,01	0,89
Mar	0 to 24,1	1,36	0,02	1	1,11	0,91
Avr	0 to 22,7	1,41	0,01	1	1,05	0,89
Mai	0 to 19,5	1,07	-0,02	0,99	1,08	0,87
Jui	0 to 10,5	0,53	0	1	1,1	0,85
Juil	0 to 4,2	0,13	-0,01	0,98	1,07	0,72
Aut	0 to 5,5	0,33	-0,02	0,96	1,06	0,75
Sep	0 to 17,8	1,11	0,08	1,03	1,14	0,84
Oct	0 to 27,1	1,46	0,02	1	1,07	0,86
Nov	0 to 29,9	1,51	0,03	1	1,05	0,93
Dec	0 to 38,9	1,69	-0,1	0,99	1,04	0,94

Le tableau 3.3 présente l'évaluation des agrégats mensuels des précipitations journalières. Les résultats ont montré un très bon accord entre les séries observées et prédites des précipitations journalières séparées par des agrégats mensuels avec des corrélations de Pearson supérieures à 0,84 presque parfaites durant tous les mois et diminuant un peu en été (Juil=0,72, Aut=0,75), La comparaison entre les valeurs observées

et estimées de RM et de RSD était proche de 1 dans tous les agrégats mensuels indiquant l'absence de biais systématiques dans les estimations, Cependant de très faibles valeurs de MAE ont également été trouvées ainsi que ME, Les mois d'été reçoivent généralement de faibles précipitations (la plupart d'entre elles sont nulles).

Tableau 3.4 Les statistiques de validation croisée (LOO-CV) montrant la qualité de l'ajustement entre les observations et les estimations des précipitations journalières séparées par les altitudes (m), N: nombre de stations; % OBS: pourcentage des précipitations observées,% PRE: pourcentage des précipitations prévues, MAE: erreur absolue moyenne; ME: erreur moyenne; RM: rapport des moyennes; RSD: rapport des écarts types.

Altitudes (m)	N	%OBS	%PRED	MAE	ME	RM	RSD
0-50	10	37,9	37	1,16	0	1	0,99
50-100	4	15,7	15,3	0,98	0	1	1
100-150	4	16,3	15,9	1,18	0	1	1
150-200	2	7,6	7,4	1,13	0	1	1
200-300	4	15,5	15,2	1,03	0	1	0,96
300-400	2	6,9	6,8	0,73	0	1	1,03
400-600	1	2,3	2,3	1,16	0	1	1,16
600-800	1	3,8	3,7	1,85	0	1	1,25
800-1000	5	4,9	4,8	0,85	0	1	1,13

La distribution des valeurs observées (% OBS) et prédites (% PRED) a montré aussi un très bon accord entre les séries observées et prédites des précipitations journalières séparées par des altitudes (tableau3.4). Le RM a montré l'absence de biais systématiques (valeurs=1) pour toutes les altitudes. On trouve le même cas pour le RSD avec des valeurs proches de 1 où l'on note l'existence d'aucune baie systématique dans la comparaison entre les valeurs observées et prédites par rapport aux altitudes, Les MAE ont présenté des valeurs proches de 1.

3.6 Conclusion

La reconstitution des séries climatiques historiques au pas de temps journalier suscite ces dernières années un intérêt croissant et nécessaire, qu'il s'agisse d'étudier la variabilité des climats du passé, de positionner le

changement climatique dans le long terme, ou encore d'améliorer la connaissance des épisodes extrêmes dans le cadre de la prévention des risques naturels. Le contrôle de qualité est probablement la phase la plus importante dans les procédures de reconstruction. Les résultats du processus de contrôle de qualité montrent que la période 1995-1998 a comporté le plus de données manquantes. Cette perte d'annuaire peut être due à un manque de sécurité durant la décennie noire (1990-2000) qu'a connue l'Algérie. Deuxièmement, les résultats de la validation de la méthode de reconstruction montrent une bonne concordance et cohérence entre les données observées et prédites dans l'estimation des amplitudes des précipitations, la comparaison entre les agrégats mensuels et la qualité de l'ajustement des précipitations journalières séparées par les altitudes. Cela est dû au processus de reconstruction appliqué qui sont créés à chaque jour et se placent indépendamment avec la conservation spatiale des caractéristiques de précipitations sur des jours différents.

Malgré cet avantage, certaines limites ont été trouvées dans l'évaluation des agrégats des précipitations mensuelles, qui ont montré une sous-estimation dans les mois d'été (juin-août), en raison du fait que cette période reçoit de petites quantités de précipitations dont la plupart d'entre elles sont nulles. L'évaluation des précipitations journalières par plages d'altitude a montré une légère sous-estimation dans les zones de haute altitude car il existe une grande différence dans la répartition spatiale des stations pluviométriques dans la zone d'étude, où les zones montagneuses sont caractérisées par une faible couverture spatiale des stations.

Enfin, un quadrillage de 1x1 km d'une résolution spatiale contenant pour chaque point, une série complète de données journalières des précipitations du 01/01/1970 au 31/12/2010, couvrant le NORD-EST algérien ont été créés. A partir de cette base spatiale et temporelle, l'analyse des indices des événements des précipitations extrêmes (chapitre 7) et leurs tendances temporelles (chapitre 8) sera évalué sur la base des précipitations journalières maillées de 1X1km réparties dans le NORD-EST de l'Algérie durant la période 1970-2010.

4 INDICES DES PRECIPITATIONS UTILISEES

4.1 La concentration des précipitations journalières (CI)

La méthodologie appliquée dans cette étude est proposée par (Martin-Vide, 2004). Sa base théorique est que la contribution des jours d'une pluviométrie donnée à la quantité totale est généralement réglable par une distribution exponentielle négative, ce qui signifie que peu de grandes quantités journalières de précipitations se produisent dans une période et le lieu donné (Brooks and Carruthers, 1953); (Martin-Vide, 2004). Il en est ainsi parce que, dans la classification et la tabulation des quantités journalières de précipitations par croissance, leurs fréquences absolues diminuent de façon exponentielle, en commençant par la classe la plus basse. Par conséquent, dans un lieu et une période donnés, la probabilité de petites quantités journalières de précipitation est supérieure à celle des grandes quantités journalières. En fait, ces grandes quantités journalières limitées de précipitations ont un plus grand potentiel d'affecter l'entrée hydrologique. Pour évaluer à la fois l'impact des différentes valeurs des précipitations journalières et la contribution de la plus grande valeur de précipitation à la valeur totale des précipitations, les pourcentages cumulés de précipitations (Y) ont contribué par les pourcentages cumulés de jours (X) durant l'apparition de Y ont été analysés (Riehl, 1949) ; (Olascoaga, 1950);(Martin-Vide, 2004); (Zhang et al., 2009). Le principe de calcul de cet indice sera illustré par un exemple (tableau 4.1), les données de la station de Nechmaya pour la période allant de 1970 à 2010 ont été utilisées, Cette station météorologique ne montre pas des valeurs élevées journalières des précipitations et, par conséquent, leur distribution de fréquence peut être présentée dans un tableau de longueur modéré.

MARTIN-VIDE (2004) Introduit la procédure de calcul comme suit :

Dans la première colonne du tableau 4,1, une limite de 0,1 mm/j a été utilisée pour séparer les jours humides et secs, et les quantités pluviométriques journalières de chaque station sont divisées en plusieurs classes avec des intervalles de 1 mm (dans un ordre croissant) pour classer les valeurs des précipitations, la seconde colonne montre leur milieu ou centre de classe, Dans la troisième colonne (Ni) le nombre de jours des précipitations enregistrées dans chaque classe, ou la fréquence absolue, est listée, La quatrième colonne représente les fréquences cumulées des jours pluvieux (ΣNi), qui sont obtenues en additionnant les fréquences absolues de toutes les classes (la dernière valeur de cette colonne est la même que le nombre total des jours pluvieux). La cinquième colonne est le total des précipitations pour chaque classe P_i , il est obtenu en multipliant la valeur de N_i correspondante par le milieu. Le total des précipitations accumulées (ΣP_i), dans la sixième colonne, est obtenu par additionner les valeurs de la colonne précédente, la valeur de la dernière classe est la précipitation totale de 9501,65 mm enregistré dans la période d'étude (1970-2010). Enfin, dans la septième et la huitième colonne, les pourcentages des valeurs des quatrième et sixième colonnes, en ce qui concerne les valeurs des dernières rangées, respectivement $\Sigma Ni (\%) = \Sigma X$ et $P_i (\%) = Y$, Les deux dernières colonnes peuvent être interprétées comme suit: près d'un tiers des jours de pluie (30,76%), de 0,9mm avec ou moins, ne représentent que 2,12% du total des précipitations accumulées.

Tableau 4.1 Distribution des fréquences dans les classes de 1 mm, fréquences cumulées relatives X et les pourcentages correspondants des précipitations totales Y à Nechmaya (1970–2010)

Classe	milieu	Ni	ΣNi	P_i	ΣP_i	$\Sigma Ni(\%)=X_i$	$\Sigma P_i(\%)=Y_i$
0,1-0,9	0,5	403	403	201,5	201,5	30,76	2,12
1-1,9	1,5	144	547	208,8	410,3	41,76	4,32
2-2,9	2,5	94	641	230,3	640,6	48,93	6,74
3-3,9	3,5	69	710	238,05	878,65	54,2	9,25
4-4,9	4,5	65	775	289,25	1167,9	59,16	12,29
5-5,9	5,5	56	831	305,2	1473,1	63,44	15,5
6-6,9	6,5	53	884	341,85	1814,95	67,48	19,1
7-7,9	7,5	46	930	342,7	2157,65	70,99	22,71

8-8,9	8,5	26	956	219,7	2377,35	72,98	25,02
9-9,9	9,5	31	987	292,95	2670,3	75,34	28,1
10-10,9	10,5	36	1023	376,2	3046,5	78,09	32,06
11-11,9	11,5	22	1045	251,9	3298,4	79,77	34,71
12-12,9	12,5	22	1067	273,9	3572,3	81,45	37,6
13-13,9	13,5	17	1084	228,65	3800,95	82,75	40
14-14,9	14,5	22	1106	317,9	4118,85	84,43	43,35
15-15,9	15,5	22	1128	339,9	4458,75	86,11	46,93
16-16,9	16,5	20	1148	329	4787,75	87,63	50,39
17-17,9	17,5	19	1167	331,55	5119,3	89,08	53,88
18-18,9	18,5	12	1179	221,4	5340,7	90	56,21
19-19,9	19,5	10	1189	194,5	5535,2	90,76	58,26
20-20,9	20,5	16	1205	327,2	5862,4	91,98	61,7
21-21,9	21,5	9	1214	193,05	6055,45	92,67	63,73
22-22,9	22,5	10	1224	224,5	6279,95	93,44	66,09
23-23,9	23,5	3	1227	70,35	6350,3	93,66	66,83
24-24,9	24,5	9	1236	220,05	6570,35	94,35	69,15
25-25,9	25,5	5	1241	127,25	6697,6	94,73	70,49
26-26,9	26,5	1	1242	26,45	6724,05	94,81	70,77
27-27,9	27,5	4	1246	109,8	6833,85	95,11	71,92
28-28,9	28,5	3	1249	85,35	6919,2	95,34	72,82
29-29,9	29,5	4	1253	117,8	7037	95,65	74,06
30-30,9	30,5	9	1262	274,05	7311,05	96,34	76,95
31-31,9	31,5	4	1266	125,8	7436,85	96,64	78,27
32-32,9	32,5	2	1268	64,9	7501,75	96,79	78,95
33-33,9	33,5	1	1269	33,45	7535,2	96,87	79,3
34-34,9	34,5	2	1271	68,9	7604,1	97,02	80,03
35-35,9	35,5	3	1274	106,35	7710,45	97,25	81,15
37-37,9	37,5	1	1275	37,45	7747,9	97,33	81,54
38-38,9	38,5	3	1278	115,35	7863,25	97,56	82,76
39-39,9	39,5	2	1280	78,9	7942,15	97,71	83,59
40-40,9	40,5	6	1286	242,7	8184,85	98,17	86,14
41-41,9	41,5	4	1290	165,8	8350,65	98,47	87,89
42-42,9	42,5	2	1292	84,9	8435,55	98,63	88,78
45-45,9	45,5	2	1294	90,9	8526,45	98,78	89,74
46-46,9	46,5	1	1295	46,45	8572,9	98,85	90,23
48-48,9	48,5	1	1296	48,45	8621,35	98,93	90,74
50-50,9	50,5	1	1297	50,45	8671,8	99,01	91,27
51-51,9	51,5	1	1298	51,45	8723,25	99,08	91,81

52-52,9	52,5	1	1299	52,45	8775,7	99,16	92,36
53-53,9	53,5	2	1301	106,9	8882,6	99,31	93,48
54-54,9	54,5	1	1302	54,45	8937,05	99,39	94,06
55-55,9	55,5	1	1303	55,45	8992,5	99,47	94,64
56-56,9	56,5	1	1304	56,45	9048,95	99,54	95,24
58-58,9	58,5	1	1305	58,45	9107,4	99,62	95,85
61-61,9	61,5	1	1306	61,45	9168,85	99,69	96,5
72-72,9	72,5	1	1307	72,45	9241,3	99,77	97,26
78-78,9	78,5	1	1308	78,45	9319,75	99,85	98,09
89-89,9	89,5	1	1309	89,45	9409,2	99,92	99,03
92-92,9	92,5	1	1310	92,45	9501,65	100	100
Somme		1310		9501,65			

Ces résultats donnent la représentation graphique représentée dans la figure 4,1, qui se traduit par un polygone exponentiel nettement positif, appelé courbe de concentration, Il présente le pourcentage cumulé des jours pluvieux (l'avant dernière valeur de la colonne du tableau 4,1, $(\sum Ni\%=Xi)$), est tracée en fonction du pourcentage cumulé des quantités des précipitations (dernière colonne, $\sum Pi\%=Yi$).

Les travaux de (Riehl, 1949) ; (Olascoaga, 1950) et (Martin-Vide, 2004) montrent que de telles fonctions sont du type :

$$Y = aX * \exp(bX) \quad 4.1$$

Où a et b étant des constantes, ils ont été déterminés par la méthode des moindres carrés, proposée dans les équations, (4.2) et (4.3)

$$\ln a = \frac{\sum X^2 \sum \ln Y + \sum X \sum X \ln X - \sum X^2 \sum \ln X - \sum X \sum X \ln Y}{N \sum X^2 - (\sum X)^2} \quad 4.2$$

$$b = \frac{N \sum X \sum \ln Y + \sum X \sum \ln X - N \sum X \ln X - \sum X \sum \ln Y}{N \sum X^2 - (\sum X)^2} \quad 4.3$$

Sachant que N est le nombre de classes non nulles, Après avoir déterminé les deux constantes a et b , l'intégrale définie de la courbe exponentielle entre 0 et 100 montre l'aire sous la courbe, qui est donnée par la formule ci-dessous :

$$s = \left[\frac{a}{b} e^{bx} \left(x - \frac{1}{b} \right) \right]_0^{100} \quad 4.4$$

Le calcul de la surface S' délimitée par la courbe exponentielle et la ligne de l'équidistribution (figure 4.1) est la différence entre 5000 (triangle inférieure) et la valeur donnée par l'équation 4.5

$$S' = 5000 - S \quad 4.5$$

Le calcul de l'indice de concentration des précipitations journalières (CI) s'effectue à l'aide de la formule suivante :

$$CI = S' / 5000 \quad 4.6$$

A noter que la valeur de CI est la fraction entre S' et de la surface du triangle inférieure.

Dans le cas de Nechmaya (NE), L'application des formules (4.2), (4.3) et (4.6) donne les résultats suivants:

$a = 0,0200$; $b = 0,0384$ et $CI = 0,64$,

La courbe de concentration de la station de Nechmaya est présentée dans la figure 4.1. Cette station présente une concentration des précipitations journalières élevée parmi celles qui ont été analysées.

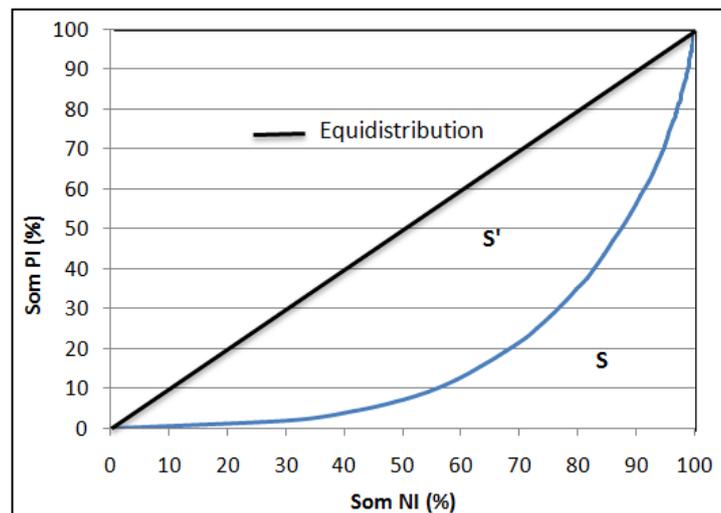


Figure 4.1 Courbe de concentration normalisée (précipitations cumulées (Pi) en % apportées par les jours de pluie cumulés (Ni) en %) à la station de Nechmaya

La ligne d'équidistribution (c'est un cas idéal) où la distribution des précipitations journalières est parfaite, La concentration (ou irrégularité journalière) peut être considérée comme une fonction de la séparation relative de la ligne d'équidistribution.

Il faut noter que dans la station de Nechmaya, 10% des jours pluvieux représentent 53% du volume total (90% des jours restants représentent 47%).

À travers les courbes de concentration exponentielles, le taux des précipitations apporté par 25 % des jours pluvieux, à savoir ceux avec les plus grandes quantités est calculé dans le Tableau 6.1.

4.2 La concentration des précipitations mensuelles (PCI)

L'hétérogénéité et la saisonnalité de la pluviométrie mensuelle a été étudiée en utilisant l'indice de concentration des précipitations mis au point par (Oliver, 1980), Il a appliqué et testé l'efficacité de cet indice aux États-Unis, en Afrique et en Australie. Selon son étude, une répartition uniforme de la pluie au cours de l'année hydrologique est indiquée par une valeur faible de l'indice par contre une valeur élevée est synonyme d'une grande saisonnalité, Il se calcule selon l'équation 4.7 :

$$PCI = 100 * \frac{\sum_{i=1}^{12} P^2 i}{(\sum_{i=1}^{12} P i)^2} \quad 4.7$$

Où P_i est la quantité des précipitations du mois i , calculée pour chacun des pluviomètres et pour chaque année de la période d'étude,

Selon la formule proposée, la valeur théorique la plus basse de PCI est 8.3, indiquant l'uniformité parfaite de la distribution des précipitations (c'est-à-dire que la même quantité des précipitations se produit chaque mois de l'année), (Oliver, 1980) est arrivé à la conclusion qu'un PCI inférieur à 10 indique une répartition uniforme des précipitations tout au long de l'année (par exemple, la concentration des précipitations faible), une valeur de 11 à 15 dénote d'une concentration des précipitations modérée, une valeur entre 16 et 20 indique une distribution des précipitations saisonnière, Un indice supérieur à 20 représente de forts effets saisonniers, Selon (Lujan and Gabriels, 2005), lorsque les précipitations de chaque mois de l'année sont les mêmes, cet indice est égal à 8,3, Si toutes les précipitations de l'année se produisent dans un seul mois, le PCI est égal à 100.

4.3 L'agressivité des précipitations (MFI)

L'agressivité des précipitations est calculée par l'indice de Fournier modifié MFI de (Arnoldus, 1980) à partir des quantités des précipitations mensuelles de chaque année individuelle et en moyenne sur un certain nombre d'années. Cet indice est souvent utilisé pour évaluer l'agressivité des précipitations et ses effets sur l'érosion des sols (LUIS et al., 2010).

Il peut être calculé selon l'équation suivante :

$$MFI = \sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{P_t} \quad 4.8$$

Avec P_i étant la précipitation mensuelle du mois i , et P_t la précipitation annuelle.

Il indique l'impact concentré d'eau de pluie sur l'érosion des sols. Plus il croît plus l'abondance saisonnière des pluies augmente (Abd Elbasit et al., 2013), le MFI est réparti en 5 classes: la classe du MFI comprise entre 0 et 60 est définie comme un indicateur très faible de l'agressivité, de 60 à 90 elle indique une érosivité faible, la valeur de 90 à 120 dénote d'une érosivité modérée, de 120 à 160, on assiste à une agressivité forte des précipitations, et plus de 160, le MFI indique une agressivité des précipitations très élevée (Apaydin et al., 2006).

4.4 Précipitations extrêmes journalières

Dans le présent travail, 10 indices de précipitations extrêmes sont utilisés (tableau 4.2). Ces indices peuvent être classés en deux groupes: un groupe mesure la profondeur des précipitations (mm) ou l'intensité (mm / jour) (PRCPTOT, SDII, R95P, R99P, RX1day et RX5day) et l'autre calcule la fréquence (nombre de cas) de l'indice dépassant ou ne dépassant pas son seuil défini (CDD, CWD, R10mm, R20mm), et peuvent être divisés en 5 catégories différentes (Alexander et al., 2006):

- Indices basés sur les centiles comprennent : les totaux des précipitations journalières au-dessus du 95^{ème} centile (jours très humides (R95p)) et du 99^{ème} centile (jours extrêmement humides (R99p))
- Indices absolus représentant les valeurs maximales ou minimales au cours d'une saison ou d'une année, Ils comprennent la quantité maximale des précipitations sur 1 jour (RX1) et la quantité maximale des précipitations sur 5 jours, (RX5).
- Indices de seuil définis comme le nombre de jours pendant lesquels une valeur des précipitations tombe au-dessus ou en dessous d'un seuil fixe, y compris le nombre de jours de fortes précipitations > 10 mm (R10) et nombre de jours de très fortes précipitations > 20 mm (R20).
- Indices de durée définissant des périodes d'humidité des jours secs consécutifs (CDD) et les jours de pluie consécutifs (CWD).
- D'autres indices utilisées comme indice des précipitations annuelles totales (PRCPTOT), indice d'intensité journalière simple (SDII), Ils n'entrent dans aucune des catégories ci-dessus, mais leurs changements pourraient avoir des impacts sociétaux importants.

Cette sélection nous fournit une information diversifiée concernant la caractérisation actuelle de la quantité, intensité, des fréquences, la longueur des séquences sèches, et humides et l'occurrence des précipitations extrêmes, Ils sont également utiles pour évaluer l'impact possible des changements climatiques ou des anomalies climatiques sur les activités régionales liées à l'agriculture, à l'économie, au développement social et à d'autres secteurs.

Tableau 4.2 Les indices des précipitations extrêmes calculés sur un ensemble de données quadrillées journalière

Indices	Noms de l'indice	Définition	Unités
RX1day	Cumul maximal des précipitations d'un jour	Précipitations mensuelles maximales sur 1 jour	mm
RX5day	Cumul maximal des précipitations sur 5 jours	Précipitations mensuelles maximales sur 5 jours consécutives	mm
SDII	Intensité simple des pluies	Précipitations totales annuelles divisées par le nombre de jours pluvieux (définis comme	mm/ jour

		RR ≥ 1) dans l'année	
R10mm	nombre de jours de fortes précipitations	Nombre annuel de jours où RR ≥ 10 mm	jour
R20mm	nombre de jours de très fortes précipitations	Nombre annuel de jours où RR ≥ 20 mm	jour
CDD	Jours secs consécutifs	Nombre maximum de jours consécutifs avec RR < 1 mm	jour
CWD	Jours pluvieux consécutifs	Nombre maximum de jours consécutifs avec RR ≥ 1 mm	jour
R95p	Jours très pluvieux	Précipitations totales annuelles lorsque RR $>$ 95e percentile	mm
R99p	Jours extrêmement pluvieux	Précipitations totales annuelles lorsque RR journalière $>$ 99e percentile	mm
PRCPTOT	Précipitations annuelles totales des jours pluvieux	Précipitations totales annuelles des jours pluvieux lorsque RR ≥ 1 mm	mm

RR précipitations journalières: une journée pluvieuse est définie lorsque RR ≥ 1 mm et une journée sèche lorsque RR < 1 mm.

En utilisant comme base le maillage journalière des précipitations d'une résolution 1x1 km couvrant le NORD-EST algérien (chapitre 3), les 10 indices proposés ont été calculés pour tous les points.

1. Rx1: Précipitations mensuelles maximales sur 1 jour.

Soit RR_{ij} la quantité journalière des précipitations de jour i de la période j . La valeur maximale sur 1 jour pour la période j est:

$$Rx1_j = \max(RR_{ij}) \quad 4.9$$

2. Rx5 : Précipitations mensuelles maximales consécutives sur 5 jours,

Soit RR_{kj} la quantité des précipitations pour l'intervalle de 5 jours k de période j , où k est défini comme le dernier jour de l'intervalle, la quantité maximale de précipitations en cinq jours pour la période j est:

$$Rx5_j = \max(RR_{kj}) \quad 4.10$$

3. SDII : Indice d'intensité simple,

Soit RR_{wj} la quantité des précipitations journalières les jours de pluie, w ($RR \geq 1$ mm) dans la période j , Si W représente le nombre de jours de pluie en j , alors:

$$SDII_j = \frac{\sum_{w=1}^W RR_{wj}}{W} \quad 4.11$$

4. R10mm : Nombre annuel de jours où $PRCP \geq 10$ mm,

Soit RR_{ij} la quantité des précipitations journalières le jour i de la période j , On compte le nombre de jours où:

$$RR_{ij} \geq 10 \text{ mm} \quad 4.12$$

5. R20mm : Nombre annuel de jours où $PRCP \geq 20$ mm : Soit RR_{ij} la quantité des précipitations journalières le jour i de la période j , On compte le nombre de jours où:

$$RR_{ij} \geq 20 \text{ mm} \quad 4.13$$

6. CDD : Durée maximale de la période sèche, nombre maximal de jours consécutifs avec $RR < 1$ mm

Soit RR_{ij} la quantité des précipitations journalières le jour i de la période j , On compte le plus grand nombre de jours consécutifs où:

$$RR_{ij} < 1 \text{ mm} \quad 4.14$$

7. CWD : Durée maximale de la vague de pluie, nombre maximal de jours consécutifs avec $RR \geq 1$ mm,

Soit RR_{ij} la quantité des précipitations journalières le jour i de la période j , On compte le plus grand nombre de jours consécutifs où:

$$RR_{ij} \geq 1 \text{ mm} \quad 4.15$$

8. R95p : $PRCP$ annuel total lorsque $RR > 95$ p,

Soit RR_{wj} la quantité des précipitations journalières d'un jour de pluie w ($RR \geq 1,0$ mm) dans la période i et soit $RR_{wn}95$ le 95^e centile des précipitations des jours de pluie pendant une période, Si W représente le nombre de jours de pluie dans la période, alors:

$$R95_{pj} = \sum_{w=1}^W RR_{wj} \text{ where } RR_{wj} > RR_{wn}95 \quad 4.16$$

9. R99p : PRCP annuel total lorsque RR > 99p,

Soit RR_{wj} la quantité des précipitations journalières d'un jour de pluie w ($RR \geq 1,0$ mm) dans la période i et soit RR_{wn99} le 99^e centile des précipitations des jours de pluie pendant une période, Si W représente le nombre de jours de pluie dans la période, alors:

$$R99_{pj} = \sum_{w=1}^W RR_{wj} \text{ where } RR_{wj} > RR_{wn99} \quad 4.17$$

10. PRCPTOT : Précipitations totales annuelles en jours de pluie,

Soit RR_{ij} la quantité journalière des précipitations le jour i de la période j , Si l'on représente le nombre de jours en j , alors :

$$PRCPTOT_j = \sum_{i=1}^I RR_{ij} \quad 4.18$$

4.5 Le test de Mann-Kendall

L'analyse des tendances a prouvé être un outil utile pour la planification efficace des ressources en eau, la conception et la gestion des ouvrages hydrauliques. La détection des tendances des variables hydrologiques comme le courant d'écoulement et les précipitations fournit une information utile sur la possibilité de changer la tendance des variables dans le temps. Le test MK est un test statistique non paramétrique (Mann, 1945); (Kendall, 1975), Il est l'un des tests les plus couramment appliquées pour détecter les tendances dans les séries chronologiques hydrologiques (Yue and Wang, 2004) et dans plusieurs indices liées aux précipitations et de tester leur signification, Il est fortement félicité pour l'usage général par l'Organisation météorologique mondiale (ONM) (Huang et al., 2014).

Il permet aussi d'examiner l'existence d'une tendance linéaire (à la hausse ou à la baisse) sur une série chronologique, L'hypothèse H_0 testée est « il n'y a pas de tendance », Si $p < \alpha$, seuil de significativité choisi. L'hypothèse H_0 est ainsi rejetée et on conclut à l'existence d'une tendance significative, au seuil choisi, La robustesse du test a été validée par plusieurs essais de comparaison effectués par (Yue and Wang, 2004),

Le paramètre statistique, S de M-K est défini comme suit :

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(X_j - X_i) \quad 4.19$$

Où X_j sont les valeurs séquentielles de données, n est égal à la longueur de l'ensemble des données, et

$$\text{sgn}(X_j - X_i) = \begin{cases} +1, X_j > X_i \\ 0, X_j = X_i \\ -1, X_j < X_i \end{cases} \quad 4.20$$

Il a été prouvé que lorsque $n \geq 8$, (S) suit approximativement une distribution normale avec la moyenne égale à 0 et la variance comme suit:

$$V(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^n t_i i(i-1)(2i+5)}{18} \quad 4.21$$

Où t_i est le nombre de périodes de mesure i,

La statistique normalisée (Z) du test MK et le P-valeur correspondant à (P) pour le test unilatéral sont respectivement donnés par

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad 4.22$$

$$p = 0,5 - \phi(|Z|) \quad 4.23$$

$$(\phi(|Z|) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{|Z|} e^{-\frac{t^2}{2}} dt) \quad 4.24$$

Si la valeur de p est assez petit, la tendance est tout à fait improbable d'être causée par un échantillonnage au hasard, Une Valeur positive de Z indique une tendance à la hausse, et une valeur négative de Z indique une tendance à la baisse, tandis qu'une valeur de zéro de Z indique l'absence de tendance, Au niveau de signification de 0,05, si $p \leq 0,05$, puis la tendance actuelle est considérée comme statistiquement significative.

Pour réaliser cette analyse, le programme de MAKESENS (Salmi, 2002) est utilisé pour le calcul du test de Mann-Kendall.

4.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons utilisé l'indice de la concentration des précipitations journalières (CI), mensuelles (PCI) et de l'indice de Fournier modifié (MFI) pour évaluer l'irrégularité, la saisonnalité et l'agressivité des précipitations respectivement.

Nous avons également utilisé 10 indices des précipitations extrêmes qui sont de plus en plus recommandés pour les analyses des extrêmes climatiques, basé sur des données journalières mis au point par l'équipe d'experts sur la détection des changements climatiques et les indices (ETCCDI), qui nous fournit une information diversifiée concernant la caractérisation actuelle de l'ampleur (PRCPTOT), intensité des précipitations (SDII), des fréquences (R10mm, R20mm), la longueur des séquences sèches (CDD), et humides (CWD) et l'occurrence des précipitations extrêmes (Rx1, Rx5, R95p, R99p).

La possibilité de détection du changement dans la hausse ou à la baisse de ces indicateurs est vérifiée par le test Mann-Kendall qui est recommandé par l'Organisation météorologique mondiale (OMM).

Partie 2

- 5 VARIABILITE SPATIO-TEMPORELLE DES PRECIPITATIONS ANNUELLES ET SAISONNIERES DANS LE NORD-ESTALGERIEN (1970-2010)

- 6 VARIABILITE ET TENDANCES SPATIALE DE LA CONCENTRATION ET L'AGRESSIVITE DES PRÉCIPITATIONS

- 7 EVALUATIONS DES PRECIPITATIONS EXTREMES JOURNALIERES

- 8 EVOLUTION TEMPORELLE ET TENDANCE DES PRECIPITATIONS EXTREMES

5 VARIABILITE SPATIO-TEMPORELLE DES PRECIPITATIONS ANNUELLES ET SAISONNIERES DANS LE NORD-ESTALGERIEN (1970-2010)

5.1 Introduction

L'étude de la variabilité des précipitations à différentes échelles est importante pour les projets de développement en agriculture et en aménagement hydraulique. Bien que ce travail se concentre sur l'étude des précipitations journalières, il fournit en premiers lieu les variations annuelles et saisonnières durant la période 1970-2010 dans le NORD-EST algérien considérés comme essentielles pour la compréhension ultérieure des taux de précipitations journalières et extrêmes.

Afin de valoriser les résultats obtenus, nous avons réalisé des cartes pluviométriques de la région d'étude à l'aide le logiciel Arc Gis, en utilisant la méthode d'interpolation de Pondération par Distance inverse (IDW) qui nous a donné une meilleure analyse spatiale des valeurs mesurées par rapport aux valeurs interpolées.

