



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'HYDRAULIQUE



THESE DE DOCTORAT D-LMD
DE L'ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'HYDRAULIQUE
Présentée par
Mamdame HAMITOUCHE Yasmine
pour obtenir le grade de
DOCTEUR DE L'ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'HYDRAULIQUE

En Hydraulique

Sujet de la thèse :

**Impact du changement climatique sur les précipitations
extrêmes en Algérie : Risques actuels et futurs**

Thèse présentée et soutenue à l'ENSH le 08/07/2024 devant le jury composé de :

T. KHETTAL	Pr. ENSH	Président
A. ZEROUAL	MCA ENSH	Directeur de thèse
M. MEDDI	Pr. ENSH	Co-Directeur de thèse
A. RASSOUL	Pr. ENSH	Examineur
B. REMINI	Pr. Université de Blida	Examineur
A. BOUCEFIANE	MCA. Université de Khemis Miliana	Examineur

Année Universitaire 2023/2024

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude envers tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail de recherche. Leur soutien scientifique ou moral a été précieux et a grandement contribué à l'achèvement de cette thèse. Je leur suis reconnaissante pour leur engagement et leur collaboration, et j'espère qu'ils trouveront dans le succès de cette thèse l'expression de ma profonde gratitude pour leur contribution, tel qu'elle soit.

Mes plus vifs remerciements vont en premier lieu à mes directeurs de thèse, ZEROUAL Ayoub, Maître de conférences à l'ENSH, et Mohamed MEDDI, Professeur à l'ENSH, pour leur encadrement efficace et exceptionnel, leur soutien constant et leurs encouragements durant ces quatre années de recherche.

Je souhaite également exprimer ma sincère gratitude à Monsieur Ramdane ALKAMA, Chargé de recherche à la Commission Européenne, pour sa contribution précieuse à cette recherche. Ses conseils éclairés et les séances de formation en programmation Python lors de visio-conférences ont été extrêmement bénéfiques pour ma progression dans ce domaine, et ont largement contribué à l'avancement de ma thèse.

Je tiens également à remercier chaleureusement le Professeur Zekai ŞEN pour son accueil chaleureux à l'Université Medipol d'Istanbul, ainsi que pour son soutien et ses corrections attentives durant mon stage.

Un merci particulier à Mr Yves TRAMBLAY pour ses commentaires précieux et constructifs lors de la correction de mon premier article, ainsi qu'à toute l'équipe du laboratoire HydroSciences Montpellier pour leurs accueils et leurs assistances.

J'exprime toute ma gratitude envers M. Abdennour KASTALI, titulaire d'un doctorat de l'Université de Chlef, pour ses conseils éclairés, son soutien inébranlable et sa disponibilité constante, qui ont grandement enrichi mon expérience de recherche et ont contribué de manière significative à la qualité et à la réussite de mon travail.

Je tiens à exprimer ma gratitude envers les membres du jury d'avoir accepté de présider et d'évaluer ce travail. Je remercie également toute l'équipe du laboratoire Génie d'Eau et d'Environnement, en particulier la directrice du laboratoire Mme Hind MEDDI, le corps enseignant et le personnel administratif de l'ENSH, pour leur aide précieuse et leur soutien moral, intellectuel ou matériel, tout au long de ma recherche.

Je souhaite également remercier le personnel de l'Agence Nationale des Ressources Hydraulique (A.N.R.H) de Blida pour avoir fourni les données nécessaires à ma recherche.

Enfin, j'exprime ma profonde gratitude envers mes parents pour leur patience et leur soutien indéfectible, ainsi qu'à toutes les personnes qui m'ont motivé et encouragé tout au long de cette expérience.

Yasmine HAMITOCHE

Dédicace

Le périple fut long et ardu, bien plus que je ne l'aurais imaginé. Le rêve que je poursuivais semblait lointain et inaccessible, parsemé d'obstacles et de défis.

Mais j'ai persévéré, soutenu par une foi inébranlable et une volonté de fer. Aujourd'hui, je savoure la joie d'avoir atteint ma destination, le cœur rempli de gratitude envers ceux qui ont éclairé mon chemin et m'ont accordé la force de surmonter les épreuves.

Cette aventure m'a transformé, m'a appris la patience, la résilience et l'humilité. Elle m'a permis de découvrir mes limites et de les dépasser, de puiser en moi des ressources insoupçonnées. Je suis reconnaissante pour chaque étape franchie, chaque obstacle surmonté, chaque leçon apprise.

Cette réussite n'est pas la mienne seule, mais le fruit d'un soutien incommensurable et d'une aide précieuse. Je dédie ce travail à tous ceux qui ont cru en moi, qui m'ont encouragé et qui m'ont accompagné dans cette aventure extraordinaire.

Maman, Papa,

Ces mots ne suffiront jamais à exprimer l'immensité de ma gratitude envers vous. Vous avez été mes premiers professeurs, mes premiers supporters, mes piliers mes guides et mes encouragements tout au long de ce parcours doctoral. Votre encouragement constant et vos sacrifices m'ont permis de poursuivre mes rêves et d'atteindre cet objectif. Merci de m'avoir donné le goût du savoir, de m'avoir appris à marcher et à ne jamais tomber.

Maman, la femme qui a fait de moi une fille ambitieuse et qui m'a facilité les difficultés avec ses prières cachées. Au cœur attentionné et à la bougie qui était pour moi dans les nuits sombres. Merci pour ta tendresse infinie et ton écoute attentive. Tes encouragements constants m'ont donné la force de persévérer et de croire en mes rêves.

À celui dont je porte le nom avec fierté, mon père, qui a toujours été à mes côtés celui qui m'a inculqué la rigueur et la curiosité intellectuelle et m'a appris que le monde est une lutte et son arme est la connaissance. Tes conseils et ton soutien indéfectible ont été ma boussole dans les moments de doute.

Je vous dédie cette thèse symbole de votre amour inconditionnel et de vos valeurs inestimables que vous m'avez transmises.

Rabah, Walid, Sarah,

Je ne saurais oublier votre rôle crucial dans mon accomplissement. Vous avez été mes complices de jeu, mes coéquipiers d'aventures et mes premiers rivaux mes confidents et mes sources d'inspiration.

Rabah merci pour ta sagesse et ta patience infinie. Ton aide et encouragement m'ont permis de traverser les moments difficiles avec sérénité.

Walid merci pour ton humour contagieux et ton esprit de compétition qui m'ont poussé à me surpasser. Nos discussions animées et nos défis partagés ont nourri ma soif de connaissance et d'excellence.

Sarah, merci pour ta gentillesse et ta bienveillance, tu es la sœur que je n'ai jamais eue, tu as toujours cru en moi, tu as été ma source de motivation et ta présence rend mon quotidien plus serein. Ton amour et ton soutien m'ont aidée à rester forte et déterminée.

Ma chère famille,

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à chacun d'entre vous pour votre soutien tout au long de ces nombreuses années d'études. Vous êtes mon havre de paix, ma source de réconfort et mon inspiration. Merci pour vos paroles encourageantes, vos gestes affectueux et votre présence bienveillante qui ont été une source de motivation inestimable.

Je voudrais adresser un remerciement particulier à mes cousines Kahina, Tounsia, Lydia, Kamilia, Wissam et à mon cousin Amine mes compagnons d'enfance, une pensée spéciale à toi Samia, vous avez joué un rôle déterminant dans mon épanouissement personnel et intellectuel. Vos conseils avisés, votre humour contagieux et notre lien éternel ont été des piliers essentiels dans ma vie.

Merci à tous ceux qui ont supporté mes soirées studieuses jusqu'au petit matin, mes annulations de dernière minute.... Cette thèse est également le fruit de votre amour.

À mes amis

À ceux qui ont partagé avec moi les joies et les défis de la vie académique. Merci pour vos encouragements, vos discussions stimulantes, et vos moments de détente qui ont rendu ce parcours plus agréable. À Imane, Nour, Amina, Hanane, Meriem, Allal, Islem... , pour votre amitié indéfectible, vos fous rires partagés et

vosre soutien inébranlable m'ont permis de garder le cap même dans les moments difficiles.

Le voyage n'a pas été court et il ne devrait pas l'être. Le rêve n'était pas proche et le chemin n'était pas semé d'embûches, mais je l'ai fait. Dieu soit loué, qui a facilité les débuts et, par sa grâce, nous avons atteint la fin.

Merci à vous tous d'avoir fait partie de cette aventure extraordinaire

Yasmine

ملخص

تهدف هذه الأطروحة إلى تحليل التغير الزمني والمكاني طويل الأمد ودراسة التوقعات المستقبلية في مؤشرات هطول الأمطار الشديدة نتيجة لتغير المناخ في مختلف المناطق المناخية في الجزائر. تم إجراء تحليل التباين طويل الأمد لمؤشرات هطول الأمطار الشديدة باستخدام بيانات يومية لستة عشر محطة مناخية تغطي أربع مناطق مناخية مختلفة في الجزائر في الفترة الممتدة من 1969 إلى 2021. بالإضافة إلى ذلك، تم تقييم التغييرات المستقبلية باستخدام عمليات المحاكاة اليومية من توقعات المناخ العالمي لوكالة ناسا للتبادل الأرضي (NEX-GDDP-CMIP6)، التي تم تصحيح تحيزها وتوسيع نطاقها إحصائياً. استُخدم اختبار Mann-Kendall الأصلي ونسخه السبع المعدلة لإزالة آثار الاستمرارية طويلة المدى لفحص التباين طويل المدى لمؤشرات هطول الأمطار بين عامي 1969 و2021. تمت دراسة التوجهات لهذه المؤشرات على مدى ثلاث فترات مختلفة، استناداً إلى سيناريوهات SSP245 و SSP585: المستقبل القريب (2026-2050)، والمستقبل المتوسط (2051-2075) والمستقبل البعيد (2076-2100)، مقارنة بالفترة المرجعية (1990-2014). كشفت نتائج تحليل التباين طويل المدى عن وجود اتجاه ملموس نحو زيادة التباين في الهطولات الشديدة لمعظم المحطات في المنطقة المناخية الدافئة للبحر المتوسط (Csa)، باستثناء مؤشر الأيام الجافة المتتالية (CDD) الذي أظهر ميلاً سلبياً لنفس المنطقة. من جهة أخرى، أظهرت المحطات الواقعة في المناطق المناخية شبه الجافة الحارة/الباردة ومناطق المناخ الصحراوي البارد (Bwk) ميلاً تنازلياً. بالإضافة إلى ذلك، تأثرت جميع سلاسل المؤشرات التي أظهرت اتجاهات طويلة الأجل ذات دلالة على وجود انقطاع في متوسطاتها، وهو ما أكدته اختبارات لومبارد (LT) وبيتي (PT). ولكن، عندما استخدمنا اختبار MPT المعدل واختبار إزالة آثار الثبات طويل الأجل (LTP)، انخفضت أهمية الانكسارات والاتجاهات. أما نتائج تحليل التغييرات المستقبلية في مؤشرات هطول الأمطار الشديدة في المستقبل فتختلفت من مؤشر إلى آخر، ومن نموذج إلى آخر ومن منطقة إلى أخرى. على الرغم من الاختلافات بين النماذج الفردية، فإن مجموعة النماذج المختلفة MME-33 تتوقع انخفاضاً في هطول الأمطار السنوي في المناطق الساحلية والهضاب العليا (المناطق من 1 إلى 4)، بمتوسط انخفاض بنسبة 16.1%، في حين أن المناطق الصحراوية (المنطقة 5) قد تسجل زيادة بنسبة 8.1%. أظهرت مؤشرات هطول الأمطار الشديدة مثل Rx1day و Rx5day و R99p منحى تصاعدياً في جميع المناطق، مع زيادات تتراوح بين 2.5% و 25.9% في ظل سيناريوهات مناخية مختلفة. بالنسبة لأيام هطول الأمطار الغزيرة (R20 مم)، تشير التوقعات إلى انخفاض في المنطقتين 1 و 2، ولكن هناك زيادات محتملة في المنطقة 3 وتغيرات مستقرة في المنطقتين 4 و 5. بشكل عام، يتوقع أكثر من 70% من النماذج انخفاضاً في الهطول السنوي للأمطار في المناطق من 1 إلى 4 وزيادة في المنطقة 5، بالإضافة إلى زيادة في مؤشري Rx1day و R99p في جميع المناطق. بالمقارنة مع الفترة المرجعية، تُظهر التوقعات المستقبلية زيادة احتمال حدوث ظواهر هطول الأمطار الشديدة، بما في ذلك الظواهر التي تتجاوز 35 ملم/يوم لـ Rx1day و 100 ملم/ 5 أيام لـ Rx5day في المناطق الشمالية. كما يمكن أن تصبح الأحداث المتطرفة لهطول الأمطار (R99p) أكثر احتمالاً، على الرغم من ندرتها، بقيم تتجاوز 50 ملم في جميع المناطق. في المقابل، يمكن أن تتخفض احتمالية حدوث ظواهر هطول الأمطار اليومية ≤ 20 ملم في بعض المناطق، مما يعكس تغييرات معقدة في أنماط هطول الأمطار في المستقبل.

الكلمات المفتاحية: هطول الأمطار الشديدة، المناطق المناخية الجزائرية، اختبار مان-كندال المصحح، الثبات طويل الأمد، NEX-GDDP-CMIP6؛ سيناريو، تغير المناخ

Résumé

Cette thèse de doctorat vise à analyser la variabilité temporelle et spatiale à long terme ainsi que l'examen des tendances futures des indices de précipitations extrêmes dans un contexte de changement climatique à travers les différentes régions climatiques de l'Algérie. L'analyse de la variabilité à long terme des indices de précipitations extrêmes a été réalisée à partir de données pluviométriques journalières provenant de 16 stations climatiques, couvrant quatre zones climatiques distinctes de l'Algérie entre 1969 et 2021. En outre, les changements climatiques futurs ont été évalués à l'aide de simulations journalières provenant des projections climatiques globales de la NASA Earth Exchange (NEX-GDDP-CMIP6), qui sont corrigées des biais et mises statistiquement à l'échelle. Le test original de Mann-Kendall et ses sept versions modifiées, pour éliminer les effets de la persistance à long-court terme, ont été utilisés pour examiner la variabilité des indices de précipitations entre 1969 et 2021. Les tendances futures de ces indices ont été étudiées sur trois périodes distinctes, pour les scénarios SSP245 et SSP585 : futur proche (2026-2050), futur moyen (2051-2075) et futur lointain (2076-2100), par rapport à la période de référence (1990-2014). Les résultats de l'analyse de la variabilité à long terme révèlent une tendance croissante significative de la variabilité des précipitations extrêmes pour la plupart des stations de la zone du climat méditerranéen chaud (Csa), à l'exception de l'indice des jours secs consécutifs (CDD), qui a montré une tendance négative pour la même zone. En revanche, les stations des zones de climat semi-aride chaud/froid et de climat désertique froid (Bwk) ont montré une tendance à la baisse. De plus, toutes les séries d'indices présentant des tendances significatives à long terme ont été affectées par une rupture significative de leurs moyennes, confirmées par les tests de Lombard (LT) et de Pettitt test (PT). Les résultats de l'analyse de l'évolution future des indices de précipitations extrêmes varient d'un indice à un autre, d'un modèle à un autre et d'une région à une autre. Malgré les différences entre les modèles individuels, l'ensemble multi-modèle MME-33 prédit une diminution des précipitations annuelles dans les zones côtières et les Hauts Plateaux (zones 1 à 4), avec des baisses moyennes de 16,1 %, tandis que les régions désertiques (zone 5) pourraient voir une augmentation de 8,1 %. Les indices de précipitations extrêmes, comme Rx1day, Rx5day et R99p, montrent une tendance à la hausse dans toutes les zones, avec des augmentations variant de 2,5 % à 25,9 % sous différents scénarios climatiques. Pour les jours de fortes précipitations (R20mm), les prévisions indiquent des diminutions dans les zones 1 et 2, mais des augmentations possibles dans la zone 3 et des variations stables dans les zones 4 et 5. Globalement, plus de 70 % des modèles prédisent une baisse des précipitations annuelles dans les zones 1 à 4 et une augmentation dans la zone 5, ainsi qu'une hausse des indices Rx1day et R99p dans toutes les zones. Comparé à la période historique, les projections futures montrent une probabilité accrue de précipitations extrêmes, notamment des événements dépassant 35 mm/jour pour Rx1day et 100 mm/5 jours pour Rx5day dans les zones nordiques. Les événements de précipitations extrêmement pluvieux (R99p) pourraient également devenir plus probables, bien que rares, avec des valeurs dépassant 50 mm dans toutes les zones. En revanche, la probabilité d'événements de précipitations journalières ≥ 20 mm pourrait diminuer dans certaines zones, reflétant des changements complexes dans les régimes de précipitations à venir.

Mots-clés : précipitations extrêmes, zones climatiques Algériennes, test de Mann-Kendall modifié, persistance à long terme (LTP), NEX-GDDP-CMIP6 ; scénario, changement climatique

Abstract

This study aims to analyze long-term variability and examine future trends in extreme precipitation indices in response to climate change across various climatic regions of Algeria. Long-term variability analysis of extreme precipitation indices was conducted using daily data from 16 in-situ observation datasets, covering four distinct climatic zones in Algeria from 1969 to 2021. Additionally, future changes were assessed using daily simulations from NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Climate Projections (NEX-GDDP-CMIP6), which are bias-corrected and statistically downscaled. The original Mann-Kendall test and its seven modified version to eliminate the effects of short-long term persistence were employed to examine the long-term variability of precipitation indices between 1969 and 2021. Future trends in these indices were investigated over three distinct periods, based on the SSP245 and SSP585 scenarios: near-future (2026-2050), mid-future (2051-2075), and far-future (2076-2100), relative to the reference period (1990-2014). Our findings, for long-term variability analysis, reveal a significant increasing trend of extreme precipitation variability for most stations in the Warm Mediterranean climate zone (Csa), except for the Consecutive dry days (CDD) index, which showed a negative trend for the same zone, while stations in the Cold/Warm semi-arid climate and Cold desert climate (Bwk) zones showed a decreasing trend. Additionally, all index series with significant long-term trends were affected by a significant shift in their means, which was confirmed by both the Lombard (LT) and Pettitt tests (PT). The results of the analysis of the future evolution of extreme precipitation indices vary from one index to another, from one model to another, and from one region to another. Despite differences among individual models, the multi-model ensemble MME-33 predicts a decrease in annual precipitation in coastal and plateau regions (zones 1 to 4), with average declines of 16.1%, while desert regions (zone 5) could see an increase of 8.1%. Extreme precipitation indices such as Rx1day, Rx5day, and R99p show an upward trend across all zones, with increases ranging from 2.5% to 25.9% under different climate scenarios. For heavy precipitation days (R20mm), forecasts indicate decreases in zones 1 and 2, possible increases in zone 3, and stable variations in zones 4 and 5. Overall, more than 70% of models predict reduced annual precipitation in zones 1 to 4 and an increase in zone 5, along with an increase in Rx1day and R99p indices across all zones. Compared to the historical period, future projections show an increased likelihood of extreme precipitation events, including those exceeding 35 mm/day for Rx1day and 100 mm/5 days for Rx5day in northern zones. Extremely heavy precipitation events (R99p) could also become more probable, albeit rare, with values exceeding 50 mm in all zones. Conversely, the probability of daily precipitation events ≥ 20 mm may decrease in some zones, reflecting complex changes in future precipitation regimes.

Keywords: extreme precipitation, Algerian climate zones, Modified Mann-Kendall test, long-term persistence (LTP), NEX-GDDP-CMIP6; scenario, climate change.

Table des matières

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Chapitre I: Etat de l'art

1. Précipitation	9
2. Précipitations extrêmes	10
3. Modélisation du changement climatique aux échelles globale et régionale	11
4. Modèles climatiques et trajectoires socio-économiques partagées (SSP)	13
5. Descente d'échelle dynamique	15
6. Réponse des précipitations extrêmes au réchauffement climatique	15
7. Tendances des précipitations extrêmes observées à l'échelle globale	19
8. Projection des précipitations extrêmes à l'échelle globale	25
9. Précipitations extrêmes observées et projetées dans le bassin méditerranéen	28
10. Précipitations extrêmes observées et projetées pour l'Algérie.....	33
10. Conclusion.....	38

Chapitre II: Matériels et méthodes

1. Présentation de la région d'étude.....	40
1.1. Situation géographique.....	40
1.2. Le climat.....	40
1.3. Zones d'études.....	41
2. Présentation des données observées.....	44
2.1. Comblement de lacunes par le package « reddPrec »	45
2.1. Fondement théorique de la méthode.....	46
2.1.1. Potentiel de contrôle de la qualité.....	47
2.1.1. Potentiel de comblement des lacunes et d'inférence.....	48
3. Ensembles de données de modèles climatiques.....	49
4. Correction du biais (BC)	53
4.1. Spatial Désagréations.....	55
5. Indices climatiques extrêmes.....	55
6. Principales méthodes d'analyse des tendances des variables climatiques.....	59
6.1. Le test de tendance Mann-Kendall (MK)	60
6.2. La pente de Sen.....	63
6.3. Traitement de la corrélation sérielle dans l'analyse des séries chronologiques.....	64
6.3.1. Méthode de pré-blanchiment.....	66
6.3.2. Test MK modifié de Hamed et Rao (1998)	66
7. Analyse des ruptures dans les moyennes des séries chronologiques.....	67

7.1. Test de Pettitt.....	68
7.2. Test de Lombard.....	68
8. Conclusion.....	68

Chapitre III: Evolution des indices de précipitations extrêmes en Algérie (1969-2021)

1. Zone d'étude et méthodes.....	72
1.1. Analyse des données.....	72
1.2. Analyse statistique des précipitations extrêmes et des séries d'indices climatiques	73
1.3. Analyse des tendances et des ruptures dans les moyennes de la série des indices de précipitations extrêmes	74
2. Résultats.....	74
2.1. Variation spatiale des indices de précipitations extrêmes.....	74
2.2. Variabilité temporelle des indices de précipitations extrêmes	81
2.2.1. Zone de climat méditerranéen chaud (Csa).....	81
2.2.2. Zone de climat semi-aride froid/chaud (BSK/BSH).....	90
2.2.3. Zone climatique désertique froide (Bwk)	97
2.3. Identification des ruptures dans les valeurs moyennes des indices de précipitations extrêmes	103
2.3.1. Zone climatique méditerranéenne chaude (Csa)	103
2.3.2. Zone climatique semi-aride froid/chaud (BSK/BSH).....	105
2.3.3. Zone climatique désertique froide (Bwk)	107
3. Discussion	109
4. Conclusions	112

Chapitre IV: Évolution de précipitations extrêmes en Algérie (1990-2100)

1. Résultats.....	117
1.1. Variations relatives (%) de des indices pour chaque simulation de modèle	117
1.1.1. Précipitations totales annuelles en jours humides (PRCPTOT).....	118
1.1.2. Précipitations annuelles maximales sur 1 jour (RX1day).....	120
1.1.3. Précipitations annuelles maximales sur 5 jours (RX5day)	122
1.1.4. Précipitations totales annuelles à partir de jours > 99e percentile (R99p).....	126
1.1.5. Précipitations totales annuelles à partir de jours > 95e centile (R95p).....	129
1.1.6. Nombre de jours de fortes précipitations (R20mm)	132
1.1.7. Nombre de jours de fortes précipitations (R10mm)	135
1.2 Variations relatives (%) des indices pour chacune des zones par l'ensemble des modèles	138
1.2.1. Précipitations totales annuelles en jours humides (PRCPTOT).....	139
1.2.2. Précipitations annuelles maximales sur 1 jour (RX1day).....	142

1.2.3. Précipitations annuelles maximales sur 5 jours (RX5day)	145
1.2.4. Précipitations totales annuelles à partir de jours > 99e percentile (R99p).....	148
1.2.5. Précipitations totales annuelles à partir de jours > 95e centile (R95p).....	151
1.2.6. Nombre de jours de fortes précipitations (R20mm)	154
1.2.7. Nombre de jours de fortes précipitations (R10mm)	157
2. Discussion et conclusion.....	160

Chapitre V: Etude de l'occurrence des précipitations extrêmes

1. Résultats.....	167
1.1. Analyse de la significativité des changements des indices de précipitations extrêmes : Analyse du consensus des modèles	167
1.1.1. Précipitations totales annuelles en jours humides (PRCPTOT).....	167
1.1.2. Précipitations annuelles maximales sur 1 jour (RX1day).....	168
1.1.3. Précipitations annuelles maximales sur 5 jours (RX5day)	168
1.1.4. Précipitations totales annuelles à partir de jours > 99e percentile (R99p).....	169
1.1.5. Précipitations totales annuelles à partir de jours > 95e percentile (R95p).....	170
1.1.6. Nombre de jours de fortes précipitations (R20mm)	170
1.1.7. Nombre de jours de fortes précipitations (R10mm)	171
1.2. Distribution de densité par noyau (KDD) pour les indices de précipitations extrêmes à travers les périodes et les régions étudiées à l'aide de MME-33.....	171
1.2.1. Précipitations totales annuelles en jours humides (PRCPTOT).....	171
1.2.2. Précipitations annuelles maximales sur 1 jour (RX1day)	173
1.2.3. Précipitations annuelles maximales de 5 jours (RX5day).....	176
1.2.4. Précipitations totales annuelles à partir de jours > 99e percentile (R99p).....	178
1.2.5. Précipitations totales annuelles à partir de jours > 95e percentile (R95p).....	180
1.2.6. Nombre de jours de fortes précipitations (R20mm)	182
1.2.7. Nombre de jours de fortes précipitations (R10mm)	184
2. Conclusion	186
Conclusion générale.....	189
Références bibliographiques.....	194

Liste des figures

Chapitre I: Etat de l'art

- Figure I.1.** Combinaisons de voies socioéconomiques partagées et de forçage radiatif utilisées dans le Projet d'Intercomparaison de Modèles Couplés Phase 6 (CMIP6)14
- Figure I.2.** Tendances linéaires des précipitations journalières dépassant les percentiles 95% (R95PTOT) et 99 % (R99PTOT) (en haut), et des jours humides consécutifs (CWD) et des précipitations totales (PRCTOT) (en bas) pour la période 1970–2018. Les points noirs représentent des tendances statistiquement significatives. Données de HadEX322
- Figure I.3.** Signes et significativité des tendances observées dans précipitations maximales journalières annuelles (Rx1day) de 1950 à 2018 sur 8345 stations. (a) Pourcentage de stations présentant des tendances statistiquement significatives de l'indice Rx1day ; les points verts indiquent des tendances positives et les points bruns des tendances négatives. Les diagrammes en boîte et en moustaches indiquent le pourcentage attendu de stations avec des tendances significatives en raison du hasard, estimé à partir de 1000 réalisations bootstrap sous une hypothèse nulle de non-tendance.....23

Chapitre II: Matériels et méthodes

- Figure II.1.** Précipitations annuelles moyennes en Algérie calculées à partir des données CHIRPS 0,05° X 0,05° pour la période 1990-2014.....41
- Figure II.2.** Localisation des stations pluviométriques utilisées dans la première phase de l'étude.....42
- Figure II.3 :** Les limites et les emplacements des cinq zones climatiques définies de l'Algérie.....44
- Figure II.4 :** Schéma du processus de contrôle de qualité. BP : Prédiction binomiale ; MP : Prédiction de magnitude (Serrano-Notivoli et al. 2017).....48
- Figure II.5 :** Schéma des distributions de probabilité de la température et des précipitations journalières. Les extrêmes sont exprimés par des zones ombragées (Zwiers et al., 2013).....57

Chapitre III: Evolution des indices de précipitations extrêmes en Algérie (1969-2021)

- Figure III. 1:** Diagramme en boîte et en moustaches (ligne : médiane ; boîte : premier et troisième quartile ; moustaches : intervalle de confiance de 99 % ; + marqueur : valeur aberrante) des dix indices de précipitations extrêmes.....79
- Figure III. 2:** Z-scores dérivés de la méthode MK et de ses sept versions modifiées pour les séries d'indices de précipitations extrêmes qui sont exprimées en [mm] pour la période 1969-2021. Les quatre lignes rouges représentent les n valeurs critiques théoriques des tests aux niveaux de probabilité de 5 % et 10 %.....83
- Figure III. 3:** Valeurs de Hurst H du test LTP et de et de la pente Sen pour les séries d'indices de précipitations extrêmes qui sont exprimées en [mm/an] pour la période 1969-2021.....84
- Figure III.4 :** Z-scores dérivés de la méthode MK et de ses sept versions modifiées pour les séries d'indices de précipitations extrêmes qui sont exprimées en unités [jour] pour la période

1969-2021. Les quatre lignes rouges représentent les n valeurs critiques théoriques des tests aux niveaux de probabilité de 5 % et 10 %.....88

Figure III.5 : Valeurs Hurst H du test LTP et de la pente Sen pour les séries d'indices de précipitations extrêmes qui sont exprimées en [jour/an] pour la période 1969-2021.....89

Figure III.6 : Z-scores dérivés de la méthode MK et de ses sept versions modifiées pour les séries d'indices de précipitations extrêmes qui sont exprimées en [mm] pour la période 1969-2021. Les quatre lignes rouges représentent les n valeurs critiques théoriques des tests aux niveaux de probabilité de 5 % et 10 %.....93

Figure III.7 : Z-scores dérivés de la méthode MK et de ses sept versions modifiées pour les séries d'indices de précipitations extrêmes qui sont exprimées en unités [jour] pour la période 1969-2021. Les quatre lignes rouges représentent les n valeurs critiques théoriques des tests aux niveaux de probabilité de 5 % et 10 %.....96

Figure III.8: Z-scores dérivés de la méthode MK et de ses sept versions modifiées pour les précipitations extrêmes sont exprimés en [mm] pour la période 1969-2021. Les quatre lignes rouges représentent les n valeurs critiques théoriques des tests aux niveaux de probabilité de 5 % et 10 %..... 99

Figure III.9: Z-scores dérivés de la méthode MK et de ses sept versions modifiées pour les séries d'indices de précipitations extrêmes qui sont exprimées en unités [jour] pour la période 1969-2021. Les quatre lignes rouges représentent les valeurs Z critiques théoriques des tests aux niveaux de probabilité de 5 % et 10 %102

Chapitre IV: Évolution de précipitations extrêmes en Algérie (1990-2010)

Figure IV.1 : Les limites des cinq zones étudiées.....117

Figure IV.2 : Variations relatives en pourcentage de l'indice PRCPTOT à travers les modèles, l'ensemble multi-modèles et les scénarios pour les périodes futures (2026-2100) comparées à la période historique (1990-2014) dans les cinq zones de l'Algérie.....119

Figure IV.3 : Variations relatives en pourcentage de l'indice RX1day à travers les modèles, l'ensemble multi-modèles et les scénarios pour les périodes futures (2026-2100) comparées à la période historique (1990-2014) dans les cinq zones de l'Algérie.....121

Figure IV.4 : Variations relatives en pourcentage de l'indice RX5day à travers les modèles, l'ensemble multi-modèles et les scénarios pour les périodes futures (2026-2100) comparées à la période historique (1990-2014) dans les cinq zones de l'Algérie.....125

Figure IV.5 : Variations relatives en pourcentage de l'indice R99p à travers les modèles, l'ensemble multi-modèles et les scénarios pour les périodes futures (2026-2100) comparées à la période historique (1990-2014) dans les cinq zones de l'Algérie.....128

Figure IV.6 : Variations relatives en pourcentage de l'indice R95p à travers les modèles, l'ensemble multi-modèles et les scénarios pour les périodes futures (2026-2100) comparées à la période historique (1990-2014) dans les cinq zones de l'Algérie131

Figure IV.7 : Variations absolues en jour de l'indice R20mm à travers les modèles, l'ensemble multi-modèles et les scénarios pour les périodes futures (2026-2100) comparées à la période historique (1990-2014) dans les cinq zones de l'Algérie.134

Figure IV.8 : Variations absolues en jour de l'indice R10mm à travers les modèles, l'ensemble multi-modèles et les scénarios pour les périodes futures (2026-2100) comparées à la période historique (1990-2014) dans les cinq zones de l'Algérie.....	137
Figure IV.9 : Box-plots des changements relatifs de l'indice PRCPTOT des 33 modèles climatiques selon les scénarios SSP245 (A gauche) et SSP585 (A droite).....	141
Figure IV.10 : Box-plots des changements relatifs de l'indice RX1day des 33 modèles climatiques selon les scénarios SSP245 (A gauche) et SSP585 (A droite).....	144
Figure IV.11 : Box-plots des changements relatifs de l'indice RX5day des 33 modèles climatiques selon les scénarios SSP245 (A gauche) et SSP585 (A droite).....	147
Figure IV.12 : Box-plots des changements relatifs de l'indice R99p des 33 modèles climatiques selon les scénarios SSP245 (A gauche) et SSP585 (A droite).....	150
Figure IV.13 : Box-plots des changements relatifs de l'indice R95p des 33 modèles climatiques selon les scénarios SSP245 (A gauche) et SSP585 (A droite).....	153
Figure IV.14 : Box-plots des changements relatifs de l'indice R20mm des 33 modèles climatiques selon les scénarios SSP245 (A gauche) et SSP585 (A droite).....	155
Figure IV.15 : Box-plots des changements relatifs de l'indice R20mm des 33 modèles climatiques selon les scénarios SSP245 (A gauche) et SSP585 (A droite).....	159

Chapitre V: Etude de l'occurrence des précipitations extrêmes

Figure V.1 : Pourcentage de modèles avec un changement relatif positif selon les scénarios sur trois périodes futures, avec les seuils de significativité.....	169
Figure V.2 : Comparaison des distributions de densité de noyau des valeurs de l'indice PRCPTOT pour les périodes futures selon les scénarios SSP245 et SSP585 par rapport à la période historique.....	173
Figure V.3 : Comparaison des distributions de densité de noyau des valeurs l'indice RX1day pour les périodes futures selon les scénarios SSP245 et SSP585 par rapport à la période historique.....	175
Figure V.4 : Comparaison des distributions de densité du noyau des valeurs l'indice RX5day pour les périodes futures selon les scénarios SSP245 et SSP585 par rapport à la période historique.....	177
Figure V.5 : Comparaison des distributions de densité du noyau des valeurs de l'indice R99p pour les périodes futures selon les scénarios SSP245 et SSP585 par rapport à la période historique.....	179
Figure V.6 : Comparaison des distributions de densité du noyau des valeurs de l'indice R95p pour les périodes futures selon les scénarios SSP245 et SSP585 par rapport à la période historique.....	181
Figure V.7 : Comparaison des distributions de densité du noyau des valeurs de l'indice R20mm pour les périodes futures selon les scénarios SSP245 et SSP585 par rapport à la période historique.....	183
Figure V.8 : Comparaison des distributions de densité du noyau des valeurs de l'indice R10mm pour les périodes futures selon les scénarios SSP245 et SSP585 par rapport à la période historique.....	185

Liste des tableaux

Chapitre I: Etat de l'art

Tableau I.1: Scénarios des Trajectoires de Concentration Représentatives (RCP) et leur description associée (GIEC, 2013).....13

Tableau I.2: Inondations les plus importantes en pertes humaines et dommages matériels en Algérie pour la période 1970-2023.....36

Chapitre II: Matériels et méthodes

Tableau II.1: Noms, coordonnées géographiques, altitudes et le type de la zone climatique correspondante pour les seize stations pluviométriques.43

Tableau II.2 : Ensembles de données des modèles GCM NEX-GDDP.....51

Tableau II.3 : Indices des précipitations extrêmes.....59

Tableau II.4 : Synthèse des tests de Mann-Kendall appliqués à la série d'indices de précipitations extrêmes analysés.....65

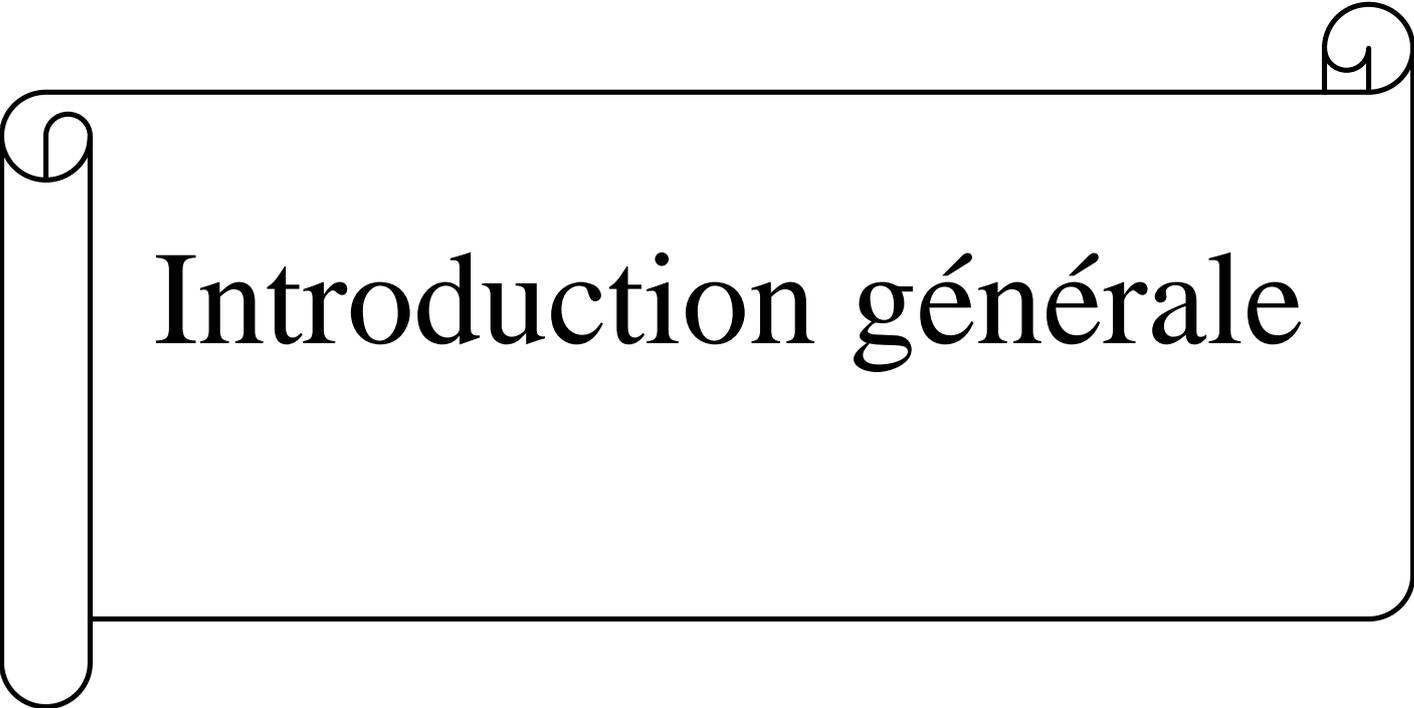
Chapitre III: Evolution des indices de précipitations extrêmes en Algérie (1969-2021)

Tableau III.1: Intervalle de confiance (95 %) autour de la moyenne des dix indices de précipitations extrêmes80

Tableau III.2 : Résultats des tests Pettitt, Pettitt modifié et Lombard.....104

Tableau III.3 : Résultats des tests Pettitt, Pettitt modifié et Lombard.....106

Tableau III.2 : Résultats des tests Pettitt, Pettitt modifié et Lombard.....108



Introduction générale

Introduction générale

Dans le contexte du réchauffement climatique actuel, tant le cinquième rapport d'évaluation du GIEC (GIEC, 2014) que le plus récent à savoir le sixième rapport d'évaluation (Seneviratne et al., 2021) ont conclu que la fréquence et l'intensité des événements météorologiques extrêmes ont probablement augmenté sur les terres dans un plus grand nombre de régions que celles où une diminution a été observée. Ces variations découlent de la dynamique de la circulation atmosphérique et des effets thermodynamiques, eux-mêmes influencés par la hausse significative de la température (Andrew et al., 2023 ; Chan et al., 2020). Les processus dynamiques, influencés par les changements dans la circulation atmosphérique à grande échelle et les mouvements verticaux de l'atmosphère, jouent un rôle crucial dans l'explication des événements de précipitations extrêmes (Kumari et al., 2021, Seneviratne et al., 2021). Cependant, les effets de ces changements, induits par le réchauffement sur les précipitations extrêmes, sont complexes et parfois difficiles à quantifier, introduisant une incertitude dans les projections (Seneviratne et al., 2021). Parallèlement, les changements dans la teneur en humidité atmosphérique, entraînés par le réchauffement climatique, jouent un rôle crucial dans l'intensification de ces phénomènes. Il est important donc, de noter que les processus thermodynamiques, liés à l'augmentation de la teneur en humidité atmosphérique due au réchauffement, contribuent également de manière significative à cette intensification (Westra et al, 2014 ; Pall et al 2017). En conséquence, les épisodes de précipitations extrêmes peuvent entraîner des inondations urbaines, des glissements de terrain, des dommages aux infrastructures qui conduisent à des pertes en vies humaines importantes, comme le soulignent le cinquième et le sixième rapport d'évaluation du GIEC. Ces changements des phénomènes météorologiques extrêmes, documentés dans les études de Kumari et al. (2021) ainsi que de Pall et al. (2017), sont souvent associés à des répercussions socio-économiques significatives. Ils peuvent affecter durablement les communautés touchées, nécessitant des mesures d'adaptation et d'atténuation efficaces pour minimiser les risques et les pertes.

Le sixième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC AR6) a identifié des régions particulièrement sensibles et vulnérables au changement climatique, notamment le bassin méditerranéen auquel appartient l'Algérie (GIEC, 2021). Les tendances au réchauffement observées dans cette région devraient s'intensifier tout au long du XXI^e siècle en fonction des futures concentrations de gaz à effet

de serre (Cos et al., 2022 ; GIEC, 2021 ; Zittis, 2019), entraînant des risques climatiques sans précédent, notamment une augmentation de la fréquence et de l'intensité des extrêmes climatiques et hydrologiques. Conformément aux études précédentes (par exemple, Seneviratne et al., 2021 ; Politi et al., 2023 ; Lionello et Scarascia, 2020 ; Ribes et al., 2019), les tendances des précipitations extrêmes dans la région méditerranéenne manquent généralement de cohérence spatiale. Bien que des diminutions aient été observées dans la partie occidentale de la Méditerranée (Insua-Costa et al., 2022 ; Politi et al., 2023), certaines augmentations ont été observées dans la partie orientale (Ribes et al., 2019 ; Mathbout et al., 2018). En ce qui concerne les variations observées inhérentes aux événements de sécheresses passées dans la région méditerranéenne, il est essentiel de noter que la tendance de leur fréquence et de leur intensité diffère d'une région à une autre (Caloiero et al., 2018 ; Raymond et al., 2018). Néanmoins, il existe un consensus beaucoup plus fort concernant l'évolution potentielle future de ces sécheresses dans la région. Les scénarios de projection indiquent clairement une augmentation attendue de la fréquence et de la gravité des sécheresses hydrologiques et météorologiques (Ozturk et al., 2015 ; Seker & Gumus, 2022 ; Pulido-Velazquez et al., 2022).