5.2 Précipitations annuelles

5.2.1 Variabilité spatiale des précipitations annuelles

Les précipitations à l'échelle annuelle dans le NORD-EST algérien (1970-2010) montrent une transition des valeurs les plus élevées dans la région côtière du NORD au plus bas au SUD de la région d'étude. Elles présentent une importante répartition irrégulière allant en moyenne de 410 à 1124 mm (figure 5.1). La région orientale (Côtiers Constantinois-EST) a enregistré des valeurs de précipitations annuelles élevées, particulièrement dans le Lac des Oiseaux, Bouhadjar, Bouteldja, Ain Assel, Cheffia et Roum Souk où elles atteignent 860 mm. La station d'Ain Charchar dans les cotiers-centre présente aussi des valeurs élevées des précipitations. La station de Mechroha a enregistré des précipitations maximales atteignant 1124mm.

La décennie 2000 connaît des précipitations maximales enregistrées dans 16 stations pluviométriques. Les stations de Mechroha et Bouteldja enregistrent les cumuls maximaux annuels qui atteignent 1725 mm et 1409 mm respectivement identifié durant les années 2002 et 2004. Une diminution des précipitations est également détectée dans 17 stations pluviométriques pendant l'année 1996 spécialement à BorjSabath qui atteint une valeur minimale égale à 135 mm.

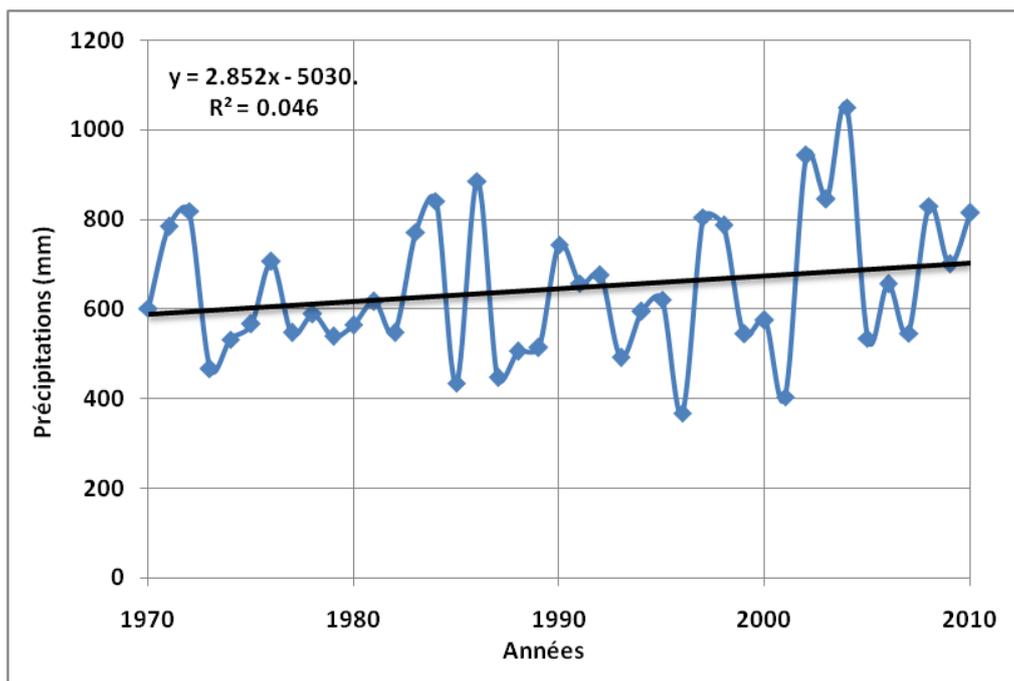


Figure 5.2 Evolution temporelle des précipitations annuelles moyennes dans l'ensemble des stations pluviométriques du NORD-EST algérien (1970-2010)

La distribution spatiale des tendances des précipitations moyennes annuelles est illustrée dans la figure 5.3 au niveau de 95%.

La tendance à la hausse non significative est présente dans 75% des stations pluviométriques, réparties dans la majorité de la région d'étude. Une augmentation significative est détectée dans les stations d'Ain Charchar et Emdjaz Chich à l'OUEST ainsi que dans la station d'El Kerma dans les basses plaines, Cependant, la réduction des précipitations est détectée dans seulement 4 stations pluviométriques: Azzaba, Helio Polis, Kef Mourad et Ain Kerma, La seule station de Roum Souk montre une diminution significative au niveau de signification égal à 95%.

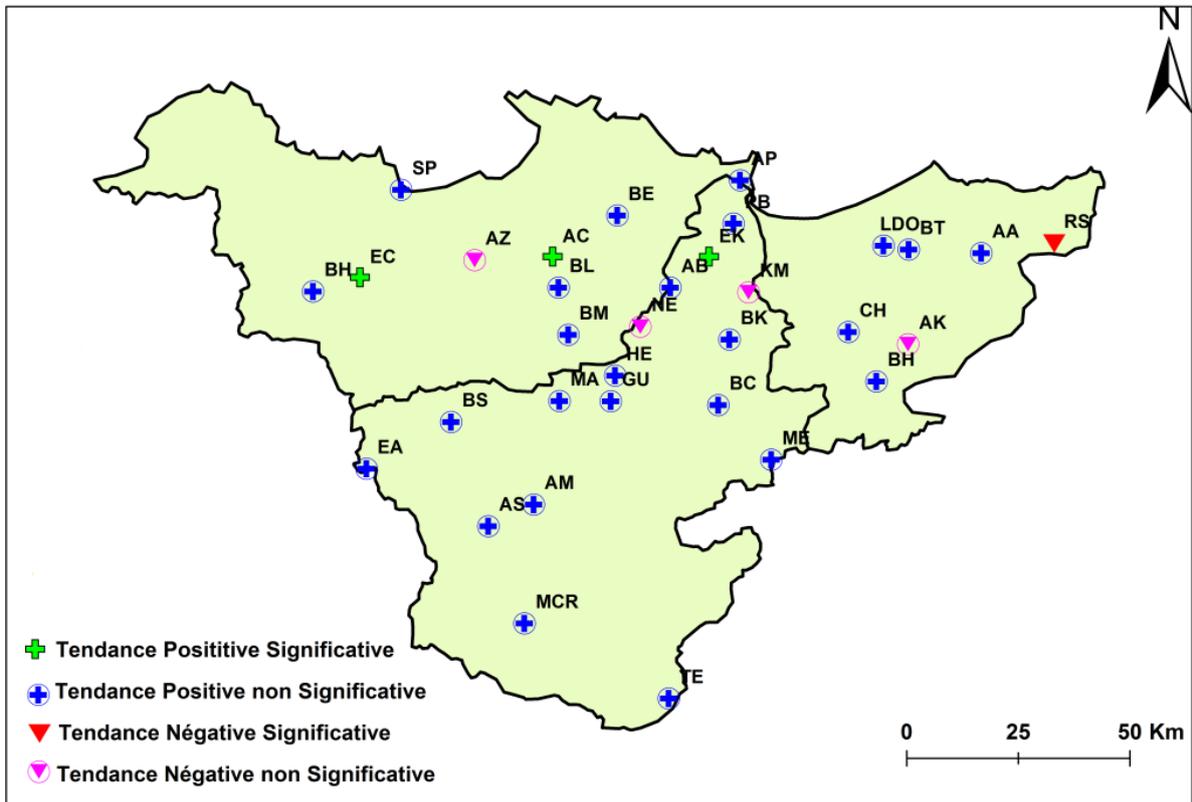


Figure 5.3 Tendance des précipitations moyennes annuelles dans le NORD-EST algérien (1970-2010)

5.3 Précipitations saisonnières

L'importance de la variation saisonnière des précipitations, concorde avec son rôle primordial régisseur des secteurs sensibles tels que: les activités agricoles et le mode de vie. Une meilleure compréhension de cette variabilité permettrait une amélioration de la gestion des risques induits par cette dernière et de bien gérer les ressources en eau et la production agricole.

5.3.1 Variabilité spatiale des précipitations saisonnières

La figure 5.4 illustre la distribution en pourcentage des précipitations saisonnières et mensuelles dans toutes les stations pluviométriques utilisées durant la période d'étude, La répartition saisonnière dans le NORD-EST algérien est marquée par la prédominance des précipitations d'hiver avec un pourcentage de 42% des précipitations totales. Les saisons d'automne et de printemps enregistrent chacune 27% avec un minimum

pluviométrique assez net aux mois de Septembre et Mai. Tandis que les mois de Décembre et Janvier ont les plus arrosés. La période chaude d'été présente une faible quantité égale à 4% des précipitations moyennes totales durant la période 1970-2010. Le mois de Juillet est défini comme le plus sec avec un pourcentage égal à 0,5% durant cette saison.

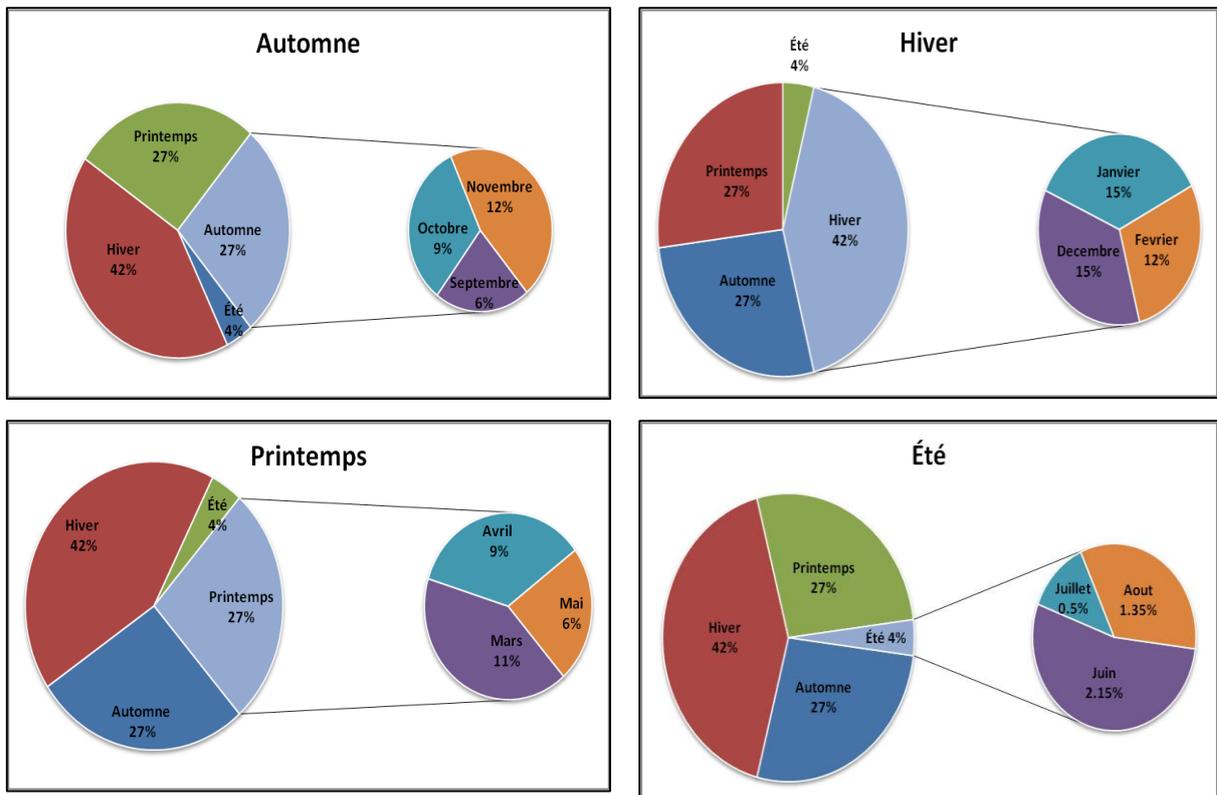


Figure 5.4 Répartition en % des précipitations saisonnières et mensuelles dans les stations pluviométriques utilisées dans le NORD-EST algérien (1970-2010)

L'analyse spatiale des précipitations saisonnières moyennes présentent une dissymétrie entre les différentes stations pluviométriques du NORD-EST algérien. L'hiver est la saison la plus pluvieuse dans presque tout le territoire (figure 5.5). Le schéma spatial observé est très semblable aux totaux annuels moyens des précipitations. Il présente un gradient croissant du SUD vers le NORD, avec un maximum principal au niveau du littoral spécialement à l'est de la région d'étude dans les stations de Bouteldja, Ain Assel et Roum Souk, et dans le SUD-EST à Machroha, étant le plus étendu avec des valeurs supérieures allant jusqu'à 400 mm, coïncidant avec les valeurs les plus élevées de précipitations annuelles, Les valeurs minimales se sont produites

dans les hautes plaines de la Seybouse spécialement à El Aria, Ain Snob, Mta Chikh Rabah et Terraguelt avec des valeurs inférieures à 220 mm.

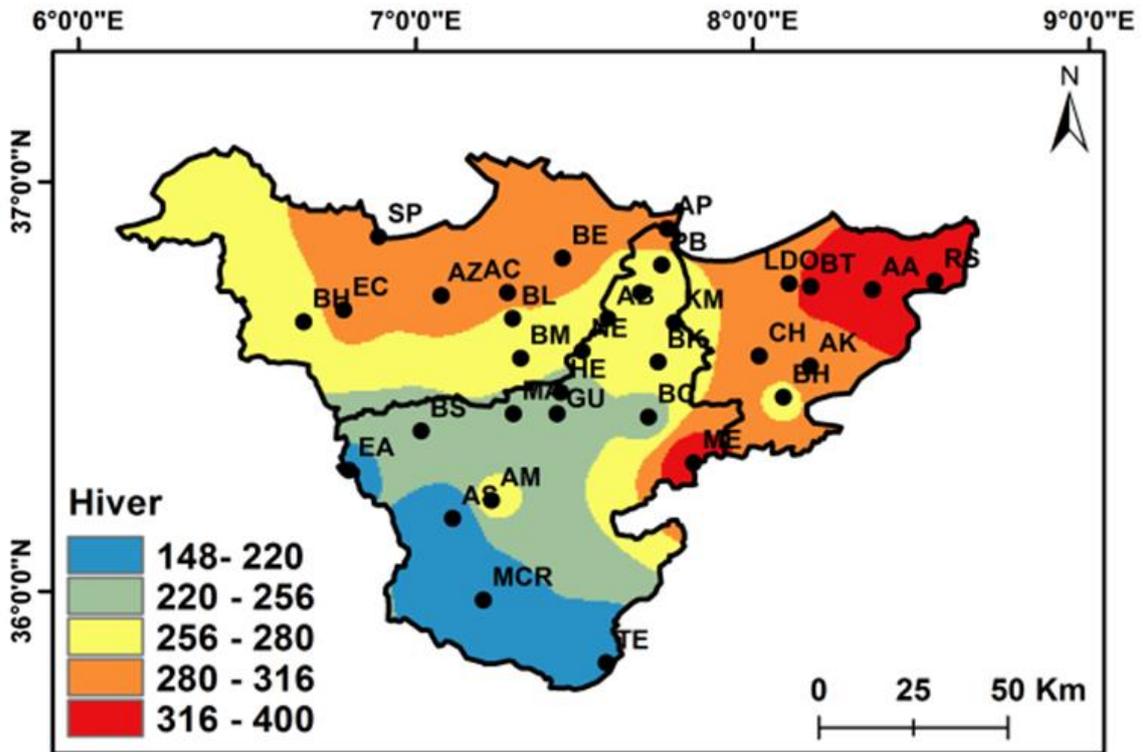


Figure 5.5 Distribution spatiale des précipitations d'hiver

En Automne (figure 5.6), les mêmes schémas spatiaux ont été maintenus, mais avec des valeurs moins marquées.

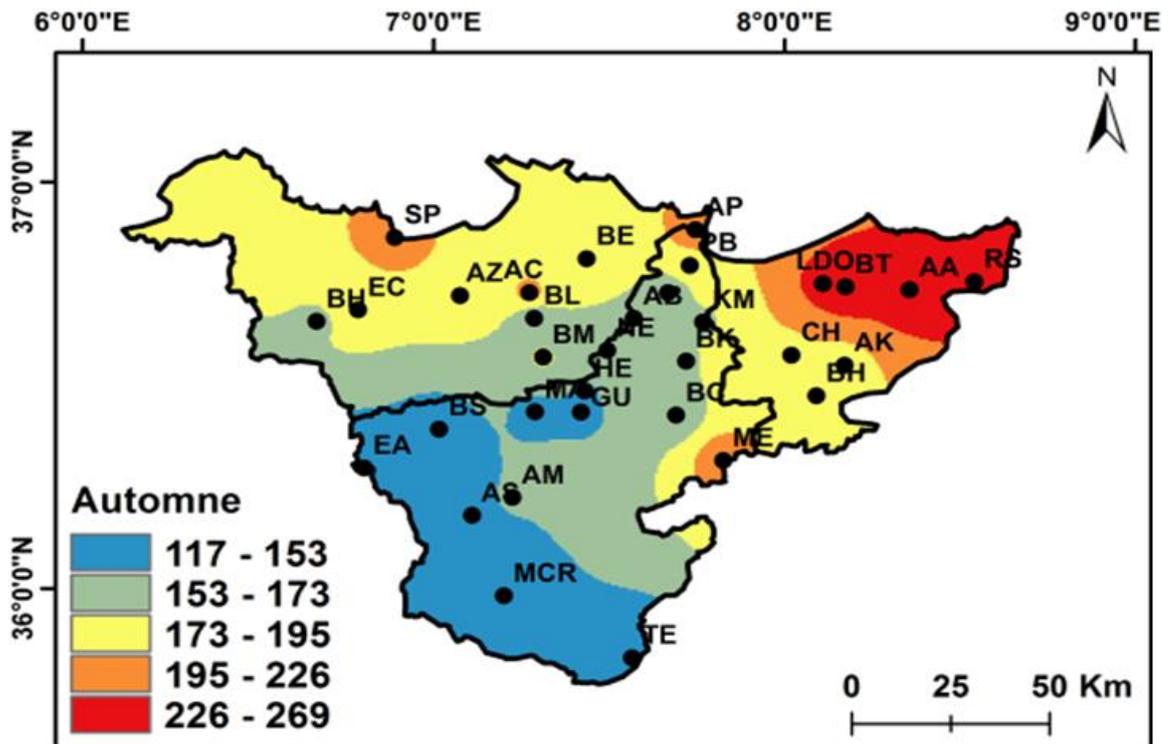


Figure 5.6 Distribution spatiale des précipitations d'automne

La saison du printemps (figure 5.7) présente une distribution spatiale différente répartie par un gradient décroissant de l'est à l'OUEST avec l'enregistrement des maximaux des cumuls des précipitations à Machroha et les stations pluviométriques de la région est de Taref. Les zones avec des précipitations inférieures à 158 mm s'étendent au SUD dans les hauts bassins de la Seybouse jusqu'à l'OUEST des côtières constantinois-centre.

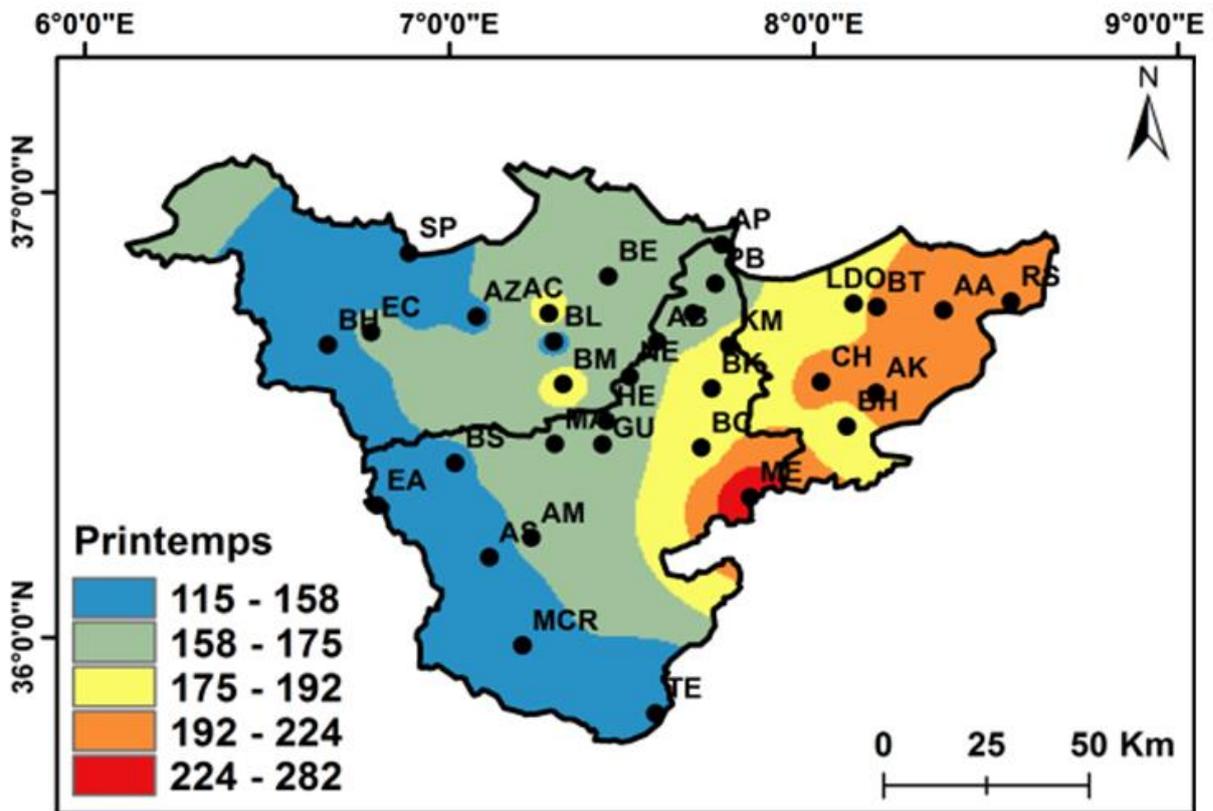


Figure 5.7 Distribution spatiale des précipitations de printemps

L'été présente un schéma spatial complètement différent, Cette saison indique un gradient contraire croissant du NORD au SUD (figure 5.8), par un maximum des cumuls des précipitations moyennes enregistrées dans les stations des hautes plaines qui présentent précédemment de faibles valeurs, spécialement aux stations de Mta Chikh Rabah et BorjSabath où l'on atteint en moyenne 40 mm.

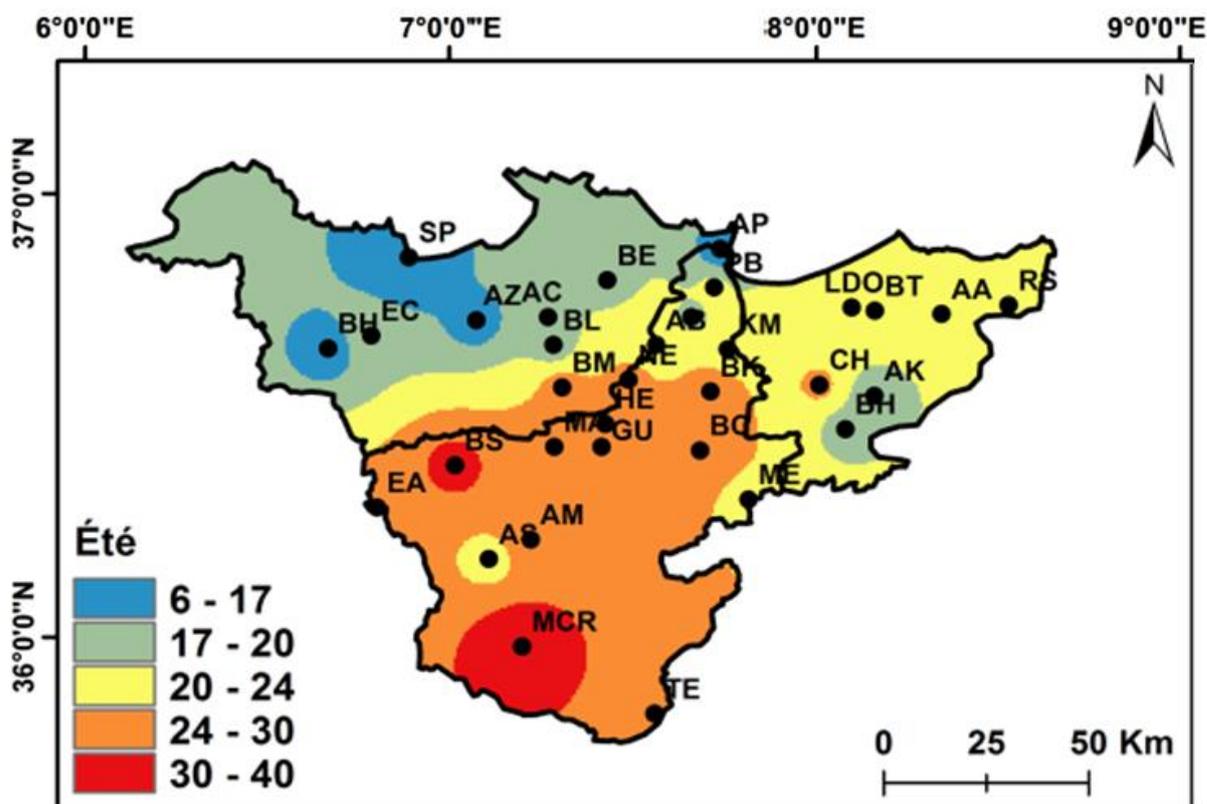


Figure 5.8 Distribution spatiale des précipitations d'été

Cependant, la région du NORD montre de faibles valeurs des précipitations en saison d'été où les moyennes sont inférieures à 17 mm particulièrement à Skikda Port, Azzaba et Bouhadjar. Ceci reflète une irrégularité des précipitations pendant cette saison dans la région d'étude.

5.3.2 Evolution temporelle et tendance spatiale des précipitations saisonnières

L'analyse temporelle des cumuls moyens des précipitations saisonnières dans le NORD-EST algérien permet de faire ressortir des occurrences de phases sèches ou de réduction des précipitations et de phases humides durant les saisons (figure 5.6). On distingue une augmentation générale dans les 4 saisons avec des fluctuations d'année en année.

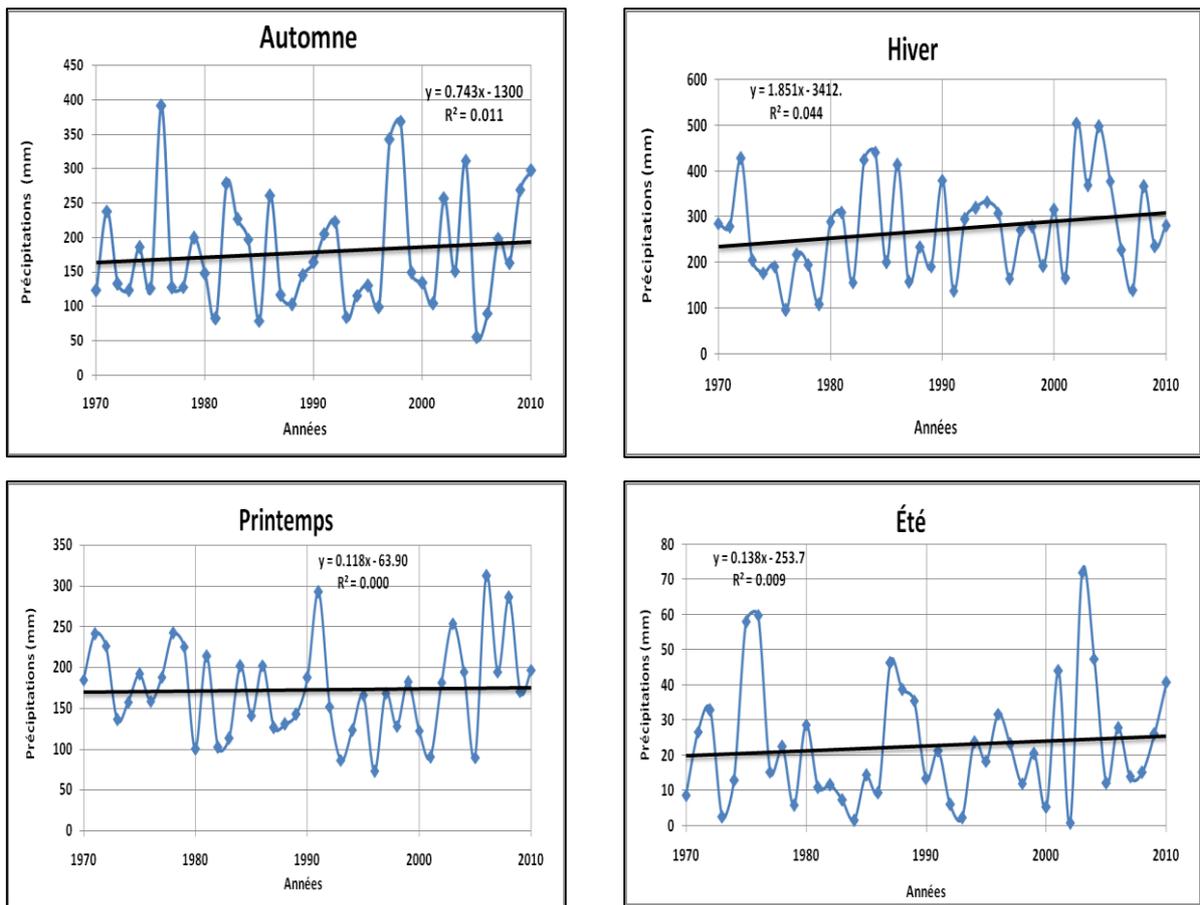


Figure 5.9 Évolution temporelle des précipitations saisonnières dans le NORD-ESTAlgérien (1970-2010) (a, Automne, b, Hiver, c, Printemps, d, été)

L'évolution temporelle des précipitations d'automne dans l'ensemble des stations pluviométriques identifie une augmentation non significative égale à 7,43 mm par décennie au cours de la période d'étude. L'année la plus pluvieuse apparaît en 1976 dans 16 stations avec le cumul le plus élevé à la station de Bouteldja (639mm). En outre l'année 1998 présente les valeurs maximales des précipitations d'automne dans 8 stations spécialement à Roum Souk (551mm), bien que la décennie 2000 montre de faibles valeurs enregistrées en 2005 dans 14 stations pluviométriques, la valeur la plus faible à la station de Borj Sabath. Durant la saison d'hiver, les deux plus hauts sommets des précipitations ont été donnés en 2002 et 2004, détectés dans 18 stations pluviométriques, particulièrement à Ain Assel (697mm) et Machroha (996mm), les années les plus déficitaires sont identifiées en 1976, 1779, 2007.

Bien qu'on enregistre le même pourcentage des cumuls moyens des précipitations saisonnières d'automne et de printemps pendant la période

d'étude (27%), les fluctuations varient considérablement entre ces deux saisons, Une augmentation non significative de 1,18 mm par décennie des précipitations du printemps est relevée sur l'ensemble de la région d'étude durant la période 1970-2010. Durant cette période, seulement 9 stations pluviométriques enregistrent les maximales des précipitations en 1991 où la valeur la plus élevée à Ain Makhoulf (420mm) et 7 stations en 2006 particulièrement à Mechroha (692mm). On distingue ainsi des périodes déficitaires dans les années 1996 et 2001 dans 15 et 8 stations respectivement, spécialement à Ain Makhoulf (24mm) et Terraguel (5mm). La saison d'été présente une forte irrégularité des précipitations entre les stations pluviométriques, mais sa tendance était pratiquement imperceptible en raison de peu de précipitations qui se produisent au cours de cette saison (1,38 mm/décennie) durant la période d'étude. Les précipitations baissent nettement dans les années 1973, 1984, 1993 et 2002. Tandis que les années les plus arrosées se concentrent en 1975 et 2003 dans 15 stations pluviométriques, avec la valeur la plus élevée est marquée à la station d'El Aria (135 mm).

Les changements spatiaux des tendances saisonnières sont présentés dans les figures suivantes au niveau de signification égal à 95%.

Une augmentation non significative en automne (figure 5.10) est enregistrée dans 84% des stations pluviométriques utilisées, réparties dans la majorité de la région d'étude, les côtiers constantinois-est montrent une tendance à la hausse dans toutes les stations, la seule de Roum Souk indique une diminution non significative des précipitations d'automne, la tendance négative est remarquée aussi dans le bassin de la Seybouse à Pont Bouchet, Nechmaya, Ain Makhoulf et à Azzaba dans les côtiers-centre.

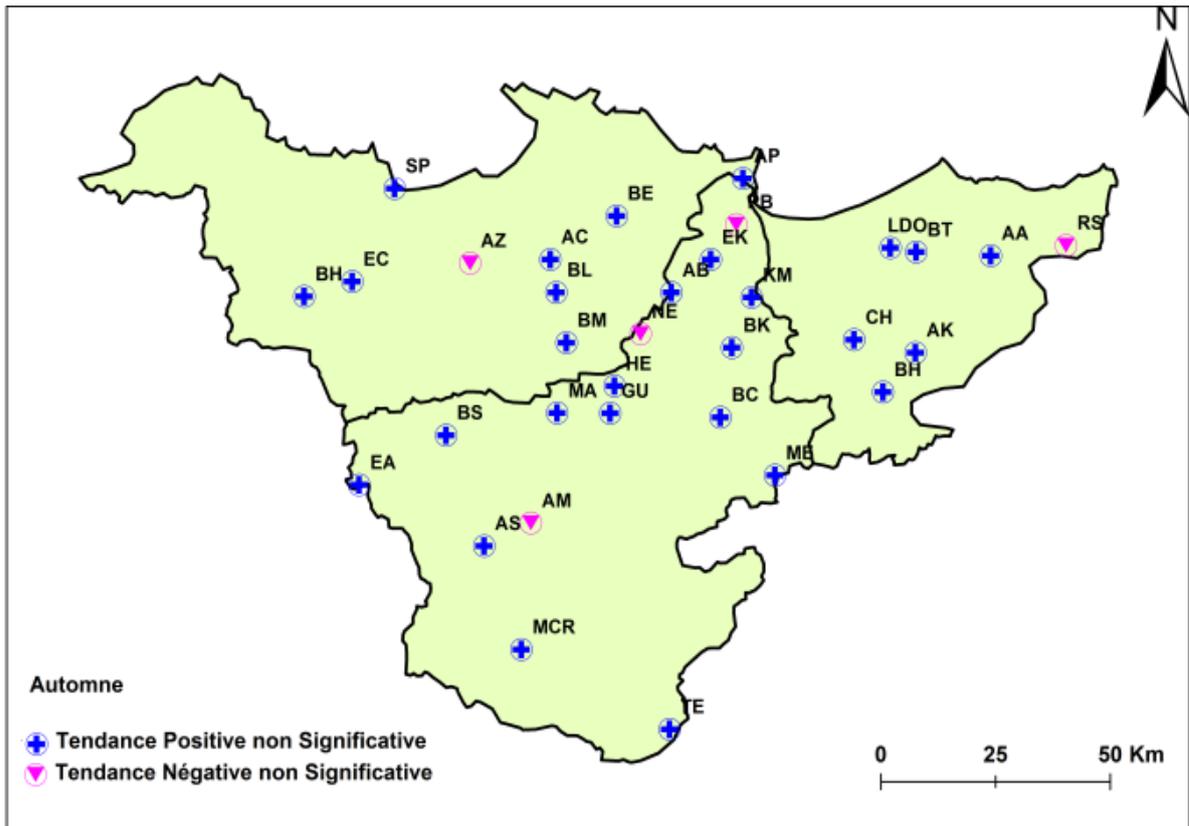


Figure 5.10 Tendence spatiale des précipitations d'automne

C'est le même cas pour l'hiver qui présente une augmentation générale des précipitations dans le NORD-EST algérien (figure 5.11), avec des tendances positives significatives dans 5 stations pluviométriques: à Skikda Port (3,352 mm/an), Bou Halloufa (2,601 mm/an), Emdjaz Chich (3,023 mm/an), El Kerma (3,482 mm/an) et Ain Berda (2,156 mm/an). La seule station de Roum Souk montre une diminution non significative des précipitations dans la saison d'hiver.

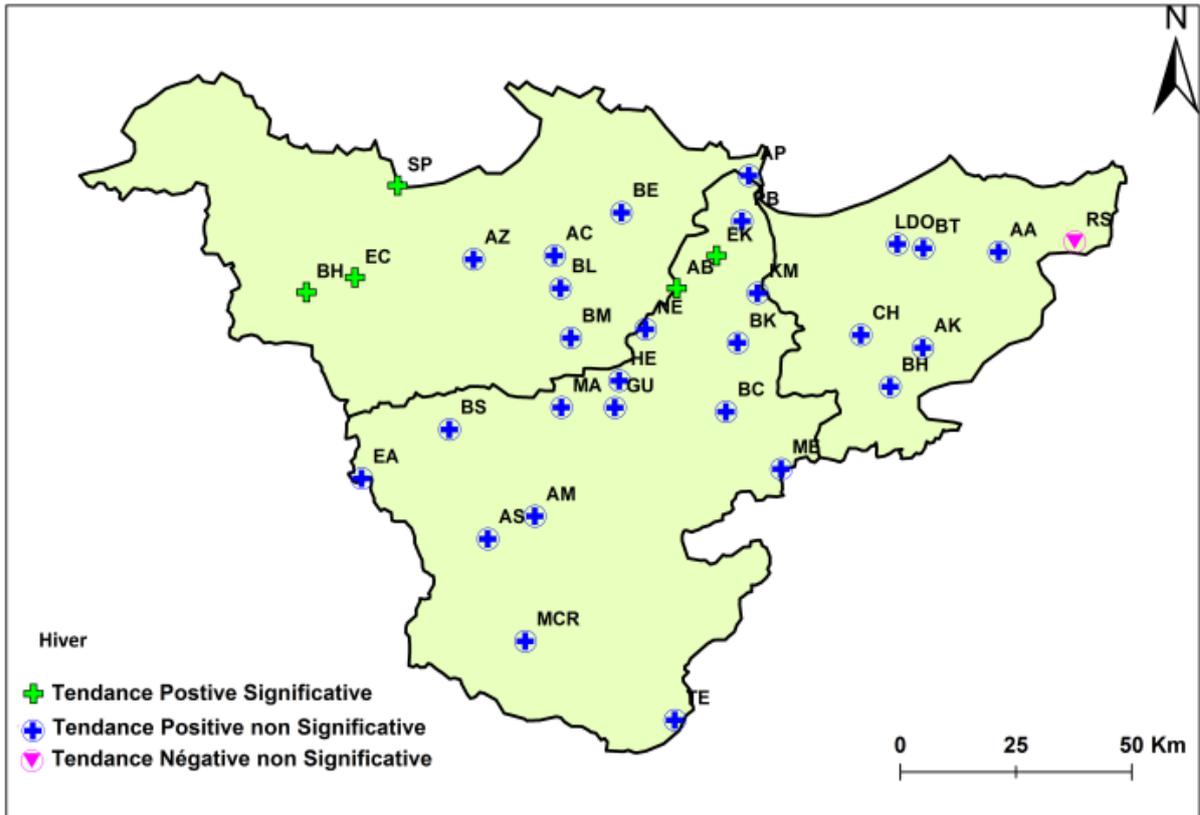


Figure 5.11 Tendance spatiale des précipitations d’hiver

La saison du printemps présente un schéma de tendance spatial différent à celui de l’automne et de l’hiver (figure 5.12). L’ensemble des stations pluviométriques de côtières-est montre des tendances négatives des précipitations au printemps. Seule la station de Roum Souk présente une tendance négative significative à 95%, avec un taux de changement égal à 29,37 par décennie. La réduction des précipitations est détectée aussi spécialement dans le moyen de la Seybouse à Guelma, Helio police, Bouchegouf et Mechroha, la basse plaine à Kef Mourad, dans les hautes plaines à Terraguelt, dans la région des cotiers-centre à Bekouche Lakhdar, Azzaba et Skikda port.

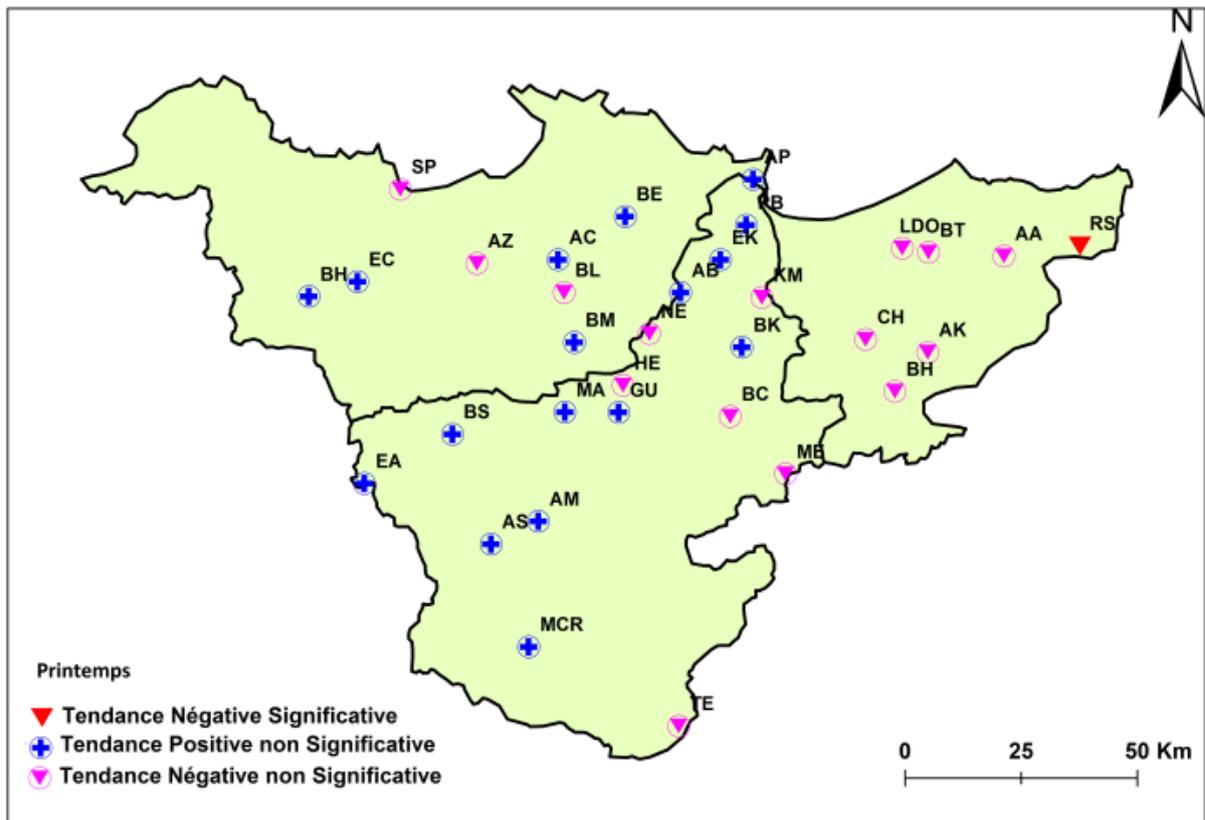


Figure 5.12 Tendence spatiale des précipitations de printemps

Les précipitations durant la saison d'été (figure 5.13) montrent une augmentation statiquement non significative dans 58 % de toutes les stations pluviométriques, 36% d'entre elles présentent une diminution non significative, tandis que 6 % des stations ont signalé une tendance significative à la hausse. L'augmentation des précipitations d'été se concentre généralement dans le bassin de la Seybouse et les côtières constantinois-centre. La station de Pont Bouchet et Bou Halloufa présentent une tendance positive significative avec un faible taux de changement égal à 4,4 mm et 2,3 mm respectivement par décennie. La région des côtières-est montre une diminution non significative dans toutes les stations pluviométriques sauf la région du Cheffia qui présente une augmentation non significative des précipitations d'été.

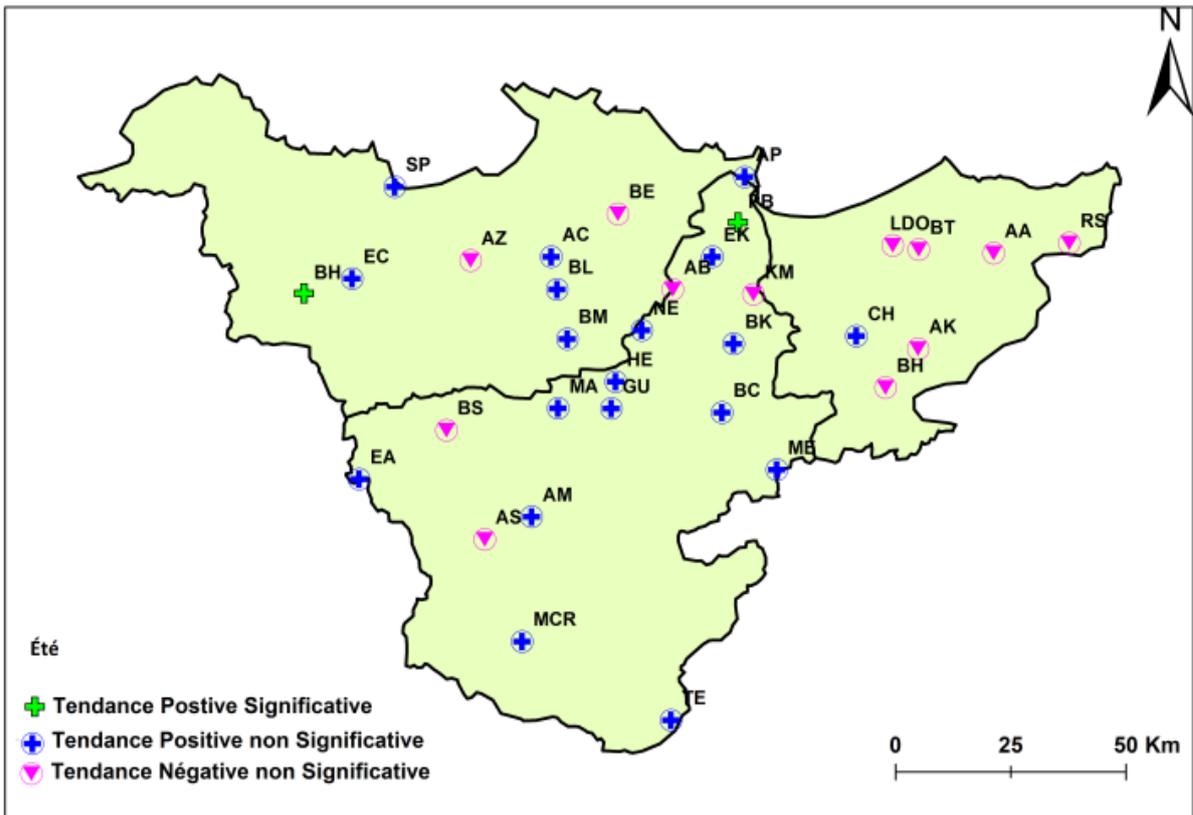


Figure 5.13 Tendence spatiale des précipitations d'été

5.4 Conclusion

Les précipitations annuelles varient selon un gradient croissant du SUD au NORD dans la région d'étude, Les stations de Mechroha et Bouteldja enregistrent les cumuls annuels maximaux atteints, soit 1725 mm et 1409 mm respectivement identifiés dans les années 2002 et 2004. L'année 1996 enregistre la valeur minimale des précipitations spécialement à Borj Sabath et El Kerma où elle vaut 135 mm. Le NORD-EST algérien est dominé par une augmentation non significative dans 75% des stations pluviométriques avec la détection de tendance positive significative à Ain Charchar et Emdjaz Chich, alors que la seule station de Roum Souk montre une diminution significative au niveau de signification égal à 95%.

D'après les résultats des précipitations saisonnières, la saison la plus pluvieuse est l'hiver par un pourcentage égal à 42% des précipitations annuelles moyennes tombées durant la période 1970-2010. La répartition spatiale des précipitations est pratiquement différente entre les saisons, l'automne et l'hiver montrent une distribution similaire des précipitations

annuelles bien que le printemps et l'été indiquent un comportement inverse dans la répartition des saisons.

Une tendance à la hausse des précipitations est également détectée dans toutes les saisons avec des fluctuations intra-saisonniers durant la période d'étude. La seule station de Roum de Souk identifie un déclin dans toutes les saisons.

6 VARIABILITE ET TENDANCES SPATIALE DE LA CONCENTRATION ET L'AGRESSIVITE DES PRÉCIPITATIONS

6.1 La concentration des précipitations journalière CI

6.1.1 Variabilité spatiale de CI

La concentration journalière des précipitations étudiée par le CI, ou simplement le pourcentage de 25% de pluie apporté par les jours très pluvieux, a été estimée selon les courbes exponentielles données par l'équation 4.1 pour les 33 stations météorologiques du NORD-EST de l'Algérie durant la période 1970-2010. Les résultats de CI sont illustrés dans le tableau 6.1, Les valeurs a et b sont des constantes calculées selon les équations 4.2 et 4.3. La figure 6.1 montre la distribution spatiale de CI dans la région d'étude.

La valeur maximale de $CI=0,64$ est marquée dans la station de Nechmaya, où près de 73% des précipitations tombent pendant 25% des jours pluvieux. Des résultats similaires sont obtenus à partir d'autres pluviomètres, tels que ceux des stations de Pont Bouchet, Cheffia et Lac des Oiseaux, Ain Snob, Borj Sabath, et El Aria qui ont également des valeurs élevées de $CI > 0,60$ comprises entre 0,61 et 0,62, Dans ces stations, l'irrégularité des quantités journalières des précipitations est principalement due à une forte proportion de faibles quantités de pluie par contre les zones où les précipitations sont les plus intenses ont donné des indices de concentration de précipitations élevés.

En revanche, la plus basse valeur est détectée à la station de Mechroha avec un $CI=0,48$, soit près de 57 % des précipitations journalières tombées se concentrent dans 25% des jours pluvieux durant l'année. Aussi, de faibles concentrations des précipitations sont marquées autour des stations d'El Kerma, Medjaz Amar et d'Ain Kerma comprise entre 0,54 et 0,55. Ces

résultats indiquent que les quantités journalières enregistrées dans ces stations sont plus régulières tout au long de l'année. Le reste des stations affiche des valeurs intermédiaires entre 0,56 et 0,60. Les résultats en % des précipitations indiquent qu'il y a une variation de 14 %, ce qui montre un comportement très différent entre le côté où les précipitations sont les plus concentrées et le côté où la quantité journalière est plus régulière.

Tableau 6.1 Valeurs des constantes a et b, l'indice de concentration des précipitations journalières(CI), l'indice de concentration des précipitations mensuelles (PCI) et l'indice de Fournier modifié (MFI), le pourcentage de précipitations contribuées 25% (P25%) par des jours pluvieux pour 33 stations pluviométriques dans le NORD-EST de l'Algérie, période (1970–2010)

stations (code map)	a	b	CI	P25%	CPI	IFM
AZZABA (AZ)	0,0423	0,0313	0,58	68,9	17,8	110
AIN CHERCHAR (AC)	0,0431	0,031	0,58	68,6	16	121
BEKOUICHE LAKHDAR (BL)	0,045	0,0302	0,59	68,1	16,5	88
BOUATI MAHMOUD (BM)	0,0689	0,0261	0,56	64,0	15,5	108
BERRAHAL (BE)	0,0479	0,0298	0,58	67,4	16,3	110
ANNABA PORT (AP)	0,0378	0,0323	0,59	68,9	16,4	105
MEDJAZ AMAR (MA)	0,0806	0,0244	0,55	62,8	15,4	94
GUELMA (GU)	0,0439	0,0305	0,59	69,0	15,3	81
HELIOPOLIS (HE)	0,0441	0,0304	0,59	68,9	15,7	94
BOUCHEGOUF (BC)	0,0408	0,0311	0,60	69,7	15,2	84
NECHMAYA (NE)	0,02	0,0384	0,64	73,5	16,6	101
BOUKHAMOUZA (BK)	0,0696	0,026	0,56	64,3	15,2	98
KEF MOURAD (KM)	0,0689	0,0261	0,56	64,0	15,9	91
EL KERMA (EK)	0,0841	0,0242	0,54	62,3	16,3	96
PONT BOUCHET (PB)	0,0341	0,0329	0,61	71,3	15,3	93
AIN BERDA (AB)	0,0411	0,0312	0,60	69,7	14,9	94
BOUHADJAR (BH)	0,0571	0,028	0,57	65,8	16,7	94
AIN KERMA (AK)	0,0874	0,0238	0,54	59,8	17,9	121
CHEFFIA BARRAGE (CHB)	0,0312	0,0338	0,62	71,5	15,5	119
BOUTELDJA (BT)	0,0601	0,0276	0,56	64,9	16,5	127
LAC DES OISEAUX (LDO)	0,0377	0,0318	0,61	70,2	16,1	120
AIN ASSEL (AA)	0,0401	0,0316	0,59	68,9	15,5	131
ROUM SOUK (RS)	0,0553	0,0285	0,56	65,1	17,8	129
MECHROHA (ME)	0,0565	0,0303	0,48	57,1	15,5	167
AIN SNOB(AS)	0,0339	0,0329	0,61	70,9	17,6	73,4
MTA CHEIKH RABAH (MCR)	0,0426	0,0308	0,59	67,9	17,7	82,9
TERRAGUEL (TE)	0,0466	0,0300	0,58	67,3	18,4	73,4
AIN MAKHLOUF (AM)	0,0437	0,0305	0,59	68,4	17,5	113,3
BORDJ SABATH (BS)	0,0410	0,0312	0,60	69,3	17,8	97,8
EL ARIA (BEN BADISS) (EA)	0,0305	0,0343	0,61	70,9	18,6	87,8

BOU HALLOUFA (BH)	0,0578	0,0280	0,56	64,9	17,5	102,9
EMDJEZ CHICH (EC)	0,0520	0,0290	0,57	66,6	17,2	116,7
SKIKDA PORT (SP)	0,0394	0,0318	0,59	68,7	17,6	115,8

Si nous adoptons la même classification que Benhamrouche et al. (2015), où: $CI > 0,61$ est élevé, $0,55 < CI < 0,61$ est modéré et $CI < 0,55$ est faible, on note que dans la zone d'étude, la concentration des précipitations est modérée sur plus de 82% des stations, Ce résultat ne coïncide pas avec ceux d'autres études.

En effet, Benhamrouche et al. (2015), ont analysé le CI dans 42 stations pluviométriques réparties sur le territoire algérien. Leurs résultats ont montré une concentration journalière moyenne élevée où près de 74% des valeurs sont supérieures à 0,61. En revanche, (GHENIM and MEGNOUNIF, 2016) ont évalué la concentration des précipitations dans le bassin versant de Kebir-Rhumel, ils ont conclu que le CI est faible, en effet 80% des 20 stations étudiées montrent une concentration inférieure à 0,55, En Chine par exemple, Shi et al. (2013a) ont estimé que la concentration des précipitations journalières dans la rivière Huai est élevée puisque les valeurs varient de 0,64 à 0,72, alors qu'elle est moins importante dans le bassin de la rivière Lancang où la concentration est élevée dans 20 stations sur les 31 étudiées et modérée sur le reste (Shi et al., 2013b). En Europe, le CI est compris entre 0,51 et 0,72, les valeurs les plus élevées ont été détectées dans le bassin méditerranéen occidental (le long des côtes méditerranéennes espagnole et française) et en Sicile, Les valeurs sont modérées autour de la mer Noire, en particulier en Roumanie, en Moldavie et en Ukraine occidentale. Les concentrations ont été jugées faibles sur la côte NORD-OUEST de la Norvège, de la Grande-Bretagne, de l'Irlande, des Pays-Bas et du Danemark (Cortesi et al., 2012). Ces régions ne reçoivent pas les mêmes quantités de précipitations que la région d'étude et ne bénéficient pas des mêmes conditions climatiques.

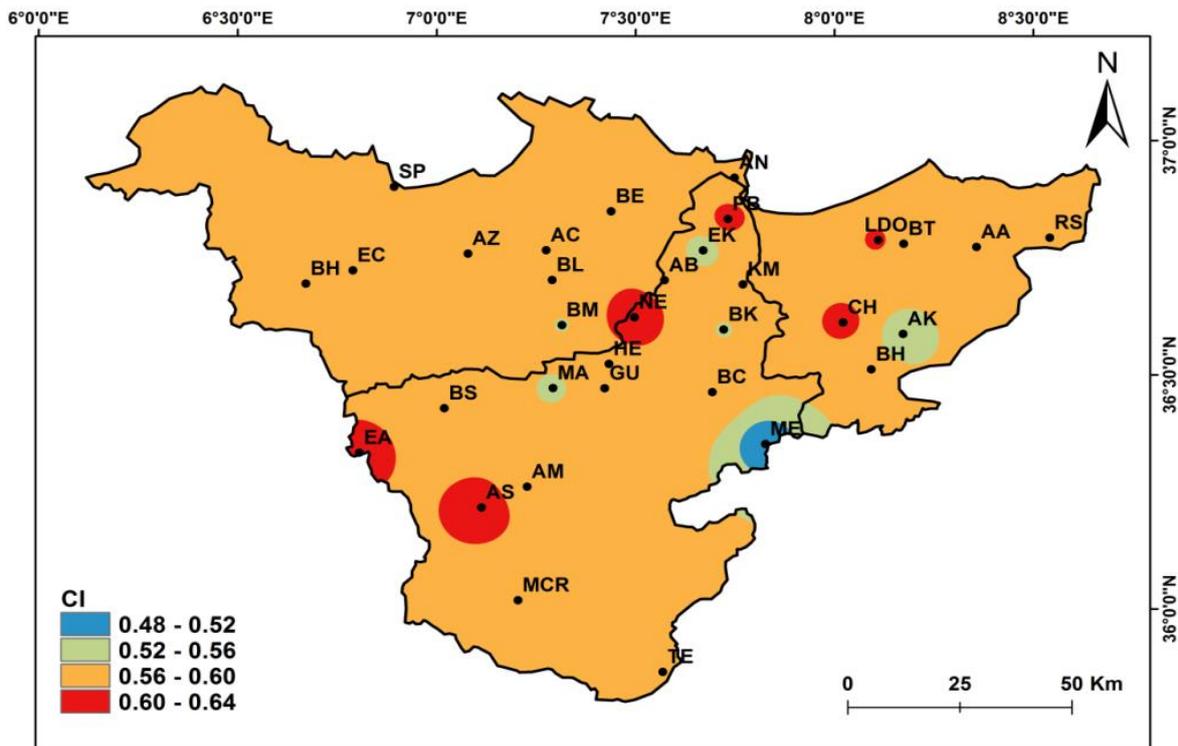


Figure 6.1 Distribution spatiale de CI dans le NORD-EST algérien (1970-2010)

6.1.2 Tendence des concentrations des précipitations journalières CI

La figure 6.2 présente la distribution spatiale des tendances de l'indice de concentration journalière des précipitations CI par le test de Mann-Kendall. Les résultats montrent que les valeurs de CI ont tendance à augmenter au niveau de signification de 95% dans 6 stations, parmi lesquelles 5 stations pluviométriques ont enregistré une forte concentration des précipitations: Nechmaya, Cheffia, Ain Snob, Bouchegouf, Bekouche Lakhdar, HelioPolis. Cependant, une tendance à la baisse significative est observée principalement dans sept stations, Parmi ces stations, deux sont dominées par de faibles valeurs de CI: les stations de Mechrohaet Ain Kerma. Les 5 stations restantes : Azzaba, Ain Assel, Terraguelt, Annaba Portet Skikda sont marquées par une diminution significative de CI. Bien que 20 stations pluviométriques ne montrent pas de tendance statistiquement significative, 11 stations ont une tendance d'augmentation non significative, 8 stations ont une tendance baissière non significative et

une seule station pluviométrique (Kef Mourad) ne présente aucun changement dans la concentration des précipitations.

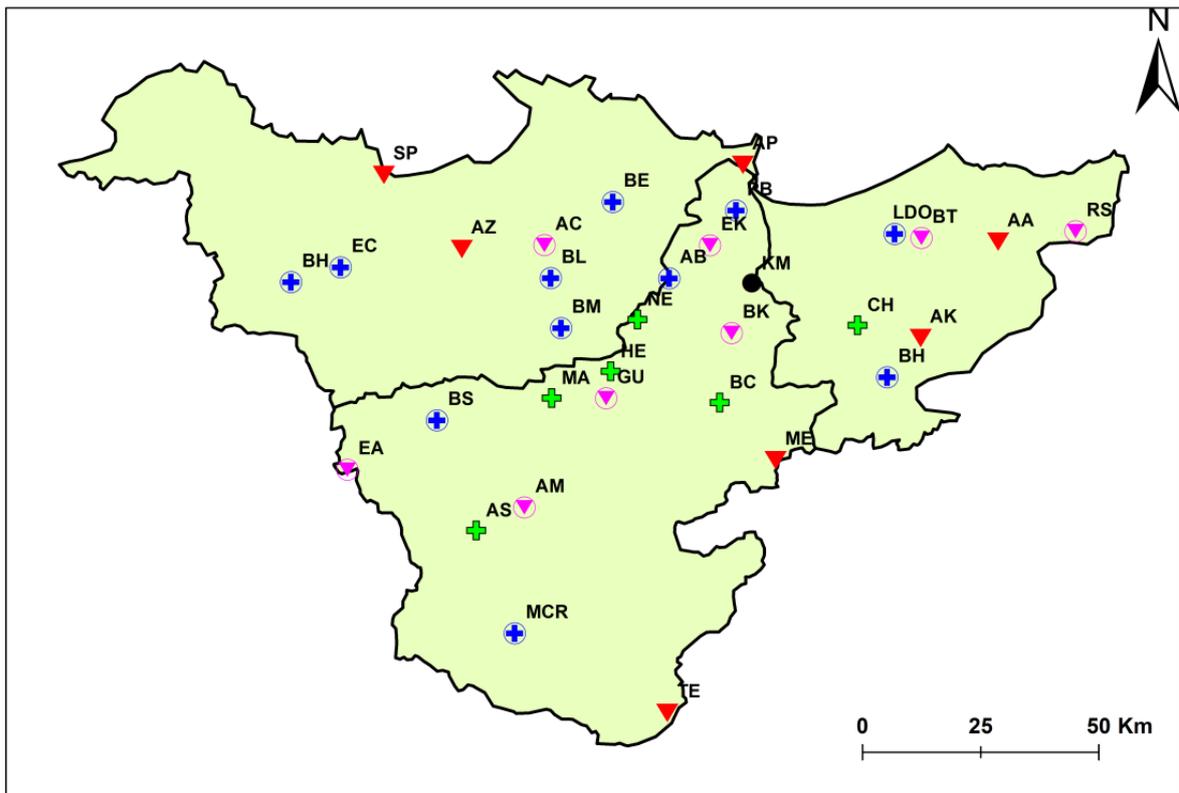


Figure 6.2 Distribution spatiale de la tendance de CI dans le NORD-EST algérien

6.2 La concentration des précipitations mensuelles PCI

6.2.1 Variabilité spatiale des PCI

Les valeurs annuelles de l'indice de concentration des précipitations (PCI) durant la période 1970-2010, pour chacune des 33 stations séparément, sont indiquées dans le tableau 6.1.

La distribution spatiale est représentée dans la figure 6.3. La distribution du PCI n'est pas uniforme dans l'ensemble de la région d'étude, et les valeurs varient de 14,8 à 18,6. Ces résultats indiquent la présence d'un régime de précipitations modérément saisonnier à saisonnier, selon la classification d'Oliver (1980). Cette saisonnalité est plus forte au SUD de la région d'étude notamment à Borj Sabath, El Aria et Terraguelt où le PCI atteint respectivement 18,6; 18,4; 17,6 à l'est particulièrement à Ain Kerma et Roum Souk, où le PCI atteint respectivement 17,8 et 17,9 et à l'OUEST à

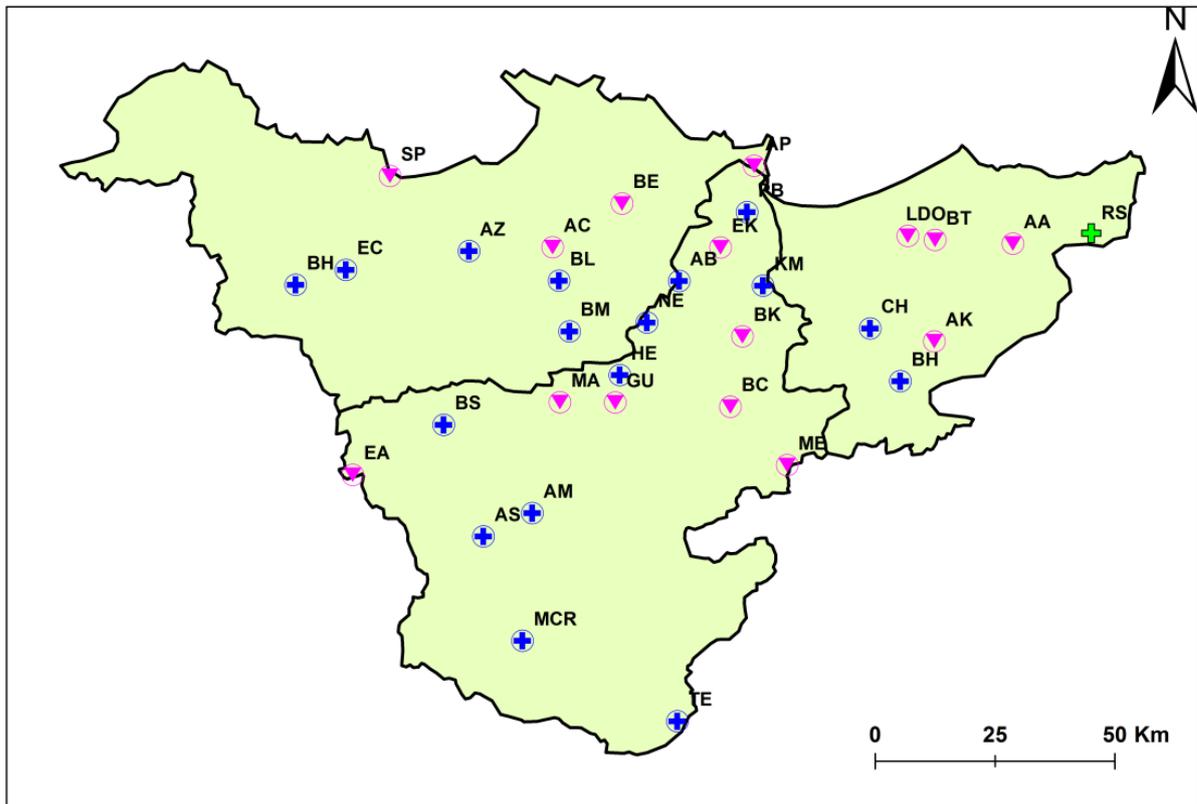


Figure 6.4 Répartition de la tendance des PCI dans le NORD-EST algérien

6.3 L'agressivité des précipitations (MFI)

6.3.1 Variabilité spatiale des MFI

L'agressivité des précipitations a été étudiée à l'aide de l'indice de Fournier modifié (MFI). Les résultats sont illustrés dans le tableau 6.1. La figure 6.5 montre la répartition spatiale du MFI. Une agressivité très élevée des précipitations a été détectée dans la station de Mechroha, elle atteint la valeur maximale égale à 167. La partie-est de la région d'étude (côtiers constantinois-est) a marqué une érosivité élevée allant de 120 à 144 dans les stations d'Ain Assel, Roum Souk, Bouteldja et Lac des Oiseaux. Tandis que le bassin du côtiers constantinois-centre est dominé par une agressivité modérée dans toutes les stations (97-120). L'agressivité faible des précipitations domine presque la majorité des stations du bassin Seybouse, sauf la région de Mechroha.