L'Algérie, comme d'autres pays méditerranéens, est l'une des nations les plus vulnérables au changement climatique (Meddi and Eslamian, 2021 ; Schilling et al., 2012 ; GIEC, 2021). De plus, sa vulnérabilité a augmenté au fil des ans et les épisodes de précipitations extrêmes sont devenus plus fréquents au cours des dernières décennies. Au cours du siècle dernier, le pays a connu plusieurs périodes de sécheresse, avec des occurrences notables en 1910, 1940, ainsi qu'en 1975 et 1981 (Meddi et Hubert, 2003 ; Taibi et al., 2015 ; Achour et al., 2020), et plus persistantes au cours du XXI^e siècle (Bouabdelli et al., 2022). Cette sécheresse récurrente a entraîné une pénurie d'eau critique, principalement due à la baisse des niveaux d'eau dans les 60 barrages opérationnels en Algérie (Bouhekima, 2003) ainsi que le rabattement drastique des niveaux piézométriques des nappes d'eau souterraines. Entre 2001 et 2002, de nombreux barrages ont enregistré leurs taux de remplissage les plus bas, en particulier ceux de la région du centre (avec 37% et 29%) et de l'Est (44% et 36%) (Touati, 2010 ; Meddi and Eslamian, 2021). Cette tendance a également été observée en 2005 lorsque les 16 barrages de l'Ouest n'ont été remplis qu'à un taux de 18%. Ce phénomène a également impacté les nappes d'eau souterraines où le rabattement a atteint pour certaines nappes les 40 m (Demmak, 2014 ; Meddi et Hubert, 2003). Puis, en 2016, une sécheresse a provoqué une chute drastique des niveaux de remplissage des barrages, passant de 95 % à seulement 65 %

(Bouabdelli, 2020). En 2021, les faibles précipitations ont entraîné une grave crise de l'eau en Algérie où les volumes d'eau stockés ayant diminué de 35 à 40 % par rapport à l'année précédente. L'année suivante, en 2022, les niveaux de barrages ont atteint seulement 17 % montrant une persistance de cette crise. De plus, au cours des cinquante dernières années, la région a connu de nombreuses inondations dévastatrices causées par des pluies torrentielles dans diverses régions du pays, comme le soulignent les travaux de Korichi et al. (2016) et Hadjij et al. (2021). La fréquence de ces événements meurtriers a augmenté au cours des deux dernières décennies dans plusieurs villes Algériennes (Kastali et al., 2020). Par exemple, la ville de Constantine a connu plusieurs inondations dévastatrices au cours des dernières décennies. Au 24 août 2015, trois personnes ont perdu la vie dans la nouvelle ville d'Ali Mendjli lors de pluies torrentielles. De même, l'inondation du 18 septembre 2018 a fait deux morts et onze blessés dans la même localité. Lors de l'inondation du 25 août 2019, une personne était toujours portée disparue. Plus récemment, le 14 juin 2023, dix familles ont dû être évacuées de leurs maisons touchées par des inondations causées par de fortes précipitations toujours dans la même localité ce qui montre la récurrence des événements extrêmes. Un nombre croissant d'études tentent d'analyser le phénomène de sécheresse (par exemple, Zeroual et al., 2017 ; Bouabdelli, 2021) ainsi que l'identification des facteurs responsables des pertes causées par les inondations (par exemple, Hadjij et al., 2021). Parmi ces facteurs, on peut citer l'urbanisation intensive des zones inondables, l'imperméabilisation des sols, l'augmentation du nombre de maisons construites dans le lit mineur et majeur des oueds, ainsi que la récurrence des épisodes de précipitations extrêmes (Llasat et al., 2010 ; Kastali et al., 2022, Hamitouche et al., 2023). Dans le contexte actuel de réchauffement climatique, il est courant d'associer ces phénomènes extrêmes à la hausse des températures (par exemple, Zeroual et al., 2017 ; Bouabdelli, 2021). Cependant, jusqu'à présent, peu d'études en Algérie ont examiné de manière comparative la variation temporelle des précipitations extrêmes dans les stations situées dans la même zone climatique. Une telle comparaison pourrait permettre de mieux comprendre l'effet de la température sur les tendances des événements extrêmes, enrichissant ainsi la compréhension des impacts du changement climatique dans la région. À la lumière de ces observations et compte tenu de l'augmentation prévue des événements extrêmes au niveau régional, il est essentiel d'approfondir la recherche sur le comportement des précipitations extrêmes en Algérie pour expliquer leur persistance temporelle et spatiale. Cependant, les changements climatiques anticipés au XXI^e siècle devraient entraîner des réponses variées dans les événements de précipitations extrêmes (IPCC, 2014; Seneviratne et al., 2021). Le bassin méditerranéen, y

compris l'Algérie, occupe une position unique entre les régions arides (Sahara) et humides (nord de l'Europe), ce qui le rend particulièrement vulnérable au changement climatique. Selon le sixième rapport d'évaluation du GIEC (Seneviratne et al. 2021), il est prévu que cette région soit confrontée à une hausse significative des risques climatiques, notamment une intensification des phénomènes météorologiques extrêmes, en raison des concentrations anticipées de gaz à effet de serre (Todaro et al., 2022, Cos et al., 2022; GIEC, 2021; Zittis, 2019). L'augmentation et l'intensification des phénomènes météorologiques extrêmes seront-elles accompagnées de changements dans les schémas de précipitations extrêmes à travers les diverses zones climatiques de l'Algérie ? Comment évolueront ces événements de précipitations extrêmes à l'avenir ? Cette thèse de doctorat vise à tenter de répondre à ces questions. À cette fin, les objectifs généraux de la thèse peuvent être définis comme suit :

1. Utiliser les dix indices de précipitations extrêmes définis par le Groupe d'experts sur la détection des changements climatiques et les indices (ETCCDI) pour étudier les variations des précipitations extrêmes sur une période s'étendant de 1969 à 2021 dans diverses zones climatiques d'Algérie, incluant le climat méditerranéen chaud « Csa », le climat semi-aride froid/chaud « Bsk/Bsh » et le climat désertique froid « Bwk ».
2. Analyser les tendances à long terme des séries des dix indices de précipitations extrêmes en utilisant la méthode de Mann-Kendall et les sept tests statistiques associés, afin de comprendre l'impact de la persistance à court terme et à long terme sur ces tendances et d'éliminer les effets de ces phénomènes pour une interprétation précise des résultats.
3. Évaluer les variations des indices de précipitations extrêmes pour l'Algérie sur la période historique (1990-2014) ainsi que pour trois périodes futures (2026-2050, 2051-2075 et 2076-2100) selon différents scénarios (SSP245 et SSP585) en se basant sur les données de précipitations journalières issues des simulations des modèles NEX-GDDP-CMIP6, dans le but de comprendre les tendances et les changements futurs des événements extrêmes de précipitations dans la région.
4. Évaluer les tendances significatives d'augmentation ou de diminution des indices climatiques en calculant les moyennes des changements pour chaque zone définie, chaque modèle climatique, et chaque période future, en se basant sur le consensus des modèles disponibles.
5. Évaluer les impacts potentiels des changements climatiques sur les indices de précipitations extrêmes dans chaque zone en utilisant les distributions de densité de noyau (KDD).

La présente thèse vise à fournir un aperçu approfondi des précipitations extrêmes dans différentes zones climatiques de l'Algérie, ce qui sera utile pour la prise de décisions en matière de gestion des ressources en eau, de réduction des risques de catastrophe et de développement de stratégies d'adaptation et de résilience au changement climatique.

La thèse est composée de cinq chapitres : Le premier chapitre s'attache à explorer l'état de l'art sur l'étude des précipitations extrêmes, en couvrant une perspective globale, régionale et locale. Cette section situe le travail de cette thèse dans un cadre général de recherche scientifique sur les extrêmes pluviométriques, mettant en lumière l'impact du changement climatique sur les indices des précipitations extrêmes. Une attention particulière est portée à la modélisation des impacts du changement climatique, notamment à travers des approches telles que la réduction d'échelle dynamique. En outre, une analyse des scénarios climatiques et de l'évaluation des risques potentiels sera abordée, en examinant les modèles climatiques et les trajectoires socio-économiques partagées. Ce chapitre explore également la réponse des précipitations extrêmes au réchauffement climatique, en examinant les tendances observées et modélisées à l'échelle mondiale ainsi que les spécificités des pluies extrêmes dans le bassin méditerranéen. Enfin, une analyse approfondie des précipitations extrêmes en Algérie sera présentée, mettant en évidence les tendances observées et les défis particuliers rencontrés dans cette région.

Dans le deuxième chapitre, la zone d'étude, les données et les méthodes utilisées pour analyser les indices des précipitations extrêmes en Algérie dans le passé récent et dans le futur seront abordées. Cette section comprend une introduction aux indices climatiques extrêmes ainsi que l'utilisation du test de Mann-Kendall pour analyser les tendances à long terme des variables climatologiques et hydrologiques. Nous détaillons également les principales variantes modifiées du test de Mann-Kendall, notamment les méthodes basées sur la correction de la variance et celle basée sur le pré-blanchiment. Par la suite, les méthodes d'analyse des ruptures dans les moyennes des séries de données climatologiques seront présentées. De plus, nous explorons les ensembles de données de modèles climatiques NEX-GDDP-CMIP6 et les techniques associées, telles que la correction du biais et la désagrégation spatiale. Ces éléments combinés permettront de comprendre de manière approfondie les caractéristiques passées et futures des précipitations extrêmes en Algérie, en utilisant des approches rigoureuses et des données variées. Les résultats de l'application de ces méthodes seront présentés dans deux parties distinctes. La première partie, abordée dans le troisième chapitre, examinera la variabilité des indices de précipitations extrêmes de 1969 à 2021 dans différentes zones climatiques de l'Algérie, en utilisant le test de Mann-Kendall et ses sept

versions modifiées. La deuxième partie, développée dans le quatrième et le cinquième chapitre, se concentrera sur l'analyse des précipitations extrêmes en Algérie, passées (1990-2014) et futures (2026-2050, 2051-2075 et 2076-2100), en utilisant des données de modèles climatiques. Les tendances et les changements potentiels, évalués à l'aide d'indices recommandés par l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et en tenant en compte les différents scénarios climatiques, visent à évaluer les impacts des changements climatiques sur ces événements dans chaque zone climatique de l'Algérie.

Enfin, des recommandations seront formulées pour une meilleure prise de décisions en matière de gestion des ressources en eau, de réduction des risques de catastrophe et de développement de stratégies d'adaptation et de résilience en réponse à l'évolution actuelle et future des événements extrêmes de précipitations. Ces recommandations prendront en compte les tendances observées dans l'évolution des indices de précipitations extrêmes ainsi que les projections pour le futur. De plus, la conclusion générale abordera les pistes de recherche issues des résultats obtenus sur les indices de précipitations extrêmes dans le présent et leurs prévisions pour le futur.



CHAPITRE I :
Etat de l'art

La modification des régimes de précipitations, susceptible d'entraîner des événements extrêmes tels que des précipitations abondantes et des inondations, suscite une préoccupation croissante au sein de la communauté scientifique et la population ainsi que les décideurs politiques. Ces événements sont de plus en plus étudiés dans le cadre de la recherche sur le climat et ses impacts (Gimeno et al., 2022 ; Alimonti et al., 2022 ; Seneviratne et al., 2021 ; GIEC, 2014). Comprendre les caractéristiques changeantes et les conséquences des précipitations extrêmes revêt une importance capitale pour la mise en place de politiques d'adaptation et d'atténuation visant à aider les sociétés à faire face aux changements climatiques (Seneviratne et al., 2021 ; GIEC, 2014). L'évolution des phénomènes d'inondations à l'échelle mondiale, particulièrement en Algérie, a été le moteur de cette revue bibliographique portant sur les événements extrêmes de précipitations, dont la méthodologie et les résultats sont discutés dans les différents chapitres de cette thèse.

1. Précipitation

Les précipitations, une des composantes du cycle hydrologique, dont l'intensité est contrôlée par la disponibilité de l'énergie et non par l'humidité (Deodhar, 2008 ; Allen et Ingram 2002). Le principe de base de la formation des précipitations est que lorsqu'une parcelle d'air est soulevée, elle se dilate, se refroidit et finit par se condenser en vapeur d'eau (Cotton et Yuter, 2009). La portance initiale peut résulter de mécanismes tels qu'un réchauffement inégal de la surface, une levée orographique, des limites d'écoulement et des instabilités baroclines associées aux fronts et aux systèmes de pression (Trenberth et al. 2003). La condensation de la vapeur d'eau se produit en raison de l'expansion de la parcelle d'air lorsque celle-ci est soumise à une pression plus basse, ce qui entraîne un refroidissement de la parcelle et la condensation de la vapeur d'eau en gouttelettes pour former un nuage (Brewster, 2015). Après la condensation, des processus supplémentaires sont nécessaires pour faire croître des gouttelettes nuageuses suffisamment grosses pour tomber sous forme de précipitations (par exemple, collision-coalescence, dépôt). Ces processus dépendent de la structure verticale de la température et de l'humidité à l'intérieur du nuage (par exemple, froid, chaud ou nuage en phase mixte) (Brewster, 2015).

2. Précipitations extrêmes

La définition du terme « extrême » reste sujette à diverses interprétations. Malgré son utilisation courante, aucune définition universelle n'a été établie, que ce soit dans un contexte interdisciplinaire ou au sein de domaines de recherche spécifiques (Gimeno et al., 2022 ; Broasca et al., 2020). Selon le dernier rapport du GIEC (AR6), un événement météorologique extrême est défini comme "un événement rare à un endroit spécifique et à une période donnée de l'année", tandis qu'un événement climatique extrême est défini comme "un schéma de conditions météorologiques extrêmes persistant sur une période prolongée, telle qu'une saison" (GIEC, 2022). La rareté peut être appréhendée de différentes manières selon le contexte, avec deux approches principales : une perspective axée sur les aspects des catastrophes, et une autre fondée sur des méthodes statistiques quantifiant les précipitations. Sous l'influence du changement climatique d'origine humaine, la rareté des événements d'une certaine magnitude évolue, rendant les événements autrefois sans précédent de plus en plus probables dans les conditions actuelles. Ces événements, uniques dans l'histoire des observations, sont souvent perçus comme des phénomènes inattendus (Clarke et al., 2022).

Les extrêmes de précipitations peuvent être calculés de différentes manières. Ils sont généralement évalués en utilisant des seuils relatifs (par exemple, le cumul des précipitations supérieures au percentile 95 ou 99) ou absolus (par exemple, le nombre maximal de jours secs avec des précipitations journalières inférieures à 1 mm) au-delà desquels les conditions sont considérées comme extrêmes. Ces méthodes de calcul permettent de déterminer avec précision les événements météorologiques exceptionnels. Par exemple, les seuils relatifs définissent des niveaux au-delà desquels les conditions sont considérées comme exceptionnelles, tandis que les seuils absolus, comme 1 mm/jour pour une journée sèche, fournissent des critères précis pour déterminer les conditions extrêmes. Ces extrêmes peuvent être analysés selon deux perspectives principales : les changements de fréquence pour une certaine magnitude d'événements extrêmes (Rahmani et al, 2016), ou les changements de magnitude pour une période de retour spécifique (DeGaetano, 2009 ; Santos et al, 2016). Cette approche permet d'évaluer si les événements extrêmes deviennent plus fréquents ou plus intenses en fonction de leur rareté. Dans cette perspective, les indices climatiques des précipitations extrêmes, recommandés par l'équipe d'experts sur le « Climate Change Detection Indices (ETCCDI) » (ETCCDMI, 2003) de l'Organisation météorologique mondiale (OMM), fournissent des mesures standardisées essentielles pour caractériser et suivre l'évolution des événements de précipitations extrêmes dans le temps (Zhang & Feng, 2004 ;

Organisation météorologique mondiale, 2004). Ces indices comprennent par exemple les précipitations maximales journalières, les précipitations maximales en 5 jours, le nombre de jours de fortes précipitations (>10 mm) (R10), le nombre de jours de très fortes précipitations (>20 mm) (R20), les séquences de jours secs consécutifs (CDD), les séquences de jours de pluie consécutifs (CWD), ainsi que la quantité totale annuelle de précipitations provenant des jours dépassant respectivement les 95e et 99e percentiles.

Les variations de l'amplitude des événements météorologiques extrêmes peuvent être interprétées de différentes manières, en fonction de la rareté de l'événement et de sa fréquence (Otto et al., 2012). Cependant, la sensibilité de ces variations à l'augmentation du réchauffement mondial dépend largement de la définition spécifique des extrêmes étudiés. Certaines études ont montré que les changements de magnitude des événements extrêmes, tels que les précipitations intenses, découlent d'une combinaison à la fois de la dynamique de la circulation à grande échelle et de la variabilité locale des effets thermodynamiques, qui varient en fonction de la région étudiée (Andrew et al., 2023 ; Chan et al., 2020). Les processus dynamiques, influencés par les changements dans la circulation atmosphérique à grande échelle et les mouvements verticaux de l'atmosphère, jouent un rôle crucial dans l'explication des événements de précipitations extrêmes (Kharin et al., 2018 ; Kumari et al., 2021 ; Seneviratne et al., 2021). Cependant, les effets de ces changements induits par le réchauffement sur les précipitations extrêmes sont complexes et parfois difficiles à quantifier, introduisant de l'incertitude dans les projections (Seneviratne et al., 2021). Parallèlement, les changements dans le contenu en humidité de l'atmosphère, induits par le réchauffement climatique, jouent un rôle crucial dans l'intensification de ces phénomènes. Toutefois, il est important de noter que les processus thermodynamiques, liés à l'augmentation du contenu en humidité de l'atmosphère due au réchauffement, contribuent également de manière significative à cette intensification (Westra et al., 2014 ; Pall et al., 2017).

3. Modélisation du changement climatique aux échelles globale et régionale

Les modèles numériques du climat sont des programmes informatiques composés complexes qui simulent les différentes composantes du système climatique, comme l'atmosphère, l'océan, les surfaces continentales et les glaces. Ces modèles utilisent des milliers d'équations physiques pour reproduire numériquement les processus météorologiques, avec des paramétrisations physiques pour représenter des phénomènes à plus petite échelle. Par exemple, ils calculent la formation des nuages et des précipitations. Cette simulation est

effectuée sur de vastes grilles tridimensionnelles, avec des résolutions spatiales et temporelles très fines. Malgré les capacités des supercalculateurs, la puissance de calcul reste un défi pour simuler de longues périodes de temps. De plus, ces modèles sont calibrés en fonction des observations disponibles, ce qui limite la possibilité de manipuler les résultats pour obtenir des conclusions spécifiques, garantissant ainsi leur fiabilité et leur validité pour étudier une variété de climats et de situations.

Les modèles climatiques, qu'ils soient globaux (GCM) ou régionaux (RCM), sont des outils essentiels pour anticiper l'évolution du climat. Cependant, ces projections dépendent largement des choix de société et des émissions de gaz à effet de serre. Les scénarios climatiques, tels que ceux présentés dans les rapports du GIEC (GIEC 1990; 1996; 2001; 2007; 2013; 2021), permettent d'évaluer différentes trajectoires d'émissions de CO₂ et leurs impacts potentiels sur le climat. Les niveaux de forçage radiatif, notamment ceux attribuables au dioxyde de carbone, sont estimés dans les différents rapports d'évaluation, avec des variations entre 1.46 et 1.68 Wm⁻² (GIEC 2013). Les projections climatiques, telles que celles du SSP2-4,5, prévoient une augmentation de température mondiale pouvant atteindre 1.8 ± 0.7 °C avant le XXIIe siècle. En 2020, la température moyenne mondiale a déjà augmenté de 1.2 °C, selon le rapport de l'OMM 2020, confirmant les tendances observées dans les études antérieures. Ces évolutions sont également étayées par des données sur les précipitations, la température, l'évaporation, le vent et le niveau de la mer, soulignant l'importance des projections futures pour comprendre les impacts du changement climatique (GIEC 1990; 1996; 2001; 2007; 2013; 2014a; 2014b; Ajjur et Al-Ghamdi 2021; Bustos Usta et Torres Parra 2021; Gehrels 2010; Ayalew 2019; Mahmood et al. 2019).

Les simulations climatiques, réalisées à l'aide de modèles climatiques globaux (GCM) et régionaux (RCM), offrent une perspective sur l'évolution du climat à venir. Cependant, ces projections dépendent largement des trajectoires d'émissions de gaz à effet de serre (GES) choisies, influencées par les décisions et les actions humaines. Dans le cinquième rapport du GIEC, les scénarios de concentrations en GES, tels que le RCP4.5 et le RCP8.5, sont utilisés pour explorer différents futurs possibles. RCP4.5 signifie "Representative Concentration Pathway 4.5", soit "Trajectoire de Concentration Représentative 4.5". Il représente un scénario d'émissions de gaz à effet de serre (GES) où le niveau de forçage radiatif est de 4.5 watts par mètre carré (W/m²) à la fin du XXIe siècle, par rapport à l'ère préindustrielle. Ces scénarios fournissent des projections climatiques, mais ne peuvent pas prédire de manière absolue le climat futur en raison de l'incertitude entourant les choix sociétaux et les politiques

environnementales (GIEC 1990, 1996, 2001, 2007, 2013, 2014a, 2014b ; Ajjur et Al-Ghamdi 2021 ; Bustos Usta et Torres Parra 2021 ; Gehrels 2010). Enfin, la concentration atmosphérique de CO₂ devrait doubler d'ici 2100, avec une augmentation correspondante de la température moyenne entre 1.4 et 5.8 °C, entraînant des impacts négatifs tels qu'une élévation du niveau de la mer (GIEC 2007). Ces projections sont cruciales pour comprendre les réponses atmosphériques possibles aux changements climatiques futurs et guider les décisions politiques et les stratégies d'adaptation (Kharin et al. 2007 ; Kunkel et al. 2013b ; Janssen et al. 2014 ; Prein et al. 2017 ; Gensini et al. 2023).

4. Modèles climatiques et trajectoires socio-économiques partagées (SSP)

Le Projet d'intercomparaison de modèles couplés (CMIP), initié par le GIEC 2021, offre une variété de scénarios climatiques en collaboration avec des institutions de modélisation climatique à l'échelle mondiale. Dans sa phase la plus récente, CMIP6, les modèles climatiques ont été utilisés pour élaborer des projections incluses dans le sixième rapport d'évaluation du GIEC (AR6). Ces projections s'appuient sur un ensemble de trajectoires socio-économiques partagées (SSP), une nouvelle approche qui prend en compte la complexité du changement climatique en intégrant des récits de développement sociétal. Comparativement, CMIP5 était basé sur des scénarios de trajectoire de concentration représentative (RCP), qui décrivaient les changements dans les émissions de GES, les concentrations d'aérosols et l'utilisation des terres, permettant d'estimer le forçage radiatif et la température globale jusqu'en 2100 (O'Neill et al., 2016). CMIP5 a proposé quatre scénarios distincts, chacun caractérisé par son niveau de forçage radiatif prévu en 2100 (Voir le tableau n°1).

Tableau I. 1: Scénarios des Trajectoires de Concentration Représentatives (RCP) et leur description associée (GIEC, 2013)

RCP	Description du Scénario	Forçage Radiatif en 2100 (W/m²)
RCP2.6	Stabilisation des concentrations de GES à un niveau faible, suivi d'une diminution	2.6
RCP4.5	Réduction progressive des émissions de GES après un pic autour de 2040, puis stabilisation	4.5
RCP6.0	Émissions de GES continues, atteignant un pic autour de 2080, puis diminuant progressivement	6.0
RCP8.5	Croissance continue des émissions de GES tout au long du XXI ^e siècle	8.5

Les scénarios CMIP6 élargissent la gamme d'hypothèses utilisées dans les expériences de modélisation climatique en intégrant les trajectoires socio-économiques avec les trajectoires

de concentration des émissions. Cela permet une meilleure représentation des processus climatiques globaux en couvrant une gamme plus étendue d'émissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques, avec différentes options d'atténuation et d'adaptation au climat. Les projections climatiques du CMIP6 explorent ainsi un éventail plus large de forçages climatiques futurs, offrant ainsi une plus grande variété de scénarios climatiques issus d'expériences modélisées. Quatre scénarios CMIP6 sont prioritaires, car ils servent de comparaison avec les scénarios CMIP5 RCP (Paola et al., 2021). Les SSP CMIP6 sont présentés par priorité dans la figure 1, avec leur relation avec les scénarios RCP précédents (Riahi et al., 2017). Chaque SSP est associé à un récit décrivant le parcours général. Chaque SSP prend en compte le niveau de difficulté de l'atténuation et de l'adaptation au climat, influencé par les changements sociaux, économiques, politiques et technologiques. Par exemple, le scénario SSP5-8.5, représentant un forçage radiatif de 8,5 W/m² en 2100, présente le forçage radiatif le plus élevé, reflétant une économie mondiale axée sur la croissance économique et le progrès technologique (O'Neill et al, 2016). Les résultats des modèles de projection climatique CMIP6 sont accessibles au public via le magasin de données climatiques du centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (ECMWF), permettant une meilleure compréhension du système climatique et des estimations du changement climatique futur ainsi que des incertitudes associées (O'Neill et al, 2016).

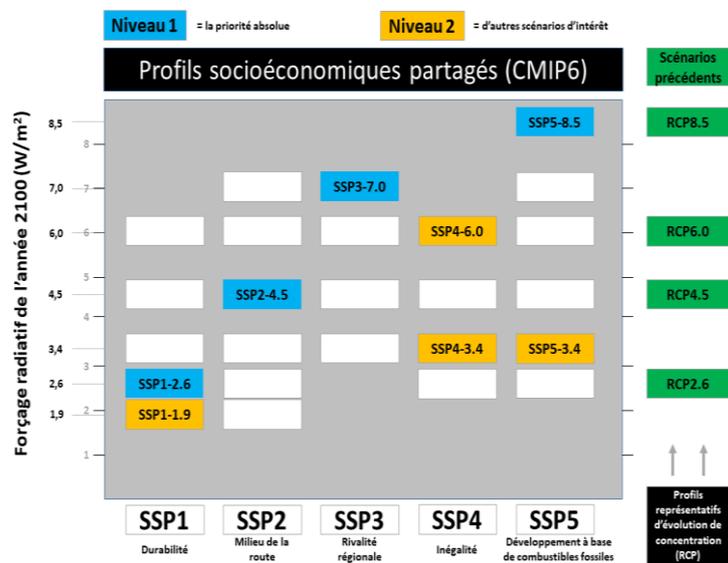


Figure I.1. Combinaisons de voies socioéconomiques partagées et de forçage radiatif utilisées dans le Projet d'Intercomparaison de Modèles Couplés Phase 6 (CMIP6) (O'Neill et al, 2016)

5. Descente d'échelle dynamique

La descente d'échelle dynamique en modélisation climatique représente une avancée significative dans la précision des prévisions météorologiques locales et régionales. Cette approche, qui utilise des modèles climatiques régionaux (RCM) à haute résolution pilotés par les sorties des modèles climatiques mondiaux (GCM), permet de mieux représenter les processus climatiques à petite échelle, tels que la topographie et les circulations à méso-échelle (par exemple, [Pan et al. 2011](#) ; [Trapp et al. 2011](#) ; [Diffenbaugh et al. 2013](#) ; [Robinson et al. 2013](#) ; [Gensini et Mote 2014](#). ; [Giorgi et Gutowski 2015](#) ; [Tippett et al. 2015](#) ; [Prein et al. 2015](#) ; [Hoogewind et al. 2017](#) ; [Prein et al. 2017](#) ; [Gensini et al. 2023](#) ; [Haberlie et al. 2023](#)).

Les RCM sont préférés aux GCM pour leur capacité à capturer les variations spatiales et temporelles des précipitations et des températures, notamment dans les régions montagneuses et côtières. Par exemple, le modèle de recherche avancé WRF (WRF-ARW) est largement utilisé pour sa capacité à simuler des phénomènes à petite échelle, comme la convection profonde et humide ([Skamarock et Klemp 2008](#) ; [Powers et al. 2017](#)).

Comparées aux méthodes de descente d'échelle statistique, qui reposent sur des relations statistiques entre les variables climatiques à grande échelle et le climat local, les méthodes dynamiques offrent une précision accrue, mais nécessitent des ressources informatiques plus importantes ([Hong et al., 2014](#) ; [Chowdhury et Eslamian, 2014](#) ; [Mujere et Eslamian, 2014](#)). Néanmoins, ces dernières demeurent populaires pour les études régionales en raison de leur relative simplicité et de leur faible coût. En somme, la descente d'échelle dynamique permet d'améliorer la représentation des phénomènes climatiques locaux et régionaux, offrant ainsi des projections plus précises des événements météorologiques extrêmes et des caractéristiques géographiques. En parallèle, les méthodes statistiques restent pertinentes pour des études à plus large échelle, mais moins exigeantes en termes de ressources ([Westra et al. 2014](#) ; [Hong et al., 2014](#)).

6. Réponse des précipitations extrêmes au réchauffement climatique

Le changement dans les extrêmes météorologiques et climatiques résulte des échanges locaux de chaleur, d'humidité et d'autres quantités connexes (changements thermodynamiques) ainsi que des mouvements atmosphériques et océaniques (changements dynamiques) ([Chan et al, 2020](#)). Les processus thermodynamiques et dynamiques sont interconnectés, mais sont

examinés séparément pour mieux comprendre leur contribution aux changements dans les extrêmes climatiques (Shepherd, 2014). Les extrêmes de température sont influencés par l'augmentation des gaz à effet de serre, entraînant un réchauffement généralisé avec des extrêmes chauds plus fréquents et intenses, et des extrêmes froids moins fréquents et moins intenses. Les réponses thermodynamiques incluent une augmentation de la vapeur d'eau atmosphérique et une modification du profil de température vertical. Les rétroactions thermodynamiques se produisent également par des processus de surface, tels que la réduction de l'albédo de la neige saisonnière et la demande d'évaporation atmosphérique accrue (Pithan and Mauritsen, 2014). Les extrêmes de précipitations augmentent de manière robuste avec l'augmentation de la vapeur d'eau, bien que la contribution dynamique varie régionalement et soit plus incertaine. Les contributions dynamiques peuvent modifier la fréquence et l'intensité des phénomènes synoptiques et sub-synoptiques, y compris les cyclones tropicaux, les systèmes convectifs de méso-échelle et les tempêtes. De plus, les réponses et rétroactions dynamiques peuvent renforcer les extrêmes de précipitations en modifiant les processus convectifs au sein des tempêtes, bien que ces effets soient sujets à des incertitudes (Shaw et al., 2016 ; Allan et al., 2020). Les sécheresses sont également affectées par les processus thermodynamiques et dynamiques. Les processus thermodynamiques augmentent la demande évaporative atmosphérique, tandis que les processus dynamiques affectent la fréquence et l'intensité des anomalies météorologiques liées aux précipitations et à l'ensoleillement (Martin, 2018 ; Vicente-Serrano et al., 2020).

Au cours des dernières décennies, l'étude des événements extrêmes est devenue un centre d'intérêt pour la société en raison de leurs impacts sociaux, économiques et environnementaux (Ackerman, 2017 ; Alimonti et al., 2022 ; Lugo, 2018 ; Wernberg et al., 2013). L'un des principaux signes du changement climatique est l'augmentation incessante de la température moyenne mondiale. D'un point de vue climatique, une atmosphère plus chaude entraîne une augmentation de la teneur en humidité et des changements dans le cycle hydrologique, qui évolue à mesure que le changement climatique s'accroît et comprennent une intensification des précipitations (Wernberg et al., 2013). Le RE6 du GIEC a présenté les risques observés et projetés liés au climat pour la sécurité de l'eau et les impacts sectoriels qui en résultent. Les changements dans le cycle hydrologique, tels que les variations des précipitations, de l'évapotranspiration, de l'humidité du sol ont des répercussions importantes sur divers secteurs. Par exemple, dans le domaine de l'agriculture, les variations des précipitations peuvent influencer les rendements des cultures. Dans le secteur de l'énergie et de l'industrie,

les changements dans l'évapotranspiration peuvent affecter la disponibilité des ressources en eau pour la production d'énergie et les processus industriels. Les écosystèmes d'eau douce sont sensibles aux modifications du débit des cours d'eau et des inondations. Les sécheresses peuvent entraîner des conflits liés à la disponibilité des ressources en eau, tandis que les variations des eaux souterraines peuvent avoir des répercussions sur les usages locaux de l'eau. Ces impacts sectoriels varient géographiquement, temporellement et globalement, comme souligné par (Pörtner et al., 2022).

L'augmentation des précipitations moyennes mondiales est estimée à l'échelle de 1 % à 3 % par degré de température moyenne mondiale, limitée par le bilan énergétique atmosphérique (O'Gorman & Schneider, 2009). Cette augmentation est bien inférieure au taux de Clausius–Clapeyron, où la vapeur d'eau moyenne mondiale augmente à un taux de 7% pour chaque degré d'augmentation de la température de surface (par exemple O'Gorman & Muller, 2010). De plus, l'estimation d'une augmentation de la précipitation moyenne n'est pas toujours étayée par des observations (Gu & Adler, 2015). La raison peut être que le retour radiatif des nuages n'est pas correctement représenté par les modèles climatiques ou que l'augmentation attendue des précipitations moyennes mondiales en raison de l'augmentation des émissions a été masquée par le séchage par aérosol, comme suggéré par différents auteurs (Mauritsen & Stevens, 2015 ; Salzmann, 2016).

En tout état de cause, il n'est pas prévu que l'augmentation des précipitations extrêmes suivra le rythme de l'augmentation globale des précipitations moyennes. Certains auteurs ont noté dans le passé que l'intensité des précipitations extrêmes devrait augmenter proportionnellement à la teneur moyenne de la vapeur d'eau atmosphérique ou au moins à un rythme similaire à celui du réchauffement climatique (Trenberth et al., 2003). Néanmoins, l'intensité des précipitations extrêmes n'est pas limitée par le bilan énergétique mondial car cela se rapporte aux précipitations moyennes à l'échelle mondiale, donc le taux d'augmentation peut être plus important avec le réchauffement climatique (Myhre et al., 2019 ; O'Gorman et al., 2012). La relation entre la température et les précipitations extrêmes est plus complexe que celle suggérée par l'équation de Clausius–Clapeyron. En fait, plusieurs études régionales ont montré comment l'intensité des précipitations extrêmes augmente plus nettement à des températures plus élevées, en particulier pour les événements pluviométriques extrêmes de courte durée (Hardwick-Jones et al., 2010 ; Lenderink et al., 2011 ; Lenderink & Van Meijgaard, 2008). O'Gorman et Schneider (2009) indiquent un effet latitudinal où les extrêmes de précipitations extratropicales peuvent évoluer plus lentement que la teneur en

vapeur d'eau atmosphérique ; les extrêmes de précipitations tropicales peuvent ne pas être simulés de manière fiable en raison de changements très variables dans la convection. En fait, les événements de précipitations tropicales extrêmes sont principalement liés aux systèmes convectifs à long terme (Roca & Fiolleau, 2020), donc le taux d'augmentation des précipitations extrêmes pourrait être plus élevé s'il y a une augmentation des flux verticaux ascendants convectifs. O'Gorman et al. (2012) ont montré une augmentation des événements de précipitations tropicales extrêmes de près de 10% pour chaque degré de température de surface, supérieure à celle estimée pour les latitudes extratropicales.

L'intensité et la fréquence des épisodes de précipitations extrêmes ont augmenté dans la plupart des régions (Alexander et al., 2006). Sun et al. (2007) ont montré une évolution constante vers des précipitations plus intenses et extrêmes à l'échelle mondiale et dans plusieurs régions différentes. Leurs résultats indiquent une augmentation de la fréquence des précipitations extrêmes, qui est beaucoup plus importante que l'augmentation de son intensité. Par conséquent, dans un climat plus chaud, les épisodes de précipitations extrêmes devraient être plus fréquents que dans les conditions actuelles, atteignant une ampleur sans précédent tout au long du XXI^e siècle (Giorgi et al., 2019). Il existe un certain consensus sur le fait que, sous un climat plus chaud, les événements de précipitations extrêmes connaîtront une amplification similaire à celle prédite par Clausius-Clapeyron pour la pression de vapeur à saturation, bien que de légères variations se produisent dans des circonstances différentes. Il est important de garder à l'esprit que les contributions dynamiques et thermodynamiques peuvent également jouer un rôle important. Emori et Brown (2005) ont examiné le rôle joué par les changements thermodynamiques et dynamiques liés à l'augmentation des précipitations extrêmes. Leurs résultats montrent généralement que les changements thermodynamiques augmentations de la teneur en humidité atmosphérique liées au réchauffement climatique jouent un rôle majeur dans les changements observés dans les schémas de précipitation extrêmes dans de nombreuses régions du monde, alors que l'effet de la dynamique atmosphérique (circulation atmosphérique) n'a qu'un effet mineur qui se limite aux latitudes inférieures. Une étude équivalente a été réalisée plus récemment par Norris et al. (2019), montrant qu'aux latitudes moyennes, la tendance thermodynamique domine, entraînant une augmentation similaire au taux de Clausius-Clapeyron. Aux latitudes (sub) tropicales, cependant, l'effet dynamique et donc l'augmentation sont plus élevés. Globalement, Tabari et al. (2020) ont montré qu'une bonne classification de l'augmentation des événements de précipitations extrêmes peut être donnée en fonction de la disponibilité en eau. Ainsi, il a

montré que dans les zones humides, l'augmentation est similaire au taux de Clausius–Clapeyron (C-C). Pour les régions semi-humides, l'augmentation est significativement plus faible, n'atteignant pas $6\% \text{ K}^{-1}$. Dans les régions limitées en eau, l'augmentation tombe à 5,62 et $5,45\% \text{ K}^{-1}$ pour les régions semi-arides et arides, respectivement.

Au cours des dernières décennies, de nombreux progrès ont été réalisés dans la compréhension de la réponse des précipitations extrêmes au réchauffement climatique. Cependant, il est nécessaire de considérer la relation entre les effets thermodynamiques à l'échelle locale et la contribution dynamique. Sans cette compréhension plus approfondie, les processus dominants liés aux changements potentiels dans les régimes de précipitations extrêmes ne seront pas correctement compris. Dans le chapitre 11 du sixième rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Seneviratne et al., 2021), intitulé "Événements extrêmes de météorologie et de climat dans un climat changeant", il a été conclu que les extrêmes de précipitations sont influencés par des processus thermodynamiques et dynamiques. Les changements thermodynamiques liés au réchauffement climatique entraînent une augmentation des précipitations extrêmes, suivant de près la relation C-C à l'échelle mondiale (haute confiance). Cependant, les effets des changements dynamiques sur les précipitations extrêmes sont plus complexes, difficiles à quantifier et représentent une incertitude dans les projections. De plus, d'autres facteurs tels que les changements dans les aérosols, l'utilisation des terres et l'urbanisation ont également une incidence sur les extrêmes de précipitations (confiance moyenne) (Seneviratne et al., 2021).

7. Tendances des précipitations extrêmes observées à l'échelle globale

Les observations tirées du rapport spécial sur la gestion des risques de catastrophes et des phénomènes extrêmes pour l'adaptation au changement climatique (SREX) (Seneviratne et al., 2012), ainsi que des rapports AR5 (IPCC, 2014) et AR6 (Seneviratne et al., 2021), convergent vers la conclusion selon laquelle il est probable que le nombre d'événements de fortes précipitations sur terre ait augmenté dans plus de régions qu'il n'a diminué. Bien que des variations régionales et saisonnières importantes soient observées, de nombreuses tendances n'ont pas été statistiquement significatives dans certaines régions et pour certaines périodes (Wan et al, 2013). L'évaluation de ces tendances a été réalisée pour différentes périodes et régions, utilisant divers ensembles de données, ce qui rend difficiles les comparaisons et la formulation de conclusions définitives. Néanmoins, dans cette section, notre objectif est de

résumer les conclusions les plus récentes pour fournir une vue d'ensemble à l'échelle mondiale.

À l'échelle globale, les observations des précipitations journalières maximales annuelles ont montré une augmentation d'une moyenne de 5,73 mm sur 110 ans (1901–2010), ce qui correspond à une augmentation de 10% K⁻¹ du réchauffement climatique depuis 1901 (Asadieh & Krakauer, 2015). Pour une période plus courte (1979–2010), Chou et al. (2013) ont révélé que les précipitations moyennes mondiales ont tendance à augmenter pendant la saison humide et à diminuer pendant la saison sèche. Cependant, lorsque la période d'analyse a été étendue aux années précédentes (1950–2009), aucun changement n'a été constaté dans les précipitations totales de la saison des pluies, tandis que les précipitations totales de la saison sèche ont montré une augmentation (Murray-Tortarolo et al., 2017). Papalexiou et Montanari (2019) ont utilisé des données de précipitations journalières de haute résolution à l'échelle globale pour identifier et comparer les changements dans la fréquence et la magnitude des extrêmes journalières au cours de la période 1964–2013. Ils ont constaté que de grandes parties de l'Europe, Russie occidentale, une bonne partie du territoire de la Chine, de l'Australie du Nord et du centre-ouest des États-Unis d'Amérique présentaient des tendances positives en termes de fréquence, tandis que les régions présentant des tendances positives en termes d'ampleur se trouvaient en Asie (Vietnam, Cambodge et Thaïlande), en Russie centrale (Nord de la Mongolie) et en Europe occidentale (du Portugal au nord de la Norvège). L'examen des données des dix dernières années révèle une augmentation encore plus prononcée de Rx1day à l'échelle mondiale, comme indiqué par Sun et al. (2021). Pour une période plus longue (1901–2010), Donat et al. (2013) ont constaté que la plupart des indices de précipitations montraient des changements (en partie significatifs) vers des précipitations plus intenses sur la moitié orientale de l'Amérique du Nord ainsi que sur de grandes parties de l'Europe de l'Est, de l'Asie et de l'Amérique du Sud. Des zones avec des tendances montrant des précipitations moins fréquentes et moins intenses ont été observées autour de la Méditerranée, en Asie du Sud-Est et dans la partie nord-ouest de l'Amérique du Nord (Donat et al. 2013). Ces variations des précipitations extrêmes ont été retrouvées pour le nombre de jours de fortes précipitations (R10mm) et pour le nombre de jours très humides (R95PTOT). Des études similaires ont également porté sur l'intensité, la fréquence et la durée moyennes des précipitations extrêmes. Dans une autre étude, Donat et al. (2016) ont examiné les changements à long terme et la variabilité interannuelle des précipitations extrêmes en utilisant des données globales pour l'ensemble du 20^{ème} siècle, en se basant sur les indices

ETCCDI (par exemple, R10mm). Leur analyse a mis en évidence une tendance globale vers des précipitations plus intenses pendant la majeure partie de la période étudiée, avec un accord notable entre les ensembles de données après 1950. L'analyse des maxima journaliers annuels des précipitations des jours très humides (l'indice de précipitations des jours extrêmement pluvieux (R95p) montre des changements positifs en Amérique du Sud, en Asie et en Afrique (Donat et al., 2016). L'évaluation de Carvalho (2019), qui a utilisé des enregistrements instrumentaux et un examen des résultats précédents, a révélé des preuves de tendances à la hausse des précipitations extrêmes (quantité, intensité et fréquence) dans de nombreuses régions du monde, mais celles-ci étaient particulièrement évidentes aux latitudes moyennes de l'Amérique du Nord et dans les régions subtropicales de l'Amérique du Sud. Plusieurs autres études menées dans différentes régions du monde ont également confirmé une augmentation de la fréquence et de l'intensité des précipitations extrêmes (Solomon et al., 2007; Min et al., 2011; Ghosh et al., 2012; Kharin et al., 2013; Hegerl et al., 2015; Easterling et al., 2017; Lochbihler et al., 2017; Ali et Mishra, 2018; Donat et al., 2019). Plus récemment, Dunn et ses collègues (2020, 2022, 2024) ont mené des études sur les tendances des précipitations extrêmes à l'échelle mondiale en utilisant les données des Indices d'extrêmes de surface terrestre en grille (HadEX3) (<https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadex3/>). Cette base de données offre plus de 80 indices de température et de précipitations, couvrant la période de 1901 à 2018 et dérivés d'observations journalières in situ provenant de 17 000 stations à travers le monde. Ici, nous nous concentrons sur les résultats de tendance des indices R95PTOT, R99PTOT, CWD et PRCTOT pour la période 1970–2018 (figure 2). Au seuil de signification de 10% ($p < 0,10$), ils ont trouvé que l'indice PRCTOT présente une augmentation observée ((figure 1). en Amérique du Nord, en Amérique centrale, en Amazonie centrale et dans la région de La Plata en Amérique du Sud, en Afrique de l'Ouest, en Europe du Nord, dans certaines parties du Moyen-Orient et en Asie du Sud-Est, ainsi que dans le nord-est de la Russie et dans la moitié occidentale de l'Australie. Les tendances négatives sont moins prononcées, mais concernent généralement une partie du Groenland, du nord-est du Brésil, du Pérou, du sud de l'Amérique du Sud, de la partie sud-ouest de l'Afrique de l'Ouest, de la moitié orientale de la péninsule ibérique, de la partie nord de la péninsule indienne, d'une partie de l'Asie du Sud-Est, ainsi que certaines régions de l'Océanie et de la Papouasie-Nouvelle-Guinée. Le schéma des tendances pour les journées pluvieuses consécutives (CWD) est très similaire à celui décrit pour l'indice PRCTOT, bien que dans ce cas, les tendances négatives semblent être plus répandues. Les tendances des valeurs extrêmes selon R95PTOT et R99PTOT montrent des augmentations claires sur de grandes parties de l'Amérique du

Nord et du Sud, de l'Afrique de l'Ouest, de l'Europe et de l'Asie du Sud-Est. En revanche, les régions présentant des anomalies négatives couvrent de plus petites régions du nord-est du Brésil et certaines parties du Canada, de la Russie, de l'Asie et du centre de l'Australie.

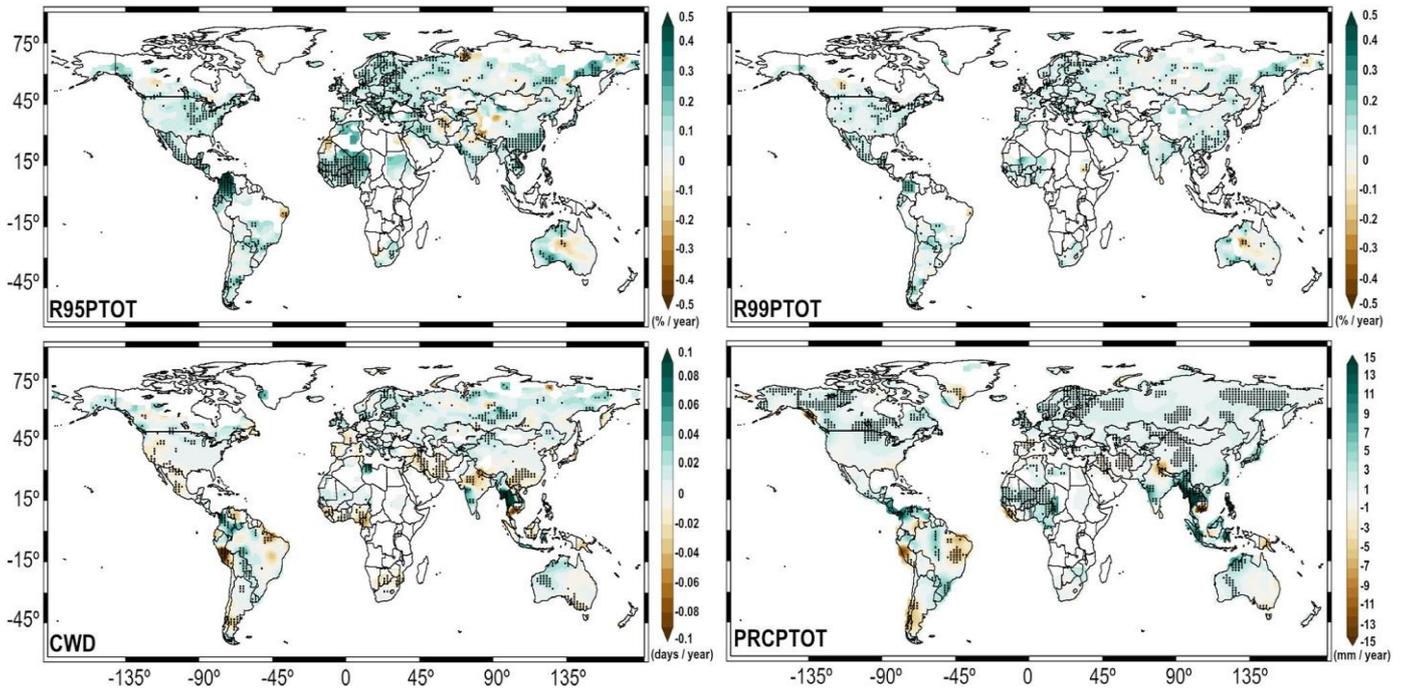


Figure I.2. Tendances linéaires des précipitations journalières dépassant les percentiles 95% (R95PTOT) et 99 % (R99PTOT) (en haut), et des jours humides consécutifs (CWD) et des précipitations totales (PRCTOT) (en bas) pour la période 1970–2018. Les points noirs représentent des tendances statistiquement significatives. Données de HadEX3 (Dunn et al., 2020)

Dans le dernier rapport du GIEC (2021) (Chapitre 11), il a été signalé que la moyenne annuelle des précipitations maximales journalières (Rx1day) a augmenté de manière significative depuis le milieu du XXe siècle, aussi bien dans les régions humides que dans les régions sèches (Du et al., 2019 ; Dunn et al., 2020). Cette augmentation est observée dans un pourcentage plus élevé de stations d'observation que ce qui serait attendu par hasard, à l'échelle mondiale et régionale, y compris en Amérique du Nord, en Europe et en Asie (Sun et al., 2021) (Figure I.3), ainsi que dans les régions de mousson (Zhang et Zhou, 2019), où la couverture des données est relativement bonne.