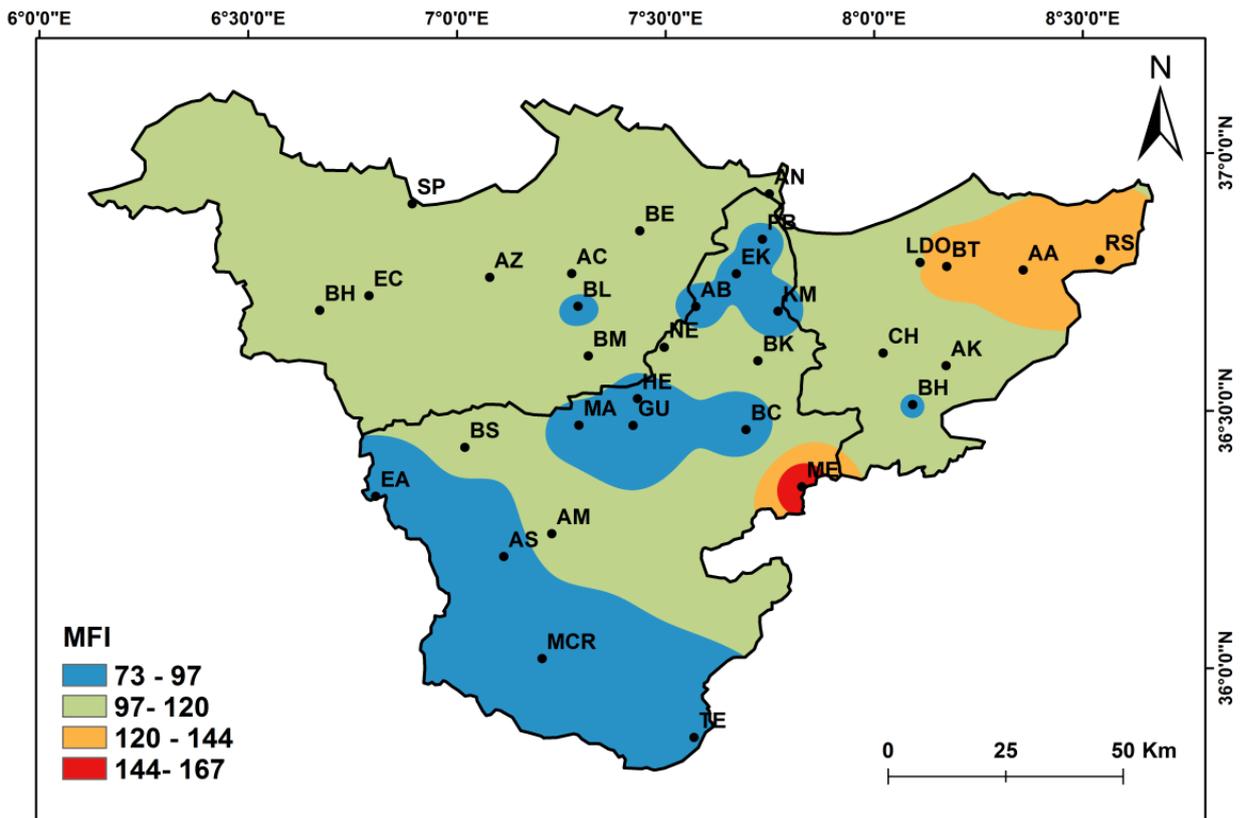


Figure 6.5 Répartition spatiale du MFI dans le NORD-EST algérien

6.3.2 Tendence de l'agressivité des précipitations (MFI)

La région d'étude est dominée par une augmentation de l'agressivité des précipitations (figure 6.6). Cinq stations ont enregistré une augmentation significative de l'agressivité des précipitations (Ain Cherchar, Bekouche Lakhdar, El Kerma, Ain Berda et Cheffia) au niveau de 95%, ce sont des stations qui ont marqué une agressivité faible à modéré des précipitations. Vingt deux stations ont marqué une croissance positive non significative et six stations sont identifiées par une décroissance négative non significative. D'un point de vue régional, ces résultats sont en accord avec ceux de (Meddi et al., 2014) qui a analysé 117 stations du NORD de l'Algérie au cours de la période 1950–2006, Leur étude a montré l'existence d'une diminution d'environ 30% des MFI dans les régions du centre et de l'OUEST Algérien, alors que les régions orientales du NORD de l'Algérie n'ont pas connu ce déclin et se caractérisent par la plus forte érosivité des précipitations.

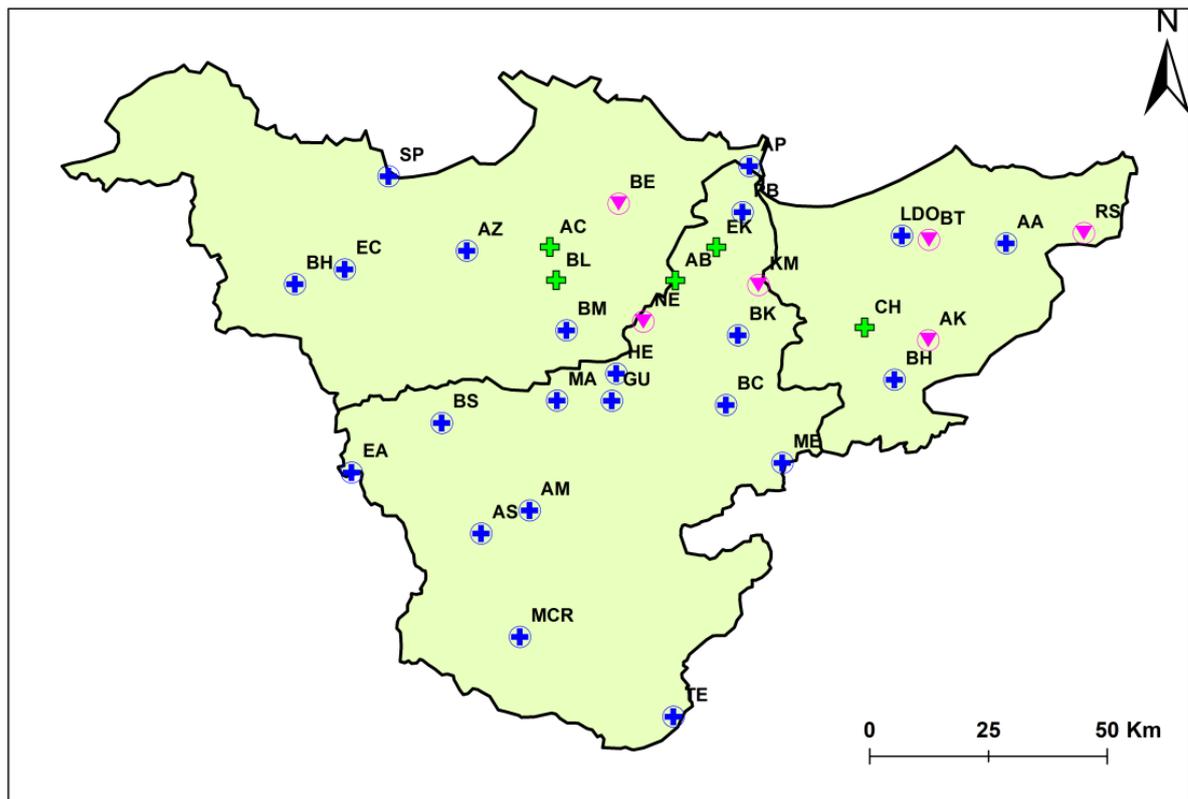


Figure 6.6 Répartition spatiale de la tendance du MFI dans le NORD-EST algérien

6.4 Corrélation entre les indices (CI, PCI, MFI) et les précipitations annuelles

Afin d'étudier plus en détail l'évolution les caractéristiques des indices des précipitations à l'échelle annuelle, une analyse plus détaillée a été menée des corrélations linéaires entre les indices (CI, PCI, MFI) et les précipitations annuelles dans l'extrême NORD-EST de l'Algérie dans 33 stations pluviométriques sur la période 1970 –2010. On distingue l'existence d'une corrélation négative entre les valeurs de CI et les précipitations annuelles au cours de la période d'étude avec un coefficient de détermination relativement faible (figure 6.7). Cela indique que les valeurs de CI les plus élevées sont celles qui présentent de faibles valeurs de précipitations annuelles, et vice versa. Ce résultat montre que la concentration des précipitations des jours pluvieux est apparemment plus élevée dans les endroits où les précipitations annuelles sont faibles ($R^2=0,241$). Ceci confirme les résultats des études de (Martin-Vide, 2004) en Espagne péninsulaire. (Li et al., 2010) en Chine et (Benhamrouche et al., 2015) en

Algérie. En outre, la figure 6.8 indique une corrélation négative non significative ($R^2 = 0,145$) entre le PCI et les précipitations annuelles moyennes, ce qui montre un comportement opposé entre les précipitations annuelles et la concentration des précipitations mensuelles. Par conséquent, la variabilité mensuelle des précipitations au cours de l'année est apparemment plus élevée dans certains endroits où les précipitations annuelles sont faibles (par exemple à Bouhadjar et Bekouche Lakhdar), alors qu'une variabilité mensuelle significative au cours de l'année peut être trouvée dans d'autres endroits où les précipitations annuelles sont élevées, par exemple dans la partie orientale de la région d'étude (Roum Souk). Cette variabilité est principalement causée par la distribution irrégulière des précipitations. Bien qu'on trouve une corrélation positive significative élevée ($R^2 = 0,912$) entre l'agressivité des précipitations et les précipitations annuelles (figure 6.9), cela implique également que l'érosivité des précipitations augmentera proportionnellement par rapport à l'augmentation des précipitations annuelles, et vice versa.

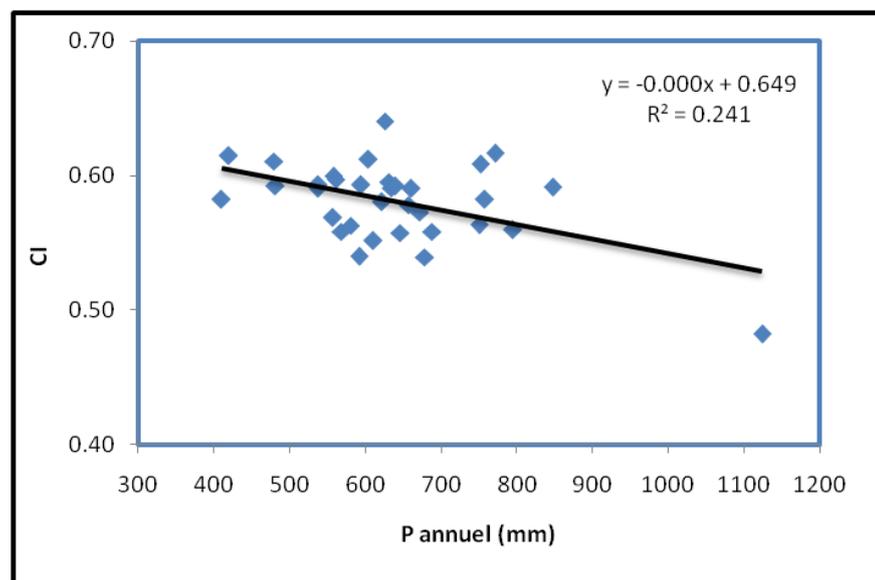


Figure 6.7 Corrélation entre l'indice CI et les précipitations moyennes annuelles P

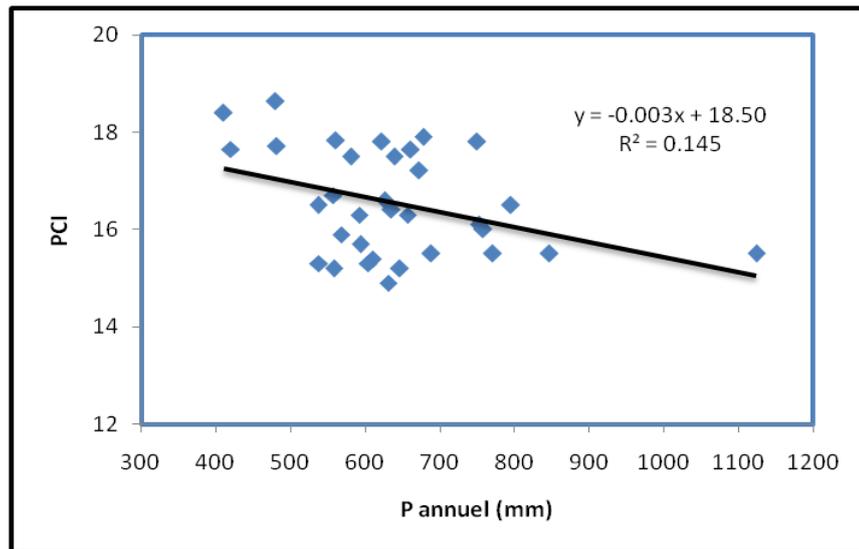


Figure 6.8 Corrélation entre l'indice PCI et les précipitations moyennes annuelles P

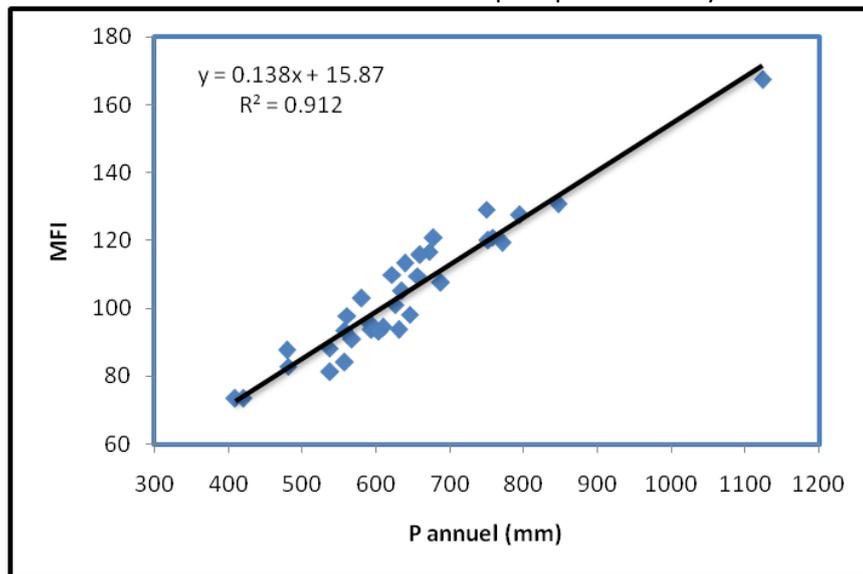


Figure 6.9 Corrélation entre l'indice MFI et les précipitations moyennes annuelles

6.5 Conclusion

L'analyse de la variabilité et la tendance de la concentration des précipitations à partir des indices journalier de concentration des précipitations (CI) et mensuel (PCI) ainsi que de l'agressivité des précipitations (MFI) dans 33 stations pluviométriques situées dans le NORD-EST algérien pendant la période 1970-2010 se fonde sur les conclusions suivantes:

- La région du NORD-EST algérien subit une variabilité de la concentration journalière. Les résultats obtenus ont montré qu'il existe des zones où les valeurs de CI sont supérieures à 0,6, avec un pourcentage des précipitations contribuées par le quartile le plus élevé de jours de pluie d'environ 70% de

la quantité de précipitations annuelles totales. Ces zones sont celles qui présentent de faibles valeurs des précipitations annuelles et des jours pluvieux. Les résultats du test de Mann–Kendall indiquent que les zones à forte concentration des précipitations CI ont tendance à voir une augmentation au niveau de signification de 95%.

- L'analyse statistique de l'indice mensuel de la concentration des précipitations (PCI) indique que la région d'étude est dominée par une distribution modérée à effet saisonnier des précipitations. Les résultats du test MK sont statistiquement non significatifs, sauf dans une seule station de Roum Souk, qui présente une augmentation significative du PCI.

Les résultats de l'indice l'agressivité de Fournier modifié (MFI) montrent que les régions qui reçoivent des quantités élevées des précipitations annuelles présentent une forte érosivité. Le test de MK montre que le NORD-EST est dominé par une augmentation significative de l'agressivité des précipitations.

La corrélation entre le CI et les précipitations annuelles est négative, ce qui indique que les faibles niveaux de précipitations font la plus grande contribution à l'irrégularité globale des précipitations. De même, les variations de PCI montrent que la quantité des précipitations saisonnières ne suit pas nécessairement toutes les variations annuelles. D'autre part, l'agressivité des précipitations par MFI est cohérente avec la quantité des précipitations annuelles. Ceci montre que le MFI suit la distribution des précipitations annuelles, l'agressivité est élevée lorsque la quantité des précipitations est supérieure à 750 mm dans la région d'étude.

7 EVALUATIONS DES PRECIPITATIONS EXTREMES JOURNALIERES

Les indices des précipitations extrêmes sont évalués et cartographiés sur la base d'un ensemble de données maillées de résolution spatiale de 1*1 km, à travers les données d'observation de 33 stations pluviométriques réparties dans le NORD-EST algérien durant la période 1970-2010. 10 indices des précipitations extrêmes ont été choisis parmi ceux qui sont les plus couramment utilisés, Les résultats sont décrits dans les chapitres 7 et 8.

7.1 Précipitations annuelles totales par jour pluvieux (PRCPTOT)

Deux des dix indices, à savoir l'indice d'intensité journalière simple (SDII) et les précipitations annuelles totales par jour de pluie (PRCPTOT), sont des indices des conditions moyennes, mais une différence dans la tendance du SDII et du PRCPTOT peut refléter des changements dans le caractère des précipitations (Moberg et al., 2006), ce qui peut aider à expliquer la variation des précipitations extrêmes.

Le PRCPTOT est un indice des conditions moyennes reflétant les variations des précipitations sur toute l'année. Les précipitations annuelles totales par jour pluvieux (figure 7.1), présente une gamme de valeurs allant de 340 à 1700mm, variant de manière croissante du SUD au NORD, La région d'étude est dominée par de faibles cumuls moyens des précipitations se concentrant dans les hautes plaines de la Seybouse entre 340 et 626mm, Les quantités des précipitations PRCTOT les plus importantes enregistrées au NORD dans la partie côtière de la zone d'étude spécialement à Annaba dans la région montagneuse s'étend du massif d'Edough jusqu'au cap de fer, dans le Collo de Skikda, à l'est dans les monts de Cheffia, dans la région montagneuse de Mechroha au SUD-EST et au centre à Guelma dans les monts de Houara. Ces régions ont enregistré des valeurs supérieures à 1197 mm des précipitations annuelles totales par jour pluvieux.

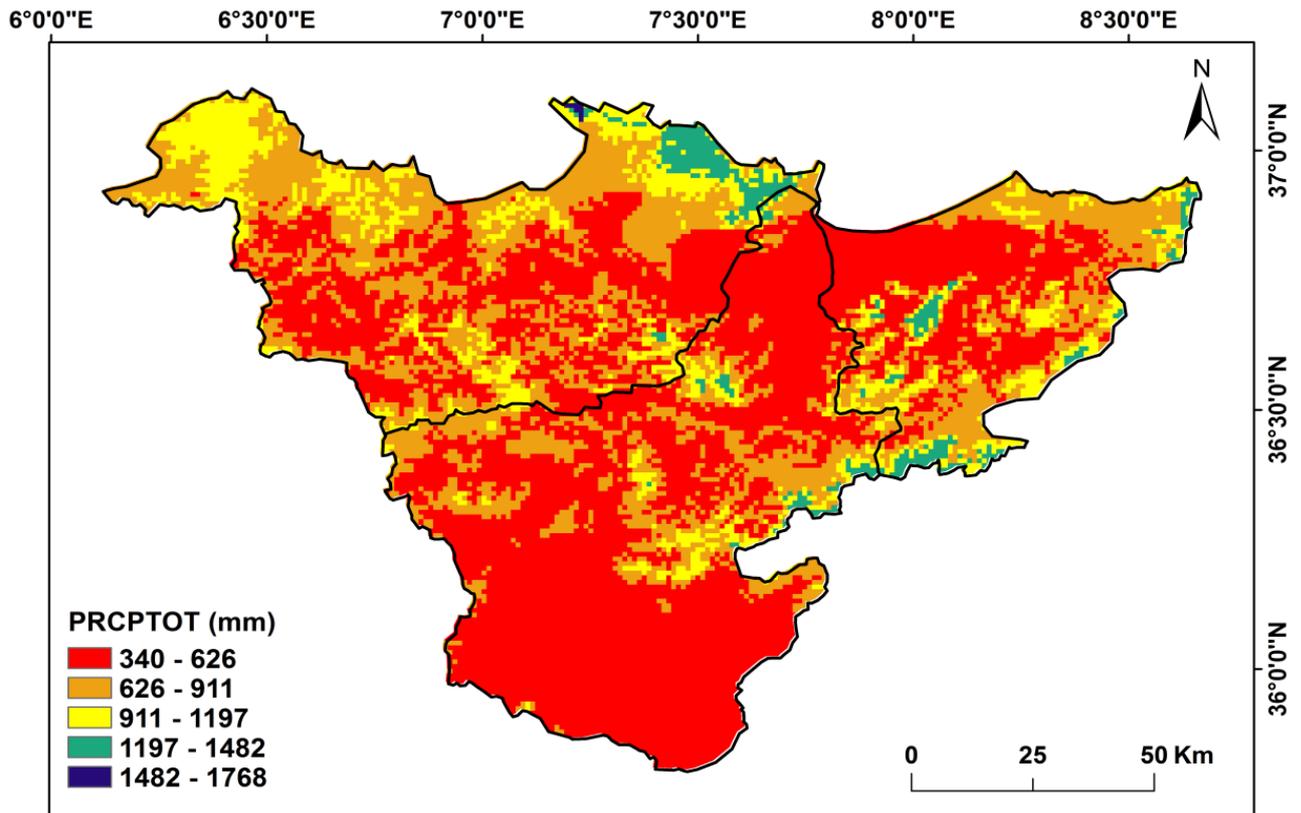


Figure 7.1 Précipitations annuelles totales par jour pluvieux (PRCPTOT)

7.2 Intensité journalière des précipitations (SDII)

L'intensité journalière des précipitations (SDII) est un indice qui prend en compte non seulement la quantité totale de précipitations tout au long de l'année, mais reflète également les changements des précipitations journalières. Cet indice varie entre 7 et 25 mm (figure 7.2). Les valeurs les plus basses se concentrent dans le centre de la région d'étude avec des zones de moyennes à faible altitude, atteint des valeurs comprises entre 7 et 16 mm.

Des valeurs élevées ont également été enregistrées dans certains points très localisés correspondant aux zones élevées en altitude telle que la chaîne montagneuse d'Edough qui s'étend de la presqu'île du Cap de Garde jusqu'au massif du Cap de Fer à Annaba, et le massif du Collo à Skikda, Il est évident que le massif montagnard d'Edough atteignant les 1 008 m d'altitude au mont Bou Zizi, est caractérisé par les valeurs maximales où les hauteurs des précipitations atteignent 1500 mm (Meddi and Toumi, 2015, MEDDI and TOUMI, 2014). Le massif du Collo à Skikda, au

NORD-OUEST, qui est un segment de l'Atlas tellien caractérisé par le point le plus élevé en hauteur à Djebel Gouffi atteint 1183m, où atteints les précipitations maximales sont égales à 1 800mm(OULHACI, 2016). Ce sont les régions les plus arrosées en Algérie (Meddi et Toumi, 2015), À l'est, on retrouve les Monts de Cheffia qui font une barrière topographique modérée, où l'altitude est égale à 996m à la forêt de l'Oued Soudan et les monts d'El Kala, Au SUD-EST dans le Djebel Bou Bakouch à Machrouha avec une altitude de 1197 m au dessus de niveau de la mer, Au centre de la région d'étude dans Le Djebel Debar (Dj Debagh) à Guelma d'altitude de 624 m, Dans ces régions, les valeurs moyennes de SDII est atteintes 25 mm. Il existe une forte relation claire entre l'altitude et les précipitations intenses dues à l'effet de la barrière orographique, et cela se reflète dans presque toutes les chaînes de montagnes, d'avantage qu'ils reçoivent de précipitations fréquentes que les vallées environnantes, Le reste du territoire atteint des valeurs faibles à moyenne comprises entre 7 et 19mm.

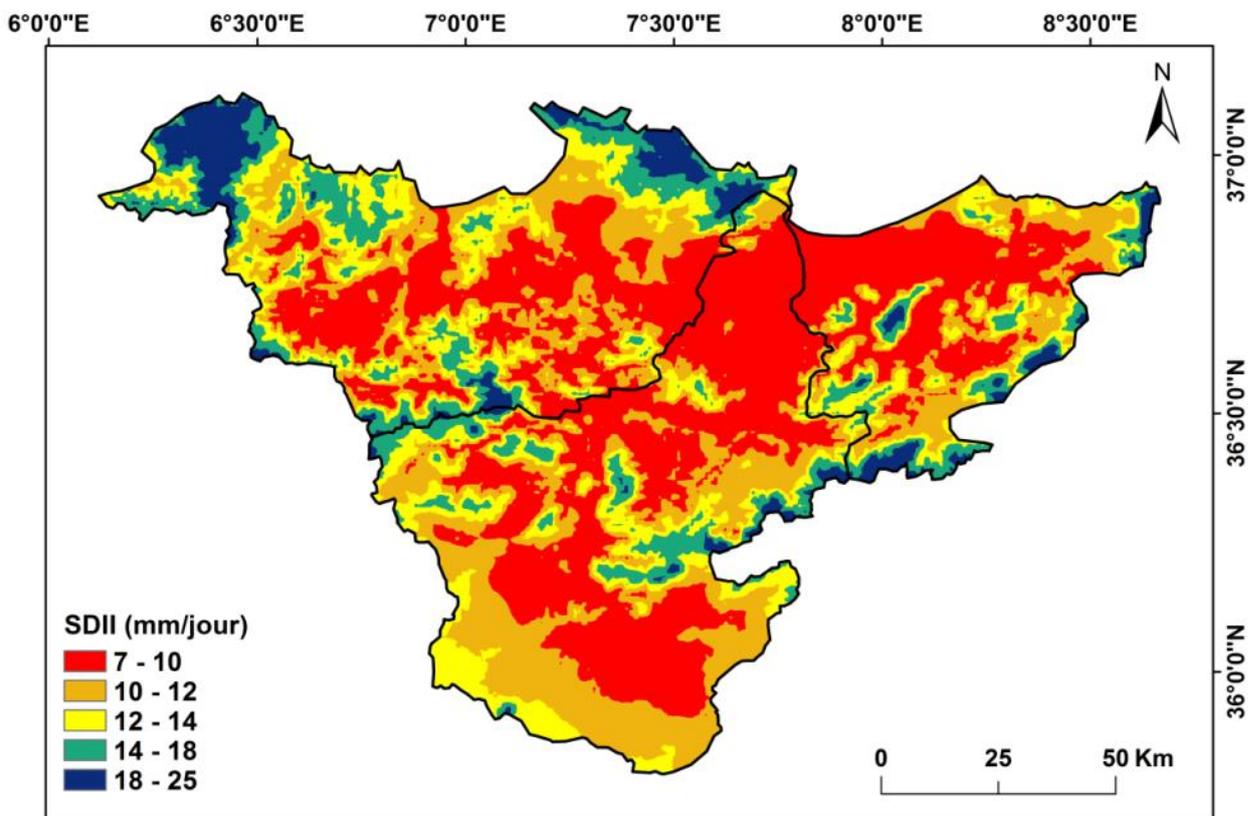


Figure 7.2 Intensité des précipitations journalières moyennes (SDII)

7.3 Précipitations maximales sur une journée (RX1)

L'indice RX1 définit les précipitations maximales enregistrées en 24 heures sur une année, en moyenne. Dans le NORD-EST algérien (figure 7.3), cette statistique montre des valeurs allant de 30 jusqu'à 150 mm, ce qui montre une très grande diversité selon les régions. Les valeurs basses sont enregistrées autour des zones qui enregistrent des valeurs élevées avec une forte concentration spatiale.

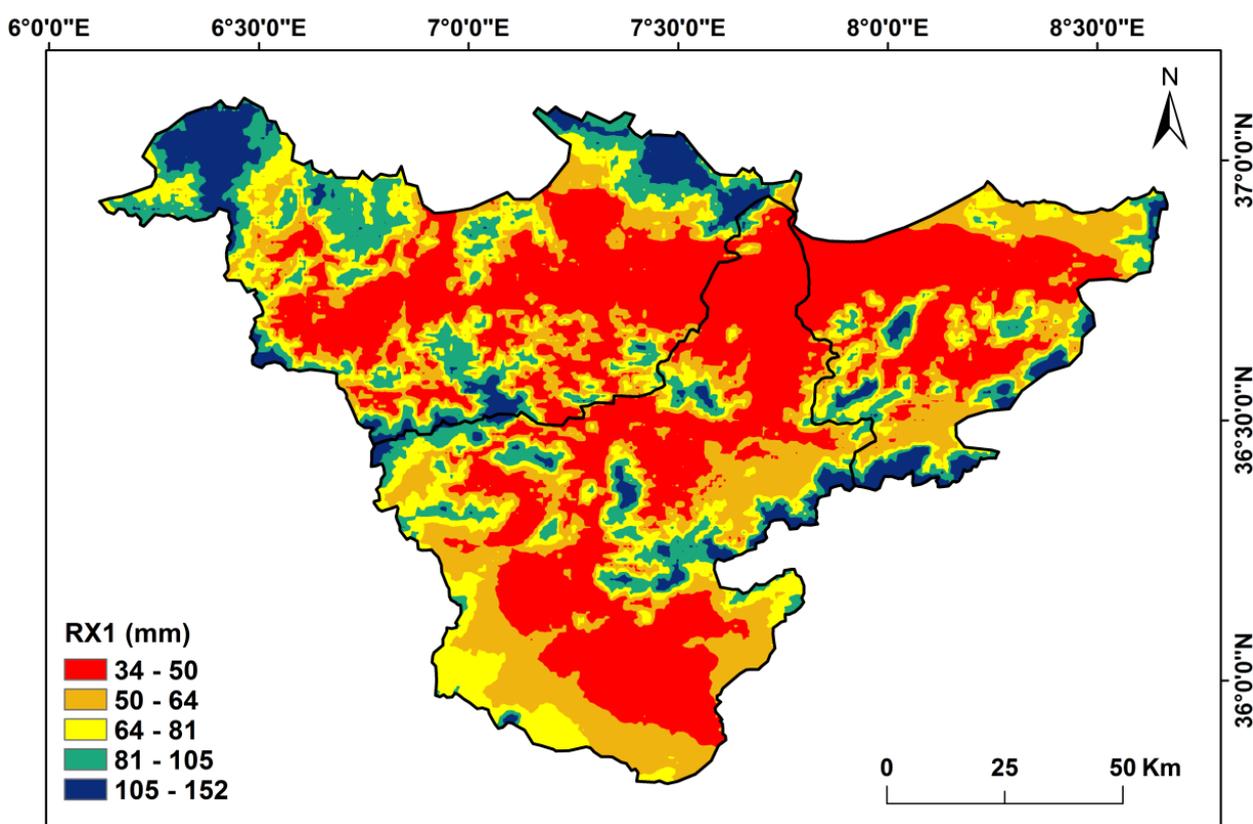


Figure 7.3 Moyenne des précipitations maximales en un jour (RX1)

Les valeurs maximales ont été regroupées principalement dans les zones les plus élevées en altitude, spécialement la partie côtière dans le massif d'Edough jusqu'au Cap de Fer à Annaba, au NORD-OUEST dans le massif du Collo à Skikda ainsi que dans la partie SUD-EST des monts de Mechroha, et SUD-OUEST dans les monts de Debagh à Guelma. Les valeurs atteintes des quantités RX1 sont supérieures à 130 mm (au-dessus de 1000 mètres d'altitude). Ce chiffre descendait avec l'altitude jusqu'à atteindre des valeurs moins de 50 mm dans les plaines et les vallées. Ce qui est logique en raison de l'effet de barrière orographique. Par conséquent, cela indique la

forte concentration des maximales des précipitations présente dans les chaînes de montagnes dans les altitudes supérieures à 800m.