En Afrique, un pourcentage plus élevé de stations montre des augmentations significatives des précipitations extrêmes journalières par rapport aux diminutions au cours de la seconde moitié du 20e siècle, principalement là où les données sont disponibles (Seneviratne et al., 2021 ; Sun et al., 2021) (figure 2). Cette tendance est observée dans diverses régions du continent,

notamment en Afrique australe et de l'Est. Cependant, cette augmentation n'est bien documentée que dans certaines zones, couvrant seulement 15% de l'Afrique subsaharienne (Donat et al., 2014a; Mathbout et al., 2018b; Alexander et al., 2019; Funk et al., 2020). Globalement, il existe une confiance modérée quant à l'augmentation des précipitations extrêmes dans certaines régions, mais une confiance faible pour l'ensemble du continent, en raison du manque d'analyse systématique à l'échelle continentale et de la nature sporadique des données disponibles.

En Europe, les précipitations extrêmes ont nettement augmenté depuis les années 1950, avec des indices significatifs tels que Rx1day et Rx5day en augmentation (Seneviratne et al., 2021 ; Sun et al., 2021). Cette tendance est observée sur tout le continent, avec plus de stations signalant des augmentations que des diminutions dans la fréquence des précipitations dépassant les 90e ou 95e percentiles (figure 2) (Cioffi et al., 2015). Les épisodes de précipitations extrêmes sur des périodes de cinq, dix et vingt ans sont devenus plus fréquents depuis les années 1950 (van den Besselaar et al., 2013). Cependant, les tendances varient selon les régions et les saisons : une augmentation est notée en Europe centrale et en Roumanie, tandis que dans la région méditerranéenne, les tendances sont divergentes, avec des diminutions à l'ouest et des augmentations à l'est (de Lima et al., 2015; Gajić-Čapka et al., 2015; Pedron et al., 2017; Serrano-Notivolli et al., 2018; Ribes et al., 2019).

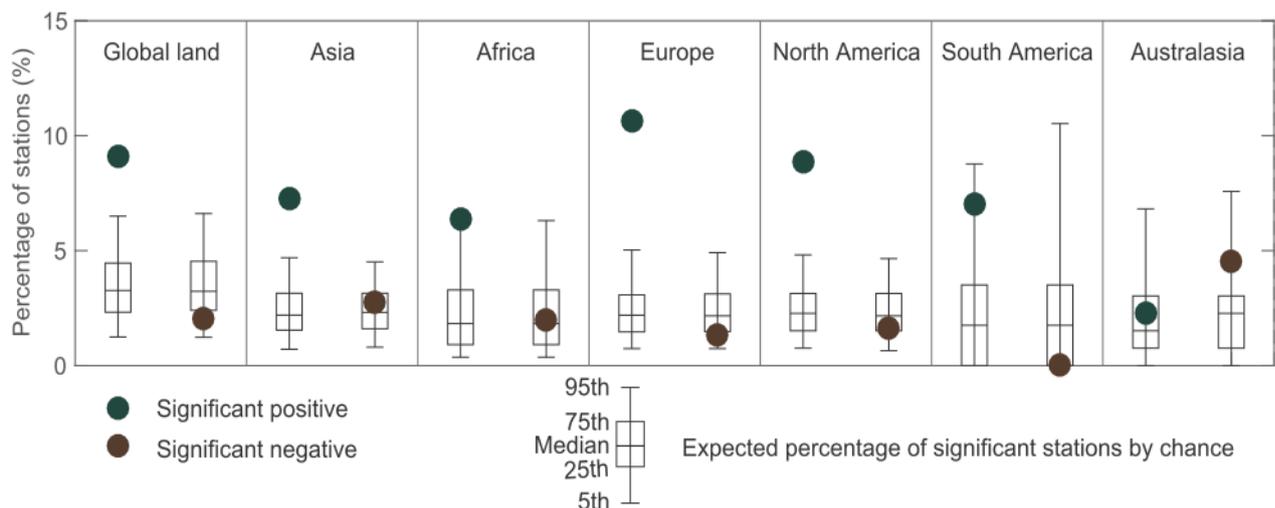


Figure I.3. Signes et significativité des tendances observées dans précipitations maximales journalières annuelles (Rx1day) de 1950 à 2018 sur 8345 stations. (a) Pourcentage de stations présentant des tendances statistiquement significatives de l'indice Rx1day ; les points verts indiquent des tendances positives et les points bruns des tendances négatives. Les diagrammes en boîte et en moustaches indiquent le pourcentage attendu de stations avec des tendances significatives en raison du hasard, estimé à partir de 1000 réalisations bootstrap sous une hypothèse nulle de non-tendance (Seneviratne et al., 2021).

En Asie, des données d'observations témoignent d'une augmentation significative des précipitations extrêmes depuis les années 1950, avec une confiance élevée dans cette tendance (Seneviratne et al., 2021). Cette augmentation est observée dans une majorité de stations, dépassant les attentes aléatoires (figure 2) (Sun et al., 2021). Les régions d'Asie centrale (Hu et al., 2016), du sud, du sud-est (Pai et al., 2015; Priya et al., 2017; Hunt et al., 2018; Kim et al., 2019), ainsi que les zones montagneuses comme l'Himalaya et la Sibérie (Ridley et al., 2013; Dimri et al., 2015; Madhura et al., 2015), ont toutes enregistré des augmentations notables. Cependant, certaines régions, comme l'est de l'Himalaya, ont vu une diminution des précipitations extrêmes. Les tendances en Chine sont hétérogènes, avec des régions où l'on observe à la fois des augmentations et des diminutions des précipitations extrêmes (Hu et al., 2016; Ge et al., 2017; Tao et al., 2018; Chen et al., 2021), tandis que la péninsule arabique et Jakarta ont également enregistré des augmentations (Siswanto et al., 2015). En revanche, certaines parties du continent maritime ont vu une diminution des précipitations extrêmes. En Inde, une augmentation significative des fortes pluies et une diminution des pluies modérées ont été observées pendant la saison des moussons (Roxy et al., 2017).

En Australasie, les études récentes ne montrent ni augmentation ni diminution globale des précipitations intenses, avec une confiance moyenne (figure 2) (Seneviratne et al., 2021). Cependant, une tendance à l'augmentation des précipitations intenses est observée dans le nord de l'Australie (en particulier dans le nord-ouest) et a diminué dans les régions orientales et méridionales (par exemple, Jakob et Walland, 2016 ; Guerreiro et al., 2018b ; Dey et al., 2019b ; Dunn et al., 2020 ; Sun et al., 2021), tandis qu'une diminution est constatée dans les régions orientales et méridionales (Jakob et Walland, 2016). Les analyses à long terme depuis le milieu du 20e siècle ont révélé des résultats mitigés, avec à peu près autant de stations montrant une augmentation que de stations montrant une diminution des précipitations intenses. En Nouvelle-Zélande, des diminutions sont observées pour les événements de précipitations modérées à intenses, mais il n'y a pas de tendances significatives pour les événements très intenses (Harrington et Renwick, 2014 ; Caloiero, 2015).

Dans les régions d'Amérique centrale et du Sud, les précipitations extrêmes semblent augmenter, bien que la fiabilité de ces tendances soit généralement faible (Seneviratne et al., 2021). Entre 1950 et 2018, on constate une augmentation de l'indice Rx1day dans un plus grand nombre de stations par rapport à une diminution en Amérique du Sud (figure 2) (Sun et al., 2021). Sur la période 1950-2010, les indices Rx5day et R99p ont augmenté dans de vastes régions de l'Amérique du Sud, notamment dans le nord-ouest, le nord et le sud-est (Skansi et

al., 2013). Cependant, il existe des différences importantes d'une région à l'autre, avec notamment une diminution des précipitations extrêmes quotidiennes observées dans le Nord-Est du Brésil (Dereczynski et al., 2020). Les recherches indiquent également des augmentations significatives des fortes pluies en Amazonie et dans le sud-est de l'Amérique du Sud, avec une confiance moyenne à élever (Valverde et Marengo, 2014; Wu et Polvani, 2017; Lovino et al., 2018; Dereczynski et al., 2020). Par contre, les tendances des précipitations annuelles dans d'autres parties de la région, telles que l'Amérique centrale, ne sont généralement pas significatives, bien que des augmentations significatives aient été observées au Guatemala, au Salvador et au Panama (Hidalgo et al., 2017).

En Amérique du Nord, il existe des preuves irréfutables indiquant que l'ampleur et l'intensité des précipitations extrêmes ont très probablement augmenté depuis les années 1950 (Seneviratne et al., 2021). Tant Rx1day que Rx5day ont augmenté de manière significative en Amérique du Nord entre 1950 et 2018 (Sun et al., 2021). Cependant, il existe une diversité régionale. Au Canada, on observe un manque de tendances détectables dans les précipitations quotidiennes maximales annuelles observées (ou de durée plus courte) (Shephard et al., 2014 ; Mekis et al., 2015 ; Vincent et al., 2018). Aux États-Unis, on observe une augmentation globale des précipitations intenses sur un jour, tant en termes d'intensité que de fréquence (Villarini et al., 2012 ; Donat et al., 2013b ; Wu, 2015 ; Easterling et al., 2017 ; H. Huang et al., 2017 ; Howarth et al., 2019 ; Sun et al., 2021), à l'exception du sud des États-Unis (Hoerling et al., 2016) où la variabilité interne peut avoir joué un rôle substantiel dans l'absence d'augmentations observées. Au Mexique, des augmentations sont observées dans R10mm et R95p (Donat et al., 2016a), les journées très humides dans les villes (García-Cueto et al., 2019) et dans les précipitations totales (PRCPTOT) et Rx1day (Donat et al., 2016b).

8. Projection des précipitations extrêmes à l'échelle globale

Le cinquième rapport du GIEC (2013) (AR5) affirme de manière très convaincante que les épisodes de fortes précipitations deviendront plus fréquents et plus intenses dans la plupart des régions de latitude moyenne et des tropiques humides à mesure que le climat se réchauffe (Collins et al., 2013). Les études réalisées après le AR5 fournissent des preuves plus nombreuses et plus solides pour étayer ces conclusions. Les études réalisées après le AR5 fournissent des preuves plus nombreuses et plus solides pour étayer ces conclusions. Par exemple, l'étude de Pendergrass et al. (2017) démontre que la variabilité des précipitations extrêmes augmente dans la plupart des modèles climatiques, couvrant une grande partie des

zones terrestres mondiales en réponse au réchauffement, avec 66 % des terres montrant une nette augmentation de la variabilité des précipitations moyennes saisonnières. De plus, les simulations des modèles climatiques globaux et régionaux basés sur des scénarios futurs d'augmentation des concentrations de CO₂ s'accordent sur l'augmentation de l'intensité des précipitations et des extrêmes pour un réchauffement continu à l'avenir (Ali et Mishra, 2018 ; Hegerl et al., 2004 ; Kharin et al., 2007, 2013 ; Min et al., 2011 ; Wang et al., 2017 ; Wentz et al., 2007 ; Zobel et al., 2018), ce qui pourrait presque doubler pour chaque degré de réchauffement planétaire supplémentaire (Myhre et al., 2019). Les modèles climatiques régionaux pour la période 2071-2100, basés sur le scénario d'émissions futures RCP8.5, indiquent des changements potentiels significatifs dans la répartition temporelle des précipitations extrêmes dans la plupart des régions, avec un décalage vers des saisons ultérieures telles que l'automne et l'hiver (Marelle et al., 2018). Cependant, cette transition n'est pas uniforme à l'échelle régionale, avec les augmentations les plus marquées observées en Europe du Nord et dans le nord-est de l'Amérique du Nord (+12 et + 17 jours respectivement), bien que des variations locales de plus d'un mois soient également probables. Malgré un consensus général, des divergences persistent concernant l'étendue spatiale et l'intensité des variations des précipitations journalières extrêmes, ces variations dépendant des modèles climatiques, des scénarios futurs et des méthodologies statistiques employées. L'incertitude est notablement plus élevée dans les régions arides par rapport aux régions humides (Kim et al., 2020). D'après Donat et al. (2016), même si les prévisions concernant les précipitations totales restent incertaines, les modèles climatiques prévoient une augmentation très marquée des précipitations extrêmes journalières moyennes dans les régions sèches et humides pour le reste du XXI^e siècle. Sous le scénario RCP8.5, les projections indiquent une hausse des précipitations extrêmes Rx1day sur la plupart des continents au cours des 30 prochaines années, mais une diminution dans les régions subtropicales, en particulier dans les bassins océaniques orientaux et leurs zones terrestres avoisinantes, représentant seulement 1,5 % de la superficie totale (Pendergrass et al., 2017). Cette tendance pourrait augmenter le risque d'inondations de manière générale (Fischer & Knutti, 2015 ; Fowler et al., 2021 ; GIEC, 2013 ; Kirchmeier-Young & Zhang, 2020 ; Mukherjee et al., 2018 ; Pall et al., 2011 ; Tabari et al., 2020). Une analyse des données du CMIP5 pour la période 2006-2100, selon les scénarios RCP8.5 et menée par Pfahl et al. (2017), montre une augmentation globale des précipitations extrêmes due à la thermodynamique. Cette hausse est plus prononcée dans la région de la mousson asiatique, mais moins marquée en Méditerranée, en Afrique du Sud et en Australie. En revanche, une diminution des précipitations extrêmes est prévue dans les

océans subtropicaux, probablement en raison du déplacement de la circulation vers les pôles (Hu et al., 2013 ; Nazarenko et al., 2015). Les études régionales futures sont cruciales pour mieux comprendre ces variations et pour permettre la mise en place de mesures d'adaptation locales et régionales. Des informations détaillées sur les changements observés dans différentes régions telles que l'Afrique, les Amériques, l'Europe, l'Asie et l'Australie sont également importantes (Gu et al, 2023 ; Zhao et al, 2024).

Il est donc, très intéressant de comprendre les caractéristiques et les impacts changeants des événements de précipitations extrêmes dans le cadre des tentatives de conception de politiques d'adaptation et d'atténuation qui pourraient permettre d'améliorer la capacité de la société à s'adapter aux changements potentiels causés par le réchauffement climatique (GIEC, 2013 et 2021). Cependant, il est difficile aujourd'hui de modéliser les précipitations et de détecter les événements extrêmes dans les scénarios futurs ; les modèles simulent encore des amplitudes variables de la réponse des précipitations au forçage anthropique. Cela est principalement dû à l'utilisation de différents schémas de paramétrage des processus à l'échelle de la sous-grille (Madakumbura et al., 2021). Des incertitudes surgissent également concernant le comportement futur des principaux mécanismes de transport de l'humidité atmosphérique et leur rôle dans la survenue d'événements de précipitations extrêmes sous le réchauffement climatique (Gimeno et al., 2016). Les résultats du CMIP5 ont été confirmés par les simulations du CMIP6 (Li et al., 2021). En particulier, pour les précipitations extrêmes se produisant une fois par an ou moins fréquemment, les taux de changement par degré Celsius de réchauffement global sont similaires, quelle que soit la cause du réchauffement. Dans certains modèles, la réponse des précipitations extrêmes au réchauffement peut suivre une relation quadratique (Pendergrass et al, 2019). Le sixième rapport du GIEC conclut que les précipitations intenses devraient généralement devenir plus fréquentes et plus intenses avec le réchauffement climatique mondial supplémentaire. À des niveaux de réchauffement climatique de 4°C par rapport à l'ère préindustrielle, les événements de fortes précipitations très rares (par exemple, une fois tous les 10 ans ou plus) deviendront plus fréquents et plus intenses dans le monde entier (pratiquement certain), et ce, sur tous les continents et les régions AR6 : l'augmentation de la fréquence et de l'intensité est extrêmement probable pour la plupart des continents et très probable pour la plupart des régions AR6. Cette intensification des précipitations suivra de près l'augmentation de l'humidité atmosphérique due au réchauffement. Plus le réchauffement sera important, plus les pluies intenses seront fréquentes, et leur intensité augmentera. Les augmentations de l'intensité des événements de

précipitations extrêmes à l'échelle régionale dépendront du niveau de réchauffement régional ainsi que des changements de la circulation atmosphérique et de la dynamique des tempêtes, entraînant des variations dans le taux de changement des fortes précipitations à travers les régions (haute confiance).

9. Précipitations extrêmes observées et projetées dans le bassin méditerranéen

La région méditerranéenne est largement reconnue comme l'un des principaux points sensibles au changement climatique, avec des impacts prévus significatifs. Le Rapport spécial sur le changement climatique et la terre (SRCCL) du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Shukla et al., 2019) a spécifiquement identifié la Méditerranée comme l'une des zones les plus vulnérables du globe aux conséquences du réchauffement climatique. Sur la base de l'indice régional de changement climatique (RCCI) calculé à partir des projections de températures et de précipitations, la région méditerranéenne est identifiée comme l'un des "points chauds" les plus significatifs de la planète (Giorgi, 2006). Plusieurs facteurs expliquent cette forte sensibilité du cycle de l'eau en Méditerranée au changement climatique. Tout d'abord, sa position géographique la place à la frontière entre deux régions climatiques distinctes : le climat tempéré et humide de l'Europe centrale et le climat aride de l'Afrique du Nord (Lionello et al., 2012). Cette transition crée des conditions météorologiques souvent instables et sujettes à des variations extrêmes (Lionello et al., 2012). Un autre facteur est sa topographie, caractérisée par des montagnes et des vallées profondes, qui contribuent à une grande diversité de microclimats. Les effets de relief peuvent entraîner des phénomènes météorologiques locaux, tels que des précipitations orographiques, qui influent sur la distribution des précipitations dans la région (Sánchez-Arcilla et al., 2011). La présence de la mer Méditerranée elle-même est un facteur déterminant (Coll et al., 2010). Cette mer semi-fermée agit comme un réservoir de chaleur, modérant les températures dans les zones côtières, mais pouvant également amplifier les épisodes de chaleur extrême et les tempêtes lorsqu'elle est combinée à des conditions météorologiques particulières (Lionello, 2012). Ces facteurs climatiques, géographiques et anthropiques contribuent également à la forte variabilité spatiale et temporelle des conditions climatiques, océaniques et hydrologiques rencontrées en Méditerranée.

Les études récentes montrent une augmentation de l'intensité et de l'occurrence des précipitations extrêmes en raison du changement climatique en Méditerranée (Westra et al.,

2013 ; Polade et al., 2017 ; Ribes et al., 2019 ; Trambly et Somot, 2018). Ces tendances ne sont en général pas cohérentes dans l'espace (Reale et Lionello, 2013, Hamitouche et al., 2024), avec des diminutions en Méditerranée occidentale et quelques augmentations en Méditerranée orientale (Rajczak et al., 2013 ; Casanueva et al., 2014 ; de Lima et al., 2015 ; Gajić-Čapka et al., 2015 ; Sunyer et al., 2015 ; Serrano-Notivoli et al., 2018 ; Ribes et al., 2019). Dans le sixième rapport du GIEC, il a été souligné qu'il existe un manque de consensus concernant les tendances observées en matière de précipitations extrêmes dans la région méditerranéenne (Casanueva et al., 2014; Donat et al., 2014a; de Lima et al., 2015; Gajić-Čapka et al., 2015; Rajczak et Schär, 2017; Jacob et al., 2018; Mathbout et al., 2018b; Ribes et al., 2019; Dunn et al., 2020; Peña-Angulo et al., 2020a; Coppola et al., 2021a; Sun et al., 2021), avec des preuves limitées de ces tendances (Añel et al., 2014). De plus, une faible confiance a été notée concernant l'augmentation de la fréquence et de la sévérité des sécheresses basées sur l'indice SPI, comme le montrent plusieurs études (Spinoni et al., 2015; Gudmundsson and Seneviratne, 2016; MedECC, 2020; Peña-Angulo et al., 2020a; Driouech et al., 2021; Vicente-Serrano et al., 2021).

Les modifications des précipitations extrêmes seraient provoquées par une augmentation de la teneur en eau précipitable dans l'atmosphère, liée à l'augmentation des températures, selon le principe de la thermodynamique de Clausius-Clapeyron (Drobinski et al., 2016 ; Pfahl et al., 2017). Ces changements dans les précipitations extrêmes en Méditerranée résulteraient d'un assèchement global lié à un déplacement de la circulation vers les pôles (Pfahl et al. 2017) et un effet thermodynamique conduisant à une augmentation de la teneur en eau précipitable dans l'atmosphère (Drobinski et al. 2016; Pfahl et al. 2017). L'un des principaux facteurs de précipitations extrêmes dans la région méditerranéenne est l'instabilité aux basses couches, le réchauffement différentiel entre la surface de la mer et la basse troposphère qui affecte l'instabilité potentielle (Jansà et al. 2014). La cyclogenèse méditerranéenne est un autre facteur principal responsable des fortes précipitations dans la région (Jansà et al. 2014).

Plusieurs études ont observé une augmentation du nombre de jours secs associée à une augmentation de l'intensité des précipitations suggérant que les périodes sèches dans ces régions sont plus longues, mais que les précipitations peuvent être plus extrêmes lorsqu'elles se produisent (Sillmann et al. 2013 ; Paxian et al. 2015; Polade et al., 2017; Vogel et al, 2021). L'augmentation des précipitations extrêmes ne compensera pas la diminution des précipitations totales, puisque les pertes dues à la diminution de la fréquence des précipitations de faible à moyenne intensité devraient dominer les gains liés aux précipitations

plus extrêmes (Polade et al. 2017). Au fil des années, les précipitations dans le bassin méditerranéen ont montré une tendance à la baisse dans ces diverses régions. En Algérie, Zeroual et al (2013) ont observé une diminution moyenne de 18 mm par décennie entre 1973 et 2017. Une tendance similaire a été constatée en Italie par Treppiedi et al. (2021) sur la période 2002-2019. Vicente-Serrano et al. (2019) ont quantifié une baisse significative atteignant 300 mm en Espagne et en France entre 1961 et 2012. En élargissant la perspective à l'Europe, à l'Asie et à l'Afrique, Caloiero et al. (2018) ont rapporté une diminution moyenne de -20 mm par décennie de 1901 à 2009. Cette tendance s'est également manifestée en Turquie, où Hadi et Tombul (2018) ont enregistré des baisses des précipitations annuelles sur la période 1901-2014. Dans le même ordre d'idées, Varouchakis et al. (2018) ont observé une diminution moyenne de 1.84 mm/an en Grèce entre 1981 et 2014. Enfin, des schémas similaires ont été relevés dans diverses régions, notamment dans le nord-est de l'Espagne, le sud de la France, l'Italie, la péninsule des Balkans, l'Afrique du Nord et le sud-ouest de l'Asie, sur la période de 1975 à 2015 (Deitch et al., 2017). Dans les mêmes études citées précédemment, des tendances à la hausse des précipitations extrêmes ont également été observées. Par exemple, en Italie, Treppiedi et al. (2021) ont constaté une augmentation allant jusqu'à +0,4 mm/heure/an des précipitations de 10 minutes. Blanchet et al. (2018) ont rapporté une augmentation des maxima annuels pouvant atteindre +60 mm/jour en France entre 1958 et 2014. De même, Vallebona et al. (2015) ont observé une tendance à la hausse des précipitations horaires dépassant le 95e percentile en Italie entre 1989 et 2010.

Des recherches antérieures ont identifié les caractéristiques spatio-temporelles des extrêmes de précipitations sur la Méditerranée, la plupart des événements se produisant pendant les six mois d'hiver (par exemple, Houssos et Bartzokas, 2006 ; Lolis et Türkeş, 2016 ; Merino et al. , 2016; Khodayar et al., 2018 ; Pavan et al., 2019 ; Grazzini et al., 2020). Ces résultats sont en accord avec les précipitations mensuelles accumulées sur la région, puisque ces mois enregistrent les quantités de précipitations les plus élevées (Mariotti et al., 2002). En ce qui concerne les événements de précipitations extrêmes, il existe une nette différenciation saisonnière entre les parties ouest et est du bassin méditerranéen ; la plupart des événements se produisant respectivement en automne et en hiver ; des résultats cohérents avec les ensembles de données d'observation et de réanalyse (Raveh-Rubin et Wernli, 2015 ; Cavicchia et al, 2018).

Selon les projections futures, le point chaud climatique méditerranéen continuera de se réchauffer (Zittis et al., 2019; Cherif et al., 2020). Le réchauffement anticipé diffère selon les

saisons et dépend des trajectoires d'émissions de gaz à effet de serre. Le réchauffement sera probablement accompagné de changements dans le cycle hydrologique, principalement des diminutions des précipitations et une manifestation accrue des sécheresses (Spinoni et al., 2020; Zittis et al., 2019). Le niveau de réchauffement futur est caractérisé par une robustesse élevée et une importance tant dans les projections des modèles globaux que régionaux (Lelieveld et al., 2016; Zittis et al., 2019). En revanche, l'accord intermodèle et la robustesse des projections de précipitations sont bien plus faibles. Pour la Méditerranée, la dispersion des modèles climatiques est comparable ou parfois plus grande que le signal du changement climatique (Lelieveld et al., 2016; Zittis et al., 2019). Les modèles individuels peuvent même être en désaccord sur le signe des changements projetés pour des emplacements particuliers ou des aspects des précipitations, tels que la saisonnalité (Giorgi et al., 2016; Rajczak and Schär, 2017).

Dans le sixième rapport du GIEC (Seneviratne et al., 2021), il a été souligné que, à des niveaux de réchauffement climatique de 1.5°C, les projections des modèles CMIP6, CMIP5 et des RCM montrent des changements divergents dans la région (Zollo et al., 2016; Samuels et al., 2018; Cardell et al., 2020; Li et al., 2021). À cet égard, on observe une intensification attendue des précipitations extrêmes dans le futur. Cette prévision est coordonnée d'une confiance faible lorsqu'elle est comparée à la période récente (1995-2014) et d'une confiance moyenne lorsqu'elle est mise en perspective avec l'ère préindustrielle (Seneviratne et al., 2021, Li et al., 2021). De même, il existe une confiance moyenne quant à l'augmentation de la sécheresse météorologique. Les modèles CMIP5 et CMIP6 montrent une diminution des précipitations totales en hiver et en été, ainsi qu'une augmentation du nombre de jours de sécheresse consécutifs (CDD) (le changement de précipitation en pourcentage par degré de réchauffement local est plus important avec une confiance élevée en juin-juillet-août (JJA) qu'en décembre-janvier-février (DJF) (Cardell et al., 2020; Li et al., 2021). De plus, une légère augmentation de la sécheresse météorologique basée sur l'indice SPI est observée (Touma et al., 2015; L. Xu et al., 2019, Achour et al, 2020).

Au niveau de réchauffement climatique de 2°C, les modèles CMIP6 anticipent une augmentation conséquente de l'intensité et de la fréquence des précipitations extrêmes dans le bassin méditerranéen (Li et al., 2021). Une augmentation médiane de plus de 2 % est prévue pour les événements Rx1day et Rx5day sur 50 ans pour un niveau de réchauffement de 1 °C (Li et al., 2021), ainsi que de plus de 1 % pour les événements Rx1day et Rx5day annuels, et de moins de -2 % pour les événements Rx30day annuels par rapport à l'ère préindustrielle.

Des preuves supplémentaires provenant des simulations CMIP5 et RCM confirment une augmentation de l'intensité des précipitations extrêmes (Zollo et al., 2016; Samuels et al., 2018; Cardell et al., 2020). Dans ce contexte, on anticipe une intensification des précipitations extrêmes à venir. Cette anticipation est caractérisée par une confiance modérée lorsqu'elle est évaluée par rapport à la période récente (1995-2014) et par une confiance élevée lorsqu'elle est considérée par rapport à l'ère préindustrielle (Seneviratne et al., 2021, Li et al., 2021). De plus, il existe une confiance moyenne quant à l'augmentation de la sécheresse météorologique. Les modèles CMIP5 et CMIP6 montrent une diminution des précipitations totales en hiver et en été, ainsi qu'une augmentation du nombre de jours de sécheresse consécutifs (CDD) (Cardell et al., 2020; Li et al., 2021). De plus, une légère augmentation de la sécheresse météorologique basée sur l'indice SPI est observée (Touma et al., 2015 ; L. Xu et al., 2019). Au niveau de réchauffement climatique de 4°C, les modèles CMIP6 projettent une augmentation robuste de l'intensité et de la fréquence des précipitations intenses (Li et al., 2021). Une augmentation médiane de plus de 8 % est prévue pour les événements Rx1day et Rx5day sur 50 ans par rapport au niveau de réchauffement de 1 °C (Li et al., 2021), ainsi que de plus de 2 % pour les événements Rx1day et Rx5day annuels, et de moins de -2 % pour les événements Rx30day annuels par rapport à l'ère préindustrielle (Seneviratne et al., 2021). Des simulations supplémentaires provenant des modèles CMIP5 et des RCM confirment une augmentation de l'intensité des précipitations extrêmes (Rajczak et al., 2013; Monjo et al., 2016; Zollo et al., 2016; Samuels et al., 2018; Trambly and Somot, 2018; Cardell et al., 2020; Driouech et al., 20). Dans ce contexte, on prévoit une augmentation des précipitations extrêmes à venir. Cette anticipation est fortement soutenue lorsqu'elle est comparée à la période récente (1995-2014) et également lorsqu'elle est évaluée par rapport à l'ère préindustrielle (Seneviratne et al., 2021, Li et al., 2021). De plus, on observe une augmentation de la sécheresse météorologique avec une forte confiance. Les modèles CMIP5 et CMIP6 (ainsi que CORDEX) montrent une diminution des précipitations totales en hiver et en été et une augmentation du nombre de jours de sécheresse consécutifs (CDD) avec une forte confiance. L'intensité et la fréquence de la sécheresse augmentent avec une forte confiance, notamment dans le sud de la Méditerranée (Samuels et al., 2018; Cardell et al., 2020; Cook et al., 2020; Driouech et al., 2020; Spinoni et al., 2020; Coppola et al., 2021a; Li et al., 2021).

10. Précipitations extrêmes observées et projetées pour l'Algérie

L'Algérie, tout comme tous les pays du Maghreb et du bassin méditerranéen, est vulnérable au changement climatique (Schilling et al., 2020) ainsi qu'aux événements extrêmes tels que les inondations et les sécheresses (Bekoussa et al. 2008 ; Meddi et Hubert 2003 ; Meddi et al. 2009), qui constituent un frein majeur au développement économique et social. L'Algérie figure parmi les pays à haut risque de changement climatique. Elle est classée 59ème, avec un indice de risque mondial (WRI) de 7,76 % (Université des Nations Unies 2017). Depuis 1970, l'Algérie a connu une forte baisse des précipitations totales, entraînant des sécheresses récurrentes, ainsi qu'une augmentation des dommages causés par les inondations (Meddi et al. 2014; Achour et al., 2020). L'une des conséquences les plus évidentes du changement climatique en Algérie est l'augmentation des températures (Zeroual et al, 2017 ; Taibi et al, 2021). Plusieurs études prévoient une augmentation des températures de 2°C à moyen terme, ainsi qu'une diminution des précipitations de 10 à 15% et une fréquence accrue ainsi qu'une intensification des sécheresses (Meddi et Hubert, 2003 ; Meddi et al. 2014 ; Zeroual et al, 2020; Achite et al. 2021 ; Bouabdelli et al. 2022). Ce réchauffement se manifeste par l'augmentation de la fréquence et de la sévérité des vagues de chaleur, tant en Algérie que dans les pays bordant le bassin méditerranéen (Perkins-Kirkpatrick et Lewis, 2020). Les implications de ces événements sont dramatiques. La direction générale de forêt a signalé que les feux de forêt ont causé la destruction de plus de 41.000 hectares d'espaces forestiers particulièrement dans les wilayas de Boumerdes, de Bejaïa, de Tizi Ouzou et de Skikda durant l'été de l'année 2023.

Concernant le cycle hydrologique, l'augmentation des températures aggrave les problèmes de pénurie d'eau dans le pays. Medjerab et Henia 2005, ont indiqué que le Nord-ouest Algérien a souffert de sécheresses graves et plus fréquentes, caractérisées par des déficits pluviométriques. L'augmentation des températures, associée à des taux d'évaporation plus élevés et à une réduction des précipitations totales annuelles (Philandras et al., 2011 ; Mariotti et al., 2015), affecte le bilan hydrique de surface, entraînant ainsi une diminution du ruissellement de surface et des niveaux d'eau souterraine (Meddi and Eslamian, 2021). Bouabdelli et al. (2021) ont observé une augmentation tant dans la durée que dans la fréquence de la sécheresse hydrologique dans l'ouest de l'Algérie. La réduction résultante de l'approvisionnement en eau pourrait entraîner une diminution de la disponibilité de l'eau pour l'agriculture, l'industrie et les ménages. Il est aussi notable que tout au long du siècle dernier, l'Algérie a été confrontée à plusieurs périodes de sécheresse, comprenant des événements

marquants en 1910, 1940, ainsi qu'en 1975 et 1981 (Meddi et Hubert, 2003 ; Taibi et al., 2015 ; Achour et al., 2020), et plus persistantes au cours du XXI^e siècle (Bouabdelli et al., 2022). Cette sécheresse récurrente a entraîné une pénurie d'eau critique, principalement due à la baisse des niveaux d'eau dans les 80 barrages opérationnels en Algérie (Bouhekima, 2003). Entre 2001 et 2002, de nombreux barrages ont enregistré leurs taux de remplissage les plus bas, en particulier ceux de la région du centre (avec 37% et 29%) et de l'Est (44% et 36%) (Touati, 2010 ; Meddi et Eslamian, 2021). Cette tendance a également été observée en 2005 lorsque les 16 barrages de l'Ouest n'ont été remplis qu'à un taux de 18%. Ce phénomène a également impacté les nappes d'eau souterraines où le rabattement a atteint pour certaines nappes les 40 m (Demmak, 2014 ; Meddi et Hubert, 2003). Puis, en 2016, une sécheresse a provoqué une chute drastique des niveaux de remplissage des barrages, passant de 95 % à seulement 65 % (Bouabdelli, 2020). En 2021, les faibles précipitations ont entraîné une grave crise de l'eau en Algérie, les volumes stockés ayant diminué de 35 à 40 % par rapport à l'année précédente. L'année suivante, en 2022, les niveaux des barrages ont atteint 17 % montrant une persistance de cette crise (ANBT, 2022).

Bien qu'il soit démontré que l'Algérie est fortement sujette à la pénurie d'eau et aux catastrophes liées à la chaleur (Bouabdelli et al. 2022, Bensaoula et al. 2019 ; Demmak 2008 ; Meddi et Hubert 2013, Faci et al, 2016 et 2018 ; Bouabdelli et al. 2022), l'un des points les plus débattus est de savoir si le changement climatique entraîne une augmentation de la fréquence et de l'ampleur des fortes précipitations. Plusieurs études ont été réalisées pour évaluer l'impact des changements climatiques sur les précipitations extrêmes dans certaines régions d'Algérie. Trambly et al. (2013) ont utilisé un indice de précipitations extrêmes (EP) dans la région du Maghreb et ont conclu que la stationnarité des précipitations est généralement conservée dans la plupart des stations. Kharin et al. (2013) ainsi que Ghenim et Megnounif (2016) ont rapporté des conclusions similaires. Le premier a observé une augmentation non significative des précipitations extrêmes en utilisant à la fois les observations et les données historiques des modèles CMIP5. Le second a étudié la variabilité et la tendance des précipitations extrêmes sur 35 stations dans le nord de l'Algérie et n'a pas trouvé de tendance significative. Ces résultats suggèrent que l'EP en Algérie est plus influencé par les processus climatiques locaux et l'orographie (Ghenim et Megnounif, 2016 ; Trambly et al. 2013). Taibi et al. (2014) ont analysé les précipitations extrêmes journalières dans le nord de l'Algérie sur une période de 70 ans (1940-2011). Ils ont trouvé que les précipitations extrêmes n'ont pas connu de changement significatif à l'échelle du nord de l'Algérie. Ils ont

également montré que la fréquence des événements de précipitations extrêmes est corrélée avec l'indice d'oscillation méditerranéenne (MOI), tandis que les stations d'Annaba et d'Oran sont mieux corrélées avec l'indice d'oscillation australe (SOI). [Meddi et Toumi \(2015\)](#) ont étudié les précipitations journalières maximales pour une période de retour de 100 ans dans les régions côtières du Centre et de l'Est de l'Algérie. Ils ont trouvé que leur seuil est de 200 mm. Des précipitations atteignant ce niveau ont par le passé conduit à des inondations catastrophiques, comme celles du 11 novembre 2001 à Alger.

Bien que de nombreuses études aient été menées sur les précipitations totales, peu d'entre elles se sont penchées spécifiquement sur les précipitations extrêmes. Ainsi, il est impératif de pousser davantage la recherche sur ces phénomènes et leurs tendances. En effet, détecter des tendances significatives dans ce type d'événements revêt une importance capitale, car cela peut servir d'indicateur de changements climatiques et éclairer les décisions politiques visant à atténuer leurs impacts ([Ingold et Fischer, 2014](#)). Comme études, nous pouvons citer par exemple, [Boulmaiz et Boutaghan \(2020\)](#) ont utilisé une méthode innovante d'analyse des tendances pour étudier l'évolution temporelle et spatiale des événements extrêmes dans le nord-est de l'Algérie entre 1970 et 2008. Ils ont observé une tendance à l'augmentation des précipitations intenses dans de nombreuses parties de la région étudiée, ainsi qu'une tendance inverse pour les périodes sèches. Dans le Nord-Est algérien, [Bessaklia et al. \(2021\)](#) ont utilisé 10 indices de précipitations extrêmes calculés sur un ensemble de données de précipitations journalières avec une résolution spatiale de 1x1 km. Ils ont observé des tendances à la hausse des indices d'intensité et de fréquence des précipitations extrêmes, à l'exception de l'indice de jours secs consécutifs (CDD) qui a montré une baisse notable. Dans les parties centrale et orientale, les changements dans l'occurrence des événements extrêmes n'ont pas présenté de tendances significatives. De plus, au cours des cinquante dernières années, la région a connu de nombreuses inondations dévastatrices causées par des pluies torrentielles dans diverses régions du pays, comme le soulignent les travaux de [Korichi et al. \(2016\)](#) et [Hadjij et al. \(2021\)](#). La fréquence de ces événements meurtriers a augmenté au cours des deux dernières décennies dans plusieurs villes algériennes ([Kastali et al., 2020](#)). Par exemple, la ville de Constantine a connu plusieurs épisodes d'inondations dévastatrices au cours des dernières décennies. Au 24 août 2015, trois personnes ont perdu la vie dans la nouvelle ville d'Ali Mendjli lors de pluies torrentielles. De même, l'inondation du 18 septembre 2018 a fait deux morts et onze blessés dans la même localité. Lors de l'inondation du 25 août 2019, une personne était toujours portée disparue. Plus récemment, le 14 juin 2023, dix familles ont dû

être évacuées de leurs maisons touchées par des inondations causées par de fortes précipitations. Le tableau I.2 résume les inondations les plus importantes en termes de pertes de vies humaines et de dommages matériels en Algérie de 1970 à 2023. Un nombre croissant d'études tentent à identifier les facteurs responsables des pertes causées par les inondations (par exemple, [Hadjij et al., 2021](#)). Parmi ces facteurs, on peut citer l'urbanisation intensive des zones inondables, l'augmentation du nombre de maisons construites dans le lit mineur et majeur des oueds, ainsi que l'augmentation des épisodes de précipitations extrêmes ([Llasat et al., 2010](#) ; [Kastali et al., 2022](#)). Dans le contexte actuel de réchauffement climatique, il est courant d'associer ces phénomènes extrêmes à la hausse des températures (par exemple, [Noto et al, 2023](#)). [Boutaghan et al. \(2021\)](#) ont examiné les inondations les plus destructrices des dernières décennies en Algérie. Parmi celles-ci, on trouve les inondations de 1973 dans l'est du pays, les crues de 1974 dans les bassins versants d'Alger et du Sebaou, ainsi que la crue du 22 octobre 2000 dans l'ouest du pays, qui a entraîné la mort de plus de 24 personnes. Ils ont également mentionné la crue éclair de Bab El Oued en 2001, touchant une zone fortement urbanisée, ainsi que la crue éclair du Wadi M'zab le 1er octobre 2008 à Ghardaïa, où la région a subi une inondation extrême avec un débit maximal de 1200 m³/s et une profondeur d'eau dépassant 2 mètres.