7.4 Précipitations maximales mensuelles sur cinq jours consécutifs (RX5)

La précipitation maximale dans une période de cinq jours au sein d'une même année a montré des modèles de distribution spatiale très similaires à RX1, mais avec des gradients plus répandus dans l'espace (figure 7.4). Les valeurs les plus élevées sont atteints à nouveau dans les zones montagneuses les plus élevées, avec des chiffres atteignant jusqu'à 270 mm de précipitations accumulées sur cinq jours consécutifs. Ces chiffres descendent progressivement jusqu'à environ 60-95 mm par rapport aux 30-50 mm qui ont eu lieu dans les faibles altitudes et les vallées.

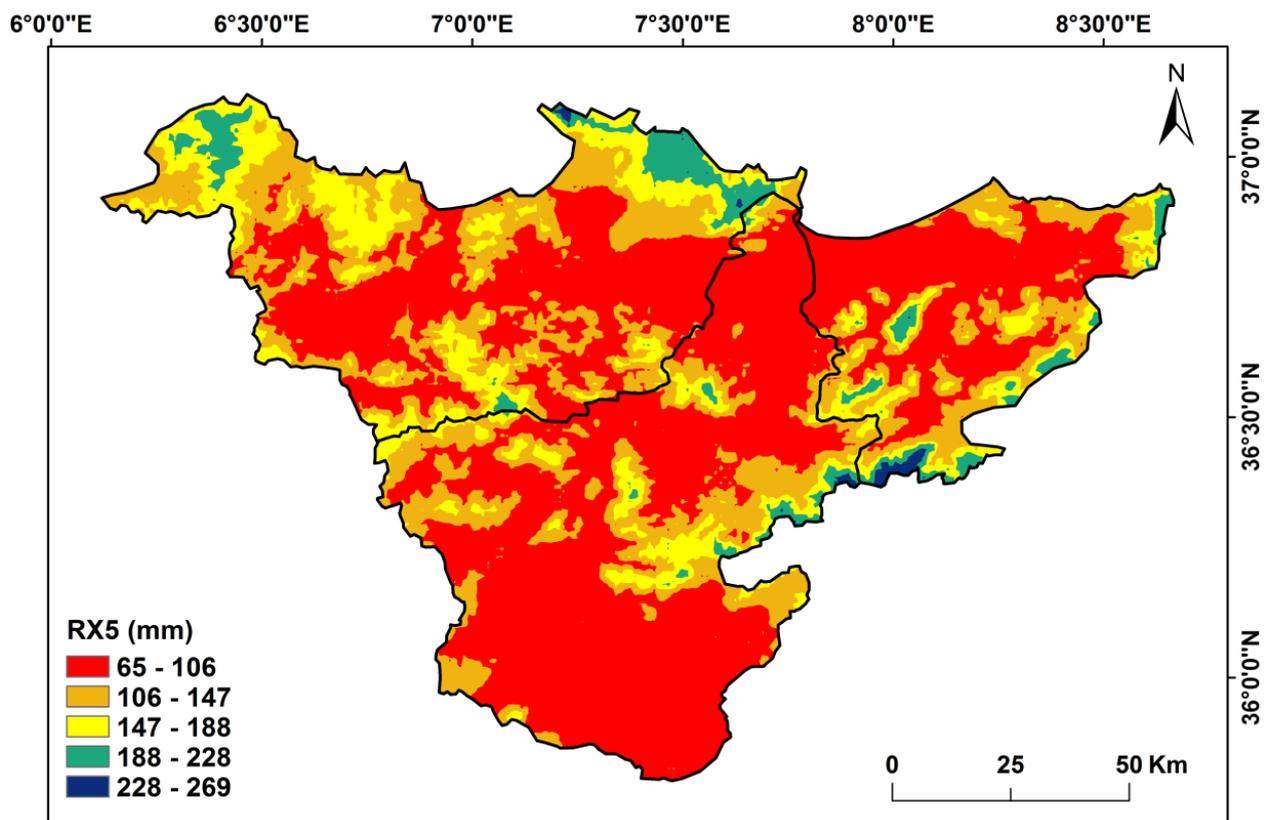


Figure 7.4 Moyenne des précipitations maximales sur 5 jours consécutifs (RX5)

7.5 Nombre annuel de jours pluvieux supérieurs à 10 mm (R10mm)

La persistance des précipitations intenses qui a été mesurée par le nombre de cas de précipitations journalières dépassant les limites de 10 mm, 20 mm a été définie au moyen d'indices R10 mm et R20 mm, L'indice R10mm réparti par un gradient croissant du SUD au NORD avec des valeurs maximales se concentrant généralement dans les régions côtières et à haute altitude (figure 7.5). Le plus grand nombre de jours a été enregistré dans le NORD, à Annaba spécialement dans les monts d'Edough, à l'est dans les monts de Cheffia et El Kala, au SUD-EST dans les monts de Boubakouch à Mechroha, au centre dans les monts de Houara à 1,292 m d'altitude à Guelma. Comme il est logique, où les volumes annuels des précipitations les plus élevés se produisent, il pleut une quantité significative pour un plus grand nombre de jours par an (37 à 42 jours). Les plus faibles valeurs des jours pluvieux de 10mm (10-16 jours) se concentrent également dans la partie SUD de la zone d'étude du bassin de la Seybouse.

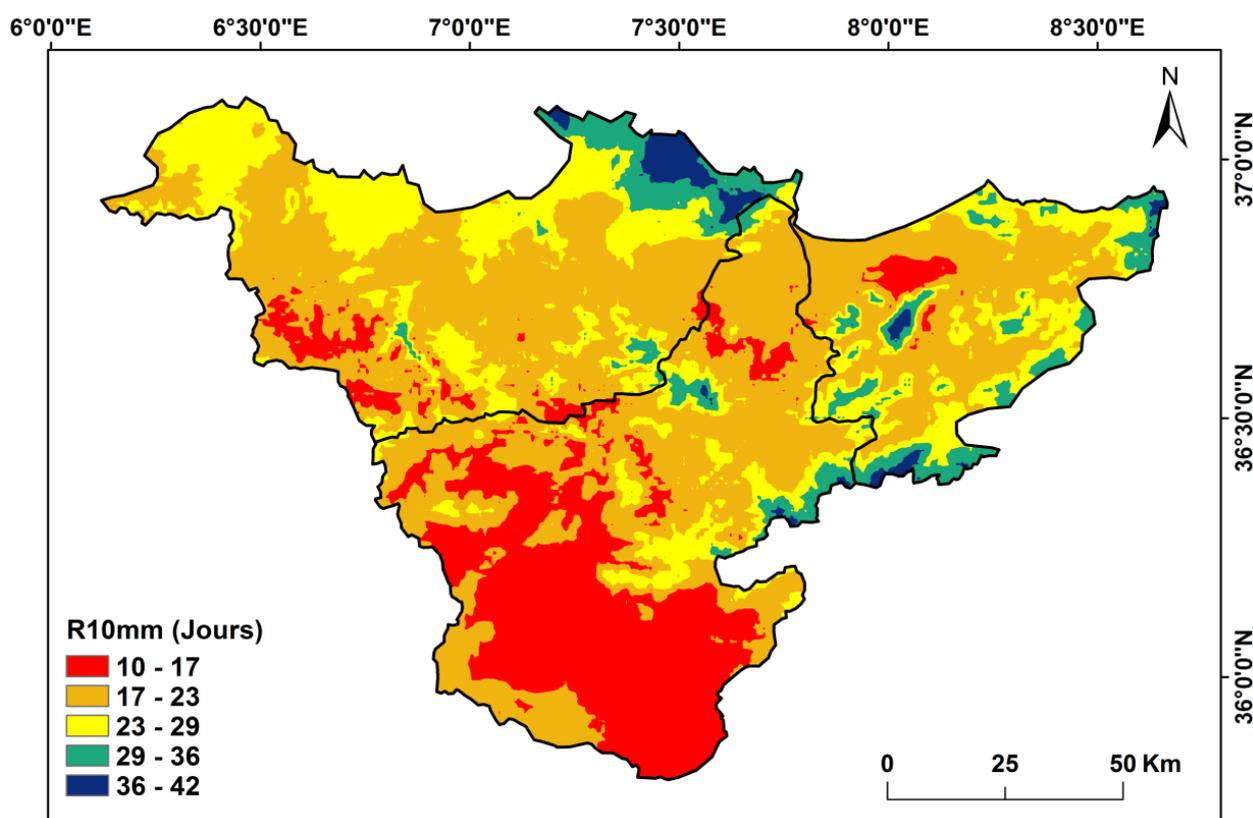


Figure 7.5 Nombre moyen de jours de précipitations supérieures à 10 mm (R10mm)

7.6 Nombre annuel de jours de précipitations supérieures à 20 mm (R20mm)

Les quantités de précipitations supérieures à 20 mm en 24 heures peuvent être considérées comme intenses. La distribution spatiale de cet indice est dominée par de faibles nombres des jours pluvieux supérieurs à 20 mm, répartis dans la majorité de la région d'étude compris entre 3 à 7 jours (figure 7.6). Dans la zone NORD, où les volumes moyens des précipitations annuelles les plus élevés s'accumulent, on a obtenu les valeurs les plus élevées dans la chaîne de montagne d'Edough. Des valeurs aussi élevées ont été trouvées à l'est dans les montagnes de Cheffia et El Kala et au SUD-EST dans les monts de Mechroha. Ces régions ont enregistré des valeurs maximales des jours pluvieux supérieurs à 20 mm, par une fréquence moyenne annuelle atteignant jusqu'à 29 jours.

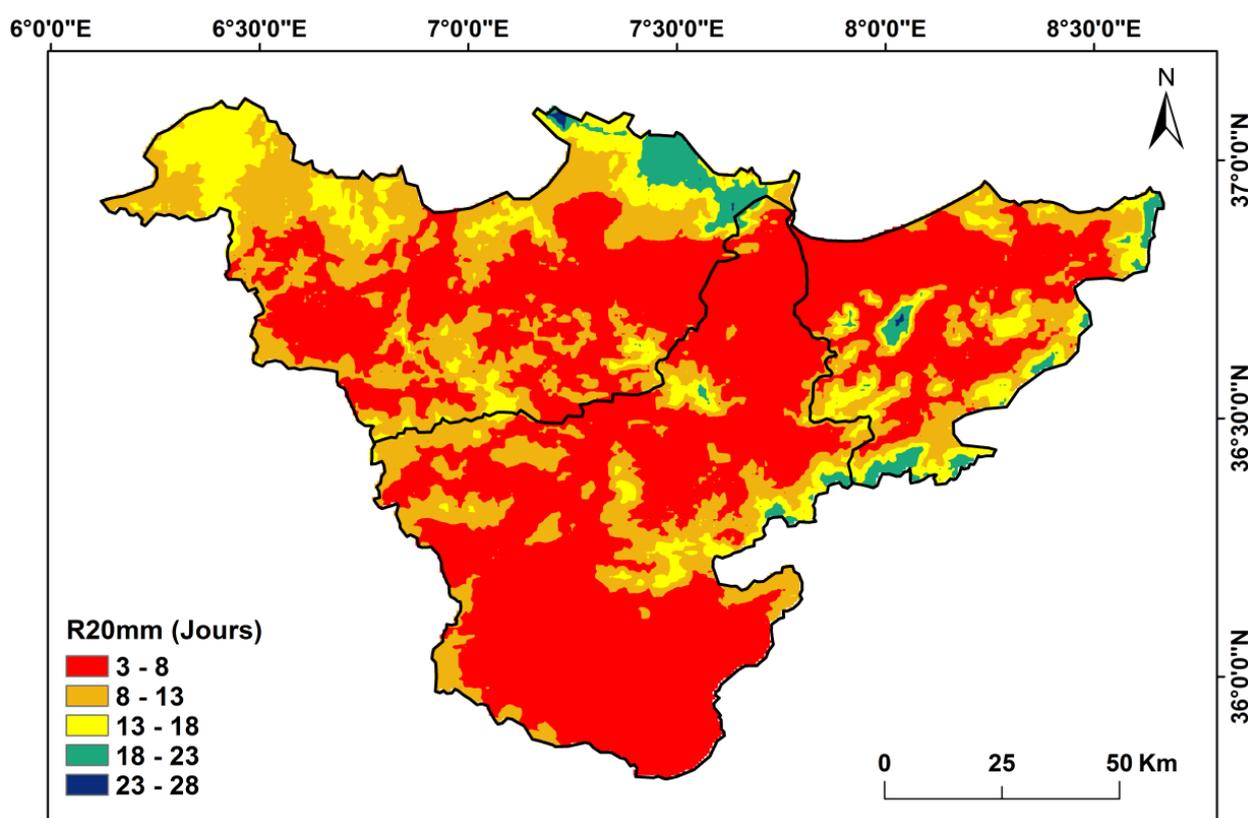


Figure 7.6 Nombre moyen de jours de précipitations supérieures à 20 mm (R20mm)

7.7 Durée maximale de la période sèche (CDD)

Le CDD représente le nombre maximum de jours secs consécutifs dans une année. C'est un indice de mesure de «sécheresse» (Frich et al., 2002), qui décrit le plus bas de la queue de la distribution des précipitations, et est souvent appelé indicateur de sécheresse. La moyenne de CDD est d'environ 50 jours. La plus faible valeur des jours secs consécutifs est enregistrée dans le centre de la région d'étude, précisément à Nechmaya par des valeurs moins de 60 jours (figure 7.7). La distribution spatiale des maximales des jours secs consécutifs moyens annuels atteint 104 jours, concentrée dans le SUD, spécialement à oued Cherf, oued Znati, Sedrata et Terraguelt, ainsi qu'à l'est à Ain Kerma, dans l'OUEST de la région d'étude particulièrement à Berrahal, Ben Azouz, Azzaba, oued Safsaf, Beni Oulban. Ces chiffres ont montré que la région d'étude a des zones avec au moins trois mois consécutifs sans précipitations.

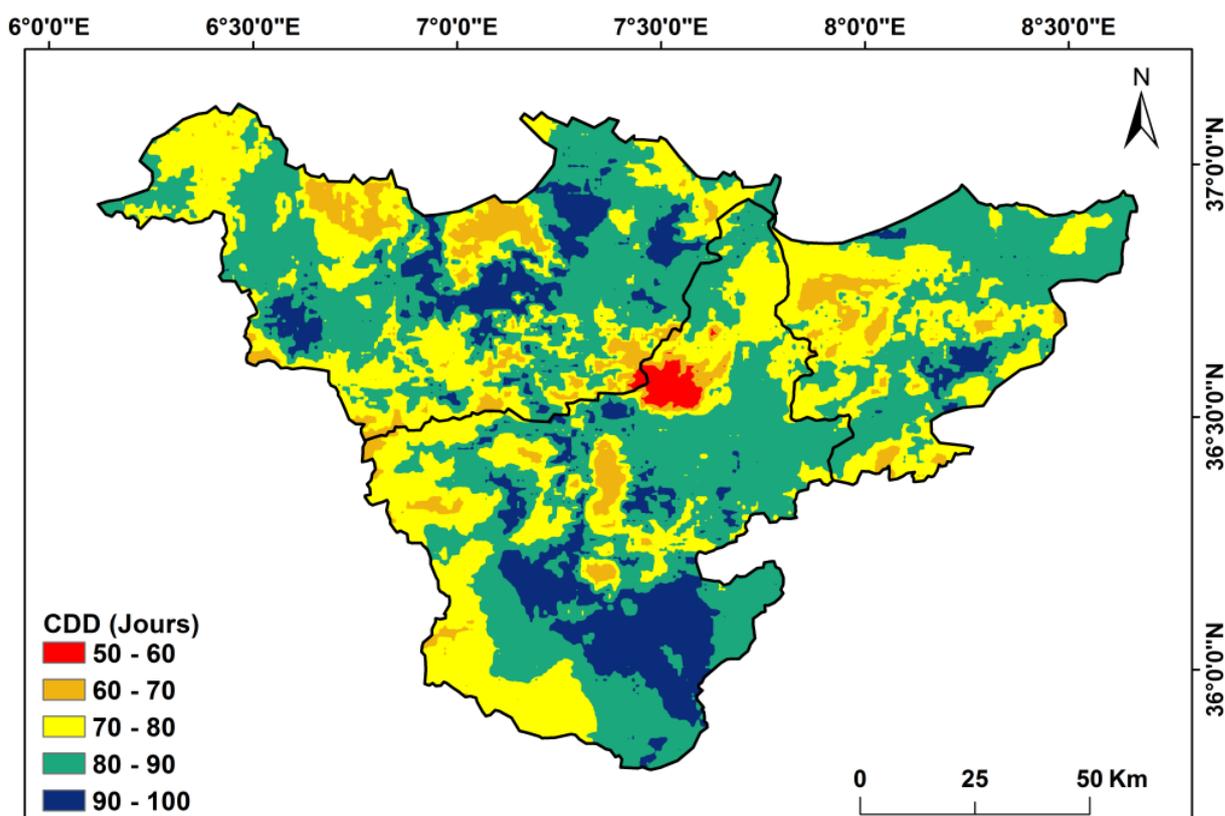


Figure 7.7 Moyenne du nombre maximal des jours secs consécutifs (CDD)

7.8 Durée maximale de la période humide (CWD)

L'indice CWD représente le nombre maximum de jours de pluie consécutifs dans une année, Dans ce cas, contrairement à l'indice CDD, la distribution spatiale (figure 7.8) a montré un gradient croissant du SUD au NORD. Les zones avec moins de 5 jours moyens annuels pluvieux consécutifs ont été trouvées pratiquement dans la région SUD spécialement les hauts plateaux de la Seybouse, aussi à l'extrême NORD-OUEST de la limite des côtières constantinoises centre. Les événements des précipitations plus fréquentes qui s'étendent au NORD ont enregistré jusqu'à 8 jours consécutifs humides dans la moitié de la région d'étude.

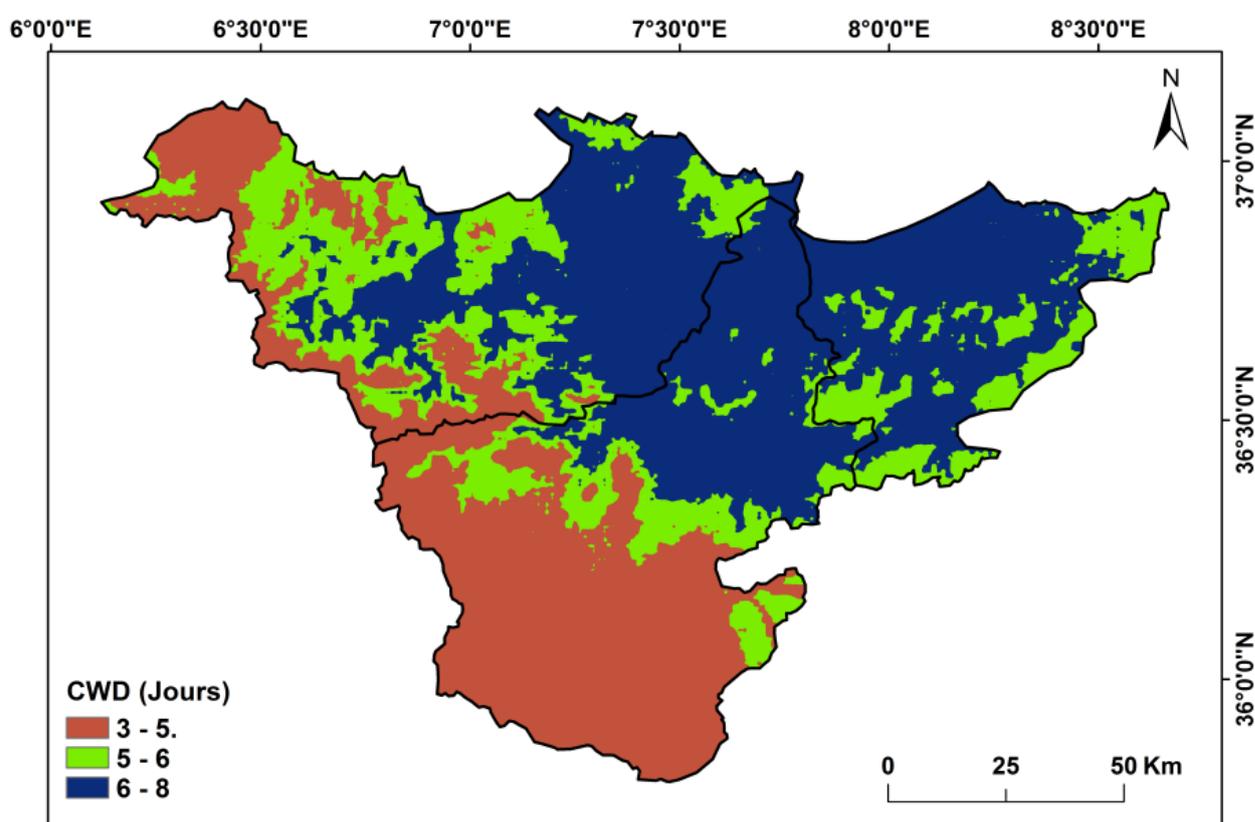


Figure 7.8 Moyenne du nombre maximal des jours pluvieux consécutifs (CWD)

7.9 Jours très humides et extrêmement humides (R95p R99p)

Les jours très humides (R95p) et les jours extrêmement humides (R99p) constituent les apports journaliers en eau les plus importants par rapport à leurs seuils (au 95^e centile et au 99^e centile), Par la quantité d'eau

apportée, ils peuvent contribuer aux phénomènes des géorisques naturels notamment les inondations, les glissements de terrains, l'érosion des sols etc. Le R95p (figure 7.9) présente une distribution similaire de R99p (figure 7.10). La région d'étude présente les mêmes zones qui enregistré des valeurs maximales des indices de R95 et R99p mais avec un déclin dans les valeurs des R99p.

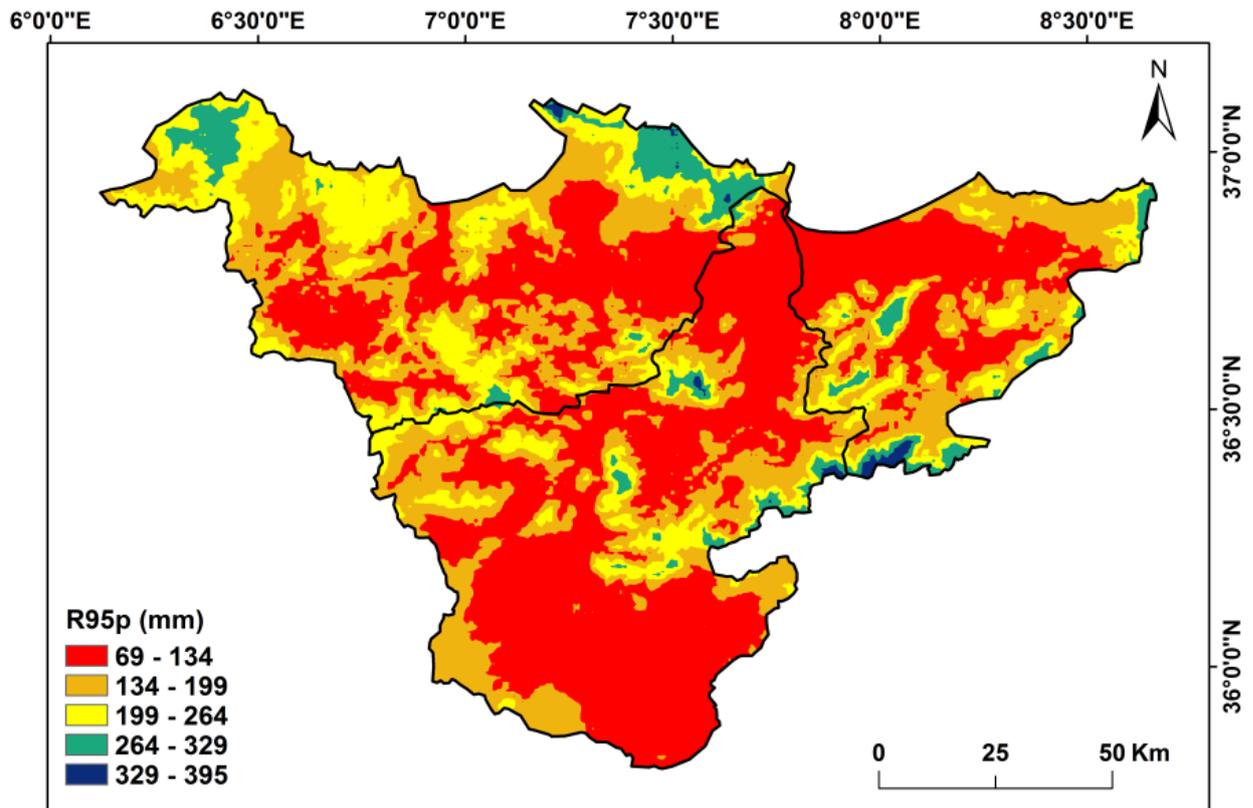


Figure 7.9 Précipitations supérieures au 95^e centile (R95p)

La région d'étude est dominée par des valeurs du R95p inférieures à 134mm réparties dans la majorité des zones. Cependant, les valeurs maximales sont détectées dans la bande côtière méditerranéenne et à haute altitude où on a enregistré des cumuls maximaux des précipitations. Ce sont les mêmes endroits qui ont indiqué des valeurs maximales dans les indices extrêmes précédents, en particulier au littoral dans les monts d'Annaba, à l'extrême NORD-OUEST dans les monts de Skikda, les régions montagneuses de Taref à l'est, au SUD-EST à Djebel Mechroha, ainsi que les hautes altitudes dans le centre de la région d'étude qui se trouve à Guelma, par des valeurs allant jusqu'à 395mm et 127 mm pour les indices de R95p et R99p respectivement.

Ceci indique que les précipitations annuelles sont dominantes dans ces zones. Une faible gamme de R95p et R99p enregistre 134 mm, 42mm respectivement est répartie dans la majorité de la région d'étude.

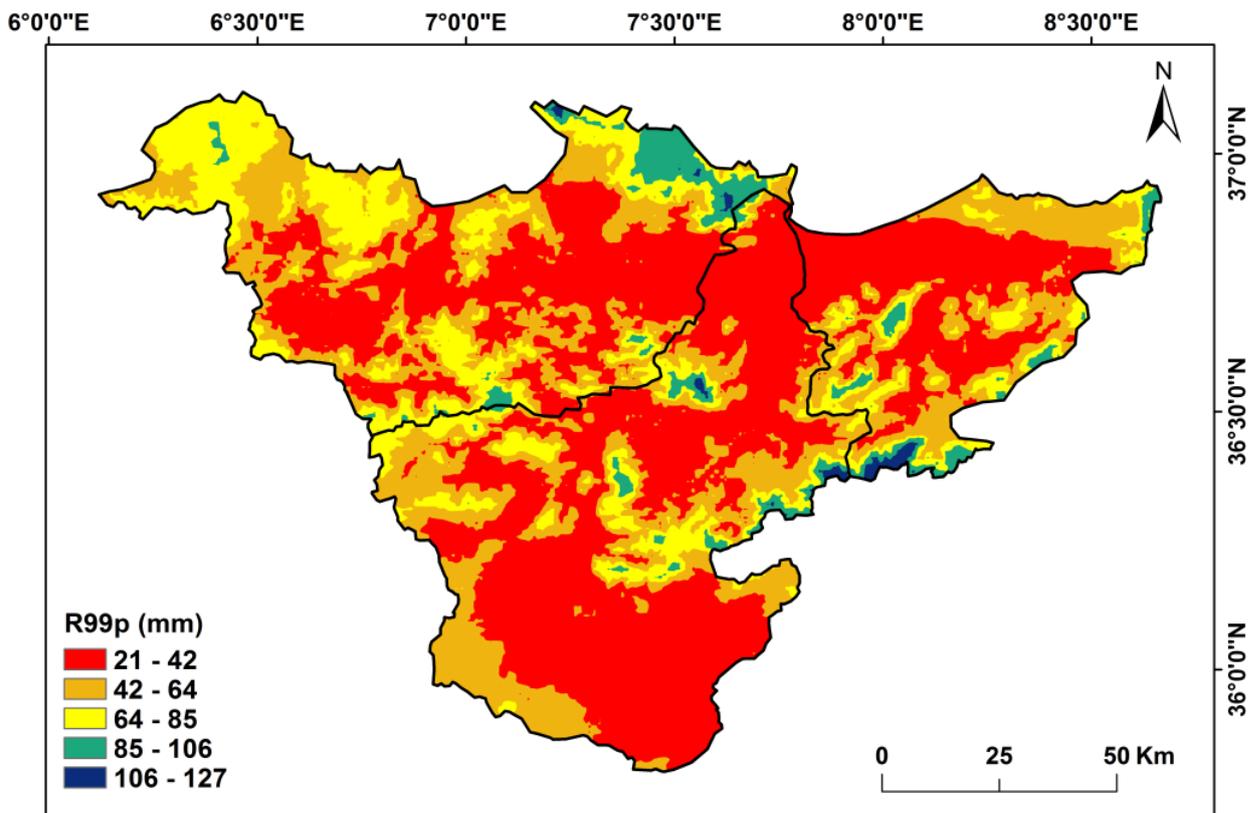


Figure 7.10 Précipitations totales supérieures au 99^e centile R99p

7.10 Conclusion

Nous avons décrit l'analyse spatiale de changement de dix indices des précipitations extrêmes maillées de 1*1 km d'une résolution journalière sélectionnée. Les résultats trouvés présentent une croissance indiquée par un gradient du SUD vers le NORD dans les paramètres d'ampleurs/ et d'intensités et de fréquences extrêmes des précipitations dans la région d'étude, à l'exception des jours secs consécutifs CDD qui montrent un comportement différent et irrégulier, Les résultats montrent que les précipitations annuelles totales par jours pluvieux PRCPTOT, l'intensité journalière simple SDII, la quantité des précipitations maximales sur un jour RX1 et sur 5 jours consécutifs, la fréquence des jours fortes R10mm et très fortes des précipitations R20mm, les précipitations journalières très humides R95p et extrêmement humides R99p, sont plus abondantes dans la

région côtière et à haute altitude du NORD-EST algérien. Ils sont particulièrement enregistrés dans certains points très localisés correspondant aux zones élevées telles que dans la chaîne montagneuse littorale d'Edough qui s'étend d'île du Cap de Garde jusqu'au massif du Cap de Fer à Annaba, au NORD-OUEST dans le massif Collo à Skikda, dans les monts de Machroha au SUD-EST, ainsi que le centre dans la région montagneuse de Guelma, Le nombre maximal des jours secs consécutifs dans une année CDD est totalement différent à la répartition des nombres maximaux des jours humides consécutifs CWD. Les résultats des CDD ont montré que la région d'étude a des zones avec au moins trois mois consécutifs sans précipitations, réparties d'une manière hétérogène.

8 EVOLUTION TEMPORELLE ET TENDANCE DES PRECIPITATIONS EXTREMES

8.1 Précipitations annuelles PRCPTOT durant la période 1970-2010

Les précipitations moyennes annuelles (PRCPTOT) sont dominées par une tendance positive répandues sur l'ensemble de la région d'étude avec une augmentation de 28,62 mm par décennie dans le NORD-EST algérien (figure 8.1), La distribution spatiale des tendances a qualifié cette augmentation dans la région d'étude (figure 8.2). Cette tendance était significative dans l'extrême NORD-OUEST à Skikda, et la partie SUD-EST du bassin côtiers constantinois-est.

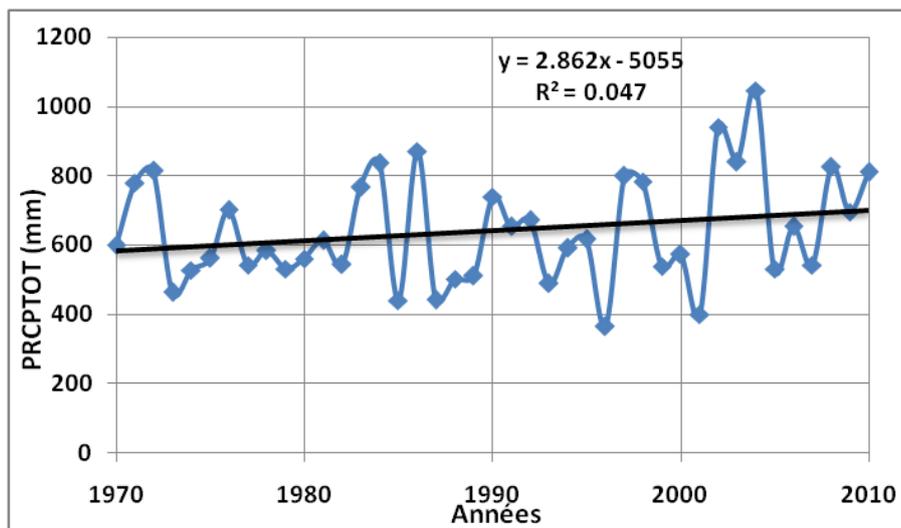


Figure 8.1 Évolution temporelle des PRCPTOT dans le NORD-EST algérien

L'évolution de l'indice PRCPTOT dans chaque station a montré que la décennie 2000 est définie comme la plus arrosée durant la période d'étude (1970-2010), particulièrement les années 2004 et 2006 identifient des valeurs maximales des PRCPTOT dans 11 et 6 stations respectivement durant la période d'étude. Dans le sens contraire, l'année 1996 est définie comme déficitaire par rapport à la moyenne dans 17 stations.

La distribution spatiale des PRCPTOT (figure 8.2) est dominée par une tendance à la hausse dans la plupart des zones de la région d'étude, Une augmentation significative a été détectée dans le NORD-OUEST de la wilaya

de Skikda. Aussi, la région-est présente également une augmentation significative spécialement à Bouhadjar, Cependant la région côtière d'Annaba montre une diminution non significative des précipitations annuelles.

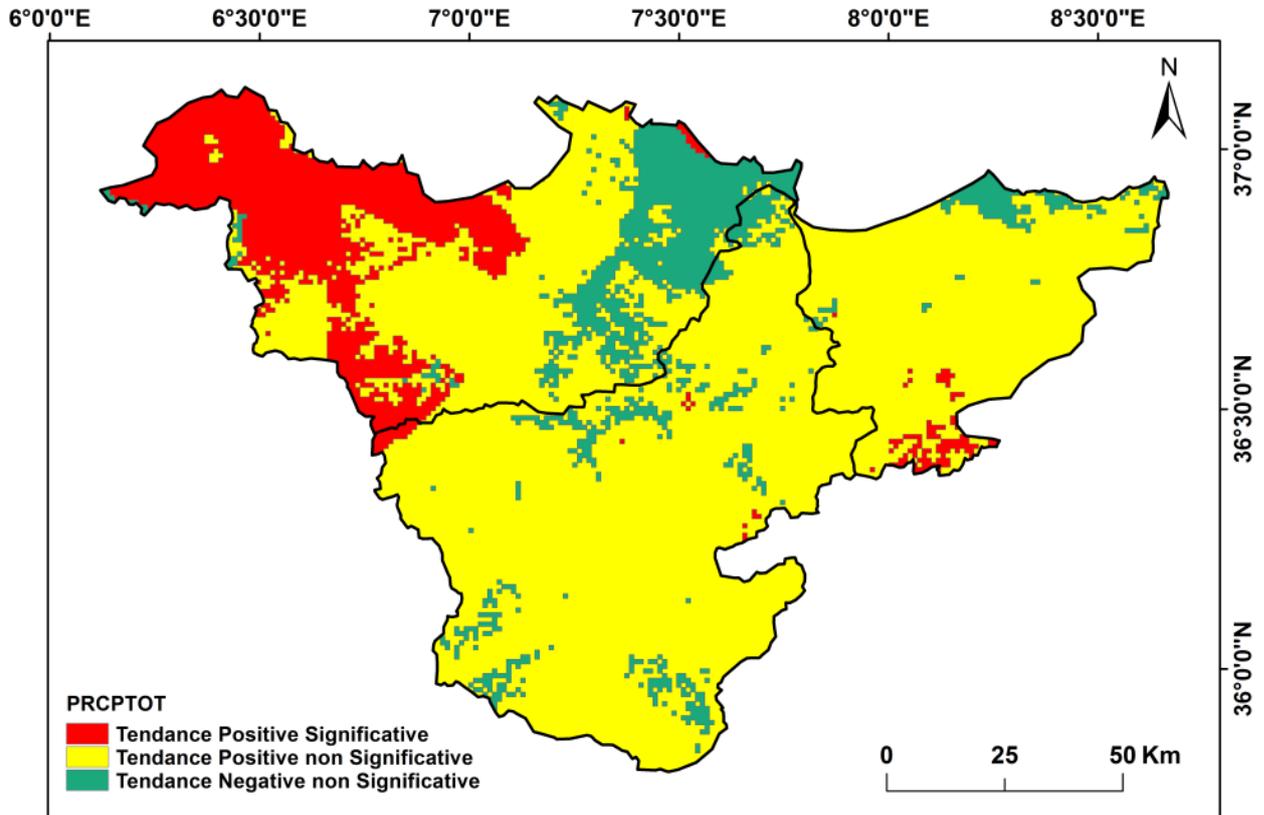


Figure 8.2 La tendance des PRCPTOT sur le NORD-EST algérien (1970-2010)

8.2 Intensité journalière des précipitations (SDII)

L'intensité moyenne des précipitations journalières a connu une augmentation significative dans le NORD-EST algérien (figure 8.3) durant la période d'étude. Cette augmentation est identifiée beaucoup plus sur la décennie 2000, spécialement dans les années 2002, et 2004 où l'on a enregistré des valeurs maximales de l'intensité des précipitations journalières dans 10 et 4 stations respectivement. Bien qu'il y ait une période de diminution surtout dans la décennie 1980 spécialement dans l'année 1985, qui présente une diminution maximale de l'intensité des précipitations journalières dans 17 stations pluviométriques, avec une variabilité remarquable d'année en année.

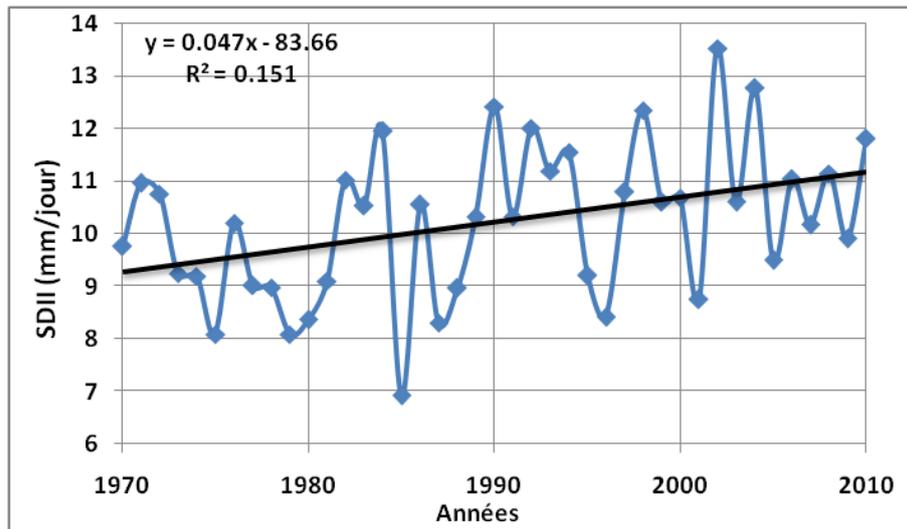


Figure 8.3 Évolution temporelle de SDII dans le NORD-EST algérien

La distribution spatiale de cette variabilité est présentée dans la figure 8.4. L'indice SDII a montré une tendance à la hausse plus prononcée et avec un plus grand degré de généralisation spatiale parmi tous les indices qui sont analysés. Le SDII a montré une augmentation significative dans la moitié de la région d'étude, spécialement au NORD-OUEST dans les côtières constantinois centre à la wilaya de Skikda, et le SUD dans les hauteurs du bassin de la Seybouse.

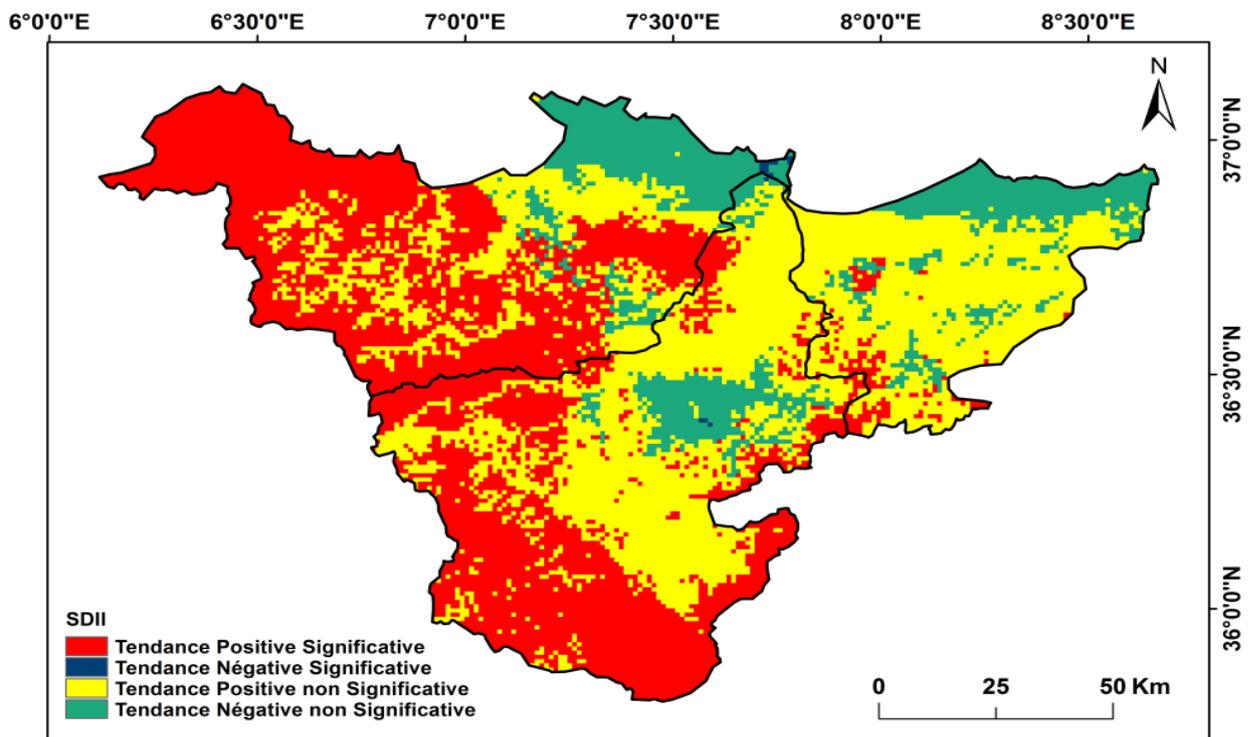


Figure 8.4 Tendance de SDII sur le NORD-EST algérien (1970-2010)

Bien qu'il n'ait pas montré une diminution significative sauf à Pont Bouceht, et non significative dans la région côtière du NORD à Annaba, le littoral EST à Taref, et le centre dans le bassin moyen de la Seybouse.

8.3 Précipitations maximales annuelles en une journée (RX1)

Les précipitations maximales en une journée ont montré une augmentation faible par un taux de changement égal de 2,86 mm/décennie (figure 8.5) dans la région d'étude, en dépit de la haute irrégularité d'une année à l'autre. La période la plus intense est celle enregistrée dans les années 1992 et 1999, Un déclin des précipitations maximales sur une journée est marqué durant les décennies 80 et 90, spécialement dans les années 1987 et 1996 pendant la période d'étude. Les deux années ont enregistré des valeurs minimales de Rx1 dans 12 stations pluviométriques.

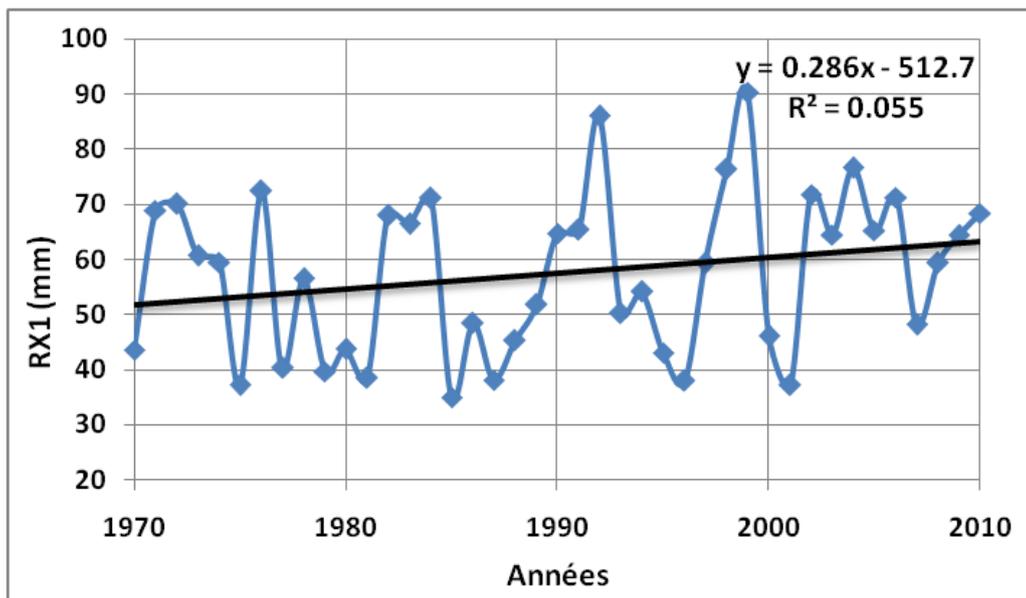


Figure 8.5 Évolution temporelle des RX1 dans le NORD-EST algérien

L'évolution de la distribution spatiale des précipitations maximales en une journée à l'échelle annuelle ont montré des schémas spatiaux clairs dans le NORD-EST algérien (figure 8.6). La plupart des points où une tendance positive significative a été trouvée se trouvent dans l'OUEST des côtières centre, le SUD-OUEST et dans la partie SUD de la Seybouse, Une augmentation non significative est détectée dans 70 % de la région d'étude.

Bien que les zones côtières d'Annaba et Taref ont montré une tendance à la baisse dans 12% de la région d'étude.

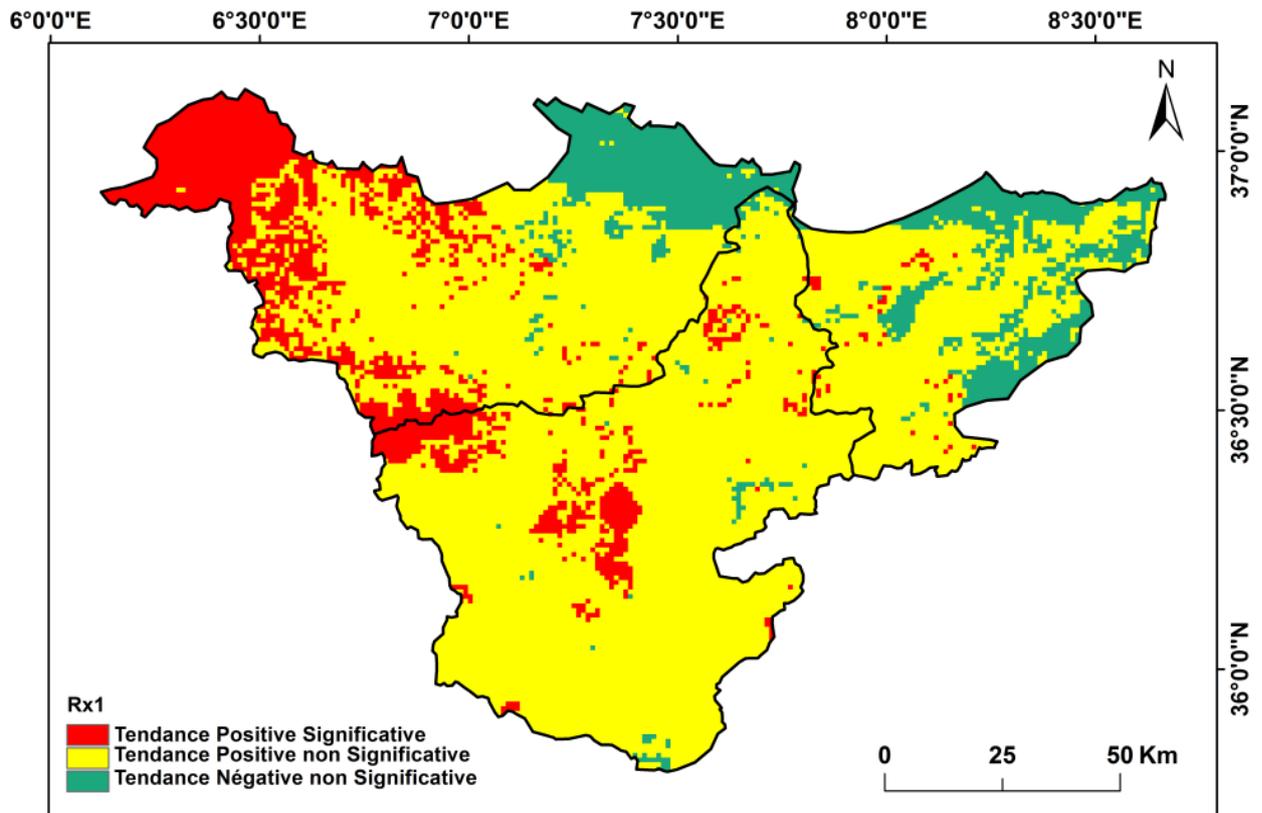


Figure 8.6 Tendance des précipitations annuelles maximales sur une journée (Rx1)

8.4 Précipitations maximales annuelles sur cinq jours (RX5)

Les précipitations maximales sur 5 jours consécutifs durant l'année ont présenté une augmentation non significative égale de 2,94 mm par décennie (figure 8.7) pendant la période 1970-2010.

On distingue que 13 stations pluviométriques ont marqué des valeurs maximales des précipitations sur 5 jours consécutifs durant la décennie 80, spécialement l'année 1985 où on a identifié des valeurs maximales dans 8 stations, La décennie 90 aussi enregistre des valeurs maximales durant l'année 1992 dans 6 stations. Malgré ces augmentations, le RX5 identifie des valeurs minimales des précipitations extrêmes sur 5 jours consécutifs particulièrement dans les années 1987 et 2001. Pendant ces 2 années, on a relevé des valeurs minimales des Rx5 dans 10 et 8 stations pluviométriques respectivement.

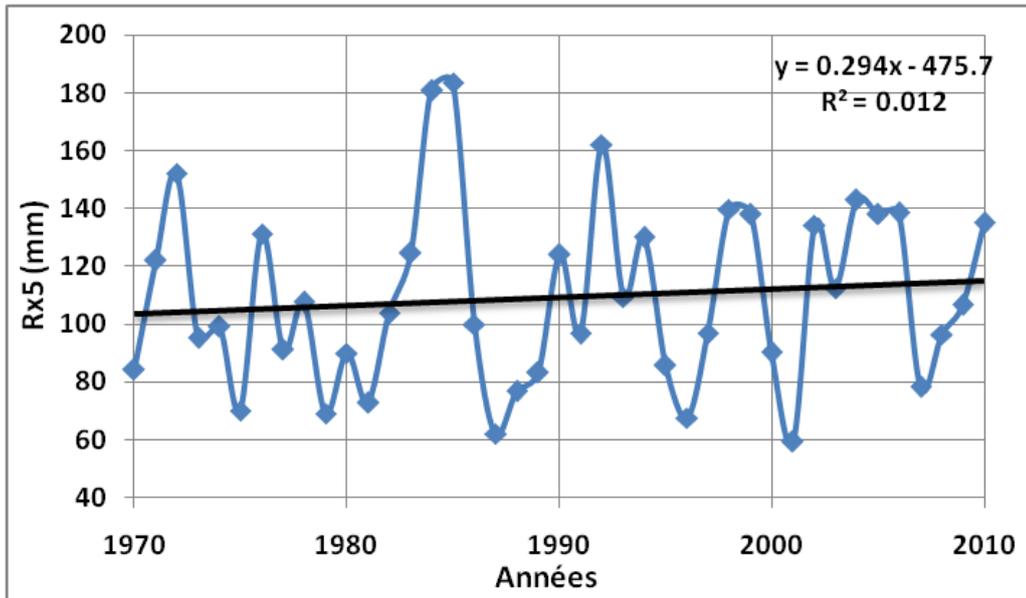


Figure 8.7 Évolution des RX5 dans le NORD-EST algérien (1970-2010)

La distribution spatiale des tendances des précipitations maximales sur cinq jours consécutifs (RX5) est similaire dans leur distribution spatiale à celles de RX1, bien que cette fois-ci avec des gradients plus prononcés (figure 8.8).

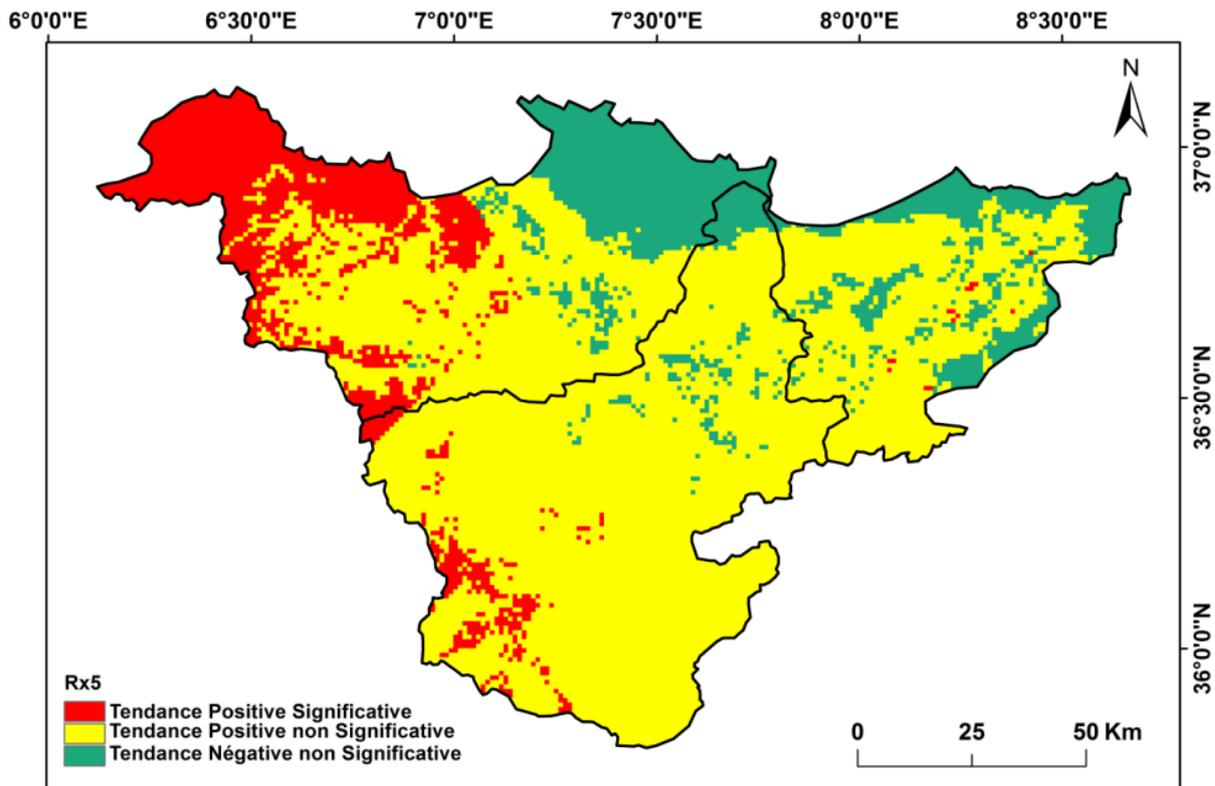


Figure 8.8 Tendance des précipitations annuelles maximales sur cinq jours (RX5)

Le Rx5 est dominé par une tendance à la hausse non significative dans 74 % de la région d'étude. Cette tendance est répartie dans la majorité de la

région d'étude. Les valeurs positives significatives sont survenues dans 16% de la région d'étude, en particulier à l'extrême NORD-OUEST à Skikda, Bien qu'on remarque un déclin non significatif dans les zones côtières d'Annaba et Taref soit 14% de la région d'étude.

8.5 Nombre annuel de jours de précipitations supérieures à 10 mm (R10mm)

L'indice R10mm a montré une tendance positive générale dans le NORD est algérien (figure 8.9), bien que cela n'a pas été vérifié pendant toute la période d'étude, Les années 1986, 2002 et 2004, ont enregistré des valeurs maximales de nombre des jours de R10mm dans 25 stations. Tandis que les années 1973, 1996 et 1985 ont montré des valeurs minimales dans 22 stations pluviométriques.

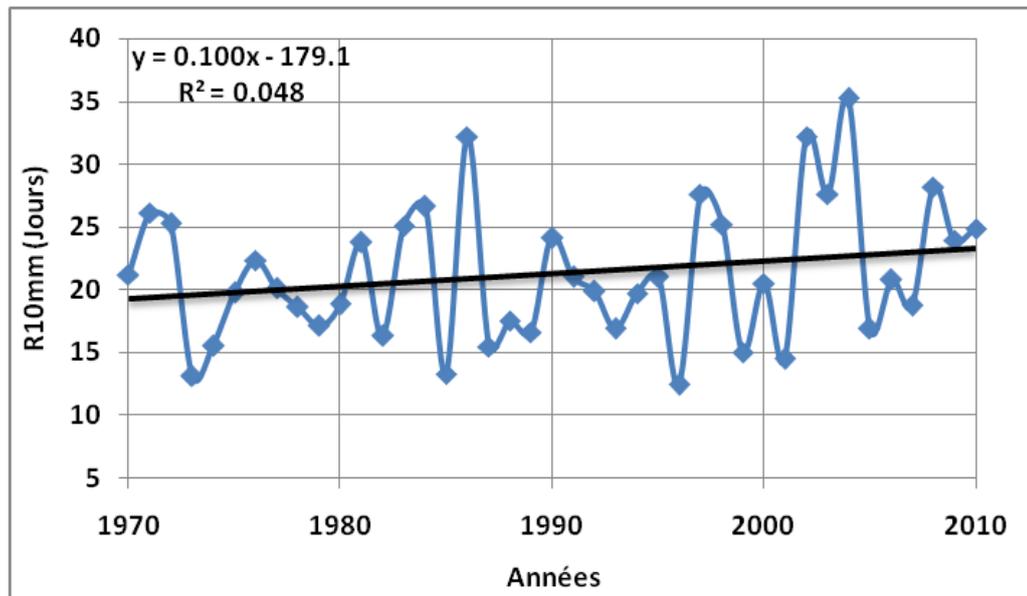


Figure 8.9 Évolution des RX5 dans le NORD-EST algérien (1970-2010)

La distribution spatiale du nombre de jours des précipitations supérieures à 10mm (figure 8.10) a montré en général une tendance positive non significative dans 85% de la région d'étude. La cote méditerranéenne à Annaba présente une tendance à la baisse non significative de R10mm, Seulement dans la région NORD-OUEST à Skikda, on a détecté une augmentation significative de R10mm au niveau de signification égal à 95% (c'est la même chose pour les autres indices PRCPTOT, SDII, Rx1, RX5).

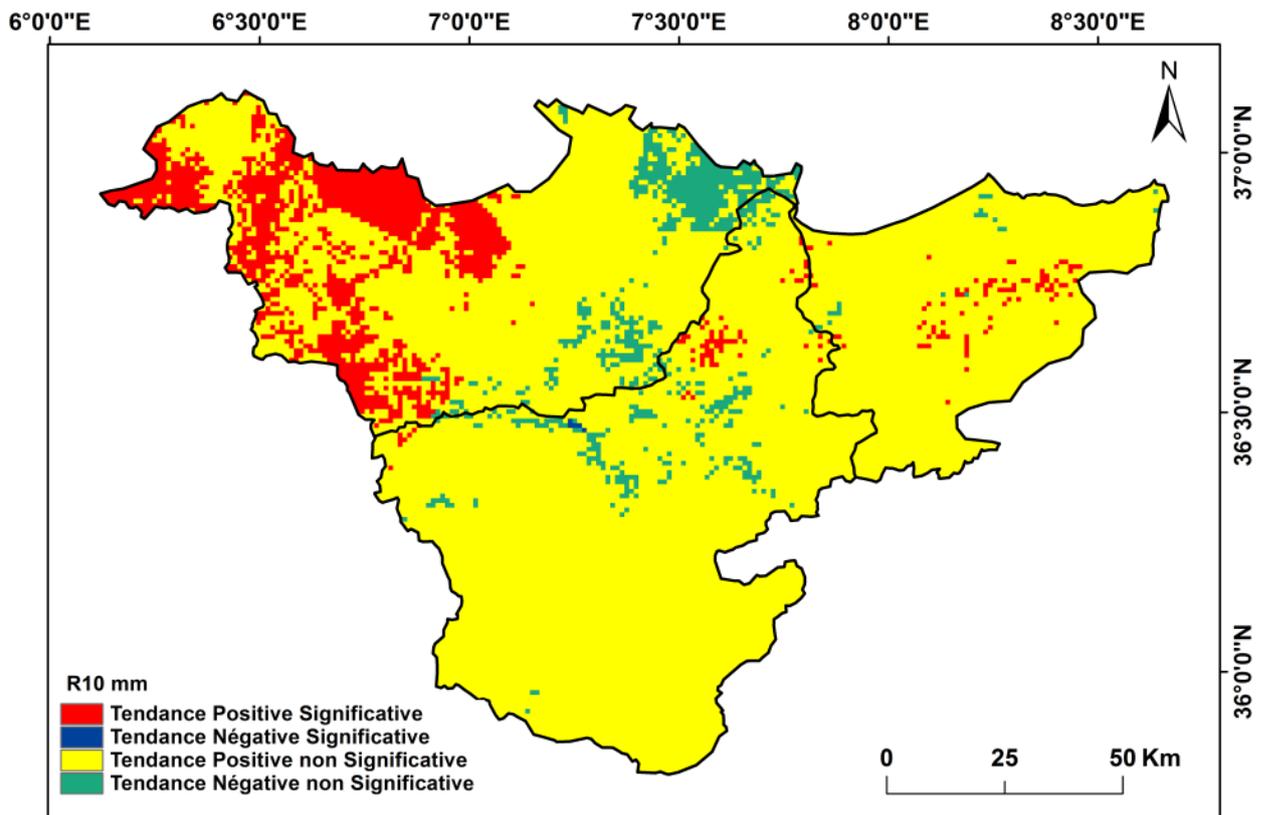


Figure 8.10 Tendence du nombre annuel de jours des précipitations >10 mm (R10mm)

8.6 Nombre annuel de jours de précipitations supérieures à 20 mm (R20mm)

L'évolution du nombre des jours supérieurs à 20mm est similaire à celle de R10mm (figure 8.11). La période la plus intense de R20mm est identifiée dans la décennie 2000, spécialement dans les années 2002 et 2004 pour 10 et 7 stations respectivement dans la région d'étude, Bien qu'on distingue une forte baisse de cet indice dans les années 1988 et 1996 dans 16 stations pluviométriques.

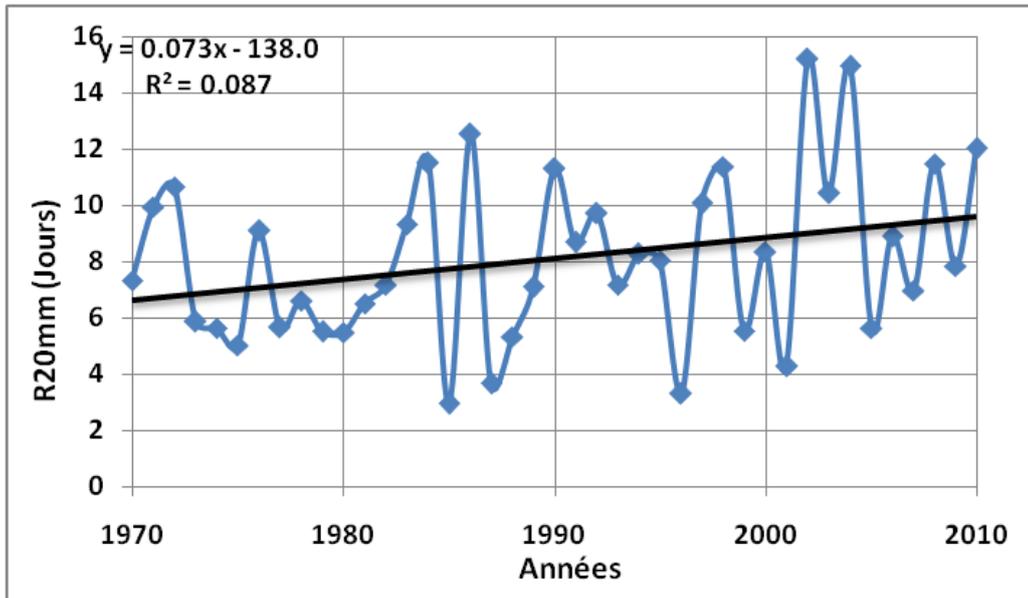


Figure 8.11 Évolution des R20 mm dans le NORD-EST algérien (1970-2010)

La durée des événements de précipitations intenses au-dessus de 20 mm a montré en général des modèles de distribution spatiale similaires à ceux de R10mm dans le NORD-EST algérien (figure 8.12).