Tableau I. 1: Inondations les plus importantes en pertes humaines et dommages matériels en Algérie pour la période 1970-2023

Région	date	Pertes humaines et dommages matériels
Azazga	12 October 1971	40 morts et des centaines de maisons sont partiellement ou totalement détruits
Tizi Ouzou	Du 28 au 31 Mars 1974	52 décès, 18 000 sans-abri
El Eulma (Sétif)	1 September 1980	44 morts, 50 blessés
Annaba	11 Novembre 1982	26 décès et 9500 personnes sans abri
Jijel	29 Décembre 1984	29 décès et 11 000 personnes sans abri
Ghilizane	20 Octobre 1993	23 morts et 20 blessés
Bordj Bou Arreridj	23 Septembre 1994	16 morts, 10 millions DA
Béchar	23 Septembre 1994	16 décès
Laghouat	20 Octobre 1995	40 décès
Naama	23 octobre 2000	5 morts 12 gâchis
Beb El Oued (Alger)	Du 10 au 11 Novembre 2001	680 morts, 115 disparus, 30 000 sans-abri et 544 millions d'euros de dégâts côtiers
Tenes (Chelef)	10 Novembre 2001	7 morts 2 en désordre
Sidi Bel-Abes	19 Octobre 2007	7 décès
Ghardaia	1 ^{er} Octobre 2008	43 morts 84 blessés 4 en désordre
Béchar	08 Octobre 2008	13 décès
Aïn Defla	9 Octobre 2008	6 morts 8 blessés
Batna	15 Octobre 2008	2 décès

Tableau I.2: Inondations les plus importantes en pertes humaines et dommages matériels en Algérie pour la période 1970-2023 (suite)

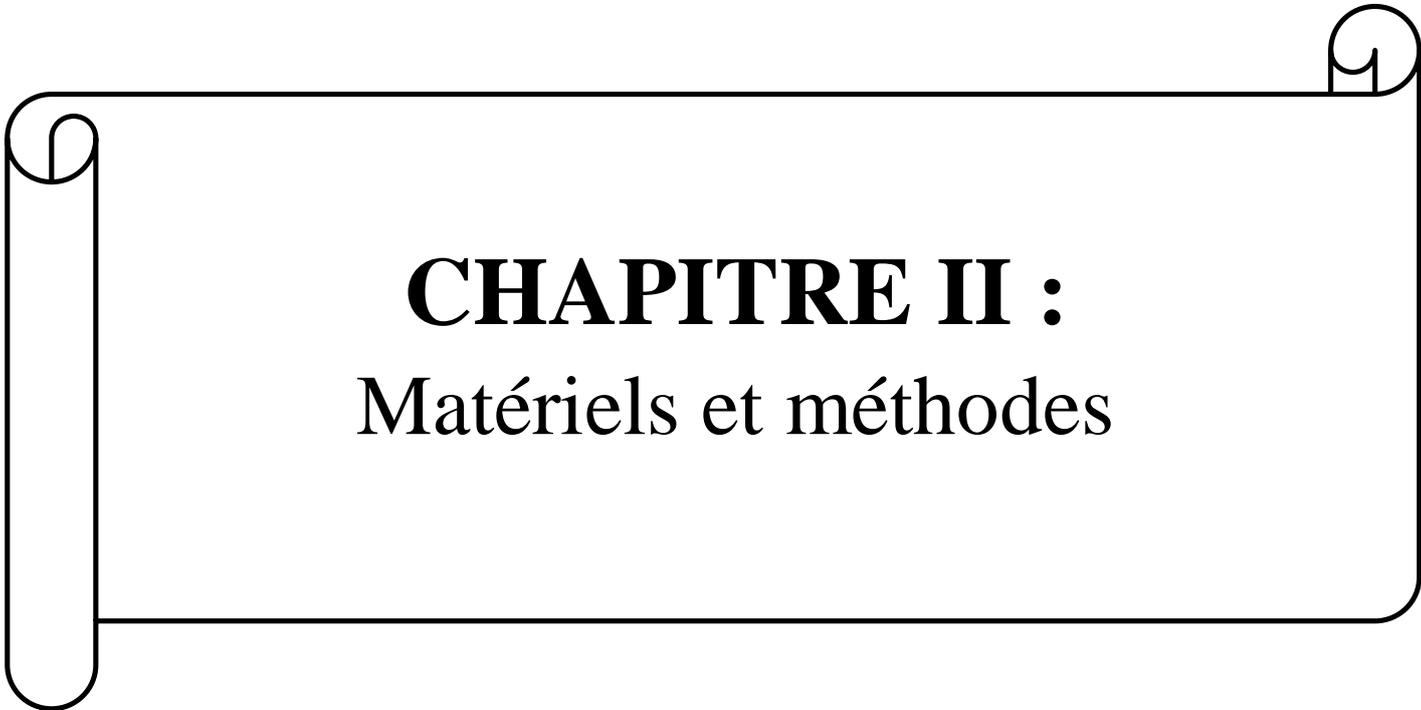
Région	date	Pertes humaines et dommages matériels
El Bayedh	2 Octobre 2011	11 morts, 4300 bâtiments détruits
Khenchela	2 Septembre 2013	3 morts et culture endommagé
Annaba	25 Février 2015	Des dégâts matériels considérables
Batna	23 Août 2015	Des dégâts matériels considérables
Constantine	24 Août 2015	3 décès
Khenchela	29 Août 2015	1 mort et 70 personnes sans abri et 40 bâtiments détruits
Alger	10 Octobre 2015	Des dégâts matériels
Tamanrasset	Septembre 2015	12 décès
Khenchela	14 Septembre 2016	1 disparu et dégâts matériels considérables
Tiert	4 Avril 2018	3 décès
Tamanrasset	25 Août 2018	5 décès
Tebessa	13 Septembre 2018	18 blessés
Constantine	19 Septembre 2018	2 morts et 18 blessés
Tizi Ouzou	3 Novembre 2018	Routes nationales fermées pendant trois jours
Mila	19 Octobre 2018	20 habitations et 4 établissements scolaires inondés
Boumerdès	5 Novembre 2018	Des dégâts matériels
Annaba	25 Janvier 2019	3 décès et 312 familles sans abri
Djanet et Illizi	9 Juin 2019	1 décès
Constantine	25 Août 2019	1 disparu
Jijel	1 ^{er} Septembre 2019	Des dégâts matériels
Msila	1 ^{er} Septembre 2019	Des dégâts matériels considérables
Tizi Ouzou	4 Septembre 2019	Des dégâts matériels
Alger	8 Septembre 2019	6 décès
Alger	12 Septembre 2019	1 décès
Guelma	12 Septembre 2019	1 décès
Djelfa	12 Septembre 2019	2 décès
Souk Ahras	12 Septembre 2019	1 décès
Mila	12 Septembre 2019	1 décès
Béchar	12 Septembre 2019	1 décès
Medea	12 Septembre 2019	Grand pont effondré
Constantine	19 Septembre 2019	2 morts 11 blessés
Annaba	2 février 2020	Des dégâts matériels considérables
Alger	19 Avril 2020	Des dégâts matériels considérables
Medea	20 Avril 2020	Des dégâts matériels
Oran	20 Avril 2020	Des dégâts matériels considérables
Tiaret	20 Avril 2020	Des dégâts matériels considérables
Msila	20 Avril 2020	Des dégâts matériels
Oran	16 Mai 2020	1 décès
Alger	8 Septembre 2020	Des dégâts matériels considérables
Jijel	21 Décembre 2020	18 voitures inondées
Annaba	31 Janvier 2021	Des dégâts matériels
Chlef	6 Mars 2021	10 décès
Chlef	7 mars 2021	10 morts et désordre
Medea	2 Mai 2021	4 morts 2 blessés
Msila	2 Mai 2021	2 morts 1 disparu
Bousaada	2 Mai 2021	Des dégâts matériels considérables
Bordj Bou Arreridj	3 Mai 2021	Des dégâts matériels considérables

Tableau I.3: Inondations les plus importantes en pertes humaines et dommages matériels en Algérie pour la période 1970-2023 (suite et fin)

Région	date	Pertes humaines et dommages matériels
Batna	3 Mai 2021	2 décès
Alger	23 octobre 2021	2 morts et 1 disparu
Alger	7 Novembre 2021	Des dégâts matériels considérables
Souk Ahras	7 Novembre 2021	Des dégâts matériels considérables
Chlef	7 Novembre 2021	18 maisons inondées
Medea	8 Novembre 2021	Effondrement du mur du bâtiment
Oran	8 Novembre 2021	Des dégâts matériels considérables
Tiaret	8 Novembre 2021	3 maisons inondées
Annaba	30 Novembre 2021	Des dégâts matériels considérables
Annaba	9 Janvier 2022	Des dégâts matériels considérables
Annaba	3 Mars 2022	Des dégâts matériels considérables
Constantine	18 Mars 2022	Des dégâts matériels considérables
Bordj Bou Arreridj	25 Mai 2022	Des dégâts matériels considérables
Bordj Bou Arreridj	4 Octobre, 2022	1 décès
Tiaret	13 Octobre 2022	4 décès 8 disparu
Alger	11 Décembre 2022	Des dégâts matériels considérables
Annaba	20 Mai 2023	Des dégâts matériels considérables
Jijel	25 Mai 2023	Des dégâts matériels considérables
Tizi Ouzou	25 Mai 2023	Des dégâts matériels considérables
Souk Ahras	25 Mai 2023	Des dégâts matériels considérables
Tipaza	26 Mai 2023	6 décès
Saïda et Laghouat	5 Juin 2023	6 décès
Constantine	14 Juin 2023	10 familles sans abri
Tamenraset	16 Août 2023	Des dégâts matériels considérables
Tlemcen	3 Septembre 2023	4 décès
El Bayadh	3 Septembre 2023	3 décès et 2 disparu
Oran	3 Septembre 2023	Des dégâts matériels considérables

10. Conclusion

Ce chapitre aborde de manière exhaustive les caractéristiques intrinsèques des précipitations, en mettant particulièrement l'accent sur les précipitations extrêmes. Il explore comment les modèles climatiques et les trajectoires socio-économiques partagées (SSP) sont utilisés pour projeter les impacts du changement climatique sur l'évolution de ces phénomènes. En utilisant des techniques avancées telles que la descente d'échelle dynamique, il a été examiné comment les précipitations extrêmes répondent au réchauffement climatique. Les tendances observées à l'échelle globale ainsi que les projections futures sont analysées minutieusement, avec une attention particulière qui a été portée aux précipitations extrêmes dans le bassin méditerranéen. Ce chapitre offre ainsi une vision holistique et approfondie de l'évolution des précipitations extrêmes et de leur potentiel impact sur la sécurité des vies humaines et des biens matériels dans un contexte de changement climatique.

A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left and rounded corners on the right, framing the chapter title.

CHAPITRE II :

Matériels et méthodes

1. Présentation de la région d'étude

1.1. Situation géographique

Située sur la rive méridionale du bassin méditerranéen, l'Algérie est un vaste territoire qui s'ouvre à la mer Méditerranée sur 1 200 km de côte. Avec une extension latitudinale allant du 37^{ème} au 18^{ème} parallèle, ce territoire s'étend sur une superficie de 2 381 741 km² (Figure II.1).

1.2. Le climat

Les précipitations interannuelles en Algérie se caractérisent par une grande variation spatiale, comme le montre la figure II.1, qui représente la carte des précipitations moyennes sur la période 1990-2014. Les précipitations dans le pays se caractérisent par une grande variation spatiale. Les valeurs de la pluviométrie annuelle diminuent au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la mer méditerranéenne. La moyenne annuelle sur le littoral varie entre 300 et 1200 mm en augmentant de l'ouest vers l'est. Les disparités Nord-Sud et Ouest-Est des précipitations en Algérie sont le résultat d'une interaction complexe entre divers éléments géographiques et météorologiques. Au nord, l'Atlas tellien et l'Atlas saharien forment deux ensembles de reliefs parallèles se rapprochant en allant vers l'est, entre lesquels s'intercalent de vastes plaines et les Hauts Plateaux. Ces reliefs, combinés aux vastes chaînes montagneuses des Aurès et de la Nememcha dans l'est algérien, contribuent à la variabilité des précipitations. De plus, la latitude, la circulation atmosphérique et les phénomènes météorologiques saisonniers influencent également la répartition des précipitations à travers le pays. L'ensemble de ces facteurs ont créé cinq zones distinctes, chacune caractérisée par des précipitations moyennes similaires dans leur évolution. La première zone, dont la moyenne interannuelle est de 750 mm, s'étend le long du littoral Est jusqu'à la latitude 36.4°. La zone 2 se trouve entre le littoral Est (à la latitude 36.4°) et les Hauts Plateaux (à la latitude 35.8°) (zone 4), avec une moyenne interannuelle de précipitation de 550 mm. La moyenne interannuelle dans la zone 4 (qui se situe entre les latitudes 35.8° et 34.5°) est de 300 mm. La zone 3 représente les régions côtières ouest avec une moyenne interannuelle de précipitation de 350 mm, tandis que la zone 5 (qui s'étend entre les latitudes 34.5° et 18.9°) correspond aux régions présaharienne et saharienne avec une moyenne de 55 mm.

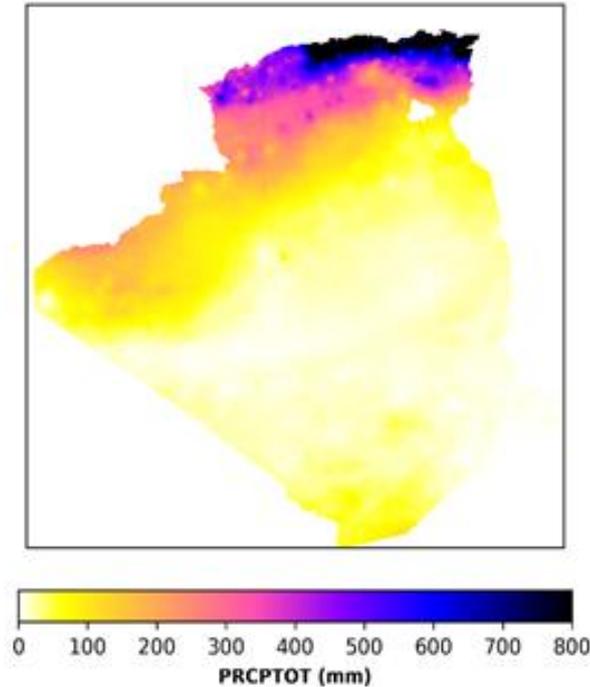


Figure II. 1 : Précipitations annuelles moyennes en Algérie calculées à partir des données CHIRPS 0,05° X 0,05° pour la période 1990-2014.

1.3. Zones d'études

Dans la première partie de cette thèse, le traitement de l'évolution des précipitations dans le Nord de l'Algérie sera fait à partir des données in-situ de 16 stations pluviométriques bien représentatives des zones climatiques du nord de l'Algérie afin de capturer adéquatement la variabilité spatiale des précipitations dans la zone d'étude. Dans la deuxième partie traitant les changements projetés dans les régimes de précipitations extrêmes dans les sous-régions Algériennes, les données de 33 modèles climatiques globaux de la base de données NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections (NEX-GDDP-CMIP6) ont été utilisées à cette fin.

Dans la première partie (Chapitre III) de la thèse, la zone d'étude (Figure II.2) comprend principalement quatre zones climatiques selon la classification de Köppen (Zeroual et al. 2019), à savoir :

- Les zones climatiques de type C, où le climat tempéré chaud entièrement humide avec une zone climatique estivale chaude (Csa), sont couvertes par six stations pluviométriques représentant le nord de l'Algérie (Est, Centre et Ouest), à savoir Annaba, Jijel, Tizi Ouzou, Alger, Médéa et la station d'Oran ;

- Pour les zones climatiques de type B, la zone climatique semi-aride froide BSk est représentée par cinq stations, à savoir Souk Ahras, Constantine, Bordj Bou Arreridj, Chlef et la station de Batna.
- La zone climatique aride froide Bwk et semi-aride chaude BSh est couverte par quatre stations, à savoir Barika, Msila, Boussaâda et la station de Ksar Chellala.

Les emplacements des 16 stations météorologiques sont indiqués dans la figure II.2 et leurs caractéristiques sont présentées dans le Tableau II.1

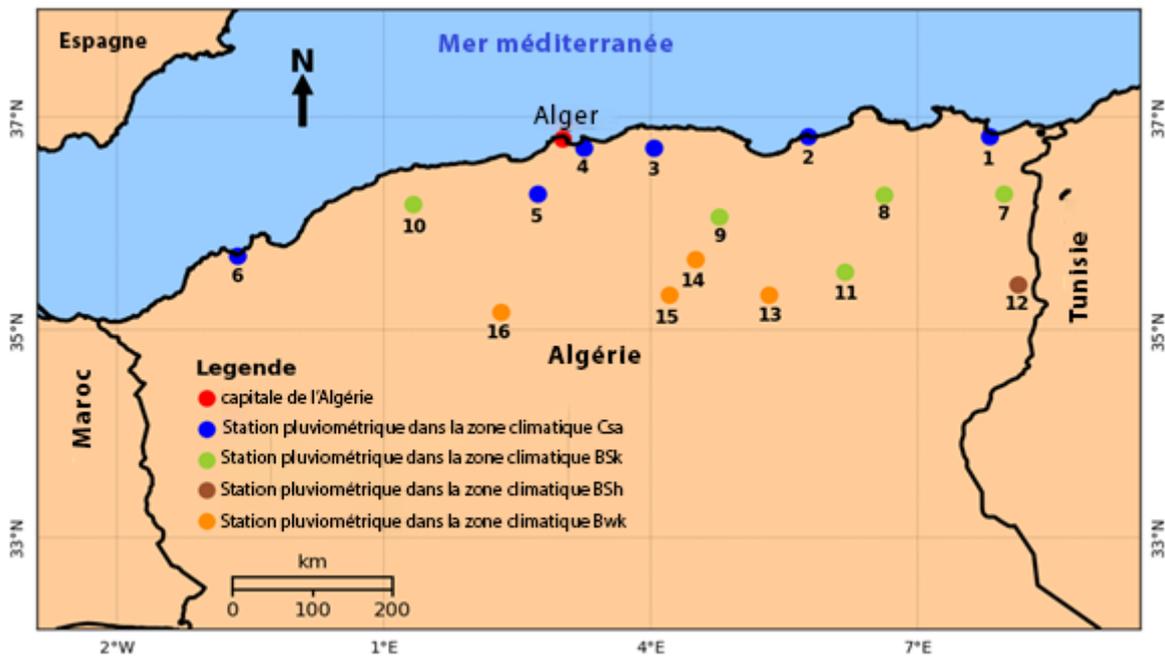


Figure II.2. Localisation des stations pluviométriques utilisées dans la première phase de l'étude.

Dans la deuxième partie (Chapitre IV et V) de la thèse, la zone d'étude (Figure II.3) comprend principalement quatre zones climatiques selon la classification de Köppen (Zeroual et al. 2019), à savoir :

- La zone climatique Csa, caractérisée par un climat tempéré chaud entièrement humide avec un été chaud, est représentée par la zone 1 et la zone 2;
- La zone climatique BSk/BSh, représentant la zone climatique semi-aride froide/chaude, est représentée par la zone 3 et la zone 4;
- La zone climatique BWk/BWh, désignant le climat désertique froid/chaud, est couverte par la zone 5.

Tableau II.1 : Noms, coordonnées géographiques, altitudes et le type de la zone climatique correspondante pour les seize stations pluviométriques.

N°	Nom de la station	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)	Type de la Zone Climatique
1	Annaba	36.82	7.8	4.9	Csa
2	Jijel	36.82	5.77	11	Csa
3	Tizi Ouzou	36.71	4.03	222	Csa
4	Alger	36.71	3.25	24	Csa
5	Medea	36.28	2.73	1036	Csa
6	Oran	35.7	-0.65	22	Csa
7	Souk Ahras	36.28	7.96	590	BSk
8	Constantine	36.27	6.62	690.4	BSk
9	Bordj Bou Arreridj (BBA)	36.07	4.76	922	BSk
10	Chlef	36.21	1.33	141.1	BSk
11	Batna	35.55	6.18	1052	BSk
12	Cheikh Larbi Tebessi (CLT)	35.43	8.12	811.1	BSh
13	Barika	35.33	5.33	461	Bwk
14	Msila	35.66	4.5	442	Bwk
15	Pousada	35.33	4.2	416	Bwk
16	Ksar Chellala	35.16	2.31	801	Bwk

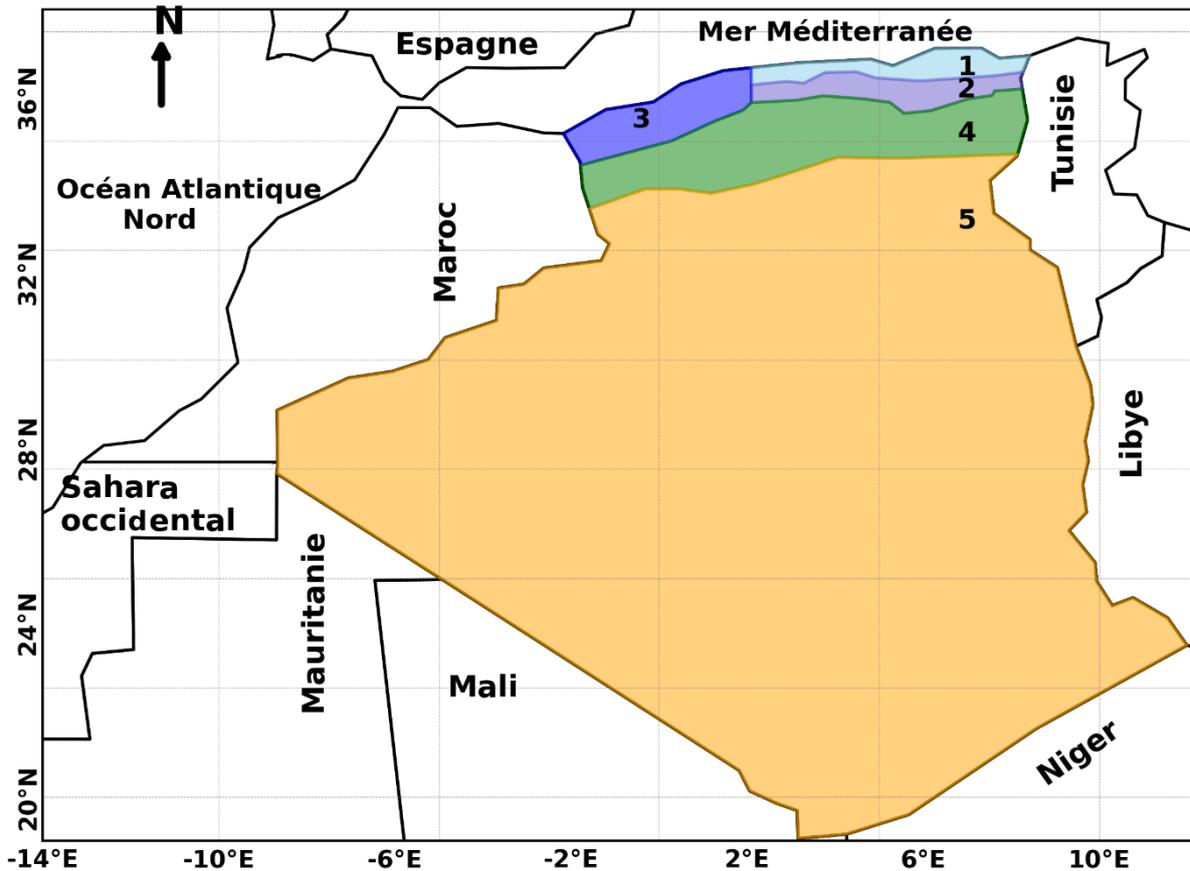


Figure II.3 : Les limites et les emplacements des cinq zones climatiques définies de l'Algérie.

2. Présentation des données observées

Les données de précipitations journalières (1969-2021), pour les 16 stations pluviométriques, proviennent de l'Office Nationale de Météorologie (ONM) et de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH). Les seize stations ont été sélectionnées en veillant à ce qu'elles soient représentatives des zones climatiques du nord de l'Algérie, et que le taux de lacunes de données ne dépasse pas 10% pour la période allant de 1969 à 2021. Il convient de noter que le comblement des lacunes pour ces stations a été effectué à l'aide du package « reddPrec » (reconstruction des données journalières – précipitations) (Serrano-Notivoli et al. 2017). Parmi les 250 stations qui sont actuellement opérationnelles dans les trois zones climatiques, seules 80 stations sont en activité depuis 1968 jusqu'à aujourd'hui. À l'échelle journalière, le pourcentage de lacunes dans ces stations varie entre 1% et 46%. Seize stations en fonction du critère que le pourcentage de lacunes ne dépasse pas 10% ont été adoptées. Il convient de noter que les stations d'Annaba, Jijel, Tizi-Ouzou, Alger, Médéa, Constantine et Oran ont moins de 5% de lacunes, tandis que le reste des stations ont un pourcentage de

lacunes allant de 12% à 15%. Il est important de noter que le processus de contrôle de la qualité des données utilisé par le package 'reddPrec' est basé sur cinq critères pour identifier les données suspectes. Cette méthode vise à préserver la variabilité locale et temporelle caractéristique des données de précipitations à haute fréquence sans s'appuyer sur la structure temporelle des données. Sur la base des valeurs de précipitations enregistrées dans les stations voisines les plus proches pour un jour donné, deux valeurs de référence (VR) sont calculées : une prédiction binomiale (PB) exprimant la probabilité d'occurrence d'un jour de pluie, et une prédiction de magnitude (PM) se référant à la quantité de précipitations. Des modèles linéaires généralisés (GLM) sont utilisés pour calculer la VR en utilisant les données de précipitations (occurrence et ampleur) des 10 stations voisines les plus proches comme variable dépendante, et les informations géographiques de chaque station (latitude, longitude et altitude) comme variables indépendantes. Les VR sont ensuite utilisées pour (1) appliquer un contrôle de qualité aux données, en signalant les enregistrements suspects selon 5 critères prédéfinis ; (2) obtenir des séries temporelles complètes en imputant les VR pour les observations manquantes dans l'ensemble de données d'origine. Par conséquent, un minimum de 11 points de données disponibles par jour est nécessaire.

Pour combler les lacunes des données dans les 16 stations de la zone d'étude, nous avons travaillé sur une période de 10 ans. Les stations voisines des 16 stations qui étaient opérationnelles pendant cette décennie ont été sélectionnées. Ensuite, le package "reddPrec" a été utilisé pour effectuer le comblement des données à l'échelle journalière.

2.1. Comblement de lacunes par le package « reddPrec »

La plupart des études climatiques exigent des ensembles de données complets et de qualité afin de calculer les paramètres climatologiques à long terme, d'évaluer l'existence de tendances, de faire des projections statistiques à partir de données de modèles climatiques globaux et régionaux, ou encore d'analyser la fréquence et l'ampleur des événements extrêmes. Parmi toutes les variables pour lesquelles des ensembles de données ont été créés, les précipitations sont l'une des plus difficiles à appréhender en raison de leur variabilité temporelle et spatiale considérable. De même, même si une échelle mensuelle peut être acceptable pour les études climatologiques axées sur les totaux de précipitations, elle n'est pas suffisante pour d'autres sujets cruciaux tels que l'analyse des événements extrêmes, pour lesquels des résolutions temporelles quotidiennes ou encore plus élevées sont nécessaires.

Plusieurs méthodes de contrôle de qualité et de reconstruction ont été proposées dans la littérature. Or, la plupart de ces méthodes ont été développées pour les données mensuelles fonctionnent bien pour le calcul de moyennes à long terme ou l'évaluation des tendances dans les totaux de précipitations. Cependant, ces procédures ne peuvent pas être appliquées aux données de précipitations à l'échelle journalières en raison de la variabilité spatiale beaucoup plus élevée et de l'interaction de problèmes locaux tels que l'orographie, qui, en combinaison avec des conditions atmosphériques spécifiques, peut conduire à une variabilité dans les schémas de distribution spatiale d'un jour à l'autre.

[Serrano-Notivoli et al., \(2017\)](#) ont développé une méthode utilisée pour l'application de contrôle qualité aux ensembles de données de précipitations journalières, la reconstruction des valeurs manquantes ainsi que l'estimation des valeurs de précipitations à des emplacements spécifiques d'intérêt, même en l'absence d'observations directes. Cette dernière préserve à la fois la variabilité spatiale et temporelle des données de précipitations journalières sans présenter de limitations. Elle ne repose sur aucune hypothèse préconçue sur la structure des séries ou leur relation avec les séries voisines, ce qui maximise l'utilisation des informations disponibles ([Serrano-Notivoli et al., 2017](#)).

2.1. Fondement théorique de la méthode

Cette méthode de contrôle qualité et de reconstruction des données de précipitations utilise des valeurs de référence individuelles (RVs) au lieu des références séries (RS) traditionnelles. Les RVs sont calculées indépendamment pour chaque jour et emplacement en fonction des données des stations voisines, utilisant les données géographiques de chaque station (latitude, longitude et altitude) comme variables indépendantes pour la modélisation ([Serrano-Notivoli et al., 2017](#)). Comme la disponibilité des données varie de jour en jour, les stations voisines sélectionnées peuvent également varier. De plus, étant donné que des modèles indépendants sont construits pour chaque emplacement et jour, les paramètres estimés des modèles (reflétant l'influence de l'altitude, de la latitude et de la longitude sur la probabilité d'occurrence et l'ampleur des précipitations) peuvent également varier en termes de signe et d'ampleur par rapport aux stations voisines, ou d'un jour à l'autre pour le même emplacement. De plus, comme la sélection des stations voisines est locale et déterminée de manière indépendante chaque jour, aucune restriction sur la sélection des données en fonction de la longueur de l'ensemble de données ou des caractéristiques structurelles n'existe. Cette

flexibilité permet donc de créer des modèles précis qui reflètent les conditions locales de précipitation tout en utilisant toutes les informations disponibles.

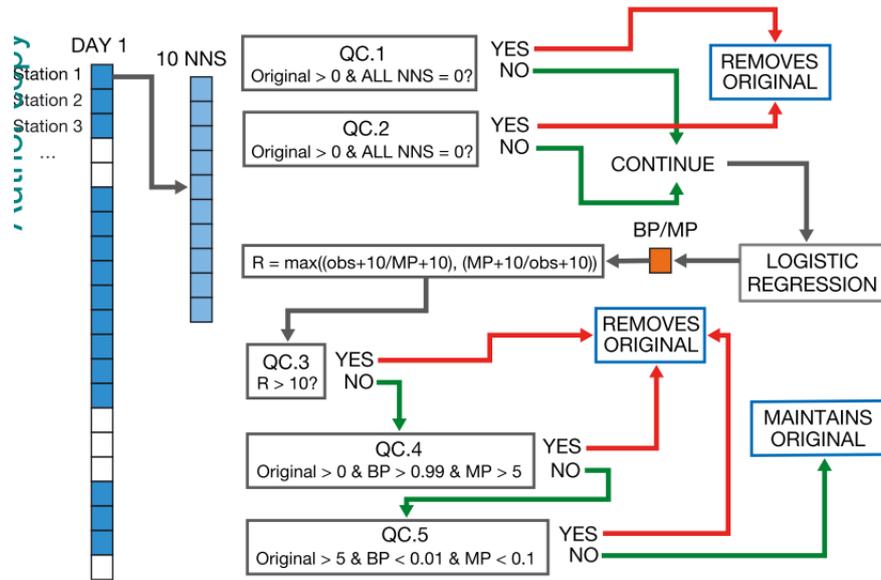
De même, cette méthode repose sur des modèles linéaires généralisés (GLMs) qui utilisent les données de précipitations des 10 stations voisines les plus proches, ainsi que des informations géographiques, pour calculer les RVs. Ces RVs sont basées sur des prédictions binomiales de la probabilité d'occurrence des précipitations et de l'ampleur des précipitations, réalisées à l'aide de régressions logistiques multivariées (Castro et al., 2014).

Enfin, le RV final est déterminé en combinant les prédictions de probabilité d'occurrence et d'ampleur des précipitations, avec un seuil de probabilité de 0,5 pour déterminer un jour de pluie. Cela garantit que la somme des probabilités d'occurrence des jours de pluie prédits dans une zone soit égale à l'occurrence observée (Beguería et al., 2019). Cette approche offre ainsi une méthode précise et flexible pour la reconstruction des données de précipitations, en exploitant pleinement les informations disponibles tout en tenant compte des variations locales.

2.1.1. Potentiel de contrôle de la qualité

Les valeurs de référence individuelles (RVs) peuvent être utilisées pour créer un test de contrôle de qualité (QC) afin de détecter les données suspectes dans les ensembles de données climatiques (Serrano-Notivoli et al., 2017). Pour ce faire, cinq critères de contrôle ont été définis en analysant les valeurs observées de précipitation par rapport aux prédictions des RVs. Ces critères incluent la détection de conditions humides ou sèches isolées, de valeurs aberrantes suspectes, ainsi que la détection de valeurs nulles suspectes avec des prédictions de précipitation significatives (Serrano-Notivoli et al., 2021).

Ce processus itératif de contrôle de qualité est appliqué à toutes les stations pour chaque jour, recalculant les 10 stations voisines les plus proches après chaque itération (Serrano-Notivoli et al., 2017). Les observations suspectes sont ensuite supprimées de la base de données, et le processus est répété jusqu'à ce qu'aucune observation supplémentaire ne soit signalée comme suspecte (Serrano-Notivoli et al., 2017).



Note: Iterative process. One loop means doing these tasks in all stations for each day. After every loop the 10 NNS (Near Stations with observed value) are recomputed. When a loop does not detect anomalies in any station, the process stops.

Figure II.4 : Schéma du processus de contrôle de qualité. BP : Prédiction binomiale ; MP : Prédiction de magnitude (Serrano-Notivoli et al., 2017)

Remarque : Processus itératif : Une boucle signifie effectuer ces tâches dans toutes les stations pour chaque jour. Après chaque boucle, les 10 NNS (Stations Proches avec valeur observée) sont recalculés. Lorsqu'une boucle ne détecte pas d'anomalies dans aucune station, le processus s'arrête. Ce schéma de contrôle de qualité (figure II.4) permet d'assurer la cohérence et la fiabilité des données climatiques en identifiant et en éliminant les valeurs suspectes qui pourraient résulter d'erreurs de mesure ou de transcription, de problèmes de capteurs, ou d'autres sources d'erreur.

2.1.1. Potentiel de comblement des lacunes et d'inférence

Les RVs peuvent être utilisés pour remplir les lacunes et obtenir des séries de données complètes. Pour maintenir la cohérence temporelle et éviter les incohérences, une correction est nécessaire. Elle implique de multiplier le RV par un coefficient de correction, assurant que les séries de RV conservent la même moyenne que les données observées (Serrano-Notivoli et al., 2018). Les coefficients de correction sont calculés pour chaque valeur mensuelle de manière indépendante afin d'éviter les biais dus à la variation saisonnière :

$$RV_{c_{i,m}} = RV_{i,m} \times (\overline{Obs_m} / \overline{RV_m}) \quad (II.01)$$

Pour calculer la valeur corrigée pour le jour i d'une année spécifique, le RV du même jour, $RV_{i,m}$, est multiplié par le rapport entre la moyenne des observations de ce mois pour toutes

les longueurs de la série, Obs_m , et la moyenne des estimations de ce mois sur la même période, RV_m .

En se basant sur les coordonnées et l'altitude de l'emplacement, ainsi que sur les données des 10 stations les plus proches (NNS), des séries de précipitations complètes peuvent être générées (Sarricolea et al., 2019). Ceci est utile pour créer de nouvelles séries dans des zones non surveillées, et pour produire des ensembles de données spatialement étendus (Sarricolea et al., 2019). Le processus implique d'abord de remplir les séries de données avec des observations existantes, puis de calculer les RV pour chaque jour en utilisant ces séries complétées. Ces RV fournissent les estimations finales des précipitations pour les emplacements donnés.

3. Ensembles de données de modèles climatiques

La NASA a mis en œuvre le projet NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections 6 (NEX-GDDP-CMIP6) pour fournir des projections historiques et futures à une échelle réduite pour la période 1950 à 2100, basées sur les modèles CMIP6. Les données journalières NEX-GDDP-CMIP6 ont été largement utilisées dans la recherche sur le changement climatique, y compris les observations impliquant des événements climatiques extrêmes (Murali et al., 2023). Le portail NCCS THREDDS Data Catalog (<https://ds.nccs.nasa.gov/thredds/catalog/AMES/NEX/GDDP-CMIP6/catalog.html>) a été utilisé pour rassembler les simulations historiques de 33 Globale Climatologie Modèle (GCM) du CMIP6. Dans cette étude, le changement climatique pour chaque sous-région est évalué sur la base de différents GCM de l'ensemble de données NEX-GDDP de la NASA, qui est compatible avec le dernier rapport d'évaluation du GIEC (AR6), c'est-à-dire la phase 6 du projet d'intercomparaison de modèles couplés (CMIP6). Outre le fait qu'il repose sur les derniers scénarios d'émission AR6, une autre justification de l'utilisation de cet ensemble de données réside dans le fait que le NEX-GDDP de la NASA fournit des sorties de GCM descente d'échelle statistiquement à une résolution plus fine ($0,25^\circ \times 0,25^\circ$), dont la validité a été confirmée dans de nombreuses études (Zheng et al., 2022 ; Guga et al., 2023).

Dans le cadre du dernier rapport d'évaluation du GIEC, AR6 (GIEC, 2022), cinq scénarios, suivant le cadre de la voie socio-économique partagée (SSP), prennent en compte à la fois les changements économiques et démographiques mondiaux et les émissions de gaz à effet de serre ont été définies (O'Neill et al, 2016). Le scénario SSP1-1.9 implique une transition

rapide vers une société durable, et les scénarios SSP3-7.0 et SSP4-6.0 décrivent une économie moins développée et une expansion démographique importante, entraînant une répartition inégale des ressources. Le scénario SSP2-4.5 décrit des situations intermédiaires entre les scénarios SSP1-1.9 et SSP3-7.0, tandis que le scénario SSP5-8.5 implique la poursuite des pratiques actuelles (Hausfather, 2018). En conséquence, les scénarios SSP2-4.5 et SSP5-8.5, ont été utilisés dans notre thèse. De même, les scénarios SSP2-4.5 et SSP5-8.5 montrent un forçage radiatif supplémentaire de 4,5 et 8,5 W/m² représentant respectivement les limites intermédiaire et haute des projections de changement climatique, autrement dit, ces scénarios reflètent une tendance favorable au progrès humain grâce à des investissements considérables dans le développement social, des institutions avancées et un développement économique rapide. Ces projections corrigées des biais sont destinées à évaluer les impacts du changement climatique à haute résolution sur des processus sensibles aux gradients climatiques et à la topographie locale. La méthode de correction de biais et de désagrégation spatiale (BCSD) (Maurer et al. 2008 ; Thrasher et al. 2012) a été utilisée pour ajuster les projections futures afin qu'elles soient cohérentes avec les observations historiques et interpoler les sorties de GCM à une résolution spatiale plus élevée (0.25°x0.25°). Ce jeu de données rassemble les simulations historiques de trente-cinq GCM CMIP6 de la période de 1950 à 2014 et les projections futures pour la période 2015-2100 selon les scénarios à faibles émissions (SSP1-2.6), émissions moyennes (SSP2-4.5) et fortes émissions (SSP5-8.5), à une résolution spatiale de 0,25 degré x 0,25 degré.

Le tableau II.2 présente les informations essentielles sur les ensembles de données des modèles, leurs organisations de développement et leur résolution spatiale. Au moins un modèle provenant de différents instituts/centres de recherche impliqués dans le développement des GCM a été sélectionné, incluant les précipitations projetées dans les scénarios SSP2-4.5 et SSP5-8.5.

Tableau II.2 : Ensembles de données des modèles GCM NEX-GDDP

N°	Modèle	Institution	Résolution
1	ACCESS-CM2	Australian Community Climate and Earth-System Simulator, Australia	1.88° × 1.25°
2	ACCESS-ESM1-5	Australian Community Climate and Earth-System Simulator, Australia	1.88° × 1.25°
3	BCC-CSM2-MR	Beijing Climate Center, China Meteorological	1.1° × 1.1°
4	CanESM5	Canadian Earth System Model, Canada	2.81° × 2.79°
5	CESM2	National Center for Atmospheric Research, USA	1.25°×0.9°
6	CESM2-WACCM	National Center for Atmospheric Research, USA	1.25°×0.9°
7	CMCC-CM2-SR5	Euro-Mediterranean Center on Climate Change, Italy	0.9375°×0.25°
8	CMCC-ESM2	Euro-Mediterranean Center on Climate Change, Italy	
9	CNRM-CM6-1	National Centre for Meteorological Research, France	1.41° × 1.40°
10	CNRM-ESM2-1	National Centre for Meteorological Research, France	1.41° × 1.40°
11	EC-Earth3	European EC-Earth consortium	0.7° × 0.7°
12	EC-Earth3-Veg-LR	European EC-Earth consortium	1.125°×1.125°
13	FGOALS-g3	LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, China	2° × 2.3°
14	GFDL-CM4	NOAA/Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA	1° × 1.25°
15	GFDL-ESM4	NOAA/Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA	1° × 1.25°
16	GISS-E2-1-G	Goddard Institute for Space Studies, New York, USA	2.5°× 2°
17	HadGEM3-GC31-LL	Met Office Hadley Centre, Natural Environmental Research Council (MOHC-NERC)	1.85°×1.25°
18	IITM-ESM	Centre for Climate Change Research-Indian Institute of Tropical Meteorology, India	1.9° × 1.9°

Tableau II.2 : Ensembles de données des modèles GCM NEX-GDDP (suite et fin)

N°	Modèle	Institution	Résolution
19	INM-CM4-8	Institute for Numerical Mathematics, Russia	2° × 1.5°
20	INM-CM5-0	Institute for Numerical Mathematics, Russia	2° × 1.5°
21	IPSL-CM6A-LR	Institut Pierre Simon Laplace, France	2.50° × 1.26°
22	KACE-1-0-G	National Institute of Meteorological Sciences/Korea Meteorological Administration, Climate Research Division, Korea	1.85°×1.25°
23	KIOST-ESM	Korea Institute of Ocean Science and Technology, Korea	1.9°×1.9°
24	MIROC6	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Japan	1.41° × 1.40°
25	MIROC-ES2L	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Japan	2.8° × 2.8°
26	MPI-ESM1-2-HR	Max Planck Institute for Meteorology, Germany	1.88° × 1.86°
27	MPI-ESM1-2-LR	Max Planck Institute for Meteorology, Germany	1.88° × 1.86°
28	MRI-ESM2-0	Meteorological Research Institute, Japan	1.13° × 1.12°
29	NESM3	Nanjing University of Information Science and Technology, China	1.875°×1.875°
30	NorESM2-LM	Norwegian Climate Center, Norway	2.50° × 1.89°
31	NorESM2-MM	Norwegian Climate Center, Norway	1.25°×0.9375°
32	TaiESM1	Research Center for Environmental Changes, Academia Sinica, Chinese Taipei	1.25°×0.9°
33	UKESM1-0-LL	UK Met Office Hadley Office, UK	1.88° × 1.25°

Au cours de ce travail, la procédure suivie est comme suit :

- 1- Examen des données historiques pour obtenir une image plus transparente des conditions climatiques sur la zone d'étude ;
- 2- Téléchargement des sorties réduites du GCM disponible sur le site à partir des ensembles de données NEX-GDDP-CMIP6 et comparaison ces sorties du GCM avec les valeurs observées pour la période de référence. Si nécessaire, une correction du biais des sorties GCM doit être effectuée (dans notre cas les données sont déjà corrigées) ;
- 3- Analyse des séries chronologiques de variables pour des horizons temporels d'intérêt dans le futur selon différents scénarios de changement climatique et évaluer le taux de changement par rapport à la période de référence. Pour évaluer les extrêmes de précipitations en Algérie au XXI^e siècle, la période d'étude de 1990 à 2100 a été subdivisée en une période historique (1990-2014) et trois périodes futures distinctes selon les scénarios SSP245 et SSP585 : le futur proche (2026-2050), le futur moyen (2051-2075) et le futur lointain (2076-2100).

4. Correction du biais (BC)

La correction du biais est un ajustement statistique effectué pour améliorer la précision des résultats du modèle (Ehret et al., 2012). Les évaluations de l'impact du climat utilisant les projections futures seront plus fiables lorsqu'elles seront réalisées avec des données à plus haute résolution (Jury et al., 2015 ; Notaro et al., 2015). Les techniques de correction des biais et de réduction d'échelle sont essentielles pour réaliser des projections significatives des indices climatiques (Maurer et al., 2007). Les méthodes de correction des biais les plus courantes sont la méthode quantile mapping, qui utilise une fonction de transfert pour faire correspondre les fonctions de distribution cumulative (CDF) des données modélisées et observées, et delta quantile mapping (QDM), qui améliore théoriquement l'efficacité de quantile mapping en calculant les changements delta à différents quantiles (Chen et al., 2013 ; Guo et al., 2018). Ces deux méthodes présentent des inconvénients : elles ne fonctionnent pas

très bien avec les données présentant des tendances ou une saisonnalité, ou impliquent également un ajustement aux observations (historiques), au modèle (historique) et aux simulations futures, d'où une plus grande marge d'erreur. Cependant, les modèles climatiques participant au projet CMIP sont robustes et offrent une solution scientifique pour explorer et comprendre la variabilité du climat. Récemment, avec la publication des résultats du modèle du Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) (Nashwan et Shahid, 2020), un ensemble de données statistiques à haute résolution NEX-GDDP- CMIP6, incorporant une méthode améliorée de correction de biais/désagrégation spatiale (BCSD) (Wood et al., 2002, 2004 ; Thrasher et al., 2012), a été produit par la NASA à l'aide des résultats du GCMS CMIP6. Cet ensemble de données représente une amélioration substantielle par rapport à l'itération précédente, NEX-GDDP-CMIP5 (Thrasher et al., 2022), grâce à ses techniques de correction quotidienne des biais.

L'étape de correction des biais " corrige " les biais des données GCM par des comparaisons avec les données historiques de la *Global Meteorological Forcing Dataset* (GMFD) (DOI: <https://doi.org/10.5065/JV89-AH11>). En effet, GMFD rassemble les données de réanalyse avec les observations et est disponible à des résolutions spatiales de 0,25 degré, 0,5 degré et 1,0 degré, et à des résolutions temporelles de 3 heures, journalière et mensuellement. Le développement de NEX-GDDP-CMIP6 a utilisé, comme indiqué précédemment, les données moyennes journalières de 0,25 degré pour chaque variable de 1960 à 2014. Pour chaque variable climatique d'un jour donné, l'algorithme génère la fonction de distribution cumulative (CDF) pour les données de la GMFD et pour les simulations rétrospectives du GCM, respectivement, en regroupant et en triant les valeurs sources correspondantes (jour de l'année +/- 15 jours) sur la période de référence pour capturer une représentation complète de valeurs candidates pour une variable particulière. Il compare ensuite les deux CDF à différents seuils de probabilité afin d'établir une carte des quantiles entre les données GCM et les données climatiques historiques. Sur la base de cette carte, les valeurs du GCM dans n'importe quel quantile de la CDF (par exemple, $p = 90\%$) peuvent être traduites en valeurs correspondantes de la GMFD dans le même quantile de la CDF. En supposant que la CDF des simulations GCM est stable sur les périodes rétrospective et prospective, pour "corriger" les variations climatiques futures projetées, l'algorithme recherche simplement le quantile de probabilité associé aux valeurs climatiques prédites à partir de la CDF GCM estimée, identifie les valeurs climatiques observées correspondantes au même quantile de probabilité dans la CDF GMFD, puis accepte ces dernières en tant que

prévisions climatiques ajustées. Les projections climatiques ajustées de cette manière ont la même CDF que les données de la GMFD ; par conséquent, les biais possibles dans la structure statistique (la variance, en particulier) des sorties originales du GCM sont éliminés par cette procédure.

4.1. Spatial Désagrégations

Après la correction des données GCM, une désagrégation spatiale est réalisée pour les ajuster à la résolution plus fine des données GMFD à 0,25 degré. Cette désagrégation utilise un algorithme complexe plutôt qu'une simple interpolation spatiale linéaire, pour préserver les détails spatiaux des observations. Il génère d'abord une climatologie journalière lissée à partir observations maillées sur la période de référence 1950-2014 à l'aide d'une transformée de Fourier rapide conservant trois harmoniques à la fois à la résolution native et à la résolution GCM. Ensuite, il compare les données corrigées des GCM avec cette climatologie pour calculer des facteurs d'échelle. Ces facteurs sont ensuite interpolés sur la grille GMFD à résolution fine et appliqués aux données GMFD pour obtenir les champs climatiques désirés à résolution réduite. En somme, l'algorithme fusionne les données observées avec les changements simulés par les GCM pour produire les résultats finaux.

5. Indices climatiques extrêmes

Les indices climatiques extrêmes sont définis pour répondre aux questions sur la tendance de ces indices, ayant des impacts sur la société et le système naturel ([Alexander et al., 2006](#) ; [Zhang et al., 2011](#)). Afin d'analyser les changements globaux dans les conditions climatiques, il est essentiel de développer un ensemble d'indices climatiques extrêmes qui sont statistiquement robustes et couvrent différents types de climats ([Zhang et al., 2011](#)). Les indices internationalement acceptés obtenus à partir de la température moyenne journalière et des précipitations permettent aux chercheurs de comparer systématiquement les extrêmes climatiques dans différentes régions et ont également l'avantage de surmonter la plupart des contraintes sur la diffusion des données quotidiennes qui sont appliquées dans de nombreux pays ([Zhang et al., 2011](#)). En ce qui concerne la capacité des indices climatiques extrêmes à représenter les extrêmes climatiques dans différents climats 10 indices pluviométriques seront utilisés dans le cadre de cette thèse de doctorat. Le choix de ces indices a été adapté pour mettre en évidence les événements de précipitations extrêmes et leur fréquence d'une part et

d'autre part comparé entre leurs variations dans la zone d'étude. En outre, l'évaluation des indices peut fournir des preuves solides du changement climatique actuel et futur dans le pays.

Avant d'introduire différents types d'indices climatiques extrêmes, il convient de montrer comment les changements dans la moyenne des variables climatiques entraînent statistiquement des variations des extrêmes climatiques. La figure II.5 présente des illustrations schématiques des distributions de probabilité de la température journalière, qui ont tendance à être approximativement gaussiennes, et des précipitations quotidiennes, ces dernières ayant une distribution asymétrique (Zwiers et al., 2013). Cependant, le gel du sol, les processus de rétroaction ou les contraintes d'équilibre énergétique peuvent modifier la forme des fonctions de densité de probabilité de température (Fischer et Schär, 2009 ; Zazulie et al., 2010 ; Mueller et Seneviratne, 2012). Dans le cas de la température, les variations des fréquences des extrêmes sont fortement affectées par les changements de la moyenne ; un déplacement modérément faible de la distribution vers des températures plus élevées augmenterait considérablement les extrêmes chauds et diminuerait les extrêmes froids (Zwiers et al., 2013). En outre, le taux d'extrêmes peut également être affecté par des changements dans la forme des queues de la distribution de température, qui pourraient devenir plus larges ou plus étroites, ou pourraient devenir quelque peu asymétriques plutôt que symétriques comme représenté. Dans une distribution asymétrique des précipitations, un changement dans la moyenne de la distribution affecte généralement sa variabilité ou sa propagation. Par conséquent, une augmentation des précipitations moyennes impliquerait probablement une augmentation des précipitations extrêmes massives, et vice versa. De plus, la forme de la queue droite pourrait également changer, affectant les extrêmes (Zwiers et al., 2013).

L'équipe d'Experts sur la détection et sur les indicateurs des changements climatiques (Expert Team on Climate Change Detection Indices (ETCCDI)), de l'Organisation météorologique mondiale (OMM) recommande 27 indices, dont 16 sont liés à la température et 11 aux précipitations. Ces indices sont dérivés des températures maximales et minimales journalières et des précipitations journalières (Alexander et al., 2006). Ces indices étaient basés sur les indices de l'évaluation européenne du climat (ECA) et choisis pour échantillonner une grande variété de climats. Ils comprenaient des indicateurs tels que le nombre total de jours de gel, les jours d'été et le nombre maximal de jours secs consécutifs dans une année (Frich et al., 2002). Les principales différences entre les différents indices d'extrêmes sont la façon dont la distribution a été définie et l'endroit où le seuil d'indice est placé (Zwiers et al., 2013)

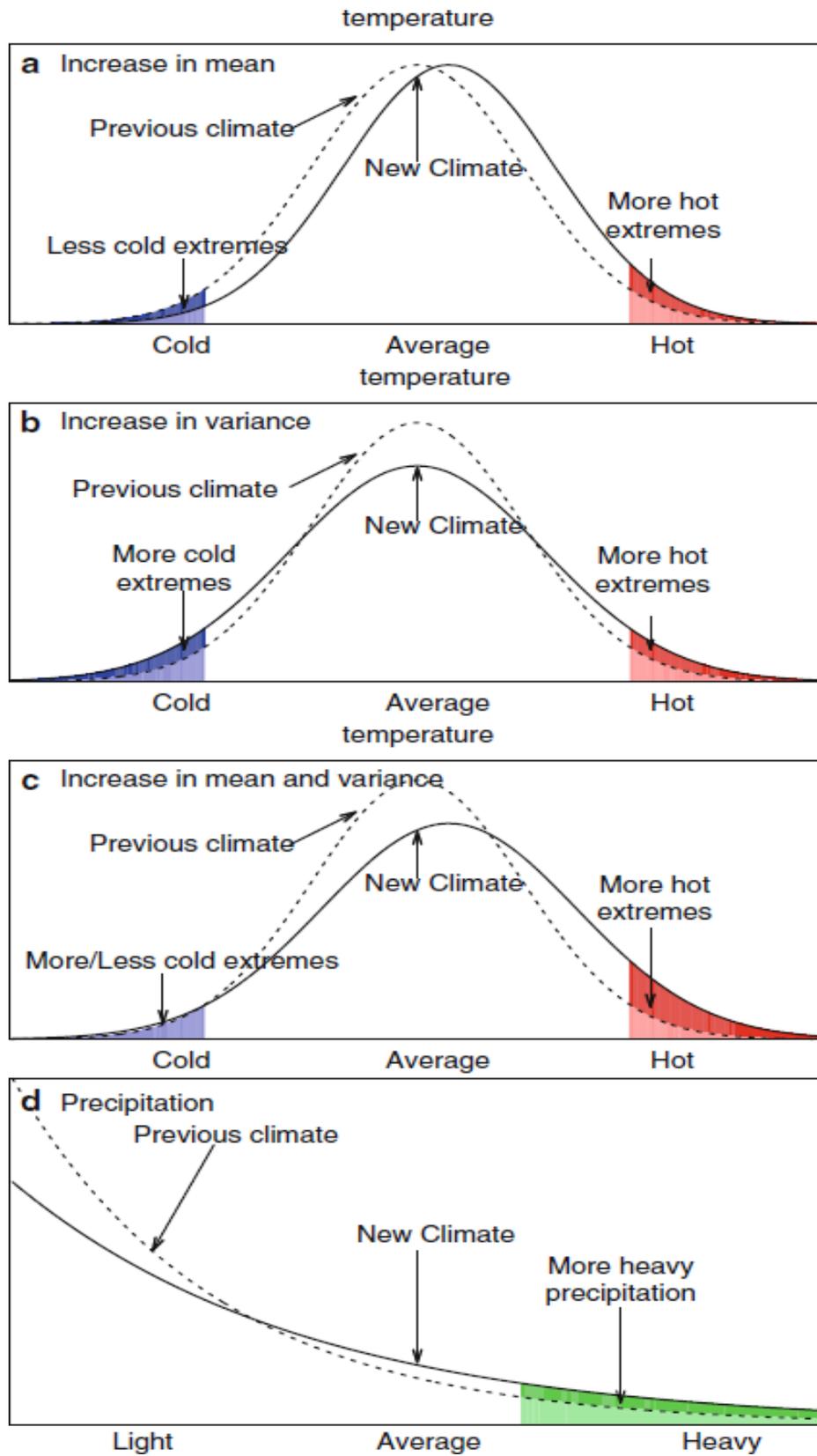


Figure II.5 : Schéma des distributions de probabilité de la température et des précipitations journalières. Les extrêmes sont exprimés par des zones ombragées (Zwiers et al., 2013).

Généralement, les indices des extrêmes de précipitations peuvent être classés en cinq classes ([Peterson et al., 2001](#)) :

- Indices absolus, dépendent à la fois des quantités de précipitations et de l'occurrence et indiquant les valeurs minimales ou maximales au cours d'une saison ou d'une année ; par exemple, le maximum annuel d'un jour ou de cinq jours de précipitations (RX1day et RX5day).
- Indices de seuil, qui se réfèrent au nombre de jours où un seuil est dépassé ; dépendent de la quantité de précipitations. Par exemple, les indices R10mm et R20mm
- indices de durée, dépendent de l'occurrence des précipitations et qui mettent en évidence la durée de la période humide et sèche, CWD et CDD.
- les indices basés sur le percentile, qui décrivent les taux de dépassement supérieurs ou inférieurs à un seuil, défini comme un percentile dérivé d'une période de référence
- d'autres indices, qui n'entrent dans aucune des catégories ci-dessus, y compris les indices de précipitations annuelles totales (PRCPTOT), l'indice d'intensité quotidienne simple (SDII) et la contribution annuelle des jours très humides (R90PTOT et R95PTOT) ([Alexander et al., 2006](#)). Le Tableau II.3 répertorie les noms et les définitions des indices calculés dans cette étude. La plupart des définitions des indices ont été tirées des travaux de l'Équipe d'experts sur la détection et les indicateurs des changements climatiques (Expert Team on Climate Change Detection Indices (ETCCDI)).

Tableau II.3 : Indices des précipitations extrêmes

	Name	ID	Définition	Unit
1	Total annuel des pluies	PRCPTOT	Précipitations totales annuelles des jours pluvieux ($RR \geq 1,0$ mm)	mm
2	Hauteur maximale des Précipitations d'un jour	RX1day	Précipitation totale maximale d'un jour pluvieux	mm
3	Cumul maximal des précipitations de 5 jours	RX5day	Précipitation totale maximale sur 5 jours pluvieux consécutifs pendant l'année	mm
4	Jours très pluvieux	R95p	Quantité de précipitations annuelles ≥ 95 percentile	mm
5	Jours extrêmement pluvieux	R99p	Quantité de précipitations totales annuelles ≥ 99 percentile	mm
6	Jours pluvieux consécutifs	CWD	Nombre maximal de jours consécutifs avec des précipitations journalières ≥ 1 mm	jour
7	Jours secs consécutifs	CDD	Nombre maximal des jours consécutifs avec précipitations journalières < 1 mm	jour
8	Jours de fortes précipitations supérieures à 10 mm	R10	Nombre de jours annuels avec des précipitations journalières ≥ 10 mm	jour
9	Jours de très fortes précipitations supérieures à 20 mm	R20	Nombre de jours annuels avec des précipitations journalières ≥ 20 mm	jour
10	Indice d'intensité journalière simple	SDII	Précipitations annuelles totales divisées par le nombre de jours humides	(mm/jour)

6. Principales méthodes d'analyse des tendances des variables climatiques

Les tendances des variables hydroclimatiques peuvent être examinées par de nombreuses manières différentes. Les données in situ, les données satellitaires, les tests statistiques, les approches et les modèles informatiques jouent un rôle important dans l'amélioration de la compréhension des variations complexes du temps et de l'espace dans les systèmes hydroclimatiques (Chingombe et al., 2005). Avant de choisir les méthodes qui seront utilisées pour étudier les tendances, il est important de prendre en compte les caractéristiques des données, telles que la longueur et la distribution des données, la structure de l'échantillon, les types possibles de tendances existantes (monotones ou par étapes) et la présence de la

persistance et de fluctuations saisonnières (Cluis et al., 1989). Certaines des méthodes les plus couramment utilisées pour l'étude des tendances dans la recherche scientifique liée à l'hydroclimatique impliquent l'utilisation de la méthode bootstrap (par exemple Douglas et al., 2000 ; Di Stefano et al., 2000 ; Chingombe et al., 2005), la simulation de Monte Carlo (par exemple Yue et al., 2002b), le test Spearman's rho (SR) (par exemple McLeod et al., 1991 ; Yue et al., 2002a), des modèles de régression (par exemple Svensson et al., 2005 ; Shao et al., 2010 ; Timofeev et Sterin, 2010), le test de tendance Mann-Kendall (MK) (par exemple Burn et Hag Elnur, 2002 ; Yue et al., 2003 ; Partal et Küçük, 2006 ; Partal, 2010), des tests statistiques non paramétriques (par exemple Birsan et al., 2005 ; Zhang et al., 2009 ; Durdu, 2010 ; Zhang et al., 2010 ; Liu et al., 2010), et des approches d'analyse par ondelettes (WA) (par exemple, Kirkup et al., 2001 ; Anctil et Coulibaly, 2004 ; Kim, 2004 ; Prokoph et Patterson, 2004 ; Partal et Küçük, 2006 ; Adamowski et al., 2009 ; Partal, 2010).

Dans cette thèse, le test de Mann-Kendall (MK) ainsi que ses sept versions modifiées ont été utilisés. En effet, la méthode de Mann-Kendall (MK) (Mann, 1945 ; Kendall, 1975) est la méthode non paramétrique la plus couramment utilisée et qui a été recommandée pour l'identification des tendances monotones dans différentes séries chronologiques, hydrologiques et climatologiques par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) (Yue et al., 2002). Le seuil de signification pour tous les tests a été fixé à 5 et 10 % (Yue et al., 2002). Les versions modifiées du test MK ont trois objectifs différents (Hamed et Rao, 1998; Storch, H. V, 1999 ; Yue et Wang, 2002; Yue et Wang, 2004; Hamed 2008). Certains de ces tests étaient d'éliminer les effets de la persistance à court terme (STP) en éliminant l'influence de l'autocorrélation de la série chronologique sur la tendance (MMK-PW et TFPW), ou en corrigeant la variance introduite par l'autocorrélation (MMKY et MMKH). D'autres tests ont été conçus pour éliminer les effets de la persistance à long terme (LTP). Un seul test (MMK-LTP) a été utilisé à cette fin. De même, l'existence d'une autocorrélation positive dans les données augmente la probabilité de détecter une tendance alors qu'elle n'existe pas en réalité, tandis qu'une autocorrélation négative diminue la probabilité de détecter une tendance significative (Hamed et Rao 1998).

6.1. Le test de tendance Mann-Kendall (MK)

Le test de tendance MK original (Mann, 1945 ; Kendall, 1975) est un test de corrélation de rang pour deux ensembles d'observations entre le rang des valeurs et les valeurs ordonnées dans l'ensemble de données (Zhang et al., 2001 ; Déry et Wood, 2005 ; Kallache et al., 2005 ;

Zume et Tarhule, 2006, Burn et al., 2010). De nombreuses études ont utilisé le test de tendance MK dans leur analyse de données afin d'évaluer et d'identifier les tendances dans une série temporelle. C'est peut-être le test non paramétrique le plus largement utilisé pour la détection de tendances dans les études hydrologiques (Yue et Pilon, 2004 ; Hamed, 2008). En effet, non seulement il est simple à utiliser, mais il résiste également à une distribution biaisée, à des valeurs manquantes et des valeurs qui se situent en dehors de la limite de détection, et à la nature non stationnaire des données (Lins et Slack, 1999 ; Partal et Küçük, 2006). Puisqu'il est basé sur le rang, il met l'accent sur l'ordre du rang, et non sur la valeur réelle des enregistrements eux-mêmes. Ainsi, si certaines valeurs sont manquantes ou si une valeur aberrante est présente, les résultats ne seraient pas beaucoup affectés, car les rangs ne changeraient pas de manière significative. L'hypothèse du test MK est basée sur l'occurrence d'un changement monotone, et non d'un changement de rupture (Chaouche et al., 2010). Le test MK, cependant, fonctionne toujours bien même si une rupture est présente dans la série temporelle (Lemaitre, 2002 ; Chaouche et al., 2010). Chaouche (2010) a également souligné que les changements dans une série temporelle affectée par le changement climatique devraient se produire de manière plus progressive.

Önöz et Bayazit (2003) ont comparé la puissance du test de Student pour la détection de tendance, estimée par simulation de Monte Carlo pour différentes distributions de probabilité, avec celle du test non paramétrique de Mann-Kendall dans l'analyse des séries de débits annuels sur 107 sites à travers la Turquie. Ils ont constaté que le test t avait un peu plus de puissance que le test MK lorsque la distribution est normale ; cependant, pour une distribution asymétrique, le test MK était plus puissant, en particulier lorsque le coefficient d'asymétrie est élevé (Önöz et Bayazit, 2003). De même, lorsque Yue et Pilon (2004) ont comparé la puissance du test t paramétrique, du test MK, du test de pente basé sur l'amorçage (BS-slope) et du test MK basé sur l'amorçage (BS-MK), ils ont constaté que le test t et le test de pente BS étaient plus puissants que les tests basés sur le classement pour les données ayant une distribution normale, quelle que soit la linéarité de la tendance. Pour les données qui ne sont pas normalement distribuées, les tests basés sur le classement ont été beaucoup plus puissants pour détecter les tendances, quelle que soit leur linéarité (Yue et Pilon, 2004).

L'hypothèse nulle du test MK pour un ensemble de données ($X_h, h = 1, 2, 3, \dots, n$) est que l'ensemble de données est indépendant et identiquement distribué (Yue et al., 2002). L'hypothèse alternative indiquerait qu'une tendance monotone est contenue dans l'ensemble

de données. Le calcul de la statistique de test MK, également connu sous le nom de tau de Kendall calculé comme suit (Yue et al., 2002) :

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n sig(X_i - X_j) \quad (\text{II.02})$$

X_i désigne les valeurs de données ordonnées, et n est la longueur des observations ; le test du signe est (Yue et al., 2002) :

$$sig(X_i - X_h) = \begin{cases} +1 & \text{si } X_i > X_h \\ 0 & \text{si } X_i = X_h \\ -1 & \text{si } X_i < X_h \end{cases} \quad (\text{II.03})$$

Lorsque le nombre d'observations est supérieur à 10, le tau de Kendall a une distribution qui est approximativement normale avec une moyenne nulle (Hamed et Rao, 1998 ; Adamowski et Bougadis, 2003). La variance de la statistique peut ensuite être calculée à l'aide de l'équation suivante (Kendall, 1975 ; Yue et al., 2002)

$$V(S_k) = \{n(n-1)(2n+5) - \sum_{h=1}^n t_h(h)(h-1)(2h+5)\}/18 \quad (\text{II.04})$$

t_h représente le nombre de liens dans la mesure h . La statistique de test standardisée pour le test de Mann-Kendall, qui est approximativement distribuée normalement et ayant une moyenne nulle et une variance d'un, peut ensuite être calculée en utilisant (Yue et al., 2002) :

$$Z = \begin{cases} \frac{S_k-1}{\sqrt{var(S_k)}} & \text{si } S_k > 0 \\ 0 & \text{si } S_k = 0 \\ \frac{S_k+1}{\sqrt{var(S_k)}} & \text{si } S_k < 0 \end{cases} \quad (\text{II.05})$$

Les valeurs de Z positives et négatives indiquent que la direction de la tendance est à la hausse et à la baisse, respectivement. La valeur Z calculée est ensuite comparée à la variation normale standard à un certain niveau de signification statistique (α) (Hamed et Rao, 1998). Dans un test MK, si le $|Z|$ calculé est supérieur à $Z_{\alpha/2}$, cela implique qu'il y a une tendance significative (c'est-à-dire que l'hypothèse nulle ne doit pas être acceptée).

Si le niveau significatif utilisé est $\alpha = 5 \%$ (ou intervalles de confiance à 95 %) pour une probabilité bilatérale. La valeur absolue de ce score Z a ensuite été comparée à la valeur Z

critique bilatérale de $\alpha/2$. Les valeurs Z dans un test bilatéral pour $\alpha = 5\%$ sont de $\pm 1,96$. Si le score Z MK calculé se situe en dehors de la fourchette comprise entre $-1,96$ et $+1,96$, les tendances sont statistiquement significatives. Le test MK teste l'hypothèse nulle d'absence de tendance (observations indépendantes et ordonnées de manière aléatoire) contre l'hypothèse alternative de tendances monotones positives ou négatives dans le temps présentes dans l'ensemble de données analysé (Hirsch et Slack, 1984 ; Mohsin et Gough 2010 ; Karaburun et al., 2011).

Bien que le test de Mann-Kendall (MK) non paramétrique original soit robuste et couramment utilisé pour détecter les tendances des séries chronologiques dans de nombreuses études hydrologiques, mais il présente des limites. Il ne tient pas compte des effets de l'autocorrélation à court et à long terme sur la tendance à long terme. En effet, (Hamed et Rao 1998 ; Yue et Wang 2004). Serinaldi et Kilsby (2016) suggèrent que la présence d'une corrélation sérielle (autocorrélation) dans un ensemble de données peut conduire à une interprétation trompeuse des résultats, car elle augmente la probabilité de détecter une tendance significative dans le test MK même lorsqu'aucune tendance réelle n'existe. Cela souligne l'importance de prendre en compte l'autocorrélation lors de l'analyse des données temporelles (Yue et al. 2002 ; Serinaldi et Kilsby 2016 ; Fathian et al. 2016 ; Piyooosh et Ghosh 2017 ; Zamani et al. 2017).

6.2. La pente de Sen

La pente de Sen (SS) est utilisée pour déterminer l'ampleur de la tendance (Thiel 1950 ; Sen 1968). Elle peut être calculée comme suit :

$$\beta = \text{Mediane}\left(\frac{x_s - x_t}{s - t}\right) \text{ for } t < s \quad (\text{II.06})$$

Où x_s et x_t sont les données de la série de s et t ; si n données sont présentes dans la série chronologique, le nombre de pentes peut être calculé comme suit :

$$N_s = \frac{n(n-1)}{2} \quad (\text{II.07})$$

La moyenne de la pente de N_s permet de calculer le TSA. Par conséquent, si N_s est un nombre impair,

$$\left(\frac{N_s+1}{2}\right) \quad (\text{II.08})$$

De même, si NS est pair,

$$\left(\frac{N_s}{2} + \frac{N_s+1}{2}\right) \quad (\text{II.09})$$

6.3. Traitement de la corrélation sérielle dans l'analyse des séries chronologiques

Plusieurs approches ont été proposées pour éliminer l'influence de la corrélation sérielle sur le test MK, telles que le traitement de pré-blanchissement (Von Storch 1995), le pré-blanchissement sans tendance (TFPW) (Yue et al. 2002), le traitement de surblanchiment (OW) (Şen 2017), le préblanchiment sans tendance corrigé et non biaisé (Serinaldi et Kilsby, 2016) et le traitement OW modifié (Xie et al. 2022 ; Şen 2023). D'autres méthodes ont suggéré une correction de la variance du test de Mann-Kendall en utilisant des formules empiriques (Hamed et Rao, 1998) et des simulations de Monte Carlo (Yue et Wang 2004). En outre, des études récentes ont montré que l'importance des tendances des variables hydroclimatiques est également sensible à la présence d'une persistance de la variabilité à long terme (Hamed, 2008 ; Kumar et al., 2009 ; Ehsanzadeh et Adamowski, 2010 ; Machiwal et Jha, 2012 ; Shahid et al., 2014 ; Fathian et al., 2016 ; Ahmed et al., 2017, Taibi et al., 2022 ; Assani et al., 2021 et 2022). Dans ce contexte, Hamed (2008) a proposé une approche alternative au test de Mann-Kendall qui tient compte de la persistance à long terme (LTP) ou du phénomène de Hurst (Hurst 1951) pour améliorer la capacité du test à discriminer la variabilité multi-échelle d'une tendance unidirectionnelle. Dans les données de séries chronologiques, la présence de persistance à long terme (LTP) peut conduire à une surestimation de l'importance du test MK, comme l'ont souligné Markonis et Koutsoyiannis (2015). Cette caractéristique peut être évaluée à l'aide du coefficient de Hurst (H), qui varie de 0 à 1. Une valeur de 0,5 implique un comportement aléatoire, où les fluctuations n'ont pas de tendance persistante. Les valeurs supérieures à 0,5 indiquent une persistance positive, ce qui suggère que les tendances observées ont tendance à persister, tandis que les valeurs inférieures à 0,5 indiquent une persistance négative (Koutsoyiannis 2003). La méthode la plus efficace pour calculer le coefficient de Hurst (H) à partir de données hydrologiques est l'analyse de la plage redimensionnée (R/S), connue pour sa simplicité de calcul et sa faible complexité temporelle. Cependant, elle nécessite l'absence de tendances sérielles pour éviter une surestimation de H (Yue et Wang, 2004). Pour y remédier, Hamed et Rao (1998) ont

introduit une méthode qui applique l'estimation de tendance non paramétrique de Sen pour éliminer les tendances apparentes avant d'évaluer la persistance de H.

Tous les tests utilisés ont été résumés dans le tableau II.4 et sont accompagnés de références fournissant des descriptions détaillées. Nous orientons les lecteurs vers ces références pour obtenir plus de détails sur leurs descriptions mathématiques et leur application en hydroclimatologie. Cette approche a été adoptée afin de ne pas alourdir le texte avec des équations.

Tableau II.4 : Synthèse des tests de Mann-Kendall appliqués à la série d'indices de précipitations extrêmes analysés

Name of the test	Acronyme	Objectif du contrôle	Références
Original Mann-Kendall	MK	Détecter la tendance à long terme (ne prend pas en compte STP ou LTP)	Mann, 1945 ; Kendall, 1975
Élimination des effets de la persistance à court terme (STP)			
Méthode de pré-blanchiment	MMK	Éliminer l'influence de l'autocorrélation en pré-blanchissant les données	Storch, H. V. (1999)
Méthode de pré-blanchissement sans tendance	TFPW	Éliminer l'autocorrélation en pré-blanchissant les données	Yue et Wang 2002
Test de Mann-Kendall modifié ¹	MMKY	Éliminer l'autocorrélation par correction de la variance	Yue et Wang 2004
Test de Mann-Kendall modifié ²	MMKH	Éliminer l'autocorrélation par correction de la variance	Hamed et Rao 1998
GAL 3 Mann-Kendall modifié	MMKH3lag	Considérant uniquement les trois premiers décalages significatifs	Hamed et Rao 1998
GAL 1 Mann-Kendall modifié	MMKY1lag	Correction de la variance en ne prenant en compte que le décalage 1	Yue et Wang, 2004
Élimination des effets de la persistance à long terme (LTP)			
Persistance à long terme MK	PLT (persistance à Long Terme)	Éliminer les effets du LTP	Hamed (2008)

6.3.1. Méthode de pré-blanchiment

Pour surmonter l'effet de la corrélation sérielle dans les séries temporelles, Kulkarni et von Storch (1995) ont proposé la méthode de pré-blanchissement. Un coefficient de corrélation couramment utilisé (c'est-à-dire un coefficient d'autocorrélation entre la valeur de la série temporelle au temps t et sa valeur au temps $t-1$) pour déterminer si une autocorrélation est présente dans un ensemble de données est le coefficient d'autocorrélation lag-1. Si les coefficients d'autocorrélation lag-1 calculés d'une série temporelle sont significatifs à un niveau de signification prédéfini (par exemple, le niveau de 5%), l'autocorrélation est éliminée par des procédures de pré-blanchiment (avant d'appliquer la tendance MK) en supposant que l'autocorrélation de la série temporelle est un processus AR(1). Un processus autorégressif de premier ordre ou un processus AR(1) est supprimé ou réduit en soustrayant l'observation à l'instant $t-1$ (qui a été multipliée par son autocorrélation estimée à lag-1) de l'observation à l'instant t (Kulkarni et von Storch, 1995). Ceci est fait afin de créer une série temporelle qui est échantillonnée indépendamment et distribuée de manière identique. Kulkarni et von Storch (1995) ont utilisé des simulations de Monte Carlo sur 1000 séries chronologiques pré-blanchies (avec un processus AR (1) à l'origine) et avec $\alpha = 5\%$, les procédures de pré-blanchissement ont produit des taux de rejet de l'hypothèse nulle correcte qui sont très proches de la valeur α . Kulkarni et von Storch (1995) ont noté que la méthode de pré-blanchissement n'est pas puissante pour les données avec grandes valeurs de coefficient autorégressif (α) ou lorsque la longueur de la série temporelle est courte. La méthode de pré-blanchissement a été utilisée dans Zhang et al. (2001) ; Burn et Hag Elnur (2002) ; et Mohsin et Gough (2010).

6.3.2. Test MK modifié de Hamed et Rao (1998)

Hamed et Rao (1998) ont développé une autre version modifiée du test MK, qui vise à résoudre le problème des structures de corrélation en série dans un ensemble de données lors de la détection de sa tendance. Hamed et Rao (1998) ont étudié l'effet de la corrélation sérielle sur la moyenne et la variance du test de Mann-Kendall original ; ils ont proposé une approximation empirique de la variance pour le test MK, qui est considérée comme appropriée pour les données autocorrélées. En effet, l'existence d'une corrélation sérielle dans un ensemble de données peut modifier la variance du test MK d'origine (l'existence d'une autocorrélation positive entraînera une sous-estimation de la variance de S et l'existence d'une autocorrélation négative entraînera l'effet inverse). Hamed et Rao (1998) ont utilisé leur version modifiée proposée du test MK et des séries de précipitations et d'écoulement présentant une autocorrélation et ils ont constaté que la puissance du test est la même que

celle du test MK original avec une meilleure précision lorsque les données présentent une autocorrélation. Dans cette version du test MK modifié, Hamed et Rao (1998) ont changé le calcul de la variance de la statistique de test S :

$$Var(s') = \left(\frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \right) \cdot \left(\frac{n}{n_e^*} \right) \quad (\text{II.10})$$

n_e^* désigne le nombre effectif d'échantillons requis pour tenir compte de l'autocorrélation dans l'ensemble de données (l'autocorrélation entre les rangs est utilisée au lieu d'entre les valeurs de données réelles pour évaluer n_e^*). La notation n/n_e^* est le facteur de correction associé à l'autocorrélation des données. Empiriquement, n/n_e^* s'exprime par (Hamed et Rao, 1998) :

$$\frac{n}{n_e^*} = 1 + \left(\frac{2}{n^3 - 3n^2 + 2n} \right) \cdot \sum_{f=1}^{n-1} (n-f)(n-f-1)(n-f-2)\rho_e(f) \quad (\text{II.11})$$

$\rho_e(f)$ symbolise la fonction d'autocorrélation entre les rangs des observations, calculée à l'aide de l'inverse de l'équation (3.20) (Kendall, 1975 ; Hamed et Rao, 1998). Cela transforme l'autocorrélation de rang en autocorrélation de données normalisée, car l'estimation de la structure d'autocorrélation normalisée est nécessaire pour évaluer la variance de S pour les données X dont la distribution peut ne pas être normale ou plutôt arbitraire (Hamed et Rao, 1998) :

$$\rho_e(f) = 2 \sin\left(\frac{\pi}{6}\rho_e(f)\right) \quad (\text{II.12})$$

7. Analyse des ruptures dans les moyennes des séries chronologiques

La méthode MK ne révèle pas quand ou comment les moyennes d'une série temporelle évoluent, donc lorsqu'on analyse des séries chronologiques, on utilise d'autres tests en plus pour repérer ces points de changements potentiels. Dans la littérature, trois tests supplémentaires pour identifier les points de changement potentiels ont été utilisés : le test de Pettitt (PT), le test de Pettitt modifié (PTM) et le test de Lombard (LT). Alors que les deux premiers tests détectent exclusivement les changements brusques, le dernier test peut détecter à la fois les changements brusques et progressifs. Contrairement au test de Pettitt (PT) original (Pettitt 1979), le test de Pettitt modifié (MPT) (Serinaldi et Kilsby, 2016) et le test de

Lombard rendent compte de l'influence de l'autocorrélation sur la détection des ruptures dans la moyenne des séries temporelles (Lombard, 1987 ; Quessy et al., 2011).

7.1. Test de Pettitt

Le test de Pettitt (Pettitt, 1979) est une méthode statistique utilisée pour détecter les ruptures ou les changements significatifs dans la moyenne d'une série temporelle. Il évalue si un point spécifique dans la série est significativement différent du reste des données en comparant les deux périodes avant et après ce point. En se base sur le test de Mann-Whitney (Mann & Whitney, 1947) à deux variables, qui utilise les rangs, il cherche à détecter un changement unique à un moment inconnu t . L'hypothèse nulle suppose l'absence de changement dans la distribution, tandis que l'hypothèse alternative suggère une différence entre les deux périodes. Si la statistique de test dépasse un seuil critique, cela indique une rupture statistiquement significative dans la série temporelle. Les équations de calcul du test de Pettitt sont détaillées dans l'article de Pettitt (1979). Le test de Pettitt modifié suit le même principe que le test de Pettitt, mais il effectue une analyse préalable de la série pour éliminer l'effet de l'autocorrélation en utilisant la méthode de pré-balancement. Les équations de calcul du test de Pettitt modifié, ainsi que les fondements théoriques de la méthode de pré-balancement utilisée, sont détaillées dans l'article de Serinaldi et Kilsby (2016).

7.2. Test de Lombard

Le test de Lombard est un outil utilisé pour identifier la nature et le timing des changements dans la moyenne et/ou la variance d'une série statistique. Contrairement à d'autres méthodes telles que celle de Pettitt souvent employées en hydrologie, la méthode Lombard est capable de distinguer entre des changements brusques et progressifs dans la moyenne et la variance. Ainsi, elle offre une approche plus exhaustive que les méthodes traditionnelles qui ne détectent que les changements soudains. Les bases mathématiques du test de Lombard ont été élaborées en détail par Lombard (1987) et Quessy et al. (2011).

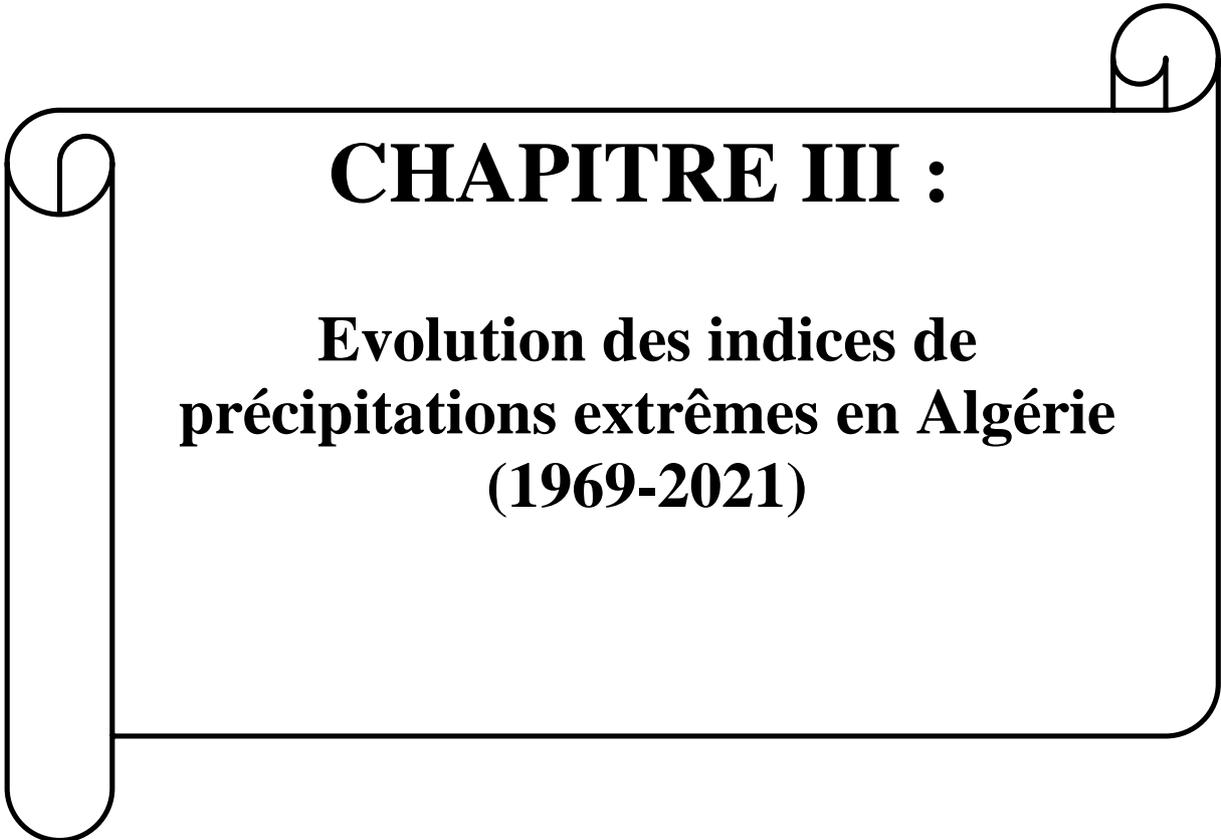
8. Conclusion

Après avoir présenté dans le détail les différentes méthodes et données qui seront utilisées ultérieurement, il est temps de conclure ce chapitre en soulignant l'importance de ces éléments pour les chapitres suivants. Nous avons examiné les caractéristiques physiques de la région d'étude, y compris la situation géographique et le climat avec ces différentes anomalies. Ensuite, nous avons abordé les données observées, en mettant en évidence le processus de

comblement des lacunes par le package "reddPrec" et en discutant du potentiel de contrôle de la qualité et de comblement des lacunes.

Nous avons également introduit les ensembles de données des modèles climatiques, discutés de la correction du biais et de la spatialisation des données à une échelle réduite, ainsi que des indices climatiques extrêmes que leurs évolutions temporelle et spatiale seront étudiées. Enfin, les principales données et méthodes d'analyse des tendances des variables climatiques, notamment le test de tendance de Mann-Kendall (MK), la pente de Sen et les méthodes de traitement de la corrélation sérielle qui seront utilisées pour réaliser les objectifs de cette thèse de doctorat ont été présentées.

Les deux dernières sections ont examiné l'analyse des ruptures dans les moyennes des séries chronologiques, en mettant en évidence le test de Pettitt et le test de Lombard qui seront également employés pour caractériser les changements dans la distribution de probabilité des séries des indices extrêmes. En résumé, ce chapitre fournit une base solide pour les chapitres suivants, où ces méthodes seront appliquées pour analyser les tendances et les ruptures dans les données climatiques de la région d'étude.



CHAPITRE III :

Evolution des indices de précipitations extrêmes en Algérie (1969-2021)

Le sixième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC AR6) a identifié des régions particulièrement sensibles au changement climatique, notamment le bassin méditerranéen auquel appartient l'Algérie (GIEC, 2021). Les tendances au réchauffement observées dans cette région devraient s'intensifier tout au long du XXI^e siècle en fonction des futures concentrations de gaz à effet de serre (Cos et al., 2022 ; GIEC, 2021 ; Zittis, 2019), entraînant des risques climatiques sans précédent, notamment une augmentation de la fréquence et de l'intensité des extrêmes. Conformément aux études précédentes (par exemple, Seneviratne et al., 2021 ; Politi et al., 2023 ; Lionello et Scarascia, 2020 ; Ribes et al., 2019), les tendances des précipitations extrêmes dans la région méditerranéenne manquent généralement de cohérence spatiale. Bien que des diminutions aient été observées dans la partie occidentale de la Méditerranée (Insua-Costa et al., 2022 ; Politi et al., 2023), certaines augmentations ont été observées dans la partie orientale (Ribes et al., 2019 ; Mathbout et al., 2018). En ce qui concerne les variations observées dans les composantes des sécheresses passées dans la région méditerranéenne, il est essentiel de noter que la tendance de leur fréquence et de leur intensité diffère d'une région à une autre (Caloiero et al., 2018 ; Raymond et al., 2018). Néanmoins, il existe un consensus beaucoup plus fort concernant l'évolution future potentielle de ces sécheresses dans la région. Les scénarios de projection indiquent clairement une augmentation attendue de la fréquence et de la gravité des sécheresses hydrologiques et météorologiques (Ozturk et al., 2015 ; Seker & Gumus, 2022 ; Pulido-Velazquez et al., 2022).

L'Algérie, tout comme d'autres pays méditerranéens, est particulièrement vulnérable aux effets du changement climatique, avec une augmentation constante des épisodes de précipitations extrêmes au fil des décennies (Schilling et al., 2012 ; GIEC, 2021). Des périodes de sécheresse récurrentes ont entraîné une baisse critique des niveaux d'eau dans les barrages (Touati, 2010 ; Meddi and Eslamian, 2021), aggravée par une diminution des précipitations et une augmentation des températures (Meddi et Hubert, 2003 ; Taibi et al., 2015 ; Achour et al., 2020 ; Bouabdelli et al., 2022). Ces conditions ont également conduit à des inondations dévastatrices dans diverses régions du pays, avec une augmentation de leur fréquence et de leur intensité algériennes (Korichi et al. (2016); Kastali et al., 2020 ; Hadjij et al. 2021). Malgré cela, il y a un manque d'études comparatives sur la variation temporelle des précipitations extrêmes dans les différentes zones climatiques d'Algérie. Une telle analyse est essentielle pour comprendre l'impact du changement climatique et développer des stratégies d'adaptation efficaces pour faire face à ces événements extrêmes persistants.

Comprendre la variation temporelle des précipitations extrêmes implique d'analyser l'évolution des indices extrêmes sur de longues périodes. Cependant, le test de Mann-Kendall (MK) non paramétrique original, couramment utilisé pour détecter les tendances des séries chronologiques (Yue et Wang, 2004), présente des limites. Il ne tient pas compte des effets de l'autocorrélation à court et à long terme sur la tendance à long terme. Des études antérieures ont mis en évidence la mauvaise interprétation potentielle des résultats des

tests MK en raison de l'autocorrélation (Hamed et Rao 1998 ; Yue et Wang 2004). Diverses approches ont été proposées pour atténuer l'impact de l'autocorrélation, y compris le traitement de pré-blanchissement (Von Storch 1995), le pré-blanchissement sans tendance (TFPW) (Yue et al. 2002), le traitement de surblanchiment (OW) (Şen 2017), le préblanchiment sans tendance corrigé et non biaisé (Serinaldi et Kilsby, 2016) et le traitement OW modifié (Xie et al. 2022 ; Şen 2023). Des corrections de variance (Hamed et Rao, 1998) et des simulations de Monte Carlo (Yue et Wang 2004) ont également été suggérées pour le test MK. Des recherches récentes soulignent la sensibilité des tendances hydroclimatiques à la variabilité à long terme. Hamed (2008) a présenté une alternative au test MK, en considérant la persistance à long terme (LTP) évaluée par le coefficient de Hurst (H) (Hurst 1951).

La présente étude vise à analyser les précipitations extrêmes au cours de la période 1969 à 2021 dans différentes zones climatiques de l'Algérie, qui comprennent le climat méditerranéen chaud « Csa », le climat semi-aride froid/chaud « Bsk/Bsh » et le climat désertique froid « Bwk ». L'analyse sera réalisée en utilisant les indices de précipitations extrêmes définis par l'équipe d'experts sur les indices de détection des changements climatiques (ETCCDI), un groupe conjoint de la Commission de climatologie et de Clivar CCI/CLIVAR/JCOMM. Les indices seront calculés à partir des données de précipitations quotidiennes obtenues à partir de 16 stations pluviométriques réparties dans les différentes zones évoquées précédemment, telles que définies par les critères de Köppen-Geiger.

Pour établir la variabilité à long terme des dix indices de précipitations extrêmes, ce chapitre appliquera sept tests statistiques du test de Mann-Kendall révisé. La prévision future des précipitations extrêmes dans les zones climatiques de l'Algérie nécessite une compréhension approfondie de leur évolution passée. Ainsi, ce chapitre vise à relever les défis mentionnés précédemment en offrant un aperçu détaillé de la variabilité des précipitations extrêmes dans ces régions pendant la période 1969-2021.

1. Zone d'étude et méthodes

Comme mentionné dans la section 1.3 du chapitre II, ce chapitre utilise 16 stations pluviométriques soigneusement sélectionnées pour représenter de manière fiable les différentes zones climatiques du nord de l'Algérie. Les emplacements et les caractéristiques de ces 16 stations météorologiques sont présentés en détail dans le chapitre II.

1.1. Analyse des données

Pour chacune de ces seize stations, les dix indices climatiques de précipitations extrêmes sur une échelle annuelle (Chapitre II : Tableau II.3 : Indices des extrêmes de pluie) suggérés par l'équipe d'experts de l'Organisation météorologique mondiale (OMM) sur les indices de détection du changement climatique

(ETCCDI) pour l'analyse climatique régionale (Zhang et Feng 2004 ; Zhang et al., 2011) ont été calculés. Ces indices ont été estimés à l'aide du logiciel « RCLimDex » (Zhang et Feng 2004).

1.2. Analyse statistique des précipitations extrêmes et des séries d'indices climatiques

La variation temporelle des précipitations extrêmes peut être mieux comprise en examinant la tendance des indices extrêmes sur de longues périodes. Le test de Mann-Kendall (MK) non paramétrique original, couramment utilisé pour détecter les tendances des séries chronologiques (Yue et Wang, 2004), présente des limites. Il ne tient pas compte des effets de l'autocorrélation à court et à long terme sur la tendance à long terme. Des études antérieures ont montré que l'autocorrélation dans les données observées peut conduire à une mauvaise interprétation des résultats des tests MK (Hamed et Rao 1998 ; Yue et Wang 2004). Serinaldi et Kilsby (2016) et suggèrent que la présence d'une corrélation sérielle positive augmente la probabilité de détecter une tendance dans le test MK même lorsqu'aucune tendance réelle n'existe. Cela souligne l'importance de prendre en compte l'autocorrélation lors de l'analyse des données temporelles (Yue et al. 2002 ; Serinaldi et Kilsby 2016 ; Fathian et al. 2016 ; Piyooch et Ghosh 2017 ; Zamani et al. 2017).