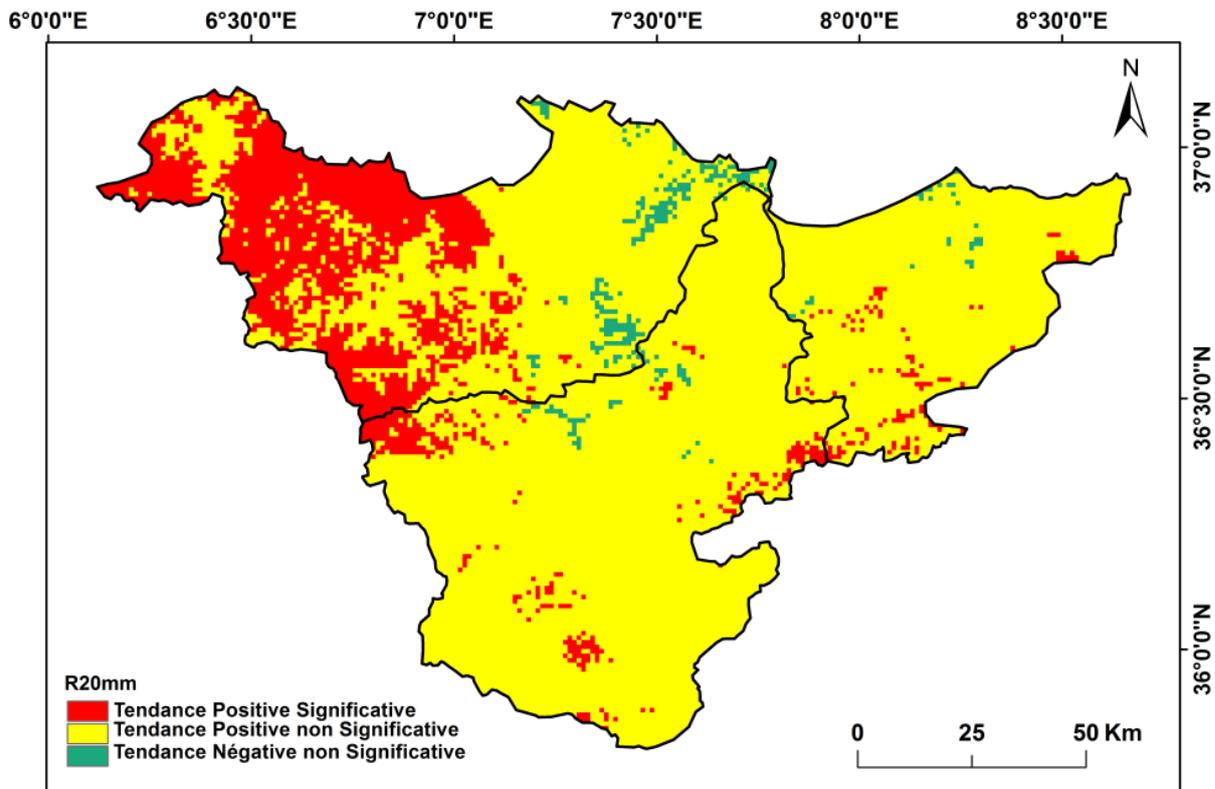


Figure 8.12 Tendance du nombre annuel de jours de précipitations > 20 mm (R20mm)

Une tendance à la hausse du nombre de jours supérieurs à 20 mm a été observée dans 81% de la région d'étude, principalement dans la Seybouse

et les côtiers constantinois centre, La partie OUEST de la région à Skikda présente une augmentation significative au niveau de 95%. Le comportement de tendance spatiale dans cette région était similaire que pour les indices précédemment présentés.

8.7 Durée maximale des jours secs consécutifs (CDD)

Le nombre maximum de jours secs consécutifs (CDD) a montré dans le NORD-EST algérien un déclin depuis 1970 (figure 8.13). La plupart de la région d'étude a montré des valeurs maximales de CDD, spécialement durant l'année 1973 et 1970 qui montre de longues séquences sèches, c.-à-d plus de 150 jours consécutifs sans pluie dans 11 et 5 stations respectives. Cela indique qu'il n'y a pas de précipitations plus de 4 mois consécutifs durant ces années. Ces résultats montrent que la décennie 70 est une période déficitaire provoquant l'apparition de la sécheresse, Alors que dans la même décennie, on trouve l'année 1975 a enregistré des valeurs minimales des jours secs consécutifs dans 10 stations.

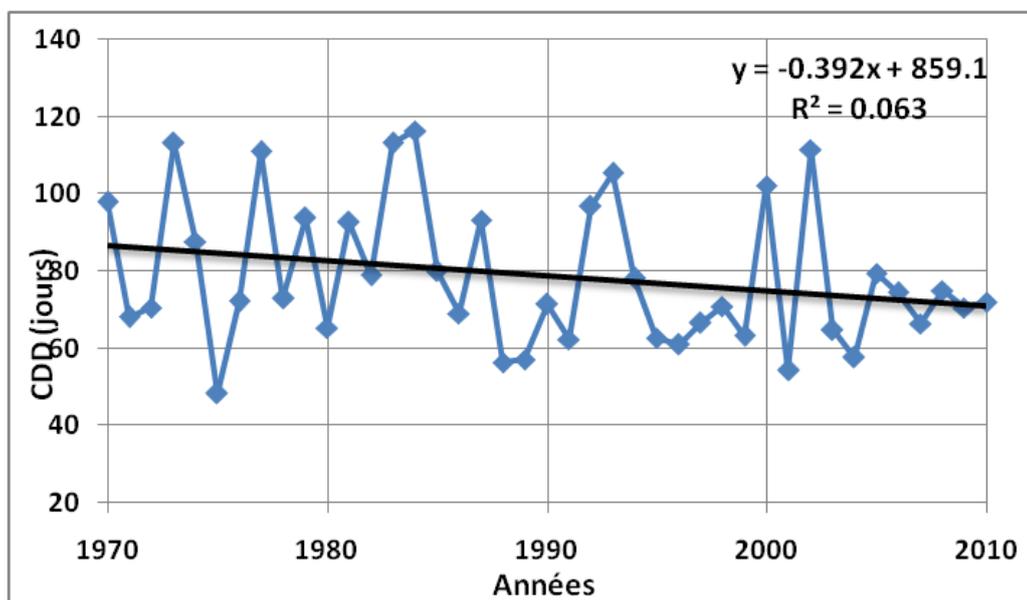


Figure 8.13 Évolution de CDD dans le NORD-EST algérien (1970-2010)

La répartition spatiale de l'indice CDD a montré que la plupart des zones de la région d'étude sont dominées par des tendances négatives non significatives soit 59% de la superficie totale (figure 8.14). Certaines zones ont montré des tendances à la baisse significatives au niveau de 95% tels

que le NORD-OUEST spécialement à Skikda, le centre de la région d'étude à Guelma, et les côtiers constantinois-est à Taref, Certains points ont également indiqué une tendance positive non significative se concentrant spécialement dans la partie SUD des côtiers-centre et le bassin de la Seybouse.

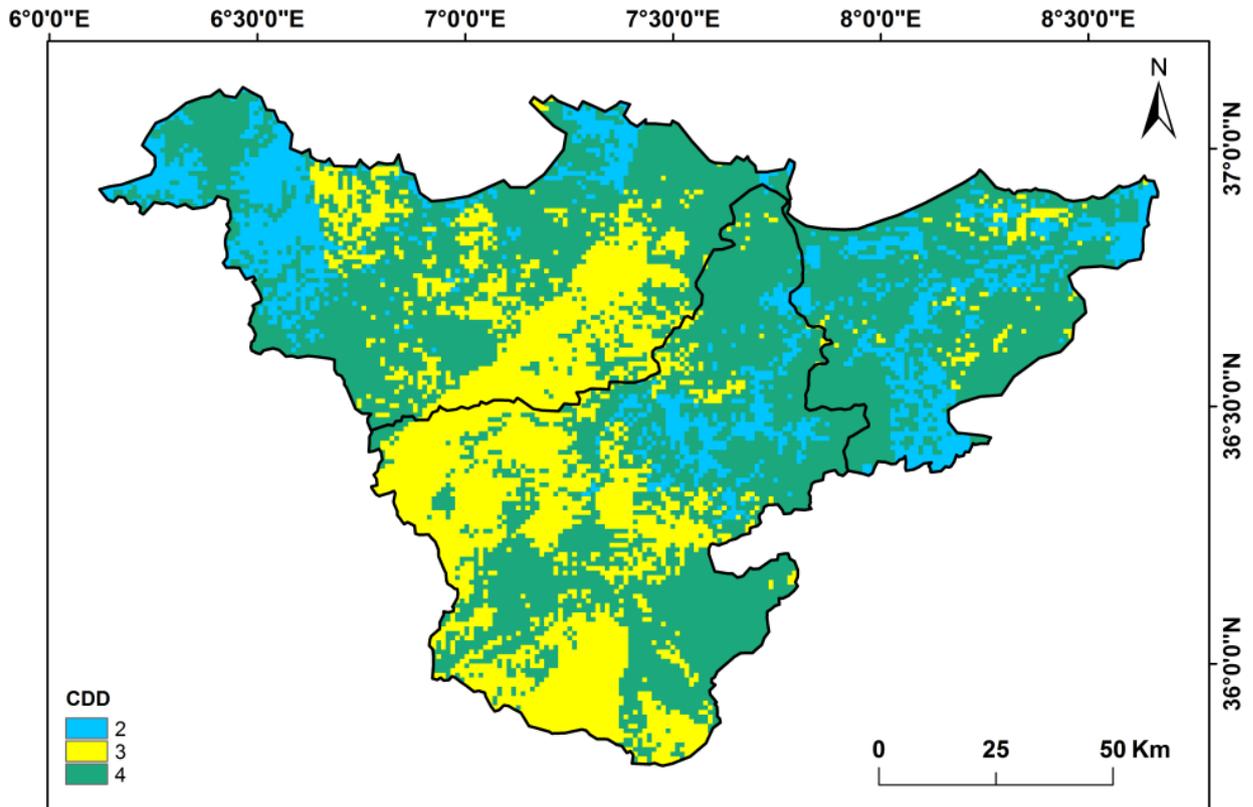


Figure 8.14 Tendance du nombre maximal des jours secs consécutifs (CDD)

8.8 Maximum de jours humides (CWD)

L'évolution temporelle de l'indice CWD dans le NORD-EST algérien a présenté une diminution non significative durant la période d'étude (figure 8.15), 32 stations pluviométriques ont enregistré des valeurs maximales des jours humides consécutifs durant la décennie des 90 et 80, spécialement dans les années 1994, 1981 et 1985, Cependant, on trouve de faibles valeurs de CWD distribuées tout au long de la période d'étude (1989, 1996, 2001) dans 27 stations pluviométriques.

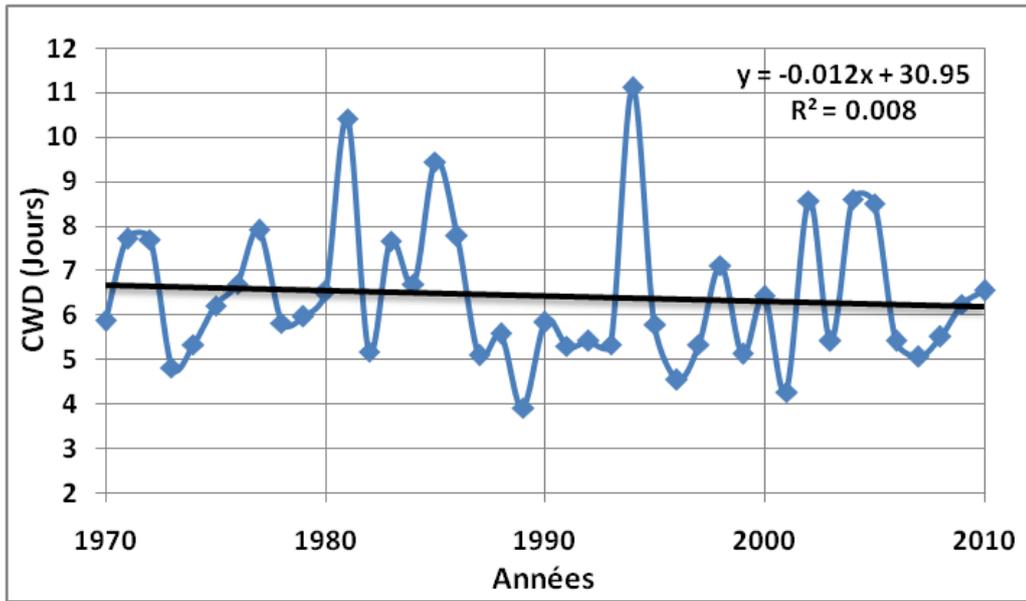


Figure 8.15 Evolution temporelle de CWD dans le NORD-EST algérien (1970-2010)

La distribution spatiale des maximaux de jours de pluie consécutifs présente un aspect opposé aux périodes de sécheresse maximum (CDD) (figure 8.16).

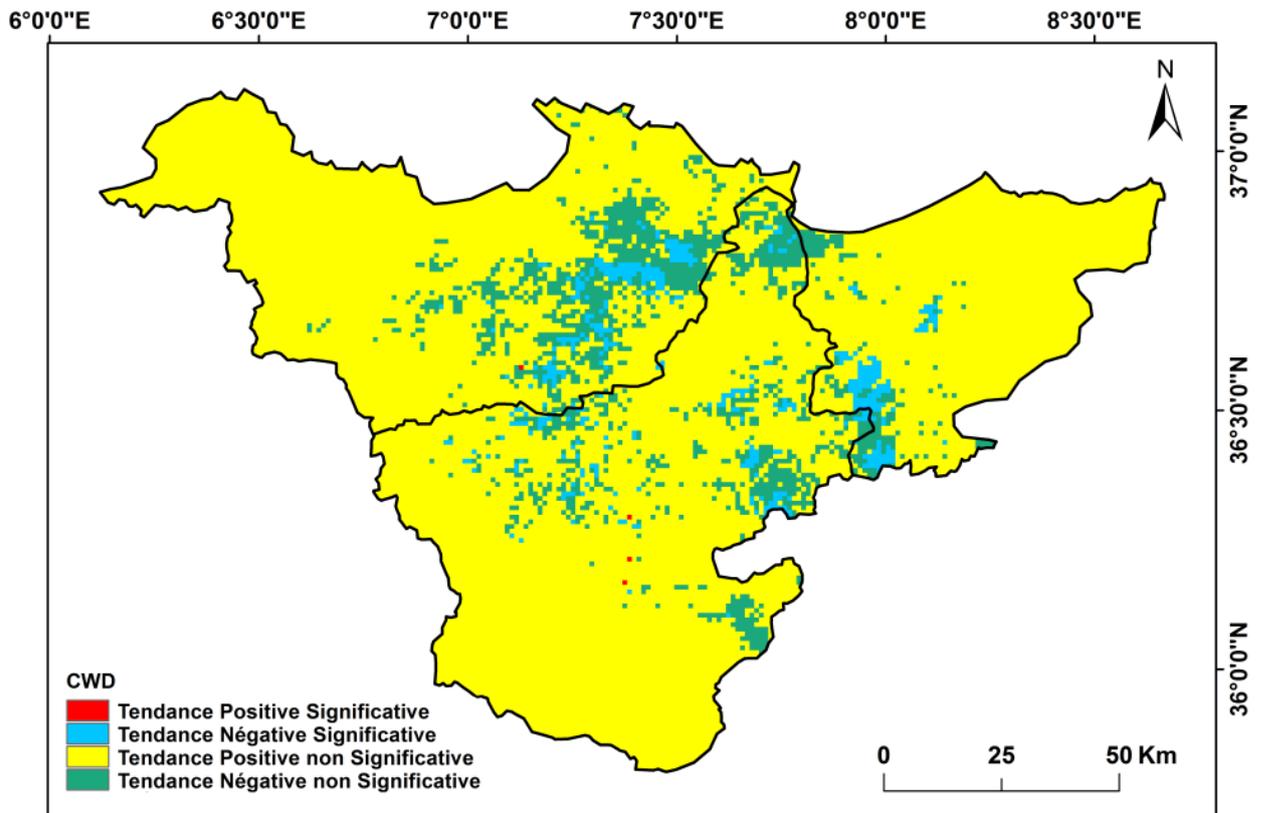


Figure 8.16 Tendance du nombre maximal des jours pluvieux consécutifs (CWD)

Les jours humides consécutifs (CWD) sont devenus plus fréquents et dominants dans plus de 86% du site d'étude. Cependant, on trouve des

points négatifs significatifs se concentrant dans le centre à Bouati Mahmoud, Bekouche Lakhdar, Ain Charchar, Pont Bouchet, dans l'est à Cheffia et le SUD-EST de la région d'étude spécialement à Machroha au niveau de 95% de signification.

8.9 Les précipitations maximales supérieures à 95^ecentiles (R95p)

L'indice de R95p représente le cumul des précipitations supérieures au centile 95, La figure 8.17 montre l'évolution de cet indice pendant la période 1970-2010. Cet indice présente une augmentation à la hausse non significative de 21 mm par décennie dans la majorité de la région d'étude. Les extrêmes les plus importants ont eu lieu en 1984 et 2004 dans 12 stations pluviométriques. Tandis que les épisodes des pluies extrêmes (R95p) diminuent considérablement dans les années 1975, 1981, 1987,1996 et 2001 dans la majorité des stations pluviométriques.

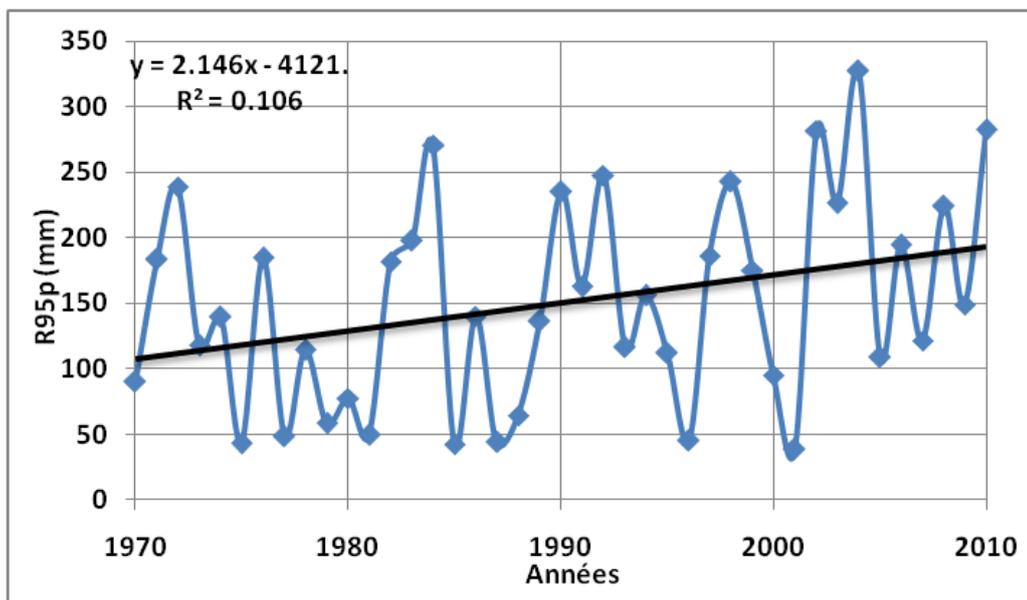


Figure 8.17 Evolution temporelle de R95p dans le NORD-EST algérien (1970-2010)

Les tendances spatiales des quantités annuelles cumulées dans les jours très humides (R95p) augmentent dans près de 74% des sites (figure 8.18). La région NORD-OUEST de Skikda présente une augmentation significative dans 17% des sites d'étude. Cependant, une tendance à la baisse a été détectée dans la région littorale spécialement à Annaba.

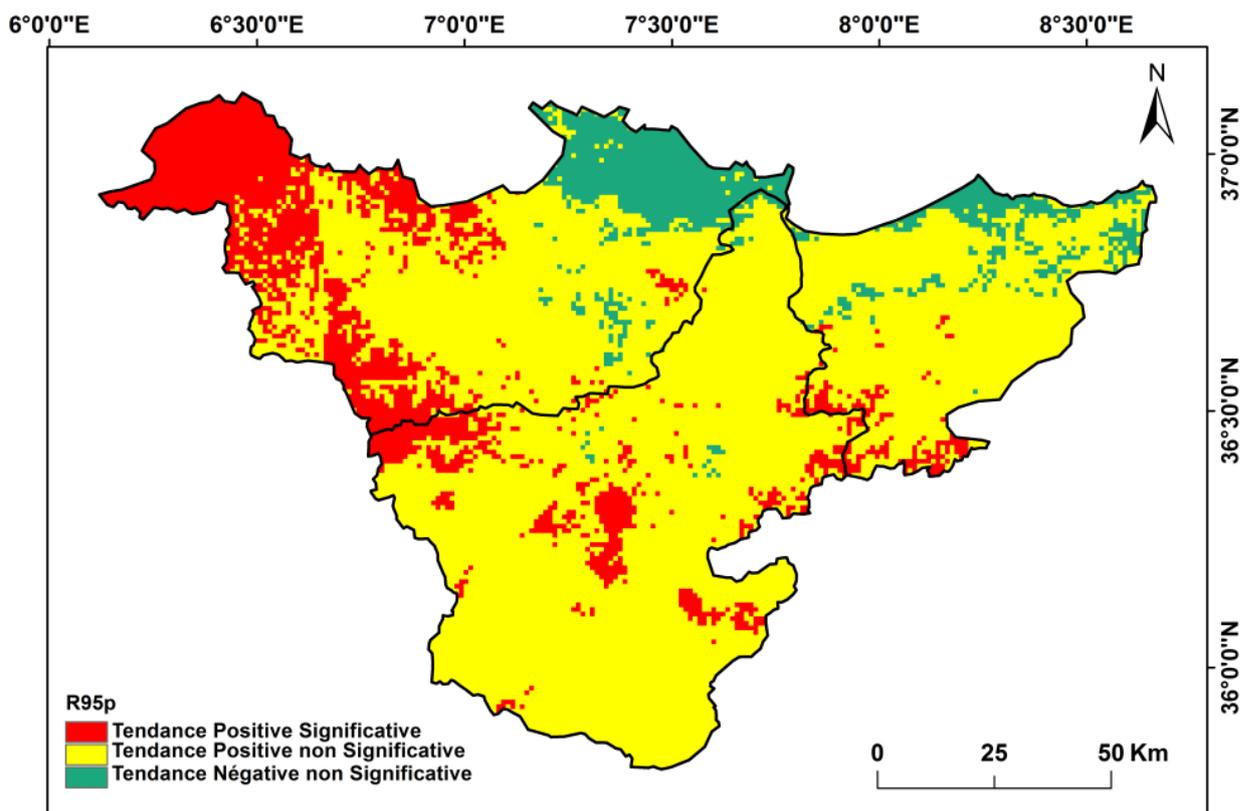


Figure 8.18 Tendance des précipitations supérieures au 95^ecentile (R95p)

8.10 Les précipitations maximales supérieures au 99^ecentile (R99p)

L'indice des précipitations extrêmement humides a obtenu aussi une tendance positive répandue sur l'ensemble de la région d'étude (figure 8.19) par la droite de tendance linéaire (ligne noire), soit 6,9 mm d'augmentation par décennie durant la période de 1970 à 2010, avec une irrégularité interannuelle. Les cumuls les plus élevés sont identifiés en 1992 et 2003. Par ailleurs, on observe les plus faibles valeurs des R99p dans les années 1985 et 2001.

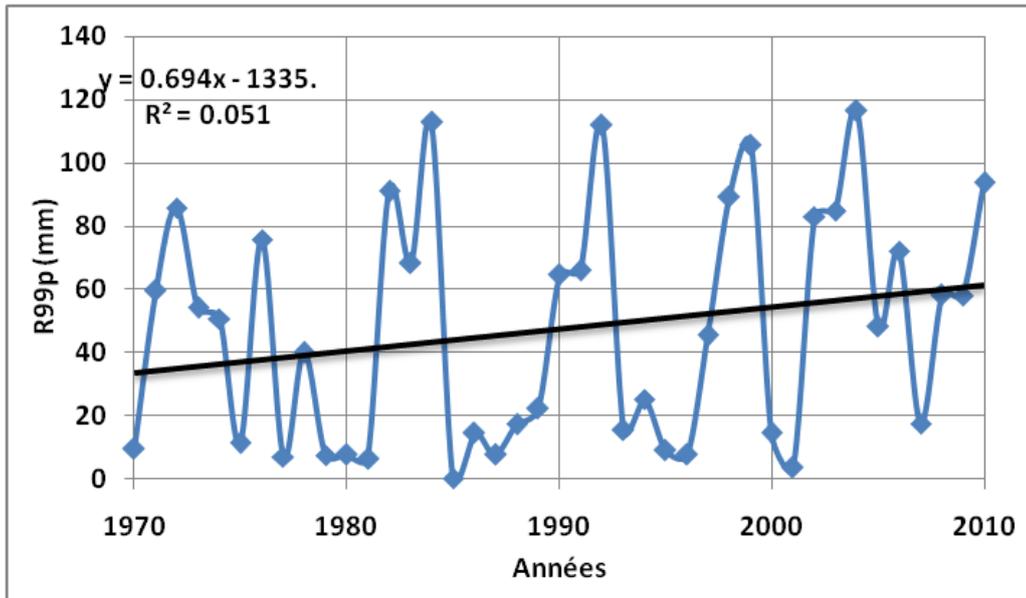


Figure 8.19 Evolution temporelle de R99p dans le NORD-EST algérien (1970-2010)

La répartition spatiale des tendances des précipitations extrêmement humides est illustrée dans la figure 8.20. Le NORD-EST algérien est totalement dominé par des tendances positives non significatives dans l'ensemble de la région. Les points significatifs se concentrent également dans la partie SUD à Guelma et l'extrême du NORD-OUEST de Skikda.

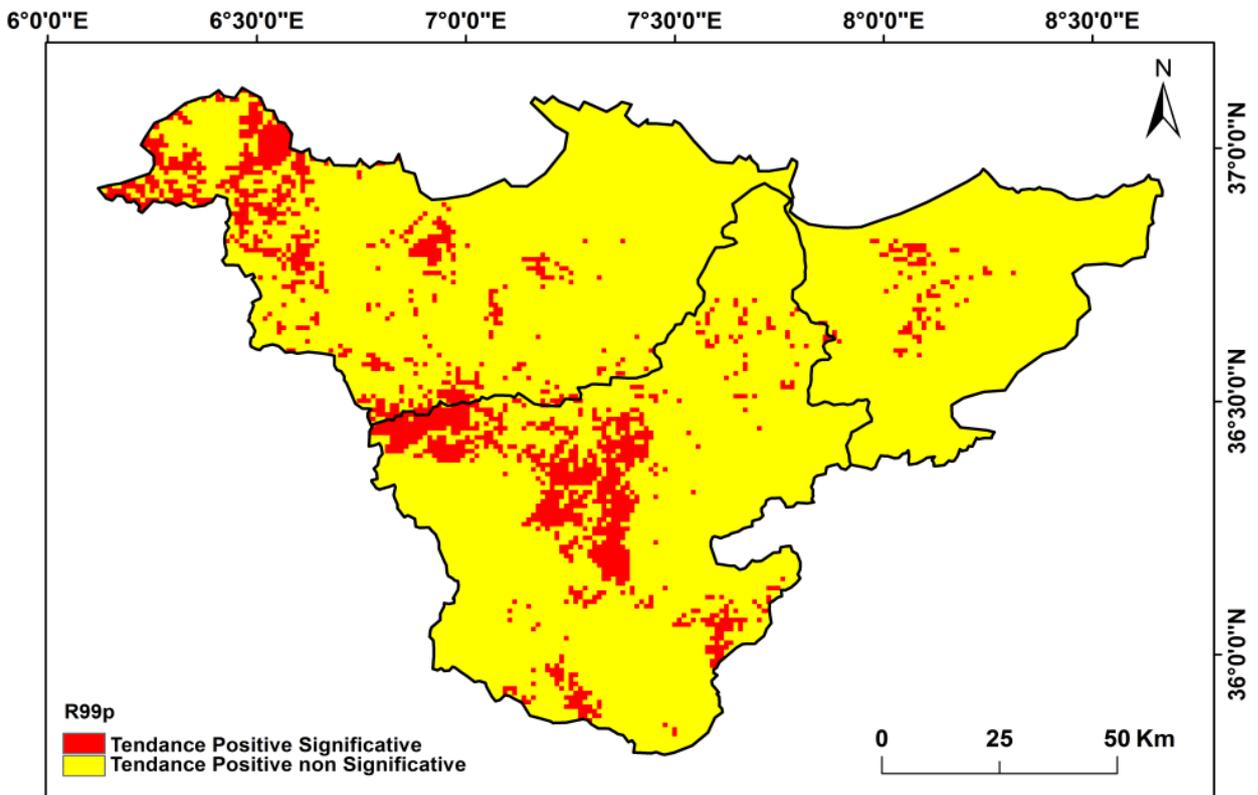


Figure 8.20 Tendance des précipitations supérieures au 99^ecentile (R99p)

8.11 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons analysé l'évolution temporelle et les tendances des précipitations extrêmes quadrillées d'une résolution journalière dans le NORD-EST algérien durant la période (1970-2010).

Les résultats ont montré que les précipitations moyennes annuelles par jours pluvieux (PRCPTOT) sont dominées par une tendance à la hausse qui s'étale presque sur toute la région d'étude, ce qui est également indiqué par d'autres indices des précipitations extrêmes, notamment Rx1 jour, Rx5 jours, SDII, R10, R20, CWD, R95, R99p. Une augmentation significative a été détectée dans le NORD-OUEST à Skikda. La région côtière d'Annaba présente une diminution non significative des PRCPTOT. L'intensité annuelle moyenne des précipitations journalières (SDII) a augmenté significativement dans la moitié de la région spécialement dans le NORD-OUEST et le SUD de la région d'étude, avec une baisse dans la région côtière du NORD à Annaba, à l'est à Taref et le centre du bassin de Seybouse. Les jours de fortes précipitations R10 et très fortes précipitations R20 mm ont montré des tendances à la hausse dans 85 et 81% de la région d'étude respectivement. Une augmentation significative a été observée pour les deux indices dans le NORD-OUEST à la région de Skikda. Les précipitations maximales sur 1 jour (RX1jour) et sur 5 jours (RX5jour) sont dominées par une tendance à la hausse dans 70-74% de la région d'étude. Les zones côtières d'Annaba et Taref ont montré une tendance à la baisse de 12-14%, et une augmentation significative dans la région du NORD-OUEST de Skikda avec un pourcentage de 14 et 16% de la région d'étude. Les jours humides consécutifs (CWD) sont devenus plus fréquents et dominants dans plus de 86% du site d'étude, alors que ce n'est pas le cas pour les jours secs consécutifs (CDD), qui indiquent une tendance à la baisse dans 59% de la région d'étude, et ne sont statistiquement significatifs que pour 14% des grilles. Les quantités annuelles cumulées dans les jours très humides (R95p) augmentent dans près de 74% des sites, la région NORD-OUEST de Skikda présente une augmentation significative dans 17% de sites d'étude. Une tendance à la baisse a été détectée dans la région côtière spécialement à Annaba. Les

quantités annuelles des précipitations cumulées en jours extrêmement humides (R99p) montrent presque la même distribution spatiale comme dans le cas des jours très humides (R95p), Ainsi, des tendances à la hausse ont été détectées dans 80% des sites dont 12% ont été jugées statistiquement significatives.

On résume que l'intensité et les fréquences des précipitations extrêmes se produisent plus fréquemment dans la partie côtière du NORD-OUEST à Skikda que dans le reste de la région d'étude.

Conclusions générale

Dans ce travail, nous avons essayé de comprendre l'évolution de la pluviométrie dans le NORD-EST algérien aux échelles spatiale et temporelle, où les extrêmes des précipitations sont principalement étudiés à l'aide d'un ensemble des indicateurs pluviométriques. Pour cela, nous avons choisi les 3 bassins versants de Seybouse et les Côtiers constantinois-est et centre d'une superficie totale de 15256 km² situés dans l'extrême NORD-EST algérien, Cette région est caractérisée pour être la plus pluvieuse en Algérie. Elle a une forte variabilité spatio-temporelle des précipitations, et est caractérisée par un climat méditerranéen. Un ensemble de 33 séries des précipitations journalières réparties dans la région d'étude pendant la période de 1970-2010 ont été utilisées. Cette base de données comporte au total une moyenne de 14,8 % de valeurs manquantes.

Avant de conclure les différents résultats obtenus, nous avons en premier lieu amélioré la qualité et la cohérence de l'ensemble données pluviométriques utilisées dans le NORD-EST algérien dans le chapitre 4. Pour cela, la méthode du processus de reconstruction des données manquantes des précipitations journalières et leur maillage est appliquée. Celle-ci est basée sur le processus de création des valeurs de références qui permet de faire un contrôle de qualité aux données d'origine en signalant et supprimant les données suspectes qui ne correspondent pas à la répartition des précipitations de chaque jour. De remplir les valeurs manquantes dans chaque série de l'ensemble de données précédemment nettoyé. Le principal avantage de cette méthode est que tous les calculs sont faits pour chaque jour et lieu de manière indépendante, de sorte qu'il n'y ait pas de problèmes de besoin pour les séries avec une longueur minimale avec une grande flexibilité pour s'adapter aux spécificités et caractéristiques des situations des précipitations à différents jours, en essayant de fournir une amélioration des connaissances détaillées sur le comportement des précipitations journalières.

Dans la phase finale de cette partie, nous avons créé, un maillage de 1x1 km d'une résolution spatiale contenant pour chaque point, une série complète de données journalières des précipitations du 01/01/1970 au 31/12/2010, couvrant le NORD-EST algérien. A partir de cette base spatiale et temporelle, l'analyse des indices des événements des précipitations extrêmes et leurs tendances sont étudiés (chapitre 7 et 8) sur la base des précipitations journalières maillées de 1*1 km réparties dans le NORD-EST de l'Algérie durant la période 1970-2010.

Les résultats du processus de contrôle de qualité montrent que la période 1995-1998 a détecté plus de données manquantes, cette perte d'annuaires peut être due à un manque de sécurité durant la décennie noire (1990-2000) qu'a connu l'Algérie. La validation de la méthode de reconstruction montre une bonne concordance et cohérence entre les données observées et prédites dans l'estimation des amplitudes, les agrégats mensuels et la séparation des précipitations journalières par les altitudes, car le processus de reconstruction appliqué à construire les grilles créées à chaque jour et placées indépendamment avec la conservation des caractéristiques de précipitations sur des jours différents. Malgré cet avantage, certaines limites ont été trouvées dans l'évaluation des agrégats des précipitations mensuelles, qui ont montré une sous-estimation dans les mois d'été (juin-août), ceci en raison du fait que cette période reçoit de petites quantités de précipitations, la plupart d'entre elles sont nulles. L'évaluation des précipitations journalières par plages d'altitude a montré une légère sous-estimation dans les zones de haute altitude car il existe une grande différence dans la répartition spatiale des stations pluviométriques dans la zone d'étude, où les zones montagneuses sont caractérisées par une faible couverture spatiale des stations.

Nous avons conclu selon le chapitre 5 que les précipitations annuelles montrent un gradient croissant du SUD au NORD dans la région d'étude, les deux stations de Mechroha et Bouteldja détectent les cumuls maximaux annuels identifiés dans les années 2002 et 2004, Bien que l'année 1996

enregistre la valeur minimale des précipitations spécialement à Borj Sabath et El Kerma. Le NORD-EST algérien est dominé par une augmentation non significative dans 75% des stations pluviométriques avec la détection de tendance positive significative à Ain Charchar et Emdjaz Chich. Bien que la seule station de Roum Souk montre une diminution significative au niveau de signification égal à 95%.

Selon les résultats des précipitations saisonnières, la saison la plus pluvieuse est l'hiver par un pourcentage égal de 42% des précipitations annuelles moyennes tombées durant la période 1970-2010. La répartition spatiale des précipitations est pratiquement différente entre les saisons, l'automne et l'hiver montrent une distribution similaire des précipitations annuelles bien que le printemps et l'été indiquent un comportement inverse dans la répartition des saisons.

Une tendance à la hausse est également détectée dans toutes les saisons avec des fluctuations intra-saisonnières durant la période d'étude. La seule station de Roum de Souk identifie un déclin dans toutes les saisons.

Dans le chapitre 6, l'irrégularité, la saisonnalité et l'agressivité des précipitations sont étudié par les indices de CI, PCI et MFI. D'après les résultats, on trouve qu'il existe des régions où la concentration journalière des précipitations est supérieures à 0,6 ; c.-à-d que le % de précipitations contribuées par le quartile le plus élevé des jours pluvieux est d'environ 70% de la quantité totales de précipitations annuelles, ce sont : Pont Bouchet, Lac Des Oieseaux, Nechamaya, El Aria et Ain Snob. Ces zones sont celles qui présentent de faibles valeurs de précipitations annuelles et des jours pluvieux et vice versa. On note aussi une forte concentration de précipitation journalière à tendance à voir une augmentation au niveau de signification de 95%. La distribution de PCI n'est pas uniforme dans l'ensemble de la région d'étude, elle est dominée par une distribution modérément saisonnière à saisonnières des précipitations, la seule station de Roum Souk présente une augmentation significative du PCI. L'indice MFI présente une forte susceptibilité à l'érosion dans les régions qui reçoivent

des quantités élevées des précipitations annuelles, Le test de MK montre que la région d'étude est dominée par une augmentation significative de l'agressivité des précipitations particulièrement à Ain Charchar, Bekouche lakhdar, El kerma, Nechmaya et Cheffia. La corrélation entre le CI et les précipitations annuelles est négatives, ce qui indique que les faibles niveaux de précipitations font la plus grande contribution à l'irrégularité globale des précipitations. De même, les variations du PCI montrent que la quantité des précipitations saisonnières ne suit pas nécessairement toutes les variations annuelles. D'autre part, l'agressivité des précipitations à travers les valeurs de MFI est cohérente avec la quantité des précipitations annuelles. Ainsi, le MFI suit la distribution des précipitations annuelles, présentant une agressivité élevée lorsque la quantité des précipitations est supérieure à 750 mm dans la région d'étude.

nous avons également utilisé dix indices des précipitations journalières extrêmes, recommandés par l'OMM et qui sont conçus pour permettre la surveillance continue des changements de l'ampleur, de fréquence et d'intensité des événements extrêmes, d'étudier la longueur des séquences sèches, et humides en se concentrant sur les événements qui se produisent généralement plusieurs fois par an. Le chapitre 07 décrit l'analyse spatiale de ces changements par un maillage de 1X1 km à haute qualité.

La distribution spatiale des indices de précipitations extrêmes ont montré un gradient croissant du sud vers le nord, dans les indices d'intensités et de fréquences des précipitations extrêmes, répondant à la distribution spatiale des précipitations totales, qui est plus élevée dans les zones côtières et les hautes altitudes. Ces répartitions sont similaires dans les indices de précipitations extrêmes montrent que la plupart des précipitations sur les zones côtières sont dues à des événements de haute intensité, comme indiqué dans SDII, R10mm, R20mm RX1day et RX5day. Cette justification se reflète également sur la distribution spatiale de R95 et R99, qui montrent qu'entre 20 et 25 % des précipitations totales tombent lors d'événements extrêmes (supérieurs au 95e centile). Cependant, le comportement des

jours secs consécutifs (CDD) est différent, car il existe de grandes différences dans la durée des périodes sèches entre les zones avec des quantités totales de précipitations similaires (élevées). Les valeurs minimales (périodes courtes) sont situées dans la partie centrale de la zone d'étude, coïncidant avec une zone de fortes précipitations et de forte élévation, indiquant une fréquence plus élevée d'événements convectifs induits par l'effet orographique, ce qui pourrait être lié aux valeurs élevées du reste d'indicateurs dans ce domaine

Dans le chapitre 08, nous avons étudié l'évolution temporelle et la tendance des précipitations extrêmes maillées à haute résolution dans le NORD-EST algérien durant la période 1970-2010. Les résultats de l'analyse des tendances ont montré une augmentation significative des indices d'intensité et de fréquence des précipitations extrêmes apparues, notamment dans la partie NORD-OUEST de la zone d'étude (PRCPRTOT, SDII, R10, R20, Rx1, Rx5, R95p et R99p dans une moindre mesure). Il s'agit d'une zone montagneuse avec des valeurs élevées ou relativement élevées des indices extrêmes, ce qui signifie que l'effet des hautes altitudes et probablement une fréquence plus élevée des fronts méditerranéens dans cette zone ont accentué l'occurrence d'événements extrêmes. Les cartes montrent un flou progressif de cette tendance significative vers l'intérieur des terres, se généralisant à la moitié ouest de la zone d'étude dans le SDII, ce qui pourrait signifier que la tendance a un impact sur les précipitations moyennes reçues dans ces zones. Ceci est cohérent ici avec la tendance significative négative des jours secs consécutifs (CDD), mais cela n'explique pas le même comportement dans les parties centrale et orientale, où les changements dans l'occurrence des événements extrêmes sont restés avec des tendances non significatives.

L'évolution temporelle des précipitations extrêmes journalières montrent que les précipitations annuelles par jour pluvieux PRCPRTOT, l'intensité des précipitations SDII, le nombre de fortes précipitations R10mm, et très fortes précipitations R20mm, ainsi que la quantité maximale des jours plus humides R95p ont marqué des valeurs maximales en 2004. L'année 2002

détecte aussi des valeurs maximales dans SDII, R10mm et R20mm. En outre, les cumuls maximaux des Rx1, Rx5 et R99p se concentrent durant l'année 1992. L'année 1985 présente des cumuls maximaux dans les jours humides consécutifs et les précipitations maximales sur 5 jours. Cependant, l'indice des jours secs consécutifs (CDD) montre que les années 1973 et 1970 ont connu de longues séquences sèches au cours de la période d'étude (1970-2010).

En somme, les précipitations extrêmes varient d'une année à l'autre. On constate qu'il y'a des phases sèches durant la décennie 70, ce qui confirme les études antérieures des périodes déficitaires des précipitations qui ont été faite en Algérie. Puis des séquences humides ont suivi, caractérisées par des précipitations abondantes qui s'abattent pendant certaines années des décennies suivantes (80, 90 et 2000) provoquant des inondations catastrophiques dans le NORD-EST algérien.

Nous concluons que les précipitations sont devenues plus extrêmes en termes d'intensité et de fréquence dans une certaine proportion au NORD-EST de l'Algérie au cours de la période d'étude, avec des tendances cohérentes vers des conditions plus humides pour tous les indices extrêmes sauf (CDD), bien qu'elles ne soient pas statistiquement significatives dans toute la région d'étude.

Contributions de la thèse et perspectives

D'après notre étude sur les paramètres pluviométriques et la reconstruction des précipitations journalières manquante et le quadrillage, il n'as pas une étude complète qui discute dans ce domaine en Algérie. A cet effet, ce travail de recherche proposé a sans aucun doute ferai progresser la connaissance disponible sur le changement des paramètres climatiques en Algérie et sur son devenir possible.

Les résultats de cette thèse contribue à une meilleure compréhension de mécanisme des paramètres pluviométriques extrêmes à l'échelle spatio-temporelle sur l'environnement et les écosystèmes de notre zone d'étude, et peuvent également être précieux pour identifier les zones sujettes aux catastrophes naturelles tels que l'inondation et la sécheresse et faciliter l'élaboration de stratégies d'adaptation, et constituent des préalables essentiels à la prévention et à la réalisation d'aménagements pour la lutte contre les aléas du climat et des tendances futures .

Il peut également contribue aussi à une méthode simple de reconstruire des données manquantes et quadrillage, qui est efficace et claire dans son développement, flexibles et adaptables à chaque jours et lieu, grâce à l'augmentation de la résolution spatiale ($1*1 \text{ km}^2$) et temporelle (échelle journalière), ont contribué à la valeur ajoutée à l'analyse climatique, en rendant compte de la fiabilité des estimations.

A partir de ce moment, les lignes futures à développer continueront dans la même ligne de recherche. D'une part, il serait utile de :

Développer une base de données par l'utilisation de la méthode proposée de reconstruction et quadrillage des précipitations journalières d'une résolution spatiale fine (par exemple 5 km), à l'échelle régionale et nationale en Algérie, qui nous fournira une base de données fiables, accessible et facile à utiliser.

Il serait également utile d'étudier la variabilité spatio-temporelle de la concentration journalière des précipitations sur la base d'un ensemble de données maillées à haute résolution dans le NORD-EST algérien et sur l'ensemble de territoire de l'Algérie.

Etude d'impact des paramètres pluviométriques sur les écoulements superficiels.

Création une collaboration avec d'autre pays méditerranéen pour élargir l'étude spatio-temporelle des précipitations extrêmes dans ces régions.

Étude du facteur d'érosivité de pluie R-USEL pour la région d'étude et la création d'une carte spécifique pour illustrer leur variation spatiale.

D'autre part, il serait aussi bon d'évaluer la projection future des précipitations extrêmes et températures sur la région d'étude et sur l'ensemble de territoire de l'Algérie, à l'aide d'un ensemble de modèles climatiques régionaux (MCR) fournis par l'expérience coordonnée de réduction d'échelle climatique régionale (CORDEX) basée sur le modèle CMIP5. Il nous fournira des informations concernant la compréhension globale des événements météorologiques extrêmes futurs dans la zone d'étude qui pourraient déclencher une adaptation appropriée ainsi que des stratégies d'atténuation appropriées.

Références bibliographiques

- ABD ELBASIT, M. A., HUANG, J., OJHA, C., YASUDA, H. & ADAM, E. O. 2013. Spatiotemporal changes of rainfall erosivity in Loess Plateau, China. *ISRN Soil Science*, 2013.
- ABDEDDAIM, H. 2018. *CONTRIBUTION A L'ETUDE DE L'INFLUENCE DE LA STRUCTURE DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE SUR LE RISQUE HYDROLOGIQUE «Cas des bassins de l'Est de l'Algérie»*. Thèse de Doctorat, UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA, Algérie.
- ABH 1999. *Agence des Bassins Hydrographiques : Constantinois- Seybouse – Mellegue. Cahier de l'agence (ministère de l'équipement et de l'aménagement du territoire), le bassin de la Seybouse. 35p.*
- ABH 2000. *Agence des Bassins Hydrographiques. Constantinois- Seybouse – Mellegue, Cahiers de l'agence: Cahier numéro 1, Cahier numéro 4.*
- AGUILAR, E., AZIZ BARRY, A., BRUNET, M., EKANG, L., FERNANDES, A., MASSOUKINA, M., MBAH, J., MHANDA, A., DO NASCIMENTO, D. & PETERSON, T. 2009. Changes in temperature and precipitation extremes in western central Africa, Guinea Conakry, and Zimbabwe, 1955–2006. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114.
- ALEXANDER, L. V., ZHANG, X., PETERSON, T. C., CAESAR, J., GLEASON, B., KLEIN TANK, A. M. G., HAYLOCK, M., COLLINS, D., TREWIN, B., RAHIMZADEH, F., TAGIPOUR, A., RUPA KUMAR, K., REVADEKAR, J., GRIFFITHS, G., VINCENT, L., STEPHENSON, D. B., BURN, J., AGUILAR, E., BRUNET, M., TAYLOR, M., NEW, M., ZHAI, P., RUSTICUCCI, M. & VAZQUEZ-AGUIRRE, J. L. 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research*, 111.
- ALIJANI, B., O'BRIEN, J. & YARNAL, B. 2008. Spatial analysis of precipitation intensity and concentration in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 94, 107-124.
- ALPERT, P. 2002. The paradoxical increase of Mediterranean extreme daily rainfall in spite of decrease in total values. *Geophysical Research Letters*, 29.
- APAYDIN, H., ERPUL, G., BAYRAMIN, I. & GABRIELS, D. 2006. Evaluation of indices for characterizing the distribution and concentration of precipitation: A case for the region of Southeastern Anatolia Project, Turkey. *Journal of Hydrology*, 328, 726-732.
- ARNOLDUS, H. M. J. 1980. An approximation of the rainfall factor in the Universal Soil Loss Equation. Chichester: John Wiley and Sons Ltd.
- BEGUERÍA, S., VICENTE-SERRANO, S. M., TOMÁS-BURGUERA, M. & MANETA, M. 2016. Bias in the variance of gridded data sets leads to misleading conclusions about changes in climate variability. *International Journal of Climatology*, 36, 3413-3422.

- BEKKOUSSA, B., MEDDI, M. & JOURDE, H. 2008. Forçage climatique et anthropique sur la ressource en eau souterraine d'une région semi-aride: cas de la plaine de Ghriss (Nord-Ouest algérien). *Sécheresse*, 18, 173-184.
- BELARBI, H., TOUAIBIA, B., BOUMECHRA, N., AMIAR, S. & BAGHLI, N. 2017. Sécheresse et modification de la relation pluie-débit: cas du bassin versant de l'Oued Sebdu (Algérie Occidentale). *Hydrological Sciences Journal*, 62, 124-136.
- BENHAMROUCHE, A., BOUCHERF, D., HAMADACHE, R., BENDAHMANE, L., MARTIN-VIDE, J. & TEIXEIRA NERY, J. 2015. Spatial distribution of the daily precipitation concentration index in Algeria. *Natural Hazards and Earth System Science*, 15, 617-625.
- BROOKS, C. E. P. & CARRUTHERS, N. 1953. *Handbook of statistical methods in meteorology*.
- BRUNSELL, N. A. 2010. A multiscale information theory approach to assess spatial-temporal variability of daily precipitation. *Journal of Hydrology*, 385, 165-172.
- CARAMELO, L. & ORGAZ, M. D. M. 2007. A study of precipitation variability in the Duero Basin (Iberian Peninsula). *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 27, 327-339.
- CHANEY, N. W., SHEFFIELD, J., VILLARINI, G. & WOOD, E. F. 2014. Development of a High-Resolution Gridded Daily Meteorological Dataset over Sub-Saharan Africa: Spatial Analysis of Trends in Climate Extremes. *Journal of Climate*, 27, 5815-5835.
- CORTESI, N., GONZALEZ-HIDALGO, J. C., BRUNETTI, M. & MARTIN-VIDE, J. 2012. Daily precipitation concentration across Europe 1971-2010. *Natural Hazards and Earth System Science*, 12, 2799-2810.
- COSCARELLI, R. A. & CALOIERO, T. 2012. Analysis of daily and monthly rainfall concentration in Southern Italy (Calabria region). *Journal of Hydrology*, 416, 145-156.
- DJELLOULI, Y. & SACI, A. 2003. Catastrophe «naturelle»: les inondations dévastatrices du 9 et 10 novembre 2001 à Bab El Oued (Alger, Algérie). *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 23, 236-242.
- DONAT, M. G., ALEXANDER, L. V., YANG, H., DURRE, I., VOSE, R., DUNN, R. J. H., WILLET, K. M., AGUILAR, E., BRUNET, M., CAESAR, J., HEWITSON, B., JACK, C., KLEIN TANK, A. M. G., KRUGER, A. C., MARENGO, J., PETERSON, T. C., RENOM, M., ORIA ROJAS, C., RUSTICUCCI, M., SALINGER, J., ELRAYAH, A. S., SEKELE, S. S., SRIVASTAVA, A. K., TREWIN, B., VILLARROEL, C., VINCENT, L. A., ZHAI, P., ZHANG, X. & KITCHING, S. 2013. Updated analyses of temperature and precipitation extreme indices since the beginning of the twentieth century: The HadEX2 dataset. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118, 2098-2118.

- EASTERLING, D. R., EVANS, J., GROISMAN, P. Y., KARL, T. R., KUNKEL, K. E. & AMBENJE, P. 2000. Observed variability and trends in extreme climate events: a brief review. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81, 417-426.
- ENSOR, L. A. & ROBESON, S. M. 2008. Statistical Characteristics of Daily Precipitation: Comparisons of Gridded and Point Datasets. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47, 2468-2476.
- FRICH, P., ALEXANDER, L. V., DELLA-MARTA, P., GLEASON, B., HAYLOCK, M., TANK, A. K. & PETERSON, T. 2002. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Climate research*, 19, 193-212.
- GHENIM, A. & MEGNOUNIF, A. 2016. SPATIAL DISTRIBUTION AND TEMPORAL TRENDS IN DAILY AND MONTHLY RAINFALL CONCENTRATION INDICES IN KEBIR-RHUMEL WATERSHED. *LARHYSS Journal ISSN 1112-3680*, 85-97.
- GHENIM, A. N. & MEGNOUNIF, A. 2013. Ampleur de la sécheresse dans le bassin d'alimentation du barrage Meffrouche (Nord-Ouest de l'Algérie). *Physio-Géo. Géographie physique et environnement*, 35-49.
- GIORGI, F. 2006. Climate change hot-spots. *Geophysical Research Letters*, 33.
- GONZÁLEZ-HIDALGO, J. C., BRUNETTI, M. & DE LUIS, M. 2011. A new tool for monthly precipitation analysis in Spain: MOPREDAS database (monthly precipitation trends December 1945–November 2005). *International Journal of Climatology*, 31, 715-731.
- HADEID, M. 2018. Impact des inondations et problématique de la gestion des risques naturels en milieu urbain saharien algérien.. Les cas de Béchar et d'Adrar. *Les Cahiers d'EMAM. Études sur le Monde Arabe et la Méditerranée*.
- HAMADACHE, B., TERCHI, A. & BRACHEMI, O. Study of the meteorological situation which affected the west and the center of Algeria in general and Bab-el-Oued in particular on the 10th November 2001. Proceedings of the 4th EGS Plinius Conference, Mallorca, Spain, 2002.
- HAYLOCK, M., HOFSTRA, N., KLEIN TANK, A., KLOK, E., JONES, P. & NEW, M. 2008a. A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950–2006. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113.
- HAYLOCK, M. R., HOFSTRA, N., KLEIN TANK, A. M. G., KLOK, E. J., JONES, P. D. & NEW, M. 2008b. A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950–2006. *Journal of Geophysical Research*, 113.

- HERRERA, S., GUTIÉRREZ, J. M., ANCELL, R., PONS, M. R., FRÍAS, M. D. & FERNÁNDEZ, J. 2012. Development and analysis of a 50-year high-resolution daily gridded precipitation dataset over Spain (Spain02). *International Journal of Climatology*, 32, 74-85.
- HUANG, J., SUN, S., XUE, Y. & ZHANG, J. 2014. Spatial and temporal variability of precipitation indices during 1961–2010 in Hunan Province, central south China. *Theoretical and Applied Climatology*, 118, 581-595.
- IPCC 2001. *Climate change 2001 : The Scientific Basis, Contribution of Working Group, I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* In Houghton, J., Ding, Y., Griggs, D., Noguer, M., van der Linden, P., and Xiaosu. Cambridge, United Kingdom. Cambridge University Press, 944 pp
- IPCC 2007. *Climate change 2007-the physical science basis: Working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC, In Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K., Tignor, M., and Miller, H., Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Cambridge University Press, 996 pp*
- KARL, T. R., NICHOLLS, N. & GHAZI, A. 1999. Clivar/GCOS/WMO workshop on indices and indicators for climate extremes workshop summary. *Weather and climate extremes*. Springer.
- KENDALL, M. G. 1975. Rank correlation methods. *Oxford University Press, New York*.
- KHANCHOU. 2006. *Quantification de l'érosion et des transports solides dans certains bassins versants de l'extrême Nord-Est algérien*. Thèse de Doctorat, Faculté des Sciences de la Terre, Département de géologie, Annaba, Algérie.
- KHEZAZNA, A., AMARCHI, H., DERDOUS, O. & BOUSAKHRIA, F. 2017. Drought monitoring in the Seybouse basin (Algeria) over the last decades. *Journal of Water and Land Development*.
- KING, A. D., ALEXANDER, L. V. & DONAT, M. G. 2013. The efficacy of using gridded data to examine extreme rainfall characteristics: a case study for Australia. *International Journal of Climatology*, 33, 2376-2387.
- KLEIN TANK, A. & KÖNNEN, G. 2003. Trends in indices of daily temperature and precipitation extremes in Europe, 1946–99. *Journal of climate*, 16, 3665-3680.
- KLOK, E. & KLEIN TANK, A. 2009. Updated and extended European dataset of daily climate observations. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 29, 1182-1191.
- KOTTEK, M., GRIESER, J., BECK, C., RUDOLF, B. & RUBEL, F. 2006. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15, 259-263.

- LAROUSSE, B. 2008. *Vulnérabilité aux inondations en milieu urbain. Cas de la ville de Annaba (Nord-Est Algérien)*. Thèse de Doctorat, Université de Annaba-Badji Mokhtar, Algérie.
- LI, X., JIANG, F., LI, L. & WANG, G. 2010. Spatial and temporal variability of precipitation concentration index, concentration degree and concentration period in Xinjiang, China. *International Journal of Climatology*, 1679-1693.
- LIONELLO, P., BHEND, J., BUZZI, A., DELLA-MARTA, P., KRICHAK, S., JANSO, A., MAHERAS, P., SANNA, A., TRIGO, I. & TRIGO, R. 2006. Cyclones in the Mediterranean region: climatology and effects on the environment. *Developments in earth and environmental sciences*. Elsevier.
- LLANO, M. P. 2017. Spatial distribution of the daily rainfall concentration index in Argentina: comparison with other countries. *Theoretical and Applied Climatology*.
- LLASAT, M. C., LLASAT-BOTIJA, M., PRAT, M., PORCU, F., PRICE, C., MUGNAI, A., LAGOUVARDOS, K., KOTRONI, V., KATSANOS, D. & MICHAELIDES, S. 2010. High-impact floods and flash floods in Mediterranean countries: the FLASH preliminary database. *Advances in Geosciences*, 23, 47-55.
- LUIS, M. D., GONZALEZ-HIDALGO, J. C. & LONGARES, L. A. 2010. IS RAINFALL EROSION INCREASING IN THE MEDITERRANEAN IBERIAN PENINSULA? *land degradation & development*, 21, 139–144
- LUJAN, D. L. & GABRIELS, D. 2005. Assessing the rain erosivity and rain distribution in different agro-climatological zones in Venezuela. *Sociedade & Natureza*, 1.
- MANN, H. B. 1945. Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the econometric society*, 245-259.
- MARTIN-VIDE, J. 2004. Spatial distribution of a daily precipitation concentration index in peninsular Spain. *International Journal of Climatology*, 24, 959-971.
- MEBARKI, A. 2005. Hydrologie des bassins de l'Est algérien: ressources en eau, aménagement et environnement. *Université Mentouri de Constantine, Thèse d'Etat*.
- MEDDI, H. & MEDDI, M. 2009. Variabilité des précipitations annuelles du Nord-Ouest de l'Algérie. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 20, 57-65.
- MEDDI, M. 2013. Sediment transport and rainfall erosivity evolution in twelve basins in Central and Western Algeria. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, 7, 253-263.
- MEDDI, M. & HUBERT, P. 2003. Impact de la modification du régime pluviométrique sur les ressources en eau du Nord-Ouest de l'Algérie. *IAHS publication*, 229-235.

- MEDDI, M., TALIA, A. & MARTIN, C. 2009. Évolution récente des conditions climatiques et des écoulements sur le bassin versant de la Macta (Nord-Ouest de l'Algérie). *Physio-Géo. Géographie physique et environnement*, 61-84.
- MEDDI, M. & TOUMI, S. 2014. Study of the interannual rainfall variability in northern Algeria. *Revue LJEE*.
- MEDDI, M. & TOUMI, S. 2015. Spatial variability and cartography of maximum annual daily rainfall under different return periods in Northern Algeria. *Journal of Mountain Science*, 12, 1403-1421.
- MEDDI, M., TOUMI, S., ASSANI, A. A. & ESLAMIAN, S. 2014. Regionalisation of rainfall erosivity in northern Algeria. *International Journal of Hydrology Science and Technology*, 4, 155-175.
- MENAD, W., DOUVINET, J., BELTRANDO, G. & ARNAUD-FASSETTA, G. 2012. Evaluating the influence of urbanised areas face to a remarkable meteorological hazard: the flood event of 9-10 November 2001 at Bab-el-Oued (Alger, Algeria). *GEOMORPHOLOGIE-RELIEF PROCESSUS ENVIRONNEMENT*, 337-350.
- MENNE, M. J., DURRE, I., VOSE, R. S., GLEASON, B. E. & HOUSTON, T. G. 2012. An overview of the global historical climatology network-daily database. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 29, 897-910.
- MICHIELS, P., GABRIELS, D. & HARTMANN, R. 1992. Using the seasonal and temporal precipitation concentration index for characterizing the monthly rainfall distribution in Spain. *Catena*, 19, 43-58.
- MOBERG, A., JONES, P. D., LISTER, D., WALTHER, A., BRUNET, M., JACOBET, J., ALEXANDER, L. V., DELLA-MARTA, P. M., LUTERBACHER, J. & YIOU, P. 2006. Indices for daily temperature and precipitation extremes in Europe analyzed for the period 1901–2000. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111.
- NOTIVOLI, R. S., BEGUERÍA, S., SAZ, M. Á. & DE LUIS, M. Reconstrucción e incertidumbre en series de precipitación diaria instrumental. X Congreso Internacional AEC: Clima, Sociedad, Riesgos y Ordenación Del Territorio, 2016.
- OLASCOAGA, M. 1950. Some aspects of Argentine rainfall. *Tellus*, 2, 312-318.
- OLIVER, J. E. 1980. Monthly precipitation distribution: a comparative index. *The Professional Geographer*, 32, 300-309.
- OULHACI, D. 2016. *RUISSÈLEMENT INTER-ANNUËL EN ALGERIE SEPTENTRIONALE (Relation entre, Ruissellement Pluie et Evaporation)*. Thèse de Doctorat, Faculté des sciences appliquées, Université Kasdi Merbah Ouargla.

- PERRY, M. & HOLLIS, D. 2005. The generation of monthly gridded datasets for a range of climatic variables over the UK. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 25, 1041-1054.
- PNUD 2015. Planification nationale sur la diversité biologique et mise en œuvre en Algérie du Plan Stratégique de la Convention sur la Diversité Biologique 2011–2020 et des Objectifs d'Aichi. Projet: MATE-PNUD-FEM pp. 98.
- RAJEEVAN, M., BHATE, J. & JASWAL, A. K. 2008. Analysis of variability and trends of extreme rainfall events over India using 104 years of gridded daily rainfall data. *Geophysical Research Letters*, 35.
- RAYMOND, F., ULLMANN, A. & CAMBERLIN, P. 2016. Précipitations intenses sur le Bassin Méditerranéen: quelles tendances entre 1950 et 2013? *Cybergéo: European Journal of Geography*.
- REZAK, S. 2014. *Hydrologie algérienne: synthèse des apports de crues sur Sig*. Thèse de Doctorat, Université Mohamed Boudiaf des Sciences et de la Technologie-Mohamed Boudiaf, Algérie.
- RIEHL, H. 1949. Some aspects of Hawaiian rainfall. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 30, 176-187.
- ROSENBERG, E. A., KEYS, P. W., BOOTH, D. B., HARTLEY, D., BURKEY, J., STEINEMANN, A. C. & LETTENMAIER, D. P. 2010. Precipitation extremes and the impacts of climate change on stormwater infrastructure in Washington State. *Climatic change*, 102, 319-349.
- SALMI, T. 2002. *Detecting trends of annual values of atmospheric pollutants by the Mann-Kendall test and Sen's slope estimates-the Excel template application MAKESENS*, Ilmatieteen laitos.
- SANTOS, M., FONSECA, A., FRAGOSO, M. & SANTOS, J. A. 2018. Recent and future changes of precipitation extremes in mainland Portugal. *Theoretical and Applied Climatology*, 137, 1305-1319.
- SCHOLZ, G., QUINTON, J. N. & STRAUSS, P. 2008. Soil erosion from sugar beet in Central Europe in response to climate change induced seasonal precipitation variations. *Catena*, 72, 91-105.
- SERRANO-NOTIVOLI, R., BEGUERÍA, S., SAZ, M. Á., LONGARES, L. A. & DE LUIS, M. 2017. SPREAD: a high-resolution daily gridded precipitation dataset for Spain—an extreme events frequency and intensity overview. *Earth System Science Data*, 9, 721.

- SERRANO-NOTIVOLI, R., DE LUIS, M. & BEGUERÍA, S. 2017a. An R package for daily precipitation climate series reconstruction. *Environmental Modelling & Software*, 89, 190-195.
- SERRANO-NOTIVOLI, R., DE LUIS, M., SAZ, M. & BEGUERÍA, S. 2017b. Spatially based reconstruction of daily precipitation instrumental data series. *Climate Research*, 73, 167-186.
- SHI, P., QIAO, X., CHEN, X., ZHOU, M., QU, S., MA, X. & ZHANG, Z. 2013a. Spatial distribution and temporal trends in daily and monthly precipitation concentration indices in the upper reaches of the Huai River, China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 28, 201-212.
- SHI, W., YU, X., LIAO, W., WANG, Y. & JIA, B. 2013b. Spatial and temporal variability of daily precipitation concentration in the Lancang River basin, China. *Journal of Hydrology*, 495, 197-207.
- STOCKER, T. F., QIN, D., PLATTNER, G.-K., TIGNOR, M., ALLEN, S. K., BOSCHUNG, J., NAUELS, A., XIA, Y., BEX, V. & MIDGLEY, P. M. 2013. Climate change 2013: The physical science basis. *Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, 1535.
- SUHAILA, J. & JEMAIN, A. A. 2011. Spatial analysis of daily rainfall intensity and concentration index in Peninsular Malaysia. *Theoretical and Applied Climatology*, 108, 235-245.
- SUMI, T., KANTOUSH, S.A., SABER, M. 2021. Book of Wadi Flash Floods. *Challenges and Advanced Approaches for Disaster Risk Reduction*. Springer Singapore, in press
- TALIA, A., MEDDI, M. & BEKKOUSSA, B. S. 2011. Étude de la variabilité de la pluviométrie dans les hauts plateaux et le Sahara algériens. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 22, 149-158.
- TANG, T., SHINDELL, D., SAMSET, B. H., BOUCHER, O., FORSTER, P. M., HODNEBROG, Ø., MYHRE, G., SILLMANN, J., VOULGARAKIS, A. & ANDREWS, T. 2018. Dynamical response of Mediterranean precipitation to greenhouse gases and aerosols. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18, 8439-8452.
- TOUAZI, M. & LABORDE, J. 2004. Modélisation pluie-débit à l'échelle annuelle en Algérie du nord. *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*, 17, 503-516.
- TRENBERTH, K. E. 2011. Changes in precipitation with climate change. *Climate Research*, 47, 123-138.

- YUE, S. & WANG, C. 2004. The Mann-Kendall Test Modified by Effective Sample Size to Detect Trend in Serially Correlated Hydrological Series. *Water Resources Management*, 18, 201-218.
- ZEROUAL, A., ASSANI, A. A., MEDDI, M. & ALKAMA, R. 2019. Assessment of climate change in Algeria from 1951 to 2098 using the Köppen–Geiger climate classification scheme. *Climate dynamics*, 52, 227-243.
- ZHANG, Q., XU, C.-Y., GEMMER, M., CHEN, Y. D. & LIU, C. 2009. Changing properties of precipitation concentration in the Pearl River basin, China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 23, 377-385.
- ZHANG, X., ALEXANDER, L., HEGERL, G. C., JONES, P., TANK, A. K., PETERSON, T. C., TREWIN, B. & ZWIERS, F. W. 2011. Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2, 851-870.
- ZHANG, X. & CONG, Z. 2014. Trends of precipitation intensity and frequency in hydrological regions of China from 1956 to 2005. *Global and Planetary Change*, 117, 40-51.