Plusieurs approches ont été proposées pour éliminer l'influence de la corrélation sérielle sur le test MK, telles que le traitement de pré-blanchissement (Von Storch 1995), le pré-blanchissement sans tendance (TFPW) (Yue et al. 2002), le traitement de surblanchiment (OW) (Şen 2017), le préblanchiment sans tendance corrigé et non biaisé (Serinaldi et Kilsby, 2016) et le traitement OW modifié (Xie et al. 2022 ; Şen 2023). D'autres méthodes ont suggéré une correction de la variance du test de Mann-Kendall en utilisant des formules empiriques (Hamed et Rao, 1998) et des simulations de Monte Carlo (Yue et Wang 2004). En outre, des études récentes ont montré que l'importance des tendances des variables hydroclimatiques est également sensible à la présence d'une persistance de la variabilité à long terme (Hamed, 2008 ; Kumar et al., 2009 ; Ehsanzadeh et Adamowski, 2010 ; Machiwal et Jha, 2012 ; Shahid et al., 2014 ; Fathian et al., 2016 ; Ahmed et al., 2017, Taibi et al., 2022 ; Assani et al., 2021 et 2022). Dans ce contexte, Hamed (2008) a proposé une approche alternative au test de Mann-Kendall qui tient compte de la persistance à long terme (LTP) ou du phénomène de Hurst (Hurst 1951) pour améliorer la capacité du test à discriminer la variabilité multi-échelle d'une tendance unidirectionnelle. Dans les données de séries chronologiques, la présence de persistance à long terme (PLT) peut conduire à une surestimation de l'importance du test MK, comme l'ont souligné Markonis et Koutsoyiannis (2015). Cette caractéristique peut être évaluée à l'aide du coefficient de Hurst (H), qui varie de 0 à 1. Une valeur de 0,5 implique un comportement aléatoire, où les fluctuations n'ont pas de tendance persistante. Les valeurs supérieures à 0,5 indiquent une persistance positive, ce qui suggère que les tendances observées ont tendance à persister, tandis que les valeurs inférieures à 0,5 indiquent une persistance négative (Koutsoyiannis 2003). La méthode la plus efficace pour calculer le

coefficient de Hurst (H) à partir de données hydrologiques est l'analyse de la plage redimensionnée (R/S), connue pour sa simplicité de calcul et sa faible complexité temporelle. Cependant, elle nécessite l'absence de tendances sérielles pour éviter une surestimation de H (Yue et Wang, 2004). Pour y remédier, Hamed et Rao (1998) ont introduit une méthode qui applique l'estimation de tendance non paramétrique de Sen pour éliminer les tendances apparentes avant d'évaluer la persistance de H.

1.3. Analyse des tendances et des ruptures dans les moyennes de la série des indices de précipitations extrêmes

Dans un premier temps, les différentes séries des dix indices de précipitations extrêmes sur une échelle annuelle ont été soumises à une analyse de tendance à long terme utilisant la méthode de Mann-Kendall (MK) (Mann, 1945 ; Kendall, 1975) ainsi que les sept tests statistiques de Mann-Kendall révisés, comme répertoriés dans le Tableau II.4 du chapitre II. Dans la continuité de l'analyse statistique, trois tests supplémentaires ont été effectués pour identifier les points de rupture potentiels : le test de Pettitt (PT), le test de Pettitt modifié (MPT) et le test de Lombard (LT). Alors que les deux premiers tests détectent exclusivement les changements brusques, le dernier test peut détecter à la fois les changements brusques et progressifs. Contrairement au test de Pettitt (PT) original (Pettitt 1979), le test de Pettitt modifié (MPT) (Serinaldi et Kilsby, 2016) et le test de Lombard rendent compte de l'influence de l'autocorrélation sur la détection des ruptures dans la moyenne des séries temporelles (Lombard, 1987 ; Quessy et al., 2011). Le niveau de signification pour tous les tests a été fixé à 5 % et 10 %.

2. Résultats

2.1. Variation spatiale des indices de précipitations extrêmes

En ce qui concerne la variabilité spatiale, les intervalles de confiance à 95 % autour de la moyenne des indices de précipitations extrêmes ETCCDI, calculés pour chacune des stations dans les différentes zones climatiques sur la base des données observées sur la période de 1969 à 2021, sont affichés dans le tableau III.1. Pour toutes les stations pluviométriques étudiées, la valeur moyenne de l'indice PRCPTOT est estimée à 412 ± 17 mm. La valeur maximale de l'indice PRCPTOT (1206,80 mm) a été observée à la station de Tizi Ouzou, tandis que le minimum (16,10 mm) observé à la station de Ksar Chellala. Pour les précipitations maximales, la valeur maximale des deux indices RX1day et RX5day est observée,

respectivement, à la station de Souk-Ahras (277mm) et de Tizi-Ouzou (352mm). En ce qui concerne les indices du nombre de jours de fortes précipitations, les valeurs moyennes des deux indices R10mm et R20mm sont estimées, respectivement, à $12,8 \pm 0,8$ jours et à $4,6 \pm 0,3$ jours. La valeur maximale de l'indice R10mm est observée à la station de Jijel (40 jours) et l'indice R20mm à la station de Tizi-Ouzou (22 jours). Pour les indices de précipitations des jours très humides, les valeurs moyennes des deux indices R95p et R99p sont estimées, respectivement, à $97,6 \pm 6,5$ mm et à $31,6 \pm 3,8$ mm. La valeur maximale de l'indice R95p est observée à la station de Tizi-Ouzou (664mm) et l'indice R99p à la station de Souk-Ahras (524mm). Le nombre de jours secs (CDD) est estimé en moyenne à $79,5 \pm 4,1$ jours, $70,8 \pm 3,6$ jours et $94,7 \pm 6,2$ jours, respectivement pour les zones Csa, Bsk/Bsh et Bwk. Le nombre maximum de jours secs pour toutes les stations (270 jours) est observé dans la station de Ksar Chellala. Enfin, pour l'indice du nombre maximum de jours humides consécutifs (CWD) et l'indice d'intensité moyenne des précipitations journalière (SDII) sont estimés, respectivement, à $5,0 \pm 0,2$ jours et $8,04 \pm 0,19$ mm/jour. La valeur maximale de l'indice CWD a été observée à la station de Jijel (15 jours) pour les stations de la zone Csa, à la station de Souk Ahras (14 jours) pour les stations de la zone Bsk/Bsh et à la station de Msila (8 jours) pour les stations de la zone Bwk. La valeur maximale de l'indice SDII a été estimée à 23,70 mm/jour, 22 mm/jour et 15,60 mm/jour, respectivement pour les zones Csa, Bsk/Bsh et Bwk. En ce qui concerne la variabilité spatiale, les caractéristiques statistiques des indices de précipitations extrêmes ETCCDI calculés pour chacune des stations, dans les différentes zones climatiques, à partir des données observées sur la période 1969 à 2021 sont présentées sous la forme d'une boîte et en moustache dans la figure III.1.

PRCPTOT : Pour les stations de la zone climatique Csa, la valeur moyenne de l'indice PRCPTOT est estimée à 600 ± 26 mm pour l'ensemble des six stations pluviométriques étudiées. La valeur maximale de l'indice PRCPTOT (1206,80 mm) a été observée à la station de Tizi Ouzou, tandis que le minimum (160,50 mm) à la station de Médéa. Dans la zone climatique semi-aride froid/ chaud (BSK, BSH), la valeur moyenne de l'indice PRCPTOT est estimée à 383 ± 19 mm pour l'ensemble des 6 stations pluviométriques. La valeur maximale de l'indice PRCPTOT (1192,40 mm) a été observée à la station de Souk Ahras, tandis que le minimum (87,00 mm) à la station de Cheikh Larbi Tebessi. Dans la zone climatique désertique froide (Bwk), la valeur moyenne de l'indice PRCPTOT est estimée à $173,23 \pm 12,89$ mm pour l'ensemble des

4 stations pluviométriques. La valeur maximale de l'indice PRCPTOT (477,60 mm) a été observée à la station Msila, tandis que le minimum (11,50 mm) a été observé à la station de Ksar Chellala.

RX1jour : Pour la pluviométrie maximale d'un jour (RX1jour), la valeur moyenne pour les 6 stations pluviométriques situées dans la zone Csa est estimée à $55,32 \pm 2,6$ mm. Les valeurs maximales (149,40 mm) et minimales (07 mm) de RX1jour ont été observées aux stations Jijel et Tizi Ouzou. Dans la zone semi-aride Bsk/Bsh, la valeur moyenne pour les 6 stations est estimée à $42,52 \pm 2,98$ mm. La valeur maximale RX1jour (277,30 mm) a été observée à la station Souk Ahras tandis que la valeur minimale RX1jour (10,9 mm) a été observée aux stations Batna et Cheikh Larbi Tebessi. Pour les 4 stations situées dans la zone désertique de Bwk, la valeur moyenne est estimée à $26,10 \pm 2,03$ mm. Les valeurs maximales (97,60 mm) et minimales (4,90 mm) de RX1jour ont été observées aux stations Msila et Ksar Chellala, respectivement.

RX5day : La valeur moyenne de l'indice de précipitations totales maximum sur 5 jours de pluie consécutifs au cours de l'année (mm) (RX5day) pour la zone Csa est de $101,67 \pm 4,94$ mm. Les valeurs maximales (352,30 mm) et minimales (21,6 mm) ont été observées à la station de Tizi Ouzou. Dans la zone semi-aride Bsk/Bsh, la valeur moyenne de l'indice RX5day est de $69,27 \pm 4,13$ mm. La valeur maximale du RX5jour (280,9 mm) a été observée à la station Souk Ahras, tandis que le minimum (17,40 mm) a été observé à la station Batna. Dans la zone Bwk, la valeur moyenne de l'indice RX5day est de $38,18 \pm 2,97$ mm. La valeur maximale (122,10 mm) a été observée à la station Boussaâda, tandis que la valeur minimale (4,90 mm) a été observée à la station de Ksar Chellala.

R10mm : La valeur moyenne du nombre de jours annuels avec des précipitations journalière supérieures ou égales à 10 mm, dans la zone Csa, est de $19,31 \pm 0,88$ jours. Le maximum a été observé à la station de Jijel (40 jours) tandis que le minimum (0 jour) a été observé aux stations de Tizi Ouzou et Médéa. Pour la zone Bsk/Bsh, la valeur moyenne de l'indice R10mm est de $11,70 \pm 0,61$ jours. Le maximum (29 jours) a été observé aux deux stations de Souk Ahras et Constantine, tandis que le minimum (1 jour) a été observé à la station de Cheikh Larbi Tebessi. Pour la zone Bwk, la valeur moyenne de l'indice R10mm est de $4,83 \pm 0,51$ jours. Le maximum (19 jours) a été observé au niveau de la station de Msila, tandis que le minimum (0 jour) a été observé aux quatre stations situées dans cette zone désertique.

R20mm : La valeur moyenne du nombre de jours annuels avec des précipitations journalière supérieures ou égales à 20mm, dans la zone Csa, est de $7,78 \pm 0,51$ jours. Le maximum a été observé à la station Tizi Ouzou (22 jours) tandis que le minimum (0 jour) a été observé aux stations d'Annaba, Tizi Ouzou, Médéa et Oran. Pour la zone Bsk/Bsh, la valeur moyenne de l'indice R20mm est de $3,70 \pm 0,31$ jours. Le maximum (17 jours) a été observé à la station Souk Ahras, tandis que le minimum (0 jour) a été observé dans les stations Constantine, BBA, Chlef, Batna et Cheikh Larbi Tebessi. Pour la zone Bwk, la valeur moyenne de l'indice R20mm est de $1,30 \pm 0,21$ jour. Le maximum (8 jours) a été observé à la station de Msila, tandis que le minimum (0 jour) a été observé aux quatre stations situées dans cette zone désertique.

R95p : Pour la pluviométrie annuelle totale avec des précipitations supérieures au 95e percentile, dans la zone Csa, la valeur moyenne est estimée à $142,87 \pm 11,62$ mm pour l'ensemble des 6 stations pluviométriques étudiées. La valeur maximale de l'indice R95p (663,80 mm) a été observée à la station Tizi Ouzou, tandis que le minimum (0 mm) a été observé à toutes les stations de la zone. Dans la zone de climat semi-aride froid/ chaud (BSK, BSH), la valeur moyenne de l'indice R95p est estimée à $92,00 \pm 9,77$ mm pour l'ensemble des 6 stations pluviométriques. La valeur maximale de l'indice R95p (640,90 mm) a été observée à la station de Souk Ahras, tandis que le minimum (0 mm) a été observé au niveau de toutes les stations. Dans la zone climatique désertique froide (Bwk), la valeur moyenne de l'indice R95p est estimée à $39,23 \pm 6,58$ mm. La valeur maximale de l'indice R95p (311,80 mm) a été observée à la station de Msila, tandis que le minimum (0 mm) a été observé aux 4 stations de précipitations.

R99p : Pour les précipitations annuelles totales avec des précipitations supérieures au 99e percentile, dans la zone Csa, la valeur moyenne est estimée à $45 \pm 6,87$ mm. La valeur maximale de l'indice R99p (439,20 mm) a été observée à la station de Tizi Ouzou, tandis que le minimum (0 mm) a été observé pour toutes les 6 stations étudiées. Dans la zone climatique semi-aride froid/chaud (BSK, BSH), la valeur moyenne de l'indice R99p est estimée à $31,18 \pm 6,55$ mm. La valeur maximale de R99p (523,80 mm) a été observée à la station Souk Ahras, tandis que le minimum (0 mm) a été observé aux 6 stations de précipitations de la zone « Bsk/Bsh ». Dans la zone climatique désertique froide (Bwk), la valeur moyenne de l'indice R99p est estimée à $12,35 \pm 5,59$ mm et la valeur maximale de cet indice (168,70 mm) a été observée à la station de Msila, tandis que le minimum (0 mm) a été observé aux quatre stations de précipitations.

CDD : Le nombre moyen de jours secs (CDD) est estimé pour la zone Csa à $79,55 \pm 4,10$ jours. Le nombre maximum de jours secs dans la zone (253 jours) et le minimum (12 jours) ont été observés à la même station (Jijel). Dans la zone Bsk/Bsh, la valeur moyenne de l'indice CDD est de $70,77 \pm 3,56$ jours. Le nombre maximum de jours secs dans la zone (215 jours) a été observé à la station Cheikh Larbi Tebessi et le minimum (17 jours) a été observé à la station Constantine. Dans la zone Bwk, la valeur moyenne de l'indice CDD est de $95 \pm 6,14$ jours. Le nombre maximum (270 jours) et minimum (28 jours) de jours secs, dans la zone, a été observé à la même station (Ksar Chellala).

CWD : Pour le nombre de jours humides (CWD) dans la zone Csa, la moyenne de cet indice est estimée à $6,35 \pm 0,25$ jours. Le nombre maximum de jours humides (15 jours) et le minimum (2 jours) ont été observés aux stations de Jijel et Médéa. Dans la zone Bsk/Bsh, la valeur moyenne de l'indice CWD est de $4,77 \pm 0,21$ jours. Le nombre maximum de jours humides (14 jours) a été observé à la station de Souk Ahras, et le minimum (1 jour) a été observé à la station de Cheikh Larbi Tebessi. Dans la zone Bwk, la valeur moyenne de l'indice CWD est de $3,20 \pm 0,16$ jours. Le nombre maximum de jours humides dans la zone (8 jours) a été observé à la station de Msila et le minimum (1 jour) a été observé aux stations de Barika, Boussada et de Ksar Chellala.

SDII : L'indice d'intensité journalière simple (SDII) pendant la période humide dans la zone climatique Csa, est estimé à $9,5 \pm 0,28$ mm/jour en moyenne. Les valeurs SDII maximales (23,70 mm/jour) et minimales (3,07 mm/jour) ont été observées à la station de Médéa, respectivement. Dans la zone semi-aride Bsk/Bsh, la valeur moyenne pour les 6 stations est estimée à $7,76 \pm 0,27$ mm. Les valeurs SDII maximales (22 mm/jour) et minimales (3,50 mm/jour) ont été observées à la station de Cheikh Larbi Tebessi. Dans la zone désertique Bwk, la valeur moyenne pour les 4 stations est estimée à $6,28 \pm 0,31$ mm/jour. Les valeurs SDII maximales (15,60 mm/jour) et minimales (2,60 mm/jour) ont été observées aux stations de Barika et de Ksar Chellala, respectivement.

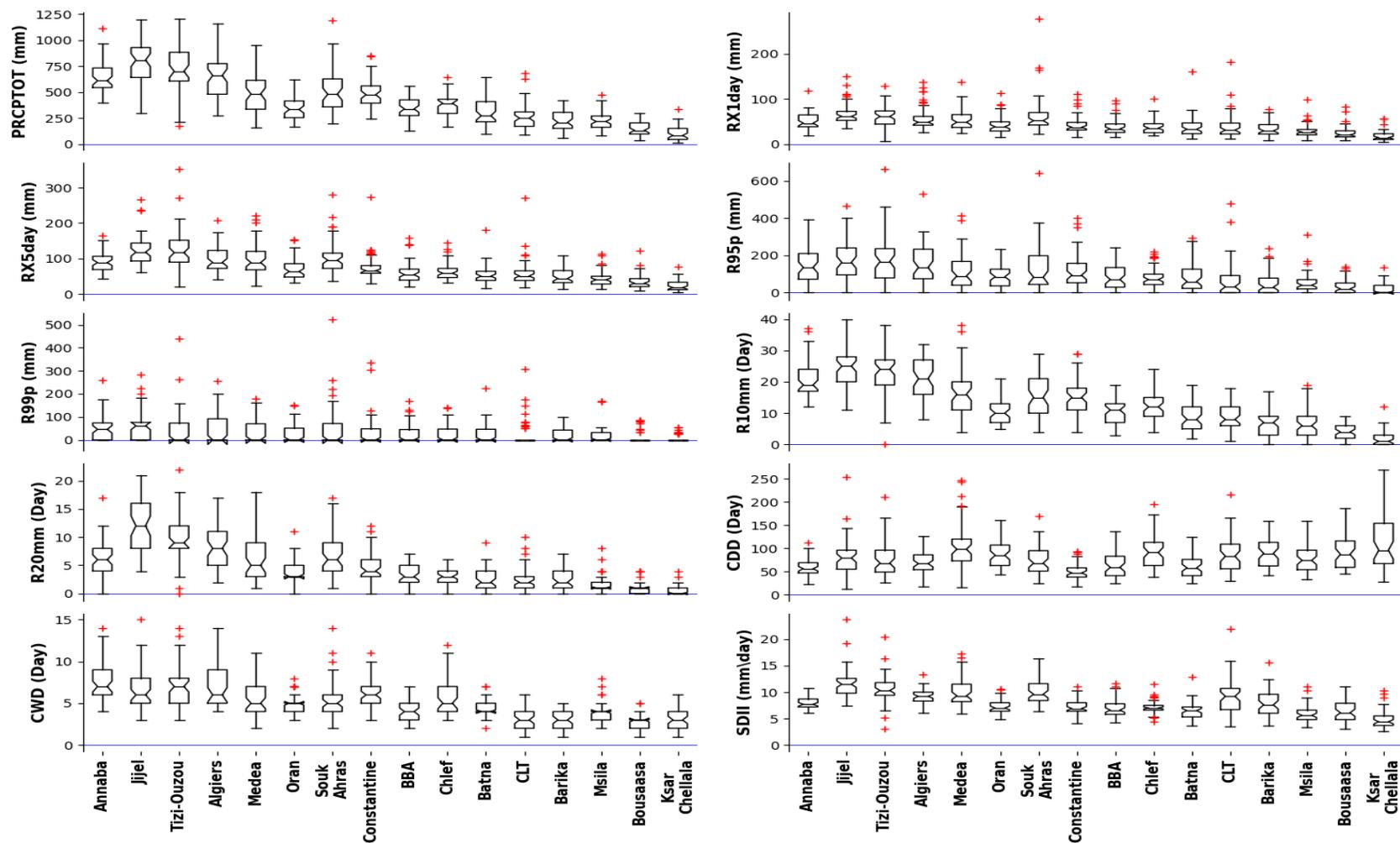


Figure III.1 : Diagramme en boîte et en moustaches (ligne : médiane ; boîte : premier et troisième quartile ; moustaches : intervalle de confiance de 99 % ; + marqueur : valeur aberrante) des dix indices de précipitations extrêmes

Chapitre III : Évolution des indices de précipitations extrêmes en Algérie (1969-2021)

Tableau III.1 : Intervalle de confiance (95 %) autour de la moyenne des dix indices de précipitations extrêmes

Stations	PRCPTOT	RX1day	RX5day	R95p	R99p	R10mm	R20mm	CDD	CWD	SDII
Unités	mm	mm	mm	mm	mm	jours	jours	jours	jours	(mm/day)
Annaba	640±40	50±5.20	90±7.80	147±24.79	47±15.46	21±1.54	6±0.86	60±5.11	7.43±0.62	8.04±0.33
Jijel	772±62	67±6.34	125±11.85	179±29.69	54±18.20	25±2.05	12±1.25	79±10.11	6.55±0.65	11.83±0.74
Tizi-Ouzou	712±59	62±6.30	126±14.81	172±34.52	53±21.07	23±2.11	10±1.14	76±9.58	7.04±0.67	10.55±0.69
Alger	643±52	57±6.95	99±9.87	152±28.68	48±17.51	21±1.72	8±1.02	70±6.65	6.75±0.61	9.20±0.39
Médéa	483±52	54±6.28	99±12.18	116±27.03	39±15.70	16±1.91	6±1.16	105±14.29	5.53±0.53	10.04±0.72
Oran	346±27	42±5.02	72±8.27	86±15.36	28±11.05	10±0.98	4±0.51	87±7.53	4.81±0.30	7.26±0.34
Souk-Ahras	516±60	62±11.18	101±12.73	132±33.39	47±24.78	16±1.74	7±1.00	74±8.18	5.08±0.60	9.97±0.62
Constantine	492±39	43±5.29	76±9.74	116±24.47	38±18.02	15±1.52	4±0.71	50±5.09	5.77±0.43	7.10±0.37
Bordj-Bou-Arreridj	349±26	38±4.69	60±7.63	83±17.66	27±11.27	10±1.09	3±0.53	61±6.91	4.43±0.33	7.00±0.46
Chlef	375±29	38±4.36	64±6.65	82±15.19	27±10.66	12±1.06	3±0.44	91±9.25	5.85±0.57	7.13±0.32
BATNA	305±34	37±6.09	56±7.24	76±18.43	26±11.37	9±1.10	3±0.52	61±6.91	4.28±0.29	6.39±0.44
Cheikh-Larbi-Tebessi	261±34	38±7.70	58±10.29	63±25.36	22±15.04	8±1.10	2±0.62	86±9.87	3.21±0.32	9.13±0.92
Barika	218±25	33±4.12	50±6.16	49±15.96	15±7.15	7±1.01	2±0.52	90±8.07	3.06±0.26	7.95±0.67
Msila	226±24	29±4.04	44±5.58	52±15.18	17±9.51	7±1.12	2±0.43	78±8.52	3.96±0.31	5.92±0.44
Boussaâda	148±18	25±3.97	35±5.50	32±10.15	11±6.82	4±0.66	1±0.30	93±10.12	2.85±0.23	6.39±0.55
Ksar-Chellala	100±19	18±2.97	24±4.07	23±8.49	7±4.00	2±0.62	1±0.23	118±17.61	2.87±0.38	4.81±0.46

2.2. Variabilité temporelle des indices de précipitations extrêmes

2.2.1. Zone de climat méditerranéen chaud (Csa)

Les résultats de l'analyse des tendances à long terme pour les indices de précipitations extrêmes au niveau des stations situées dans la zone *Csa* sont illustrés dans les figures III.2 et III.4. La figure III.2 montre les tendances des indices PRCPTOT, RX1day, RX5day, R95p et R99p, tandis que la figure III.4 illustre les tendances des indices R10mm, R20mm, CDD, CWD et SDII. Les figures III.3 et III.5 présentent les valeurs de Hurst H du test LTP et de la pente de Sen pour les séries d'indices de précipitations extrêmes.

PRCPTOT : L'indice annuel des précipitations « PRCPTOT » dans la zone climatique Csa à travers six stations de précipitations présente un schéma varié. Exceptionnellement, Alger (-2,34 mm/an) et Oran (-0,93 mm/an) montrent des tendances à la baisse (figures III.2 et III.3). Cependant, une tendance positive à long terme est observée dans la plupart des stations, notamment à la station de Médéa, où elle est significative avec les approches MK ($Z=2,48$), TFPW ($Z=2,28$), MMKY ($Z=2,98$) au niveau de signification de 5 % et MMKH ($Z=1,83$) au niveau de signification de 10 %. Des tendances similaires, significatives en utilisant l'approche MMKY, sont observées aux stations d'Annaba, Jijel et de Tizi Ouzou. L'élimination de la persistance à court terme à l'aide de diverses approches et de la persistance à long terme par LTP ($Z=1,13$) rend cette tendance insignifiante. En termes de taux d'augmentation, Annaba, Jijel et Tizi Ouzou montrent des augmentations de 1,21 mm/an, 2,45 mm/an et 2,84 mm/an, respectivement. Médéa présente la plus forte augmentation avec une moyenne de 4,82 mm/an. Le test LTP (Figure III.3) met en évidence une persistance significative à long terme au niveau de signification de 5 % à la station de Médéa et aux stations de Jijel et d'Alger au niveau de signification de 10 %.

RX1jour : À l'exception de la station d'Alger (-0,25 mm/an), la variabilité maximale des précipitations d'un jour (RX1jour) entre les cinq stations montre une tendance à la hausse à long terme pour toutes les approches (figures III.2 et III.3). Cependant, cette tendance est particulièrement significative à la station d'Annaba au niveau de signification de 5% avec les approches MMKY ($Z=4,72$) et LTP ($Z=2,42$). Le test LTP (Figure III.3) met en évidence une persistance significative à long terme à la station d'Annaba avec un niveau de signification de 5 %. Inversement, la tendance à la baisse à la station d'Alger n'est généralement pas significative, sauf pour les approches MMKY ($Z= -2,012$) et TFPW ($Z=1,665$) au niveau de signification de 5% et 10%, respectivement. L'application d'approches pour éliminer la persistance à court terme (MMK-PW, MMKH, MMKH3lag, MMKY1lag) et la persistance à long terme par LTP a rendu cette tendance négligeable au sens statistique. En termes de taux d'augmentation, la station d'Annaba affiche une augmentation de 0,18 mm/an, tandis que la station de Jijel affiche une augmentation minimale de 0,01 mm

par an. La station de Tizi Ouzou suit de près avec une augmentation annuelle de 0,15 mm, et La station de Médéa démontre l'augmentation la plus significative, avec une moyenne de 0,15 mm/an.

RX5day : La variation annuelle maximale consécutive des précipitations sur 5 jours (RX5day) aux stations d'Annaba, de Jijel et de Médéa révèle une tendance positive constante à long terme dans toutes les approches (figures III.2 et III.3). Plus précisément, Annaba présente une augmentation de 0,48 mm/an, Jijel avec 0,83 mm/an et Médéa avec 0,61 mm/an. Ces incréments sont statistiquement significatifs aux trois stations utilisant le test MMKY, affichant des valeurs Z de 5,18 à Annaba, 4,78 à Jijel et 2,10 à Médéa. D'autres tests montrent également des résultats significatifs avec des valeurs de Z comprises entre 1,77 et 2,97 pour Annaba et 2,07 à 2,72 pour Jijel, à l'exception du test MMKY. Au contraire, une tendance à la baisse significative au seuil de 10% a été observée à l'aide du test MMKY pour les stations de Tizi Ouzou ($Z=-1,85$) et d'Oran ($Z=-1,73$). De plus, la station d'Alger montre une tendance négative significative avec le test MK ($Z=-2,29$). Divers tests visant à éliminer l'autocorrélation ont montré des tendances négatives aux stations. Cependant, la tendance à la baisse observée aux trois stations est devenue insignifiante lors de l'élimination de la persistance à long terme par le test LTP. Notamment, Oran enregistre une baisse de 0,08 mm/an, suivie de Tizi Ouzou avec 0,26 mm/an, et Alger avec 0,65 mm/an (figure III.3).

R95p : À l'exception de la station d'Alger, l'indice R95p montre une tendance positive à long terme dans les cinq stations de la zone *Csa*. Plus précisément, Jijel a connu une augmentation notable de 1,84 mm/an, suivie d'Annaba avec un taux d'augmentation de 1,34 mm/an (Figure III.3). De plus, Médéa et Tizi Ouzou ont observé des taux de 0,97 mm/an et 0,30 mm/an, respectivement, tandis qu'Oran a le taux d'augmentation le plus faible avec 0,065 mm/an. Cependant, cette tendance à la hausse n'est significative qu'à la station de Jijel avec tous les tests sauf le test LTP. La station d'Annaba présente une signification ($Z=4,68$) au seuil de 5 % et Médéa ($Z=1,92$) au seuil de 10 %. Aucune tendance significative n'est observée aux stations de Tizi Ouzou et d'Oran pour l'ensemble des tests. La tendance à la baisse observée à la station d'Alger, avec un taux de -1,03 mm/an, n'est pas significative sauf avec les approches MMKY ($Z=-2,11$) au niveau de signification de 5%. L'application d'approches pour éliminer la persistance à court terme (MMK-PW, MMKH, MMKH3lag, MMKY1lag) et la persistance à long terme par LTP a rendu cette tendance insignifiante (figure III.2).

R99p : À l'exception des stations de Jijel et d'Alger, la variabilité temporelle de l'indice R99p sur quatre stations de la zone *Csa* montre une tendance positive à long terme pour toutes les approches (figures III.2 et III.3). Cependant, cette tendance à la hausse n'est significative qu'aux stations d'Annaba ($Z=1,761$) et d'Oran ($Z=1,688$) utilisant le test MMKY au niveau de signification de 10 %. Inversement, la diminution observée aux stations de Jijel et d'Alger n'est significative pour aucun test. Le test de LTP (Figure 3) met en évidence une persistance à long terme significative à la station d'Annaba.

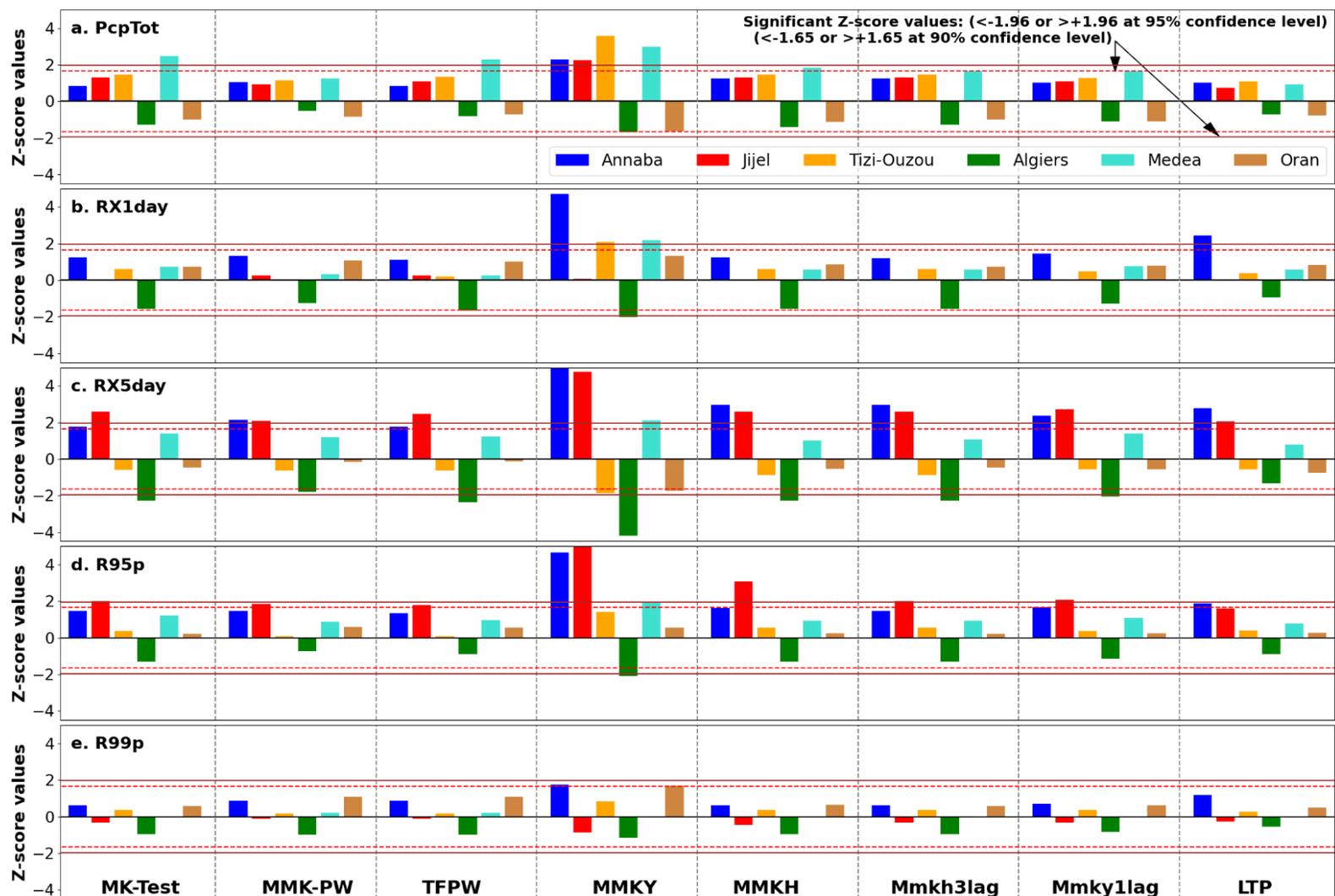


Figure III.2 : Z-scores dérivés de la méthode MK et de ses sept versions modifiées pour les séries d'indices de précipitations extrêmes qui sont exprimées en [mm] pour la période 1969-2021. Les quatre lignes rouges représentent les n valeurs critiques théoriques des tests au niveau de probabilité de 5 % et 10 %.

Chapitre III : Évolution des indices de précipitations extrêmes en Algérie (1969-2021)

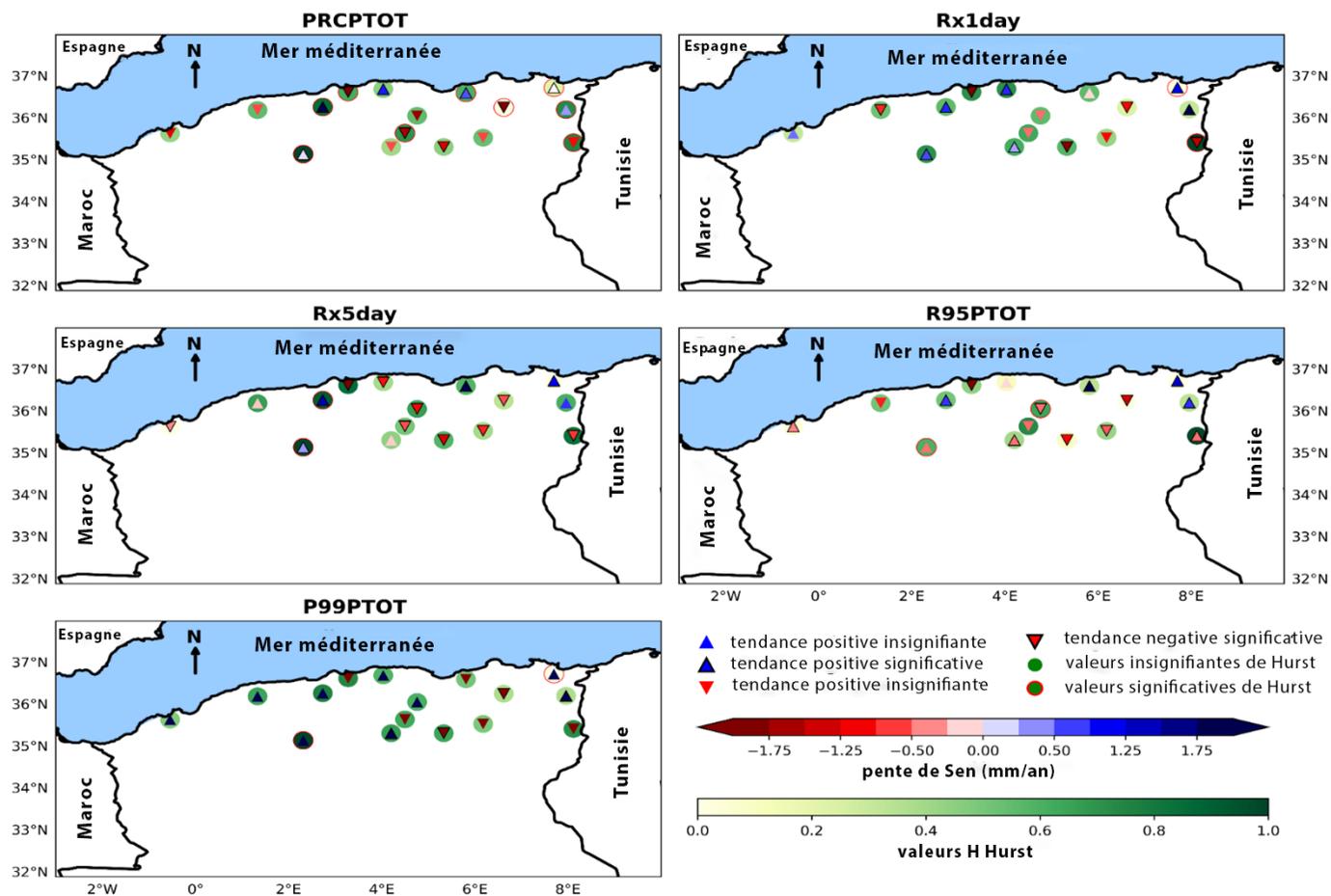


Figure III.3 : Valeurs de Hurst H du test LTP et de et de la pente Sen pour les séries d'indices de précipitations extrêmes qui sont exprimées en [mm/an] pour la période 1969-2021.

R10mm : L'indice R10mm affiche une tendance positive à long terme dans les différentes stations, à l'exception des stations d'Alger et d'Oran (figures III.4 et III.5). Cependant, cette tendance à la hausse est significative à la station de Médéa en utilisant les approches TFPW ($Z=1,69$) et MMKY ($Z=1,66$) au niveau de signification de 10 %. De même, à la station de Jijel, la signification est observée avec l'approche MK ($Z=2,24$) au niveau de 5% et à la station Tizi Ouzou ($Z=2,66$) en utilisant l'approche MMKY au niveau de signification de 5%. Néanmoins, aucune tendance significative n'est observée à la station d'Annaba. L'élimination de la persistance à court terme par TFPW ($Z=1,85$), MMKY ($Z=3,97$), MMKH ($Z=1,91$), MMKH3lag ($Z=1,91$) a maintenu l'importance à 10 % pour la station de Jijel. Cependant, il est devenu insignifiant après l'élimination de la persistance à long terme par LTP ($Z=1,45$). La tendance à la baisse constatée aux stations d'Alger ($Z=-2,02$) et d'Oran ($Z=-2,99$) n'est pas significative, sauf avec les approches MMKY au niveau de signification de 5%. L'élimination de la persistance à court terme par les approches MMK-PW, MMKH, MMKH3lag et MMKY1lag, et de la persistance à long terme par LTP, a rendu cette tendance insignifiante. Le test LTP (Figure III.5) met en évidence une persistance significative à long terme au niveau de signification de 5 % à la station de Médéa. En termes de taux de changement, Annaba connaît une augmentation moyenne de 0,04 jour/an, tandis que Jijel montre une occurrence plus élevée à environ 0,12 jour/an. Tizi Ouzou et Médéa suivent de près, enregistrant environ 0,09 jour/an. Cependant, Oran et Alger connaissent une diminution, avec une réduction d'environ 0,05 jour/an et 0,08 jour/an, respectivement (figure III.5).

R20mm : L'indice R20mm affiche une tendance positive à long terme dans toutes les stations, à l'exception de la station d'Alger (figures III.4 et III.5). Cependant, cette tendance à la hausse n'est pas significative uniquement à la station d'Oran avec toutes les approches, quels que soient les seuils de signification de 5 % ou 10 %. Le test MK appliqué aux indices R20mm montre une signification au niveau de 5% aux stations Annaba ($Z=2,42$), Jijel ($Z=3,45$) et Médéa ($Z=2,39$). Même après avoir éliminé la persistance à court et à long terme, cette tendance reste significative aux stations d'Annaba ($Z=2,66$ à $Z=7,99$) et de Jijel ($Z=2,9$ à $Z=9,86$). À la station de Tizi Ouzou, seul le test MMKY indique une tendance positive significative ($Z=3,45$). Cependant, la tendance à la baisse observée à la station d'Alger n'est significative avec aucun test. En examinant le taux de changement (Figure III.5), Annaba montre une augmentation moyenne de 0,07 jour/an, tandis que Jijel se démarque par une occurrence nettement plus élevée à une moyenne de 0,16 jour/an. Tizi Ouzou et Médéa suivent de près, les deux enregistrent environ 0,03 jour/an. En revanche, Alger

connaît une légère baisse, avec une moyenne de -0,03 jour/an. Enfin, Oran ne signale aucun changement sur cet aspect, avec une moyenne de 0 jour/an.

CDD : À l'exception d'Oran, les six stations de la zone Csa montrent une baisse à long terme de l'indice CDD, notamment significative aux stations de Médéa et Jijel. Médéa montre une diminution substantielle ($-3,83 < Z < -2,06$) pour tous les tests, tandis que Jijel montre une diminution significative uniquement avec l'approche MMKY ($Z = -2,31$). Tizi Ouzou présente une signification initiale ($Z = -1,84$) mais devient insignifiante après avoir éliminé la persistance à long terme. Aucune tendance à la baisse significative n'est observée aux stations d'Alger et d'Annaba (figure III.4). Inversement, la station d'Oran ne montre une tendance positive significative ($Z = 4,48$) qu'avec le test MMKY. Quant au taux de variation (pente de Sen), Annaba ne présente aucune variation (0 jour/an). Jijel connaît une légère diminution d'environ 0,3 jour/an (Figure III.5). Tizi-Ouzou montre une diminution plus prononcée, avec une réduction d'environ 0,51 jour/an. Alger connaît également une légère baisse, avec une moyenne de -0,03 jour/an. Médéa présente la diminution la plus significative, avec une réduction moyenne de 1,05 jour/an. En revanche, Oran voit une augmentation d'environ 0,333 jour/an.

CWD : Pour les six stations, à l'exception d'Annaba et d'Alger, la variabilité temporelle du nombre de jours de pluie consécutifs montre une tendance à la hausse à long terme pour toutes les approches. Cette tendance à la hausse est significative à la station Jijel ($-3,83 < Z < -2,06$) avec tous les tests, et à la station Médéa avec toutes les approches sauf le test LTP (MK ($Z = 2,48$), MMKPW ($Z = 2,69$), TFPW ($Z = 3,6$), MMKY ($Z = 2,48$), MMKH ($Z = 2,48$), MMKH3lag ($Z = 2,53$)) (figure III.4). Cependant, la persistance à long terme est significative au seuil de 5% à la station de Médéa (Figure III.5), et son élimination de la série temporelle CWD rend la tendance insignifiante ($Z = 1,55$). La tendance à la hausse observée aux stations de Tizi Ouzou et d'Oran n'est significative pour aucun test. Inversement, pour les stations d'Annaba et d'Alger, seul le test MMKY montre une tendance positive notable à un niveau de signification de 10%. En regardant les valeurs de pente du Sen du figure III.5, il devient évident que les stations d'Annaba, Tizi-Ouzou, Alger et Oran ne montrent aucun changement (0 jour/an). En revanche, les stations de Jijel et Médéa connaissent une légère augmentation d'environ 0,03 jour/an.

SDII : L'indice d'intensité journalière (SDII) montre des tendances distinctes entre les stations. Annaba et Jijel affichent une tendance à la hausse significative (plage Z : -3,83 à 9,57) pour toutes les approches. Cependant, Tizi Ouzou présente une tendance à la baisse significative, notamment avec le test MMKY ($Z =$

-2,57). Alger montre également une tendance négative significative au départ (plage Z : -2,13 à -1,79) mais devient insignifiante après avoir supprimé la persistance à long terme ($Z = -0,89$) (figure III.4). En examinant la figure III.5, Annaba et Jijel présentent des augmentations d'environ 0,02 mm/jour par an et 0,07 mm/jour par an, respectivement. Oran montre une légère augmentation d'environ 0,004 mm/jour par an. Au contraire des stations de Tizi Ouzou, Alger et Médéa affichent une diminution d'environ -0,02 mm/jour par an.

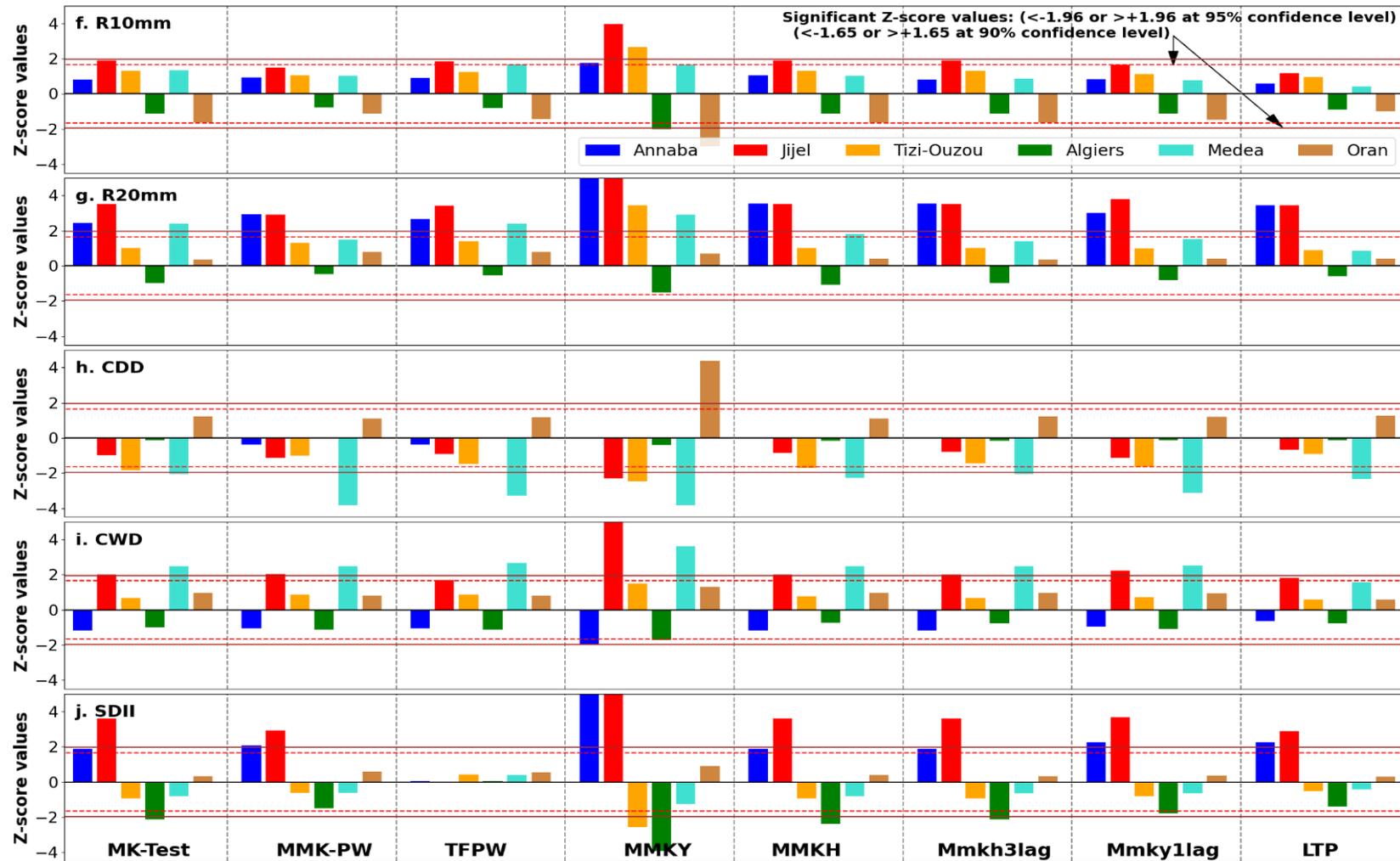


Figure III.4 : Z-scores dérivés de la méthode MK et de ses sept versions modifiées pour les séries d'indices de précipitations extrêmes qui sont exprimées en unités [jour] pour la période 1969-2021. Les quatre lignes rouges représentent les n valeurs critiques théoriques des tests au niveau de probabilité de 5 % et 10 %.

Chapitre III : Évolution des indices de précipitations extrêmes en Algérie (1969-2021)

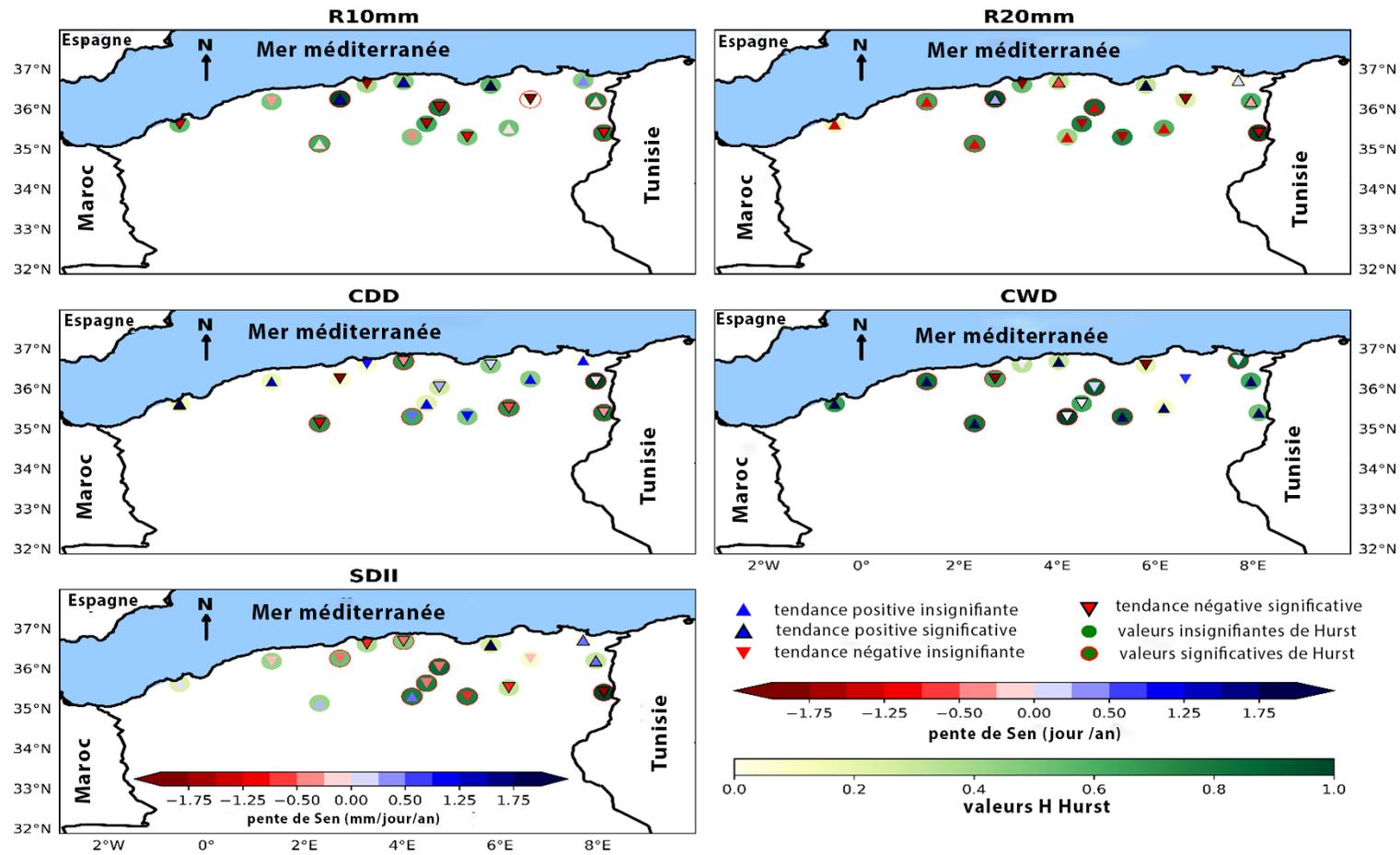


Figure III.5 : Valeurs Hurst H du test LTP et de la pente Sen pour les séries d'indices de précipitations extrêmes qui sont exprimées en [jour/an] pour la période 1969-2021.

2.2.2. Zone de climat semi-aride froid/chaud (BSK/BSH)

Les résultats de l'analyse de tendance à long terme des indices de précipitations extrêmes utilisant la méthode MK et ses sept versions modifiées pour les stations situées dans les zones BSK/BSH sont présentés dans les figures III.6 et III.7.

PRCPTOT : À l'exception de la station Souk Ahras, la variabilité temporelle de l'indice PRCPTOT montre une tendance négative à long terme en utilisant toutes les approches. Plus précisément, à Souk Ahras, il y a une augmentation de 1,96 mm/an (Figure III.3), ce qui indique une tendance légèrement plus humide. Inversement, Constantine et Bordj Bou Arreridj connaissent une diminution annuelle de 2,3 mm/an et 2 mm/an, respectivement. Chlef et Batna montrent des tendances plus douces avec des diminutions de 0,03 mm et 0,05 mm par an, respectivement. La station de Cheikh Larbi Tebessi montre la tendance à la réduction la plus prononcée, avec une baisse de 0,52 mm des précipitations chaque année. Cependant, cette tendance à la baisse n'est significative qu'à la station de Constantine en utilisant les approches MMKY ($Z = -5,92$), MMKY1lag ($Z = -2,01$) et LTP ($Z = -2,9$) au niveau de signification de 5 %, et MMK-PW ($Z = -1,85$), TFPW ($Z = -1,71$) au niveau de signification de 10 % (figures III.6). La suppression de la persistance à court terme par les approches MMKH et MMKH3lag a rendu cette tendance insignifiante. Les tendances à la baisse observées aux stations de Bordj Bou Arreridj, Chlef, Batna et Cheikh Arabi Tebessi n'étaient significatives avec aucun test. Néanmoins, la tendance à la baisse observée à la station Souk Ahras n'est significative avec aucune approche. Le test LTP (Figure III.3) indique une persistance significative à long terme au niveau de 5% pour les stations Souk Ahras et Cheikh Arabi Tebessi et au niveau de 10% pour la station Constantine.

RX1day : À l'exception de Souk Ahras, la variabilité temporelle RX1day au niveau de cinq stations montre une tendance négative à long terme en utilisant toutes les approches. Souk Ahras connaît une légère augmentation de 0,31 mm/an, suggérant une tendance légèrement plus humide (figures III.6 et III.3). Inversement, Constantine et Batna présentent une diminution de 0,11 mm/an, tandis que Bordj Bou Arreridj et Chlef présentent des diminutions plus légères de 0,05 mm et 0,09 mm par an, respectivement. Cheikh Larbi Tebessi montre la réduction la plus significative, diminuant de 0,18 mm/an. Cependant, cette diminution n'est significative qu'avec l'approche MMKY aux stations Constantine ($Z = -3,53$), Chlef ($Z = -2,13$) et Cheikh Arabi Tebessi ($Z = -2,18$) au niveau de signification de 5 % et à la station Batna ($Z = -1,68$) au

niveau de signification de 10 %. Aucune tendance à la baisse significative n'est observée à la station de Bourdj Bou Arreridj. Alors que, l'augmentation observée au Souk Ahras n'est significative qu'avec le test MMKY ($Z=3,639$) à 5 % de signification, et avec les tests MMKY1lag ($Z=1,75$) et LTP ($Z=1,84$) à 10 % de signification. Le test LTP indique une persistance significative à long terme au niveau de 5% à la station Cheikh Arabi Tebessi (Figure III.3).

RX5day : À l'exception de Souk Ahras et Chlef, la variabilité temporelle RX5day au niveau des autres stations montre une tendance négative à long terme en utilisant toutes les approches. Souk Ahras connaît une augmentation de 0,39 mm/an, et Chlef une légère augmentation de 0,005 mm/an. Inversement, Batna, Cheikh Larbi Tebessi, Bordj Bou Arreridj et Constantine marquent des diminutions de 0,23 mm/an, 0,2 mm/an, 0,3 mm/an et 0,17 mm/an respectivement (figure III.3). Cependant, cette tendance à la baisse n'est significative qu'avec l'approche MMKY aux stations Constantine ($Z=-2,54$), Bordj Bou Arreridj ($Z=-2,81$) et Batna ($Z=-3,05$) à un niveau de signification de 5 % et à la station Cheikh Arabi Tebessi ($Z=-1,85$) au niveau de signification de 10 % (figure III.6). La tendance à la baisse observée à la station de Chlef n'est significative pour aucun test. On remarque que la tendance à la hausse à la station Souk Ahras n'est significative qu'avec le test MMKY ($Z=3,64$) à 5 % de niveau de signification.

R95p : À l'exception de la station Souk Ahras, la variabilité temporelle de l'indice R95p des cinq stations est caractérisée par une tendance négative à long terme pour toutes les approches (figures III.6 et III.3). Plus précisément, Souk Ahras et Constantine montrent une augmentation annuelle de 1,0 mm et 0,001 mm, respectivement. Inversement, Chlef, BATNA, Cheikh Larbi Tebessi et Bordj Bou Arreridj observent une diminution à des taux de 0,56 mm/an, 0,007 mm/an, 0,22 mm/an et 0,06 mm/an, respectivement. Cependant, cette tendance à la baisse n'est significative qu'avec l'approche MMKY à la station Constantine ($Z=-3,11$) au niveau de signification de 5% et à la station Cheikh Arabi Tebessi ($Z=-1,79$) au niveau de signification de 10% (figure III.6). La tendance à la baisse observée aux stations Bourdj Bou Arreridj, Chlef et Batna n'est significative pour aucun test. Néanmoins, la tendance à la hausse observée à la station de Souk Ahras n'est significative qu'avec le test MMKY ($Z= 1,75$) au niveau de signification de 10 %.

R99p : Parmi les six stations, seules les stations de Souk Ahras, Chlef et Bordj Bou Arreridj présentent une tendance négative à long terme pour l'indice R99p, tandis que les stations de BATNA, Cheikh Larbi Tebessi et de Constantine présentent une tendance positive selon toutes les approches (figures III.6 et III.3).

Cependant, la tendance à la baisse n'est significative qu'avec l'approche MMKY à la station de Constantine ($Z=-2,152$) au niveau de signification de 5% (figure III.6). La tendance à la baisse observée aux stations de Bourdj Bou Arreridj, Chlef, Cheikh Arabi Tebessi et Batna n'est significative pour aucun test. Alors que, la tendance à la hausse observée à la station Souk Ahras n'est significative qu'avec le test MMKY ($Z=3,355$) au niveau de signification de 5%.

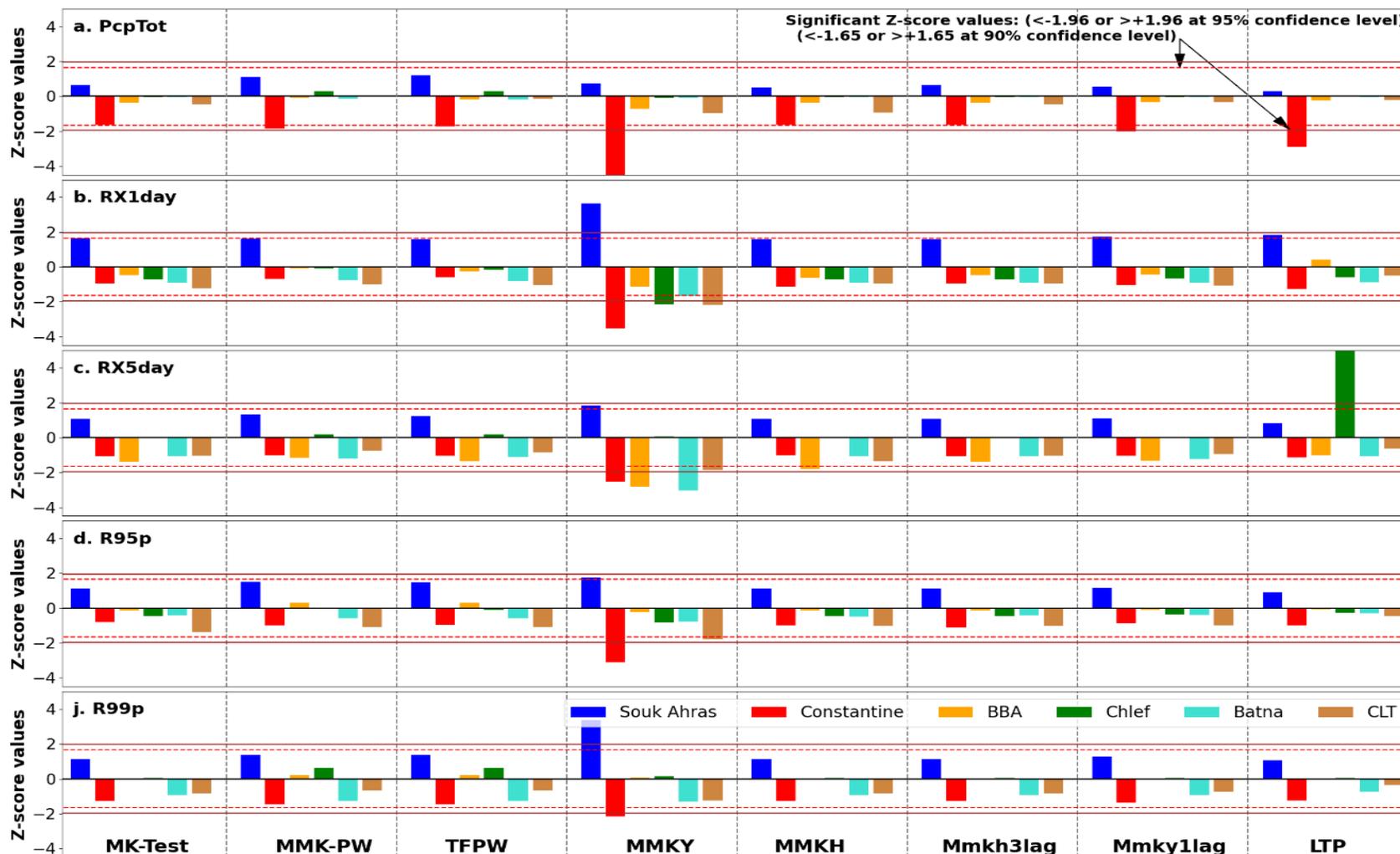


Figure III.6 : Z-scores dérivés de la méthode MK et de ses sept versions modifiées pour les séries d'indices de précipitations extrêmes qui sont exprimées en [mm] pour la période 1969-2021. Les quatre lignes rouges représentent les n valeurs critiques théoriques des tests au niveau de probabilité de 5 % et 10 %.

R10mm : À l'exception du Souk Ahras, l'indice R10mm montre une tendance à la baisse à long terme pour les différentes stations (figures III.7 et III.5). La tendance est significative à Constantine pour toutes les approches ($Z=-1,78 < Z < -4,52$), et à Cheikh Arabi Tebessi ($Z=-2,57$) et Bordj Bou Arreridj ($Z=-1,95$) avec le test MMKY (figures III.7). La réduction est en moyenne d'environ 0,09 jour/an pour Constantine, 0,06 jour/an pour Bordj Bou Arreridj et 0,05 jour/an pour Cheikh Larbi Tebessi (Figure III.5). Cependant, la tendance à la baisse aux stations de Chlef et de Batna n'est significative pour aucun test. Néanmoins, l'augmentation observée à la station Souk Ahras n'est significative pour aucune approche. Il est à noter que la persistance à long terme est significative aux stations de Souk Ahras et de Bordj Bou Arreridj à un niveau de signification de 5%, et à la station de Chlef à un niveau de signification de 10% selon le test LTP (Figure III.5).

R20mm : À l'exception de Souk Ahras, une tendance négative à long terme caractérise l'indice R20mm dans différentes stations (figures III.7 et III.5). Cependant, cette baisse n'est significative qu'aux stations Constantine ($Z=-2,7$) et Cheikh Arabi Tebessi ($Z=-2,34$) en utilisant l'approche MMKY à un niveau de signification de 5% (figure III.7). La tendance à la baisse observée aux stations de Bourdj Bou Arreridj, Chlef et de Batna n'a atteint aucune signification statistique et cela pour l'ensemble des tests. La tendance reflète une diminution approximative de 0,02 jour/an pour Constantine, tandis que les autres stations n'ont pas montré de changements significatifs. Inversement, l'augmentation observée à la station de Souk Ahras n'est significative qu'avec le test MMKY ($Z=2,15$) à un niveau de signification de 5%, soit environ 0,05 jour/ an (Figure III.5). Selon le test LTP (Figure III.5); la persistance à long terme est significative au niveau de signification de 5 % aux stations de Cheikh Larbi Tebessi (CLT) et de Bourdj Bou Arreridj, et à la station de Chlef au niveau de signification de 10 %.

CDD : À l'exception de la station de Chlef, une tendance négative à long terme caractérise l'indice CDD sur les six stations de la région BSK/BSH (figures III.7 et III.5). Cependant, cette diminution n'est significative qu'à la station de Souk Ahras ($-1,98 < Z < -1,69$) pour tous les tests et aux stations de Bourdj Bou Arreridj ($Z=-4,47$), Cheikh Arabi Tebessi ($Z=-2,19$) et de Souk Ahras ($Z=-1,98$) avec l'approche MMKY ($Z=-2,31$). À la station de Batna, la tendance reste significative même après avoir éliminé la persistance à court terme avec plusieurs approches : TFPW ($Z=-1,97$), MMKY ($Z=-2,75$), MMKH ($Z=-2,15$), MMKH3lag ($Z=-2,36$) et MMKY1lag ($Z=-1,97$). Cependant, la tendance devient insignifiante après l'élimination de la persistance à

long terme ($Z = -1,183$) (Figure III.5). La tendance à la baisse observée à la station de Constantine n'est significative pour aucun test. La diminution observée varie d'environ 0,4 jour/an pour Souk Ahras, 0,6 jour/an pour Batna, 0,25 jour/an pour Bordj Bou Arreridj et 0,5 jour/an pour Cheikh Larbi Tebessi. Cependant, la tendance à la hausse de 0,05 jour/an (Figure III.5) observée dans la série CDD à la station Chlef n'est significative pour aucune approche.

CWD : Pour les six stations de la région de BSK/BSH, à l'exception de la station de Constantine, la variabilité temporelle de l'indice CWD est caractérisée par une tendance positive à long terme pour toutes les approches. Cependant, cette augmentation n'est significative qu'à la station de Chlef avec seulement l'approche MMKY ($Z=1,82$) au seuil de significativité de 10% (figures III.7 et III.5). La tendance à la hausse observée aux stations de Souk Ahras, Bourdj Bou Arreridj, Batna et de Cheikh Arabi Tebessi n'est significative pour aucun test. Néanmoins, la tendance à la baisse observée dans la série CWD à la station de Constantine n'est pas significative pour toutes les approches.

SDII : À l'exception de la station de Souk Ahras, une tendance négative à long terme caractérise l'indice SDII pour les six stations (figures III.7 et III.5). Cependant, cette baisse n'est significative qu'aux stations de Bourdj Bou Arreridj et de Batna. Bourdj Bou Arreridj montre une signification avec les tests de MK ($Z=-1,741$) et MMKY ($Z= -1,941$), tandis que Batna présente une signification avec les tests de MK ($Z=-1,74$), MMKY ($Z=-3,74$), MMKH ($Z=-2,13$), MMKH3lag ($Z=-1,74$) et MMKY1lag ($Z=-1,74$). À la station de Sheikh Arabi Tebessi, le test MK est significatif ($Z=-2,54$), et cette tendance reste même après l'élimination de la persistance à court terme avec MMKY ($Z=-3,87$), MMKH ($Z=-1,94$) et MMKH3lag ($Z=-1,77$) (figure III.7). Cependant, après élimination de la persistance à long terme ($Z = -0,71$), la tendance devient insignifiante (Figure III.5). La tendance à la baisse observée aux stations de Constantine et de Chlef n'est significative pour aucun test. Plus précisément, la diminution est d'environ 0,07 mm/jour/an pour Cheikh Larbi Tebessi, 0,03 mm/jour/an pour Batna, 0,02 mm/jour/an pour Bordj Bou Arreridj, et environ 0,006 mm/jour/an pour les stations de Chlef et de Constantine. Cependant, la tendance à la hausse de 0,02 mm/jour/an (Figure III.5) à la station de Souk Ahras n'est significative qu'avec le test MMKY ($Z=2,68$) au niveau de signification de 5 %.

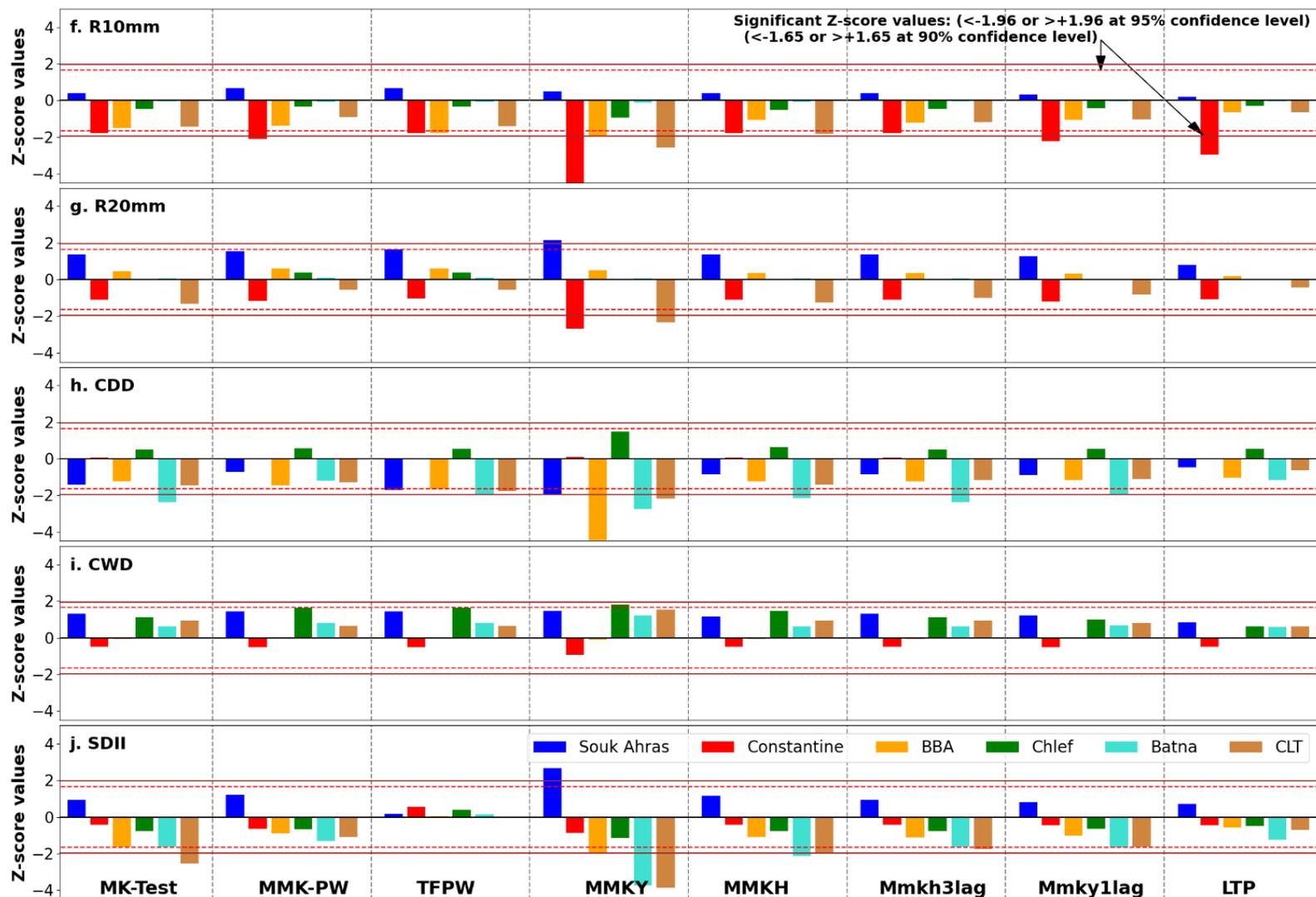


Figure III.7 : Z-scores dérivés de la méthode MK et de ses sept versions modifiées pour les séries d'indices de précipitations extrêmes qui sont exprimées en unités [jour] pour la période 1969-2021. Les quatre lignes rouges représentent les n valeurs critiques théoriques des tests au niveau de probabilité de 5 % et 10 %

2.2.3. Zone climatique désertique froide (Bwk)

Les figures III.8 et III.9 présentent les résultats de l'analyse des tendances à long terme pour les indices de précipitations extrêmes, réalisée à l'aide de la méthode MK et de ses sept versions modifiées, en particulier pour les stations situées dans la zone Bwk.

PRCPTOT : Pour les quatre stations pluviométriques de la zone climatique Bwk, à l'exception de la station de Ksar Chellala, la variabilité temporelle est marquée par une tendance négative à long terme pour toutes les approches (figures III.8 et III.3). Cependant, cette tendance à la baisse est statistiquement significative au niveau de signification de 5 % uniquement à la station de Msila en utilisant les approches MK ($Z = -2,109$), TFPW ($Z = -1,965$), MMKY ($Z = -3,719$), MMKH ($Z = -2,614$) et MMKH3lag ($Z = -2,109$), et à la station de Barika ($Z = -3,445$) avec l'approche MMKY. Néanmoins, la tendance à la hausse observée à la station de Ksar Chellala est statistiquement significative au niveau de 5% en utilisant les approches MK ($Z = 1,964$), MMK-PW ($Z = 2,091$), TFPW ($Z = 3,243$) et MMLY ($Z = 2,057$). De plus, à cette station, la persistance à long terme est significative au seuil de 5% (Figure III.3), et son retrait de la série chronologique des jours humides consécutifs rend la tendance insignifiante ($Z = 1,02$). En ce qui concerne le taux de variation, Boussaâda montre une diminution minimale de 0,03 mm par an, indiquant une légère baisse des précipitations annuelles. Inversement, Msila et Barika présentent une diminution plus prononcée de 1,72 mm/an et 1,12 mm/an, respectivement. En revanche, Ksar Chellala présente un motif contrasté avec une augmentation substantielle de 1,46 mm par an, suggérant une tendance vers des conditions plus humides.

RX1jour : La variation des précipitations maximales d'un jour (RX1jour) montre une augmentation notable au niveau de signification de 5% en utilisant le test MMKY dans les stations de Boussaâda ($Z = 2,36$) et de Ksar Chellala ($Z = 2,55$) (figures III.8 et III.3). A Ksar Chellala seul, il y a une augmentation significative au niveau de 10 % observée dans les tests MK ($Z = 1,69$), TFPW ($Z = 1,90$), MMKH ($Z = 1,69$) et MMKH3lag. Inversement, une tendance à la baisse notable au niveau de 5% est évidente à la station de Biskra, déterminée par les tests MK ($Z = -2,00$), MMK-PW ($Z = -1,82$), TFPW ($Z = -1,98$), MMKY ($Z = -4,12$), MMKH ($Z = -1,687$) et MMKH3lag ($Z = -2,00$). Une tendance négative similaire est observée dans le test MMKY1lag mais au niveau de signification de 10% ($Z = -1,858$). La suppression de la persistance à long terme a rendu toutes les tendances insignifiantes. En ce qui concerne le taux de variation, Boussaâda enregistre une augmentation de 0,08 mm/an, tandis que Msila enregistre une diminution de 0,05 mm/an. Barika présente une diminution de 0,24 mm/an, tandis que Ksar Chellala montre une augmentation de 0,13 mm/an.

RX5day : La variation des précipitations maximales sur 5 jours (RX5day) montre une diminution notable à la station de Barika, significative au niveau de 5% en utilisant le test MMKY ($Z = -4,23$) et le test TFPW

($Z=-2,11$). A la station de Msila, une diminution est observée au niveau de 10% avec le test MMKY ($Z=-1,79$). De plus, une tendance à la baisse similaire est observée à la station de Barika au niveau de 10 % en utilisant les tests MK ($Z=-1,8$), MMK-PW ($Z=-1,87$), MMKH ($Z=-1,8$), MMKH3lag ($Z=-1,8$) et MMKY1lag ($Z=-1,68$) (figures III.8 et III.3). Cependant, une tendance à la hausse est significative à la station de Ksar Chellala au niveau de 5% avec les tests MK ($Z=2,056$), MMK-PW ($Z=1,697$), TFPW ($Z=2,5$) et MMKY ($Z=2,79$), et au niveau de 5% avec le test MMKH3lag ($Z=1,66$). La suppression de la persistance à long terme a rendu toutes les tendances insignifiantes. En termes de taux de changement de tendance (figure III.3), Boussaâda connaît une augmentation de 0,02 mm/an, tandis que Ksar Chellala montre une augmentation plus élevée de 0,24 mm/an.

R95p : La variabilité temporelle de l'indice R95p est caractérisée par une tendance significative à la baisse au seuil de 10% à la station de Barika par les approches MK ($Z=-1,672$), MMKY ($Z=-1,787$), MMKH3lag ($Z=-1,761$), MMKY1lag ($Z=-1,715$) et LTP ($Z=-1,932$) (figures III.8 et III.3). Cette tendance a également été remarquée à la station de Msila, mais elle n'est significative pour aucun test. Inversement, la station de Ksar Chellala affiche une tendance à la hausse significative au niveau de 10% pour toutes les approches sauf les tests MMKH, MMKH3lag et LTP. De plus, la persistance à long terme est significative au niveau de 5 % à cette station (Figure III.3), et son retrait de la série temporelle R95p annule la tendance ($Z=1,02$). La tendance à la hausse observée à la station de Boussaâda n'est significative avec aucun test. En ce qui concerne les taux de changement de tendance (figure III.3), Barika connaît une diminution de 0,35 mm/an, tandis que Msila, Boussaâda et Ksar Chellala ne montrent aucun changement significatif.

R99p : L'indice R99p montre une tendance à la hausse à long terme aux stations de Boussaâda et de Ksar Chellala (figures III.8 et III.3). Cette tendance n'est significative qu'à la station de Boussaâda en utilisant l'approche MMKY ($Z=2,253$) à un niveau de signification de 5%. Inversement, les stations de Barika et de Msila affichent une tendance à la baisse. La baisse est significative uniquement à la station de Barika avec l'approche MMKY ($Z=-2,178$) à un niveau de signification de 5%. Notamment, le test LTP (Figure III.3) montre une persistance significative à long terme au niveau de 5% à la station de Ksar Chellala. Cependant, les taux de changement de tendance pour toutes les stations n'indiquent aucun changement significatif (figure III.3).

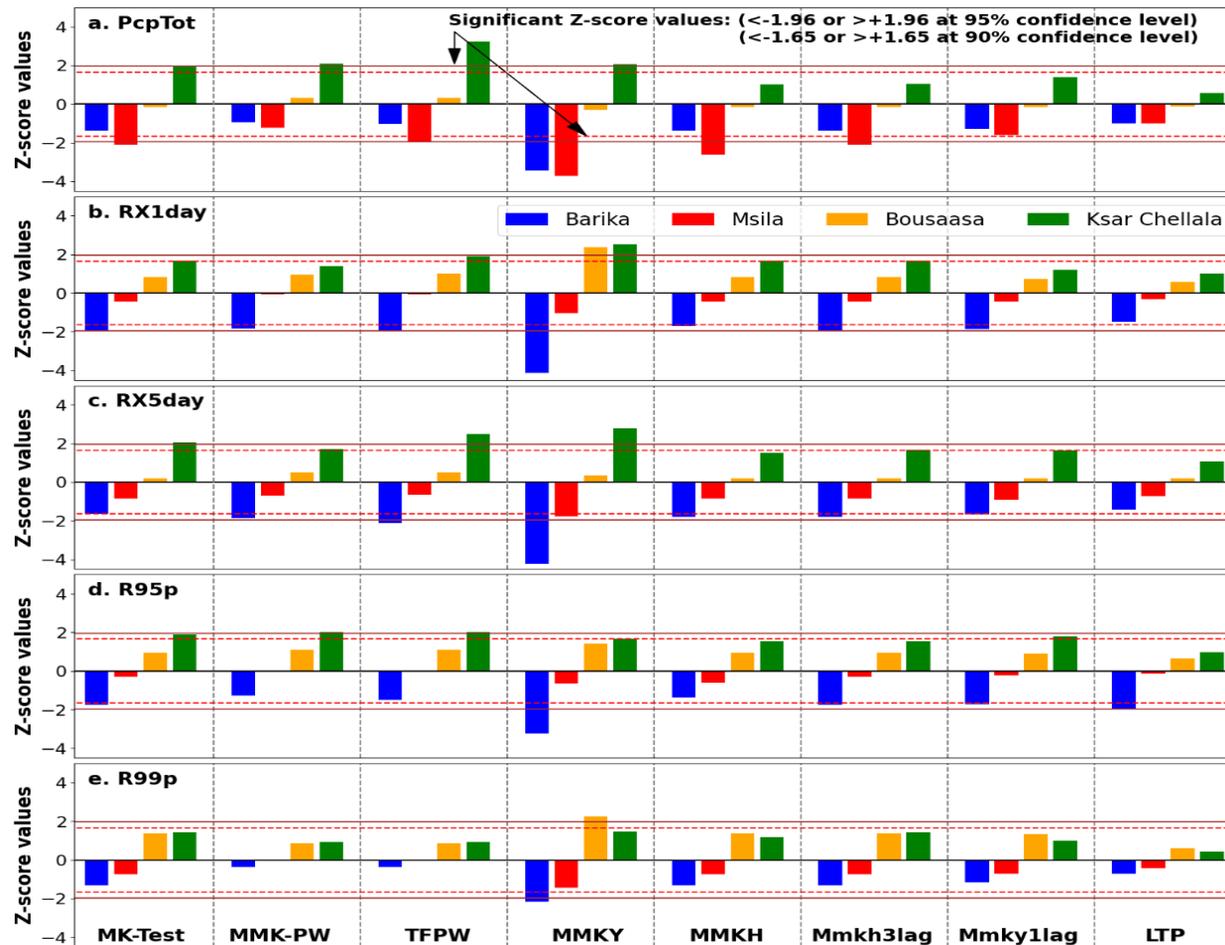


Figure III.8 : Z-scores dérivés de la méthode MK et de ses sept versions modifiées pour les précipitations extrêmes sont exprimés en [mm] pour la période 1969-2021. Les quatre lignes rouges représentent les n valeurs critiques théoriques des tests au niveau de probabilité de 5 % et 10 %.

R10mm : L'indice R10mm affiche une tendance à la baisse à long terme dans toutes les stations à l'exception de Ksar Chellala (figures III.9 et III.5). Cette baisse n'est significative qu'à la station Barika ($Z = -2,841$) et à la station Msila avec les tests MK ($Z = -2,282$), MMKY ($Z = -4,193$) et MMKH ($Z = -2,102$) à un niveau de signification de 5 %, et avec les tests TFPW ($Z = -1,854$) et MMKH3lag ($Z = -1,865$) à un niveau de signification de 10 %. La suppression de la persistance à court terme par MMK-PW, MMKY1lag et de la persistance à long terme par LTP rend cette tendance insignifiante. Cependant, la tendance à la hausse observée à la station de Msila n'est significative pour aucun test, similaire à ce que l'on trouve à la station Ksar Chellala. Notamment, le test LTP (Figure III.5) indique une persistance significative à long terme au niveau de 10% à la station de Ksar Chellala. En termes de taux de changement, Barika et Msila connaissent toutes les deux une diminution de 0,05 jour/an et 0,07 jour/an, respectivement. Néanmoins, Boussaâda et Ksar Chellala montrent des changements négligeables.

R20mm : L'indice R20mm présente une tendance positive à long terme aux stations de Boussaâda et de Ksar Chellala (figures III.9 et III.5). Cependant, cette tendance est significative à la station de Ksar Chellala en utilisant les approches MK ($Z = 1,831$) et MMKY1lag ($Z = 1,74$) à un niveau de signification de 10%. De plus, la persistance à long terme est significative au seuil de 5 % à cette station (Figure III.5), et son retrait de la série chronologique R20mm rend la tendance insignifiante ($Z = 0,81$). Inversement, les stations de Barika et de Msila affichent une tendance à la baisse. La baisse n'est significative qu'à la station de Barika en utilisant l'approche MMKY ($Z = -1,86$) au niveau de signification de 10 %. Cependant, les taux de changement de tendance pour toutes les stations sont négligeables.

CDD : En dehors de la station Msila, une tendance négative à long terme est observée dans toutes les approches (figures III.9 et III.5). Cependant, cette tendance à la baisse n'est significative qu'à la station de Ksar Chellala en utilisant l'approche MMKY ($Z = -2,179$). Le test LTP (Figure III.5) indique une persistance significative à long terme au niveau de signification de 10 % à la station Boussaâda et au niveau de signification de 5 % à la station de Ksar Chellala. Pourtant, la tendance à la baisse observée à la station de Msila n'est significative pour aucun test. En termes de taux de changement, Barika, Boussaâda et Ksar Chellala diminuent de 0,01 jour/an, 0,16 jour/an et 0,82 jour/an, respectivement, tandis que Msila montre une augmentation de 0,05 jour/an.

CWD : Le nombre de journées humides consécutives montre une tendance positive non significative à long terme aux stations de Barika et de Ksar Chellala en utilisant toutes les approches (figures III.9 et III.5). Cependant, les stations de Msila et de Boussaâda présentent des tendances à la baisse, qui sont significatives à la station de Msila avec le test MMKY ($Z=-2,12$), et à la station de Boussaâda avec les tests MMKH3lag ($Z=-2,16$) et MMKY ($Z=-1,99$) à un niveau de signification de 5%. De plus, les tests MMKH ($Z=-1,85$) et MMKY1lag ($Z=-1,72$) montrent une signification au seuil de 10 % pour la station de Boussaâda. De plus, à la station de Boussaâda, une persistance significative à long terme est observée au niveau de 5% (Figure III.5), et la suppression de cette persistance rend la tendance insignifiante ($Z = -0,4$). Cependant, les taux de changement de tendance pour toutes les stations sont négligeables.

SDII : La variabilité temporelle de l'indice SDII indique une tendance positive non significative aux stations de Barika, Boussaâda et de Ksar Chellala (figures III.9 et III.5). Cependant, à la station Msila, il y a une tendance négative significative observée uniquement avec le test MMKY ($Z=-1,655$). Le test LTP (Figure III.5) révèle une persistance significative à long terme au niveau de signification de 5 % aux stations de Barika, Msila et de Boussaâda. En ce qui concerne le taux de changement, Barika et Msila montrent une diminution de 0,025 mm/jour/an, tandis que Ksar Chellala montre une très légère diminution de -0,001 mm/jour/an. Pendant ce temps, Boussaâda affiche une augmentation de 0,02 mm/jour/an.

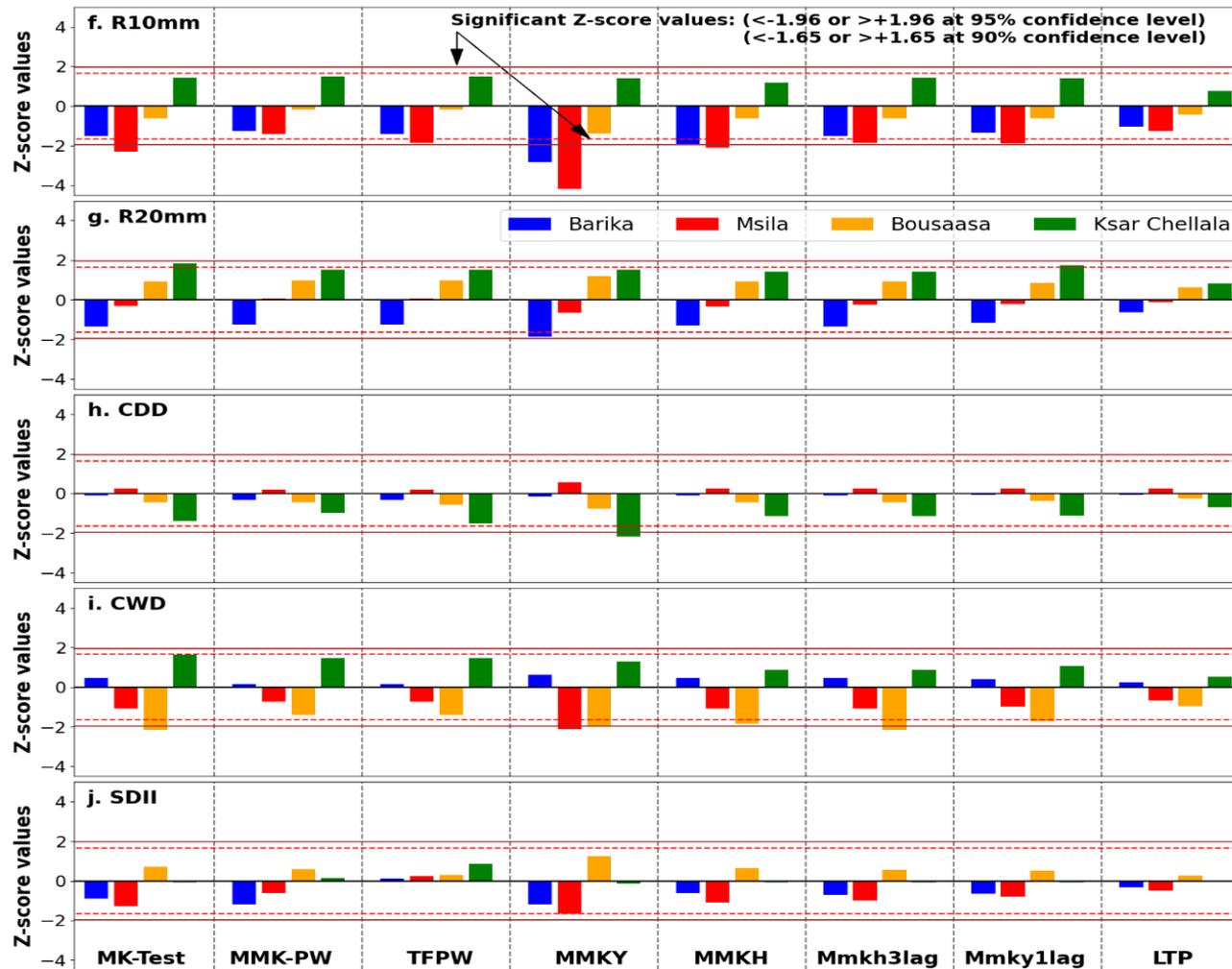


Figure III.9 : Z-scores dérivés de la méthode MK et de ses sept versions modifiées pour les séries d'indices de précipitations extrêmes qui sont exprimées en unités [jour] pour la période 1969-2021. Les quatre lignes rouges représentent les valeurs Z critiques théoriques des tests au niveau de probabilité de 5 % et 10 %.

2.3. Identification des ruptures dans les valeurs moyennes des indices de précipitations extrêmes

Les résultats de trois tests, à savoir le test de Pettitt (PT), le test de Pettitt modifié (MPT) et le test de Lombard (LT), dans les trois zones climatiques sont présentés dans les tableaux III.2, III.3 et III.4.

Pour toutes les stations pluviométriques, par rapport au test de Pettitt, les indices présentant des tendances significatives à long terme sont affectés par une rupture significative de leurs moyennes. Pour certains indices, ces ruptures de moyennes sont devenues non significatives après la suppression de l'autocorrélation en appliquant les méthodes MPT et LT. En outre, il convient de souligner que les résultats du test de Pettitt modifié appliqué sur la série d'indices de précipitations extrêmes à un niveau de signification de 5 % ou 10 % ont été modifiés par rapport aux résultats de Pettitt originaux où les valeurs KT ont diminuées tandis que les valeurs P value ont augmentées.

2.3.1. Zone climatique méditerranéenne chaude (Csa)

Dans la zone climatique Csa, seules deux stations présentent des ruptures significatives dans la série PRCPTOT (Tableau III.2). A la station d'Alger la rupture a été constatée pour l'année 1986, il y a une augmentation de +156,8 mm après cette date, alors que pour Médéa c'est l'année 2009, où on enregistre une diminution de -188,3 mm après la rupture, toutes les deux significatives à 10%. Ces ruptures deviennent non significatives après la suppression de l'autocorrélation avec les approches TPM et LT. Aucune rupture statistiquement significative n'est détectée pour les six stations en ce qui concerne les indices Rx1day et R99PTOT avec les méthodes PT, TPM et LT. Pour l'indice Rx5day, des ruptures significatives sont observées à Annaba en 1991, Jijel en 1989 et Alger en 1986, toutes confirmées par TPM et LT. Cependant, la rupture à Annaba devient non significative après le retrait de l'autocorrélation. En ce qui concerne l'indice R95PTOT, seule la station de Jijel montre une rupture significative en 1989 (signification de 5%). Pour les indices R10mm, R20mm, CDD, CWD et SDII, la plupart des ruptures sont brusques, avec des changements significatifs à Jijel pour R10mm et à Annaba, Jijel et Médéa pour R20mm. Cependant, certaines ruptures deviennent non significatives après le retrait de l'autocorrélation, comme R10mm à Jijel avec l'approche TPM. Les indices CWD et SDII présentent des ruptures significatives à Jijel, Alger et Médéa, confirmées par TPM, mais avec un décalage de la date de rupture à 1973-1974 à Jijel et Alger avec l'approche LT pour SDII.

Chapitre III : Évolution des indices de précipitations extrêmes en Algérie (1969-2021)

Tableau III.2 : Résultats des tests Pettitt, Pettitt modifié et Lombard

Station	Indices	Pettitt test	Pettitt test Modifié		Test de Lombard	Indices	Pettitt test	Pettitt test Modifié	test	Test de Lombard
		T	Δ (mm)	T	T1-T2		T	Δ (jour)	T	T1-T2
Annaba	PRCPTOT	1978	-94,9	1978	A.R	R10mm	1978	-4,7	1978	A.R
Jijel		1995	-156,2	1995	A.R		1995*	-5,4	1995	1984-2004**
Tizi-Ouzou		1995	-131,6	1995	A.R		1995	-4,4	2001	A.R
Alger		1986*	156,8	1985	A.R		1982	5,1	1982	A.R
Médéa		2009*	-188,3	2008	A.R		2009	-4,0	2008	A.R
Oran		1976	122,4	1976	A.R		1976	5,2	1976	A.R
Annaba	Rx1day	1996	-6,2	1997	A.R	R20mm	1989*	-2,1	1989*	1988-1989**
Jijel		2012	15,5	1987	A.R		1995**	-5,2	1996*	1984-2004**
Tizi-Ouzou		2017	-25,6	2017	A.R		2006	-2,2	2006	A.R
Alger		1979	28,1	1978	A.R		1980	3,1	1980	A.R
Médéa		2012	-14,2	2013	A.R		2008*	-2,9	2008	A.R
Oran		2006	-3,8	2006	A.R		1998	-0,7	1998	A.R
Annaba	Rx5day	1991**	-10,5	1992	A.R	CDD	1975	7,4	1995	A.R
Jijel		1989**	-38,0	1989**	1988-1989**		1994	6,5	1974	A.R
Tizi-Ouzou		1980	27,9	1980	A.R		1985**	64,3	1985	1984-1985**
Alger		1986**	31,5	1986**	1972-1988**		2005	8,1	2016	A.R
Médéa		2013	-40,6	2013	A.R		2007	50,1	2005*	A.R
Oran		2001	9,8	1971	A.R		1998	-13,4	1998	A.R
Annaba	R95PTOT	1991	-41,3	1991	A.R	CWD	1987	1,1	1987	A.R
Jijel		1989**	-72,8	1989**	1988-1989**		1992**	-1,5	1992*	A.R
Tizi-Ouzou		1993	-26,3	2001	A.R		1998	-1,1	1998	A.R
Alger		1974	165,1	1974	A.R		1985*	1,3	1985	A.R
Médéa		2013	-96,6	2013	A.R		2004**	-1,7	2003*	2002-2004**
Oran		1998	-24,3	1998	A.R		1998	-0,6	1998	A.R
Annaba	R99PTOT	1991	-15,6	1991	A.R	SDII	1981	-0,8	1981	A.R
Jijel		2012	46,2	2012	A.R		1991**	-1,9	1991*	1973-
Tizi-Ouzou		2017	-51,5	1980	A.R		1970	-3,1	1984	A.R
Alger		1979	66,4	1974	A.R		1987*	1,1	1987	1973-1975**
Médéa		2013	-43,9	2013	A.R		1994*	2,0	1994*	A.R
Oran		1999	-11,6	1999	A.R		1998	-0,5	1998	A.R

** = valeurs significatives au-dessus du seuil de 5 % ; * = valeurs significatives au-dessus du seuil de 10 % ; T = année de la moyenne de décalage ; Δ = la différence avant et après la moyenne de décalage ; T1-T2 = année avant (T1) et après (T2) de la moyenne de décalage ; K_t = valeurs calculées du test de Pettitt ; S_n = valeurs calculées du test de Lombard. A.R : Aucune Rupture.

3.3.2. Zone climatique semi-aride froid/chaud (BSK/BSH)

Pour les six stations pluviométriques de la zone climatique BSK/BSH, l'analyse des indices PRCPTOT, R95 et R99 à l'aide de trois tests n'a révélé aucune rupture (tableau III.3). Concernant les indices Rx1jour et Rx5jour, seule la station de Souk-Ahras a présenté une rupture pour l'indice Rx1jour en 2002 (-16,6 mm) et l'indice Rx5jour en 2010 (-37,0 mm), comme le confirment les trois tests pour le premier et seul le test de Pettitt original pour le second. Des ruptures significatives ont été identifiées pour les indices R10mm et R20mm à différentes stations. Pour Constantine, Bordj Bou Arreridj et Cheikh Larbi Tebessi, des ruptures de l'indice R10mm se sont produites en 2011 (+4,8 jours), 1984 (-1,7 jours), 2004 (+4,5 jours) et 2012 (+5,1 jours), respectivement, au niveau de signification de 5 % ou 10 %. A Souk Ahras, l'indice R20mm a montré une rupture en 2004 (+15,1 jours). Toutes les ruptures observées pour R10mm et R20mm sont devenues insignifiantes après l'application des méthodes TPM et LT. En ce qui concerne l'indice CDD, des ruptures ont été détectées aux stations de Souk Ahras, Batna et de Cheikh Larbi Tebessi en 2004 (15,1 jours), 1988 (26,3 jours) et 2003 (32,2 jours), respectivement, au niveau de signification de 5 %. Cependant, ces ruptures ne sont pas significatives avec TPM et LT, à l'exception de Batna, où le temps de rupture a été ramené à 1985 par rapport au test de Pettitt original. L'indice CWD a montré une rupture uniquement dans la station de Chlef en 2004 (-1,2 jour) au niveau de signification de 10%. En ce qui concerne l'indice SDII, des ruptures significatives se sont produites aux stations de Bordj Bou Arreridj et de Cheikh Larbi Tebessi en 2012 (-1,9 mm/jour) et 2010 (4,5 mm/jour), respectivement, au niveau de signification de 5 %. Cependant, la rupture pour Bordj Bou Arreridj est devenue non significative avec TPM et LT, tandis qu'à Cheikh Larbi Tebessi, la date de la rupture a été enregistrée en 2011-2012 en utilisant LT.

Chapitre III : Évolution des indices de précipitations extrêmes en Algérie (1969-2021)

Tableau III.3 : Résultats des tests Pettitt, Pettitt modifié et Lombard

Station	Indices	Pettitt test	Pettitt test Modifié		Test de Lombard	Indices	Pettitt test	Pettitt test Modifié		Test de Lombard
		T	Δ (mm)	T	T1-T2		T	Δ (jour)	T	T1-T2
Souk-Ahras	Prcptot	2002	-139,5	2002	A.R	R10mm	2006	-4,7	2006	A.R
Constantine		2004	94,8	2004	A.R		2004*	4,5	2004	A.R
Bordj-Bou-Argeridj		1984	-44,5	2013	A.R		2011**	4,8	2011	A.R
Chlef		1986	48,2	1986	A.R		1986	1,9	1986	A.R
Batna		2011	104,0	2011	A.R		2011	3,7	2011	A.R
Cheikh-Larbi-Tebessi		1980	61,3	2002	A.R		2012*	5,1	2011	A.R
Souk-Ahras	Rx1day	2002**	-16,6	2002*	2001-2002**	R20mm	2002*	-2,7	2002	A.R
Constantine		1986	4,9	1986	A.R		2003	1,5	2004	A.R
Bordj-Bou-Argeridj		1996	6,3	1996	A.R		1984**	-1,7	1984	A.R
Chlef		1980	9,5	1980	A.R		1982	0,9	1982	A.R
Batna		2011	14,2	2011	A.R		2013	2,0	2013	A.R
Cheikh-Larbi-Tebessi		1984	17,0	1984	A.R		2012	1,9	2010	A.R
Souk-Ahras	Rx5day	2010*	-37,0	2010	A.R	CDD	2004**	15,1	1992	A.R
Constantine		2004	18,0	2004	A.R		2013	-13,9	2013	A.R
Bordj-Bou-Argeridj		2007	19,5	2007	A.R		1995	13,0	1995	A.R
Chlef		1980	11,2	1980	A.R		1977	-15,2	1977	A.R
Batna		2013	22,7	2013	A.R		1988**	26,3	1985**	1984-1985**
Cheikh-Larbi-Tebessi		1977	37,8	1977	A.R		2003**	32,2	2003	A.R
Souk-Ahras	R95	2002	-59,1	2002	A.R	CWD	2009	-2,3	2009	A.R
Constantine		2004	44,1	2004	A.R		1988	0,6	1988	A.R
Bordj-Bou-Argeridj		1984	-40,4	2012	A.R		1977	0,8	1977	A.R
Chlef		1982	29,4	1982	A.R		2004*	-1,2	2004	A.R
Batna		2011	59,1	2011	A.R		1989	-0,5	1989	A.R
Cheikh-Larbi-Tebessi		1984	55,3	1984	A.R		2009	-0,8	2008	A.R
SOUK AHRAS	R99	1997	-9,6	1997	A.R	SDII	2002	-1,0	2002	A.R
Constantine		1986	24,5	1986	A.R		1971	-1,0	2004	A.R
Bordj-Bou-Argeridj		1984	-10,5	1970	A.R		2012**	1,9	2007	A.R
Chlef		1980	21,4	1980	A.R		1986	0,4	1980	A.R
Batna		2006	21,5	2007	A.R		2013	1,6	2013	A.R
Cheikh-Larbi-Tebessi		1972	110,5	1972	A.R		2010**	4,5	2010	2011-2012**

** = valeurs significatives au-dessus du seuil de 5 % ; * = valeurs significatives au-dessus du seuil de 10 % ; T = année de la moyenne de décalage ; Δ = la différence avant et après la moyenne de décalage ; T1-T2 = année avant (T1) et après (T2) de la moyenne de décalage ; K_i = valeurs calculées du test de Pettitt ; S_n = valeurs calculées du test de Lombard. A.R : Aucune Rupture.

3.3.3. Zone climatique désertique froide (Bwk)

Pour les quatre stations pluviométriques de la zone climatique Bwk (tableau III.4), l'analyse de la série PRCPTOT à l'aide du test de Pettitt original a révélé une rupture uniquement au niveau de signification de 10% à la station de Msila en 2012, avec une augmentation de +95 mm de la moyenne après le changement. Cependant, cette rupture est devenue non significative après la suppression de l'autocorrélation en utilisant à la fois les approches TPM et LT. Une autre rupture s'est produite au niveau de signification de 5 % à la station de Ksar Chellala en 2002, avec une baisse de -188,3 mm dans la moyenne après le changement. Cette rupture brutale a été confirmée à la fois par les approches TPM et LT. En analysant l'indice Rx1jour, des ruptures significatives ont été trouvées aux stations de Barika et de Ksar Chellala. Barika a montré une rupture en 2011 avec une augmentation de +16,7 mm de la moyenne, mais elle est devenue non significative après la suppression de l'autocorrélation à l'aide de TPM et LT. Ksar Chellala a montré une rupture en 2002 avec une baisse de -11,2 mm dans la moyenne, et cette rupture est restée significative avec le test de Lombard en dépit de devenir non significative avec TPM. Pour les indices Rx5day et R95PTOT, une rupture a été enregistrée à Ksar Chellala en 2002 avec des baisses de -18,2 mm et -30,1 mm en moyenne, respectivement. Le moment de la rupture pour R20mm (2001) a été retardé par rapport au test Pettitt original, tandis que R95PTOT est devenu non significatif après avoir supprimé l'autocorrélation avec l'approche LT. Cependant, les ruptures pour R99PTOT n'étaient statistiquement significatives à aucune des quatre stations utilisant les approches PT ou TPM et LT. Concernant l'indice R10mm, une rupture significative a été observée à Msila en 2011 (+4,52 jours) et à Ksar Chellala en 2002 (-1,86 jours). La rupture Msila est devenue non significative avec TPM et a montré un schéma progressif avec l'approche LT. Pour Ksar Chellala, l'approche TPM a confirmé le moment de la rupture, mais l'approche LT l'a rendue non significative après avoir éliminé l'autocorrélation. Pour l'indice R20mm, le test de Pettitt original a montré une rupture à Barika en 2013 (2,50 jours), qui est devenue non significative après l'élimination de l'autocorrélation en utilisant le TPM et LT. Une rupture alternative à Ksar Chellala en 2002 (-0,82 jours) a été d'une nature progressive et confirmée par LT mais elle est devenue non significative avec le TPM après l'élimination de l'autocorrélation. En ce qui concerne l'indice CDD, aucune des ruptures n'est statistiquement significative, sauf à Ksar Chellala en 2003 (+80,94 jours), qui est devenu non significatif après suppression de l'autocorrélation avec l'approche LT. Pour l'indice CWD, les ruptures à Boussaâda et Ksar Chellala en 1982 (0,79 jour) et 2003 (-1,55 jour), respectivement, étaient progressives et confirmées à la fois par TPM et LT. Enfin, l'analyse de la série SDII à l'aide du test de Pettitt original a montré des ruptures à Barika en 2013 (3,59 mm/jour) et Msila en 2012 (1,88 mm/jour) au niveau de signification de 5%. Cependant, les deux ruptures sont devenues non significatives après la suppression de l'autocorrélation avec les approches TPM et LT pour les deux stations.

Chapitre III : Évolution des indices de précipitations extrêmes en Algérie (1969-2021)

Tableau III.4. Résultats des tests Pettitt, Pettitt modifié et Lombard

Station	Indices	Pettitt test	Pettitt test Modifié		Test de Lombard	Indices	Pettitt test	Pettitt test Modifié		Test de Lombard
		T	Δ (mm)	T	T1-T2		T	Δ (jour)	T	T1-T2
Barika	PRCPTOT	2011	76,9	2011	A.R	R10mm	2012	3,97	2011	A.R
Msila		2012*	95,0	2011	A.R		2011**	4,52	2011	2010-2012**
Boussaâda		1977	50,8	1977	A.R		1977	1,50	1977	A.R
Ksar-Chellala		2002**	-93,9	2002**	2001-		2002*	-1,86	2002*	A.R
Barika	Rx1day	2011**	16,7	2011	A.R	R20mm	2013**	2,50	2011	A.R
Msila		2002	-6,7	2002	A.R		1974	0,82	1974	A.R
Boussaâda		2013	9,2	2013	A.R		2002	-0,75	2013	A.R
Ksar-Chellala		2002**	-11,2	2002	2001-		2002*	-0,82	2002	2000-2002**
Barika	Rx5day	2011	23,1	1970	A.R	CDD	1973	-	1973	A.R
Msila		2012	13,6	2012	A.R		1991	-	1997	A.R
Boussaâda		2005	-12,5	2002	A.R		2012	35,82	2012	A.R
Ksar-Chellala		2002**	-18,2	2002**	2001-		2003**	80,94	2001**	A.R
Barika	R95PTOT	2011*	56,7	2011	A.R	CWD	1971	1,00	1975	A.R
Msila		2012	32,3	2011	A.R		1973	1,15	1972	A.R
Boussaâda		1987	-19,3	1987	A.R		1982*	0,79	1980	1981-1982**
Ksar-Chellala		2002**	-30,1	2002*	A.R		2003**	-1,55	2003	2002-2003**
Barika	R99PTOT	2011	18,5	1986	A.R	SDII	2013**	3,59	2012	A.R
Msila		1970	32,9	1971	A.R		2012**	1,88	2012	A.R
Boussaâda		2002	-12,6	2010	A.R		2013	1,88	2013	A.R
Ksar-Chellala		2002	-13,8	2002	A.R		1985	-0,66	1985	A.R

** = valeurs significatives au-dessus du seuil de 5 % ; * = valeurs significatives au-dessus du seuil de 10 % ; T = année de la moyenne de décalage ; Δ = la différence avant et après la moyenne de décalage ; T1-T2 = année avant (T1) et après (T2) de la moyenne de décalage ; K_t = valeurs calculées du test de Pettitt ; S_n = valeurs calculées du test de Lombard. A.R : Aucune Rupture.

3. Discussion

La comparaison de la variabilité temporelle de 1969 à 2021 de dix indices de précipitations extrêmes provenant de 16 stations de précipitations situées dans différentes zones climatiques de l'Algérie a révélé cinq faits significatifs et remarquables en l'occurrence :

En ce qui concerne les dix indices de précipitations extrêmes dans la zone Csa, la plupart de ces indices ont connu une augmentation de leur variabilité temporelle de 1969 à 2021, à l'exception de l'indice CDD. Dans les zones semi-arides froides/chaudes (BSK/BSH), tous les indices ont montré une tendance à la baisse, à l'exception de l'indice CWD. Quant aux stations de la zone climatique désertique froide (Bwk), les résultats ont révélé des tendances hétérogènes, avec deux stations affichant des tendances négatives et deux autres affichant des tendances positives. Ces résultats corroborent et élargissent les connaissances existantes sur les tendances des précipitations extrêmes dans la région et dans le monde (par exemple, [Seneviratne et al., 2021](#) ; [Politi et al., 2023](#) ; [Lionello et Scarascia, 2020](#) ; [Ribes et al., 2019](#)). Les résultats dans la zone Csa s'alignent sur les études existantes sur les tendances des précipitations extrêmes dans la littérature pour les zones côtières du bassin méditerranéen, remontant au début des années 2000. Ces études révèlent des conclusions parfois contradictoires d'une zone à une autre et d'une période à une autre, en raison des caractéristiques spatiales et temporelles de chaque zone étudiée. Par exemple, [Bessaklia et al. \(2021\)](#) ont constaté des tendances croissantes des indices d'intensité et de fréquence des précipitations extrêmes, à l'exception de l'indice des jours secs consécutifs (CDD), au cours de la période 1970-2010 dans le nord-est de l'Algérie. Des tendances similaires à la hausse des indices de précipitations extrêmes ont été observées par [Benabdelouahab et al. \(2020\)](#) dans les régions de la Méditerranée occidentale, et la durée des événements extrêmes a été détectée dans certaines régions de la Méditerranée par [Cid et al. \(2016\)](#). Cependant, [Tramblay et al. \(2013\)](#) ont observé une forte tendance à la baisse des précipitations totales et des jours humides, ainsi qu'une augmentation de la durée des périodes sèches dans certaines stations de l'ouest de l'Algérie de 1968 à 2005. [Mathbout et al. \(2018\)](#) ont noté des tendances à la baisse significatives des précipitations (50 stations pluviométriques) et des tendances à la hausse des jours extrêmement humides (50 stations pluviométriques) en Méditerranée orientale de 1961 à 2012. En ce qui concerne les tendances à la baisse observées, dans ce travail, dans les zones semi-arides, confirment des résultats similaires en Algérie pour l'indice PRCPTOT de 1973 à 2013 ([Zeroual et al., 2017](#)) et au Maroc pour les indices PRCPTOT, R10,

R20 et R95p, CDD et SDII de 1970 à 2012 (Filahi et al., 2016). Des résultats parallèles ont également été trouvés en Libye et en Tunisie pour les indices PRCPTOT et R10 (Donat et al., 2014). Ces observations s'alignent sur des tendances similaires dans plusieurs régions semi-arides du monde, telles que la Chine (Wen et al., 2017), l'Éthiopie (Berhane et al., 2020) et l'Iran (Malaekheh et al., 2022 ; Alavinia & Zarei, 2021). En Iran, Alavinia & Zarei (2021) ont observé une diminution des indices extrêmes dans certaines régions, associée à une tendance positive non significative du nombre de jours de pluie (Rahimzadeh et al., 2009). Enfin, les résultats hétérogènes dans la zone désertique froide sont également cohérents avec les observations dans les régions désertiques du moyen Orient (Donat et al., 2014) et les déserts chinois (Li et al., 2019).

L'analyse des points de rupture de l'ensemble des stations de précipitations dans les trois zones climatiques a révélé que la plupart des changements dans la moyenne des indices de précipitations extrêmes sont brusques. Cependant, ces ruptures ne se sont pas produites de manière synchrone entre les indices. De plus, la comparaison de trois tests de point de rupture différents a montré que l'identification des ruptures d'indice était influencée par le test de Pettitt modifié (MPT) et le test de Lombard (LT). Par exemple, certains indices qui ont montré des ruptures significatives selon le test de Pettitt sont devenus non significatifs après avoir supprimé l'autocorrélation par l'application du test de Pettitt modifié (MPT) et du test de Lombard (LT). Cette constatation est cohérente avec les études d'Achour et al. (2020) et de Piyoosh et Ghosh (2017).

Les tendances divergentes des précipitations extrêmes résultent de facteurs dynamiques et thermodynamiques (Seneviratne et al. 2021). Les variations de température amplifient l'évaporation globale, augmentant de 7% pour 1°C de réchauffement global de la surface. Les précipitations extrêmes peuvent être renforcées par des réponses et des rétroactions dynamiques, libérant de la chaleur latente due à des augmentations thermodynamiques de l'humidité (Mizuta et Endo, 2020). Dans la zone Csa, la hausse des indices de précipitations le long de la bande côtière peut s'expliquer par l'élévation de la température (Taibi et al., 2022 ; Zeroual et al., 2021). Le réchauffement qui en résulte pourrait entraîner une évaporation accrue de l'eau, favorisant de puissants mouvements convectifs propices à la formation de nuages d'orage. Inversement, dans les zones semi-arides éloignées de la côte, situées entre deux chaînes de montagnes parallèles, l'Atlas téllien et l'Atlas saharien, la diminution des indices de précipitations extrêmes pourrait résulter de difficultés à véhiculer l'humidité de la mer malgré les augmentations de température. Les résultats hétérogènes observés dans la zone désertique froide peuvent s'expliquer par la nature des

précipitations, qui se produisent sous forme d'averses dans les régions désertiques et sont plus probables en hiver et en automne dans la zone désertique du nord (Bwk) et en été dans l'extrême sud (Bwh) qui sont régis par d'autres mécanismes climatiques.

La comparaison de huit tests MK montre que la caractérisation des tendances dans la série des dix indices de précipitations extrêmes a été affectée par les effets de la persistance à court terme (STP) et de la persistance à long terme (LTP). La prise en compte de l'effet du STP et du LTP a considérablement réduit le nombre de tendances significatives des indices de précipitations extrêmes obtenus à l'aide des tests MK et MMKY. Il est à noter que chacun des huit tests a été appliqué 160 fois (10 indices de précipitations extrêmes X 16 stations pluviométriques). Ainsi, le nombre d'indices montrant des tendances significatives est plus élevé lorsque les tests MMKY et MK sont utilisés, suivis des tests TFPW, MMKH et mmkh1lag, et enfin du test qui élimine l'autocorrélation des trois premiers décalages significatifs (Mmkh3lag), du test qui élimine l'influence de l'autocorrélation par les données de pré-blanchiment (MMK-PW), et du test qui élimine les effets de la persistance à long terme (LTP). Par exemple, pour les 160 tests, le nombre d'indices montrant des tendances à la hausse significatives au niveau de signification de 5% est de 32 tests pour MMKY, 11 tests pour MK, 10 tests pour MMK-PW, 09 tests pour TFPW et Mmkh1lag, 08 tests pour MMKH et mmkh3lag, et 07 tests pour LTP. De même, le nombre d'indices montrant des tendances à la baisse significatives au niveau de signification de 5% était de 40 tests pour MMKY, 10 tests pour MK, 5 tests pour mmkh3lag et seulement 3 tests pour MMK-PW et LTP. En outre, les résultats présentés ici confirment ceux trouvés par [Fathian et al. \(2016\)](#) en examinant quatre versions différentes de la méthode Mann-Kendall (MK) sur les données mensuelles et annuelles de la température, des précipitations et du débit des rivières. De plus, l'effet de la présence de la persistance à long terme (PLT) dans les séries hydroclimatiques sur les tendances a été mis en évidence par [Khan et al. \(2019\)](#) en comparant la méthode MK avec la LTP.

Dans les huit tests utilisés, les valeurs absolues de la statistique Z diminuent lorsque les effets de la persistance à court terme (STP) et de la persistance à long terme (LTP) sont supprimés. Ainsi, la valeur statistique Z pour les tendances positives diminue dans la plupart des tests, respectivement à partir des tests MMKY, TFPW, MK, MMK-PW, MMKH, Mmkh1lag, mmkh3lag et enfin du test LTP. Il est également observé que lorsque la persistance est présente dans la série de données (Hurst $H > 0,5$ dans le tableau 5), la valeur statistique Z avec les tests MK, MMKY, TFPW, MMK-PW et MMKH diminue considérablement et devient insignifiante avec le test LTP. En revanche, pour les données persistantes négativement (Hurst $H <$

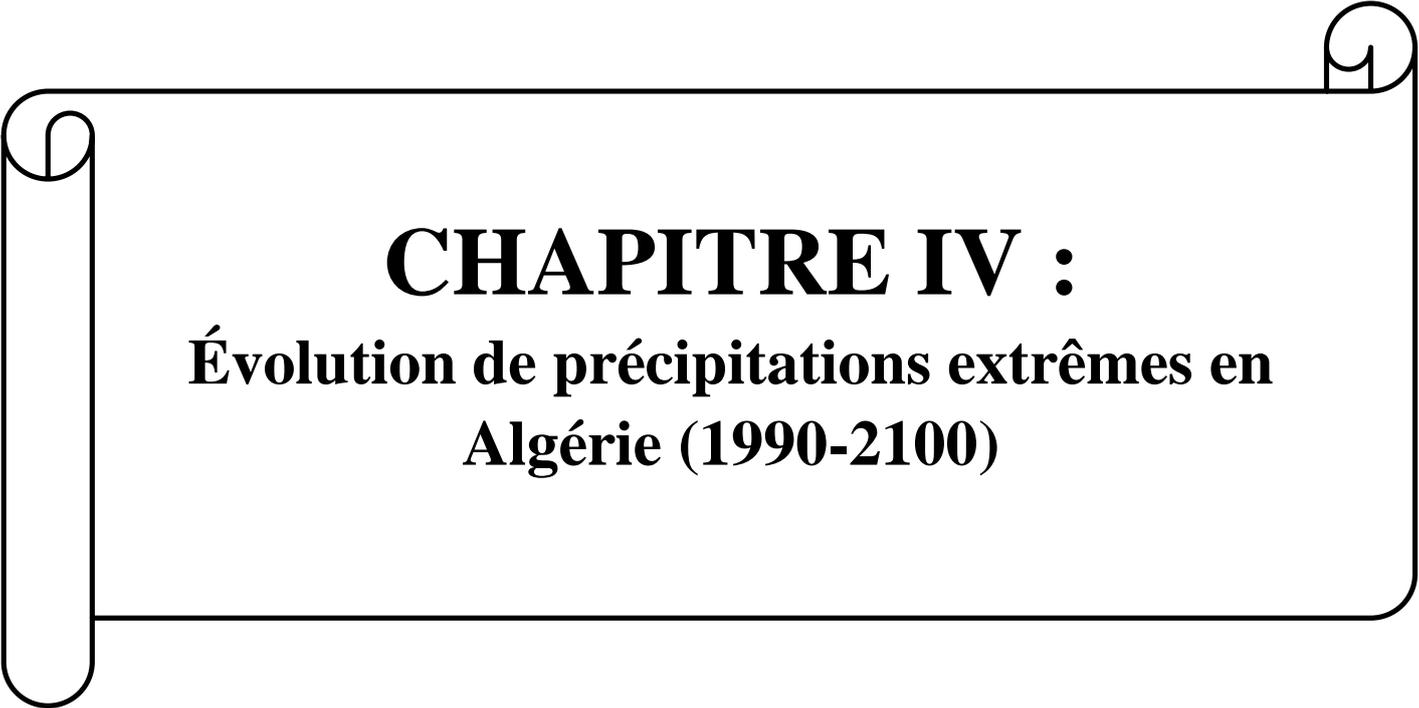
0,5 dans le tableau 5), la valeur de la statistique Z avec les tests MK, MMKY et MMKH augmente légèrement avec le test LTP. L'augmentation du taux de rejet de l'hypothèse nulle dans le cas de données persistantes positivement (Hurst $H > 0,5$) et sa diminution dans la plupart des cas pour des données persistantes négativement (Hurst $H < 0,5$) ont également été observées par [Hu et al. \(2020\)](#).

Cette étude, la première du genre en Algérie et rare en Afrique du Nord, fournit des informations précieuses sur les impacts locaux du changement climatique. En les contextualisant dans le scénario actuel et en les reliant aux projections futures, cela contribue à notre compréhension des changements climatiques régionaux dans un contexte mondial. Selon le sixième rapport d'évaluation ([AR6, Seneviratne et al., 2021](#)), les prévisions suggèrent que notre région sera particulièrement affectée par les changements climatiques futurs, connaissant des précipitations plus fréquentes et plus intenses que celles récemment observées, ainsi qu'une augmentation significative de la durée des périodes sèches (CDD) ([Lionello et Scarascia, 2020](#)). Ces changements auront des implications majeures pour les extrêmes climatiques et la sécheresse dans la région.

4. Conclusions

L'objectif de ce chapitre était d'analyser la variabilité des indices de précipitations extrêmes à travers seize stations représentatives réparties dans diverses zones climatiques de l'Algérie. Des études récentes ont révélé que la tendance des séries chronologiques hydro-climatiques est influencée à la fois par la persistance à court et à long terme. Par conséquent, il est essentiel de prendre en compte l'effet d'autocorrélation lors de l'analyse de la variabilité temporelle des séries de données. Pour y parvenir, une comparaison entre le test de Mann-Kendall original et sept autres tests modifiés éliminant les effets de la persistance à court et à long terme a été effectuée sur tous les indices de précipitations extrêmes des 16 stations pluviométriques étudiés. De plus, l'étude révèle qu'en général, les dix indices de précipitations extrêmes des stations de la zone Csa montrent une tendance croissante à long terme de leur variabilité temporelle au cours de la période 1969-2021, à l'exception de l'indice CDD. Comme pour les stations situées dans la zone climatique semi-aride froid/chaud (BSK/BSH), les tests montrent une tendance à la baisse des indices, à l'exception de l'indice CWD. Cependant, la variabilité temporelle des indices pour les stations situées dans la zone climatique désertique froide (Bwk) présente des tendances hétérogènes. Lorsque l'effet de persistance à long terme est pris en compte, de fausses tendances sont détectées par les tests MK, MMKY, TFPW, MMK-PW et MMKH pour les données persistantes positives, et une véritable tendance pour les données persistantes négatives peut être masquée par ces tests.

En conclusion, ce chapitre fournit des informations précieuses sur la tendance des épisodes de précipitations extrêmes en Algérie au cours des dernières décennies. L'utilisation de tests modifiés pour éliminer les effets de la persistance à court et à long terme sur l'analyse des tendances fournit des résultats plus précis et plus fiables. Ces résultats peuvent aider les décideurs et les parties prenantes de la région à élaborer des stratégies et des politiques efficaces pour atténuer l'impact potentiel des événements de précipitations extrêmes sur le cycle hydrologique et les écosystèmes ainsi que les milieux urbain et rural. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour mieux comprendre les effets à long terme des événements de précipitations extrêmes sur le cycle hydrologique et les écosystèmes de l'Algérie.



CHAPITRE IV :
Évolution de précipitations extrêmes en
Algérie (1990-2100)

Dans le contexte du réchauffement climatique actuel, le sixième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) met en lumière les changements anticipés dans la fréquence et l'intensité des phénomènes météorologiques extrêmes dans de nombreuses régions du monde (IPCC, 2014; Seneviratne et al., 2021). Ces variations découlent de la dynamique de la circulation atmosphérique et des effets thermodynamiques, eux-mêmes influencés par la hausse significative de la température (Faranda et al., 2023; King et al., 2023; Chan et al., 2020; Shen et al., 2018). Les changements des phénomènes météorologiques extrêmes peuvent avoir de nombreuses répercussions socio-économiques significatives, telles que les inondations urbaines et les dommages aux infrastructures (Kumari et al., 2021; Pall et al., 2017).

Ces dernières années, l'Algérie a été touchée par des inondations dévastatrices causées par des pluies torrentielles ajoutées aux facteurs anthropiques dans diverses régions. Ces événements ont engendré d'importants dégâts matériels et humains, avec une fréquence croissante observée au fil des dernières décennies (Korichi et al. 2016; Kastali et al., 2020; et Hadjij et al. 2021). Ces événements extrêmes ont suscité un intérêt croissant de la part des chercheurs et décideurs, qui veulent situer les facteurs responsables de leur occurrence. Parmi ces facteurs figurent notamment l'urbanisation accrue des zones inondables, l'augmentation du nombre de constructions riveraines et l'intensification des précipitations extrêmes (Kastali et al., 2020; et Hadjij et al. 2021). L'intensification des précipitations extrêmes a fait l'objet d'une analyse approfondie dans le chapitre III, où une étude spatio-temporelle des événements extrêmes a été menée. Les résultats ont révélé des tendances distinctes selon les zones climatiques. Dans la zone méditerranéenne chaude (Csa), la plupart des indices de précipitations extrêmes ont montré une augmentation de leur variabilité temporelle entre 1969 et 2021, à l'exception notable de l'indice des jours secs consécutifs (CDD). En revanche, dans les zones semi-arides froides/chaudes (BSK/BSH), la majorité des indices tendent à diminuer, sauf l'indice des jours humides consécutifs (CWD) qui montre une tendance différente. Pour les stations situées dans la zone climatique du désert froid (Bwk), les tendances sont variables varient, certaines de ces stations climatiques affichent des baisses tandis que d'autres des augmentations. De plus, les projections climatiques indiquent une augmentation significative des risques inhérents dans le bassin méditerranéen, y compris en Algérie, en raison de l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre (Todaro et al., 2022, Cos et al., 2022; GIEC, 2021; Zittis, 2019 ; Seneviratne et al. 2021). Ces évolutions soulèvent des

interrogations sur les futurs schémas d'évolution des précipitations extrêmes dans les différentes zones climatiques de l'Algérie et dans le bassin méditerranéen.

Ce chapitre s'attache à répondre à ces interrogations en entreprenant plusieurs démarches. Tout d'abord, il vise à calculer sept indices climatiques d'extrêmes de précipitations pour chaque cellule de grille (0,25°×0,25°) couvrant l'Algérie sur une période historique (1990-2014) à partir des données de précipitations journalières issues des simulations des modèles NEX-GDDP-CMIP6 pour atteindre les objectifs suivants :

Après avoir calculé les sept indices de précipitations extrêmes ETCCDI pour la période historique (1990-2014) ainsi que pour les trois périodes futures ((2026-2050), (2051-2075) et (2076-2100)) selon les deux scénarios SSP245 et SSP585, la moyenne de chaque indice ETCCDI pour chaque cellule de grille sur les quatre périodes sera calculée. Ensuite, le changement entre les trois périodes futures par rapport à la période historique en utilisant le changement relatif (%) pour les indices PRCPTOT (mm), RX1day (mm), RX5day (mm), R95p (mm) et R99p (mm), et le changement absolu (jours) pour les deux indices R10mm (jours) et R20mm (jours) sera déterminé. Le changement relatif (%) et le changement absolu (jours) entre les indices ETCCDI sont calculés au niveau de chaque cellule de grille sur la période historique ($ETCCDI^{hist}$) et ceux des périodes projetées ($ETCCDI^{proj}$) :

$$Changement\ relatif(\%) = \frac{ETCCDI^{proj} - ETCCDI^{hist}}{ETCCDI^{hist}} \times 100 \dots\dots\dots(1)$$

$$Changement\ absolu(jours) = ETCCDI^{proj} - ETCCDI^{hist} \dots\dots\dots(2)$$

Pour chacune des cinq zones définies et pour chacun des indices de précipitations extrêmes ETCCDI, la moyenne du changement relatif (%) et la moyenne du changement absolu (en jours) de chaque zone pour chaque modèle climatique, ainsi que la moyenne de l'ensemble des modèles (MME-33) pour les trois périodes futures ((2026-2050), (2051-2075) et (2076-2100)) selon les deux scénarios SSP245 et SSP585 sera évaluée.

Après avoir calculé la moyenne du changement relatif (%) et du changement absolu (en jours) de chaque indice pour chaque zone et chaque modèle climatique sur les trois périodes futures selon les scénarios SSP245 et SSP585, les changements relatifs des 33 modèles climatiques dans chacune des zones pour les trois périodes futures selon les deux scénarios seront présentés sous forme de diagrammes en boîte et en moustaches. Chaque boîte représente la distribution des changements relatifs des modèles pour une période spécifique et pour

chacune des zones avec les deux scénarios. Dans ces diagrammes en boîte et en moustaches, les médianes, les quartiles et les plages interquartiles sont clairement visibles, ce qui permet une comparaison rapide des variations projetées par les différents modèles dans chacune des zones et pour les deux scénarios. En outre, les cartes spatiales de chaque modèle pour les sept indices et leurs changements au cours des trois périodes futures selon les deux scénarios sont élaborées.

1. Résultats

1.1. Variations relatives (%) des indices pour chaque simulation de modèle

Le changement relatif (%) et absolu (jours) des indices étudiés avec chacun des modèles ainsi qu'avec l'ensemble de multi-modèle (MME-33) est présenté dans la figure IV.2 (PRCPTOT), IV.3 (RX1day), IV.4 (RX5day), IV.5 (R99p), IV.6 (R95p), IV.7 (R20mm) et IV.8 (R10mm). Pour chaque zone et pour les trois périodes futures ((2026-2050), (2051-2075) et (2076-2100)) selon les deux scénarios. Les limitations et la sélection des cinq zones (Figure IV.1) sont déjà présentées dans la section 1.3 du chapitre II.

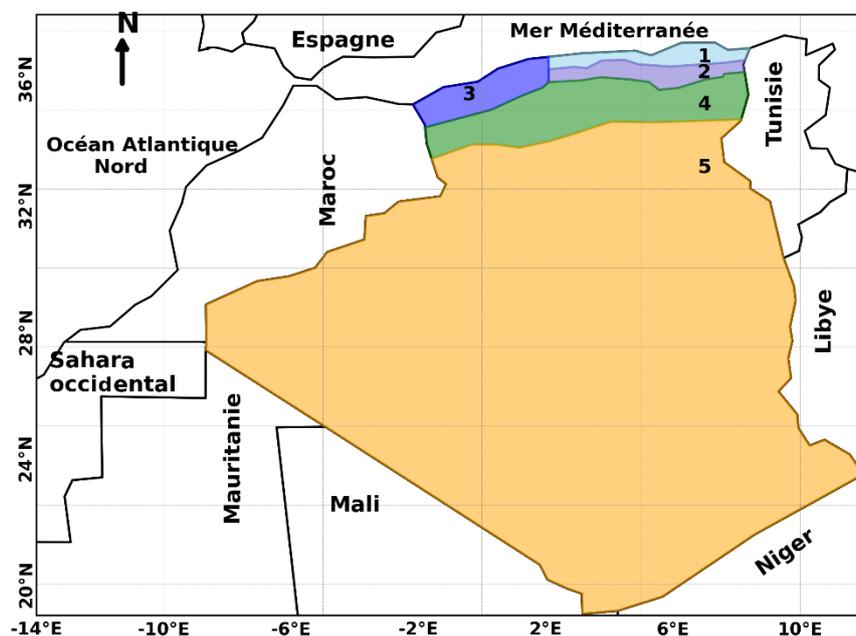


Figure IV.1 : Les limites des cinq zones étudiées

1.1.1. Précipitations totales annuelles en jours humides (PRCPTOT)

En ce qui concerne le changement relatif (%) de l'indice PRCPTOT, pour les trois périodes et les deux scénarios, une tendance générale de diminution des précipitations est observée dans les zones 1, 2, 3 et 4, comme illustré par la figure IV.2. En revanche, la plupart des modèles prévoient une augmentation des précipitations dans la zone 5, quelle que soit la période ou le scénario considéré. Pour la Zone 1, la diminution maximale des précipitations sous le scénario SSP245 a été observée avec les simulations du modèle CMCC-ESM2, avec une baisse de -24,10% pour la période 2026-2050, suivie par le modèle PSL-CM6A-LR avec -26,14 % pour la période 2051-2075, et enfin le modèle CESM2 avec une baisse de -31,36% pour la période 2076-2100. Sous le scénario SSP585, la plus forte diminution des précipitations dans la Zone 1 a été enregistrée avec les simulations du modèle IPSL-CM6A-LR. Cette diminution a été de -22,82% pour la période 2026-2050, de -36,78 % pour la période 2051-2075, et elle a atteint un niveau considérable de l'ordre de -57,49% pour la période 2076-2100. Pour la Zone 2, sous le scénario SSP245, les simulations du modèle CMCC-ESM2 ont montré la plus grande diminution des précipitations, atteignant -24,89% pour la période 2026-2050. De même, pour la période 2051-2075, le modèle IPSL-CM6A-LR a enregistré la plus forte baisse, avec une diminution de -27,64%. Enfin, pour la période 2076-2100, le modèle CESM2 a présenté la diminution maximale, s'élevant à -32,23%. Sous le scénario SSP585, le modèle IPSL-CM6A-LR a enregistré les diminutions les plus marquées, avec -23,38% pour la période 2026-2050, -37,43% pour la période 2051-2075, et -58,45% pour la période 2076-2100. Pour la Zone 3, le modèle IPSL-CM6A-LR a enregistré la plus grande diminution, avec -25,21% pour la période 2026-2050, -31,88 % pour la période 2051-2075, et -37,06 % pour la période 2076-2100. Sous le scénario SSP585, le modèle IPSL-CM6A-LR a également présenté les plus fortes baisses, avec des diminutions de -26,23%, -39,18% et -64,03% pour les périodes 2026-2050, 2051-2075 et 2076-2100 respectivement. Dans le cas de la Zone 4, sous le scénario SSP245, le modèle CMCC-ESM2 a présenté la plus grande baisse, atteignant -23,41% pour la période 2026-2050. Cette tendance s'est intensifiée au fil du temps, avec le modèle MPI-ESM1-2-HR enregistrant la plus forte diminution de -38,65 % pour la période 2076-2100. Sous le scénario SSP585, la tendance à la diminution des précipitations est également très marquée, avec des valeurs minimales de -24,92%, -36,57% et -60,01% pour les périodes 2026-2050, 2051-2075 et 2076-2100 respectivement, toutes issues du modèle IPSL-CM6A-LR. Enfin, pour la Zone 5 sous le scénario SSP245, bien que la tendance générale soit une augmentation des précipitations, des résultats divergents ont été observés pour certaines périodes. Pour la période 2026-2050, le modèle MRI-ESM2-0 a montré une augmentation de 34,36%.

Cependant, pour les périodes ultérieures, l'augmentation avec le modèle EC-Earth3 est plus prononcée, avec des valeurs de 63,64 % pour la période 2051-2075 et 62,57 % pour la période 2076-2100. Sous le scénario SSP585, le modèle NESM3 a montré la plus forte augmentation pour la période 2026-2050 avec 59,11%. Les augmentations pour les périodes suivantes sont de 86,63 % pour 2051-2075 et de 97,63 % pour 2076-2100, toutes enregistrées avec le modèle EC-Earth3.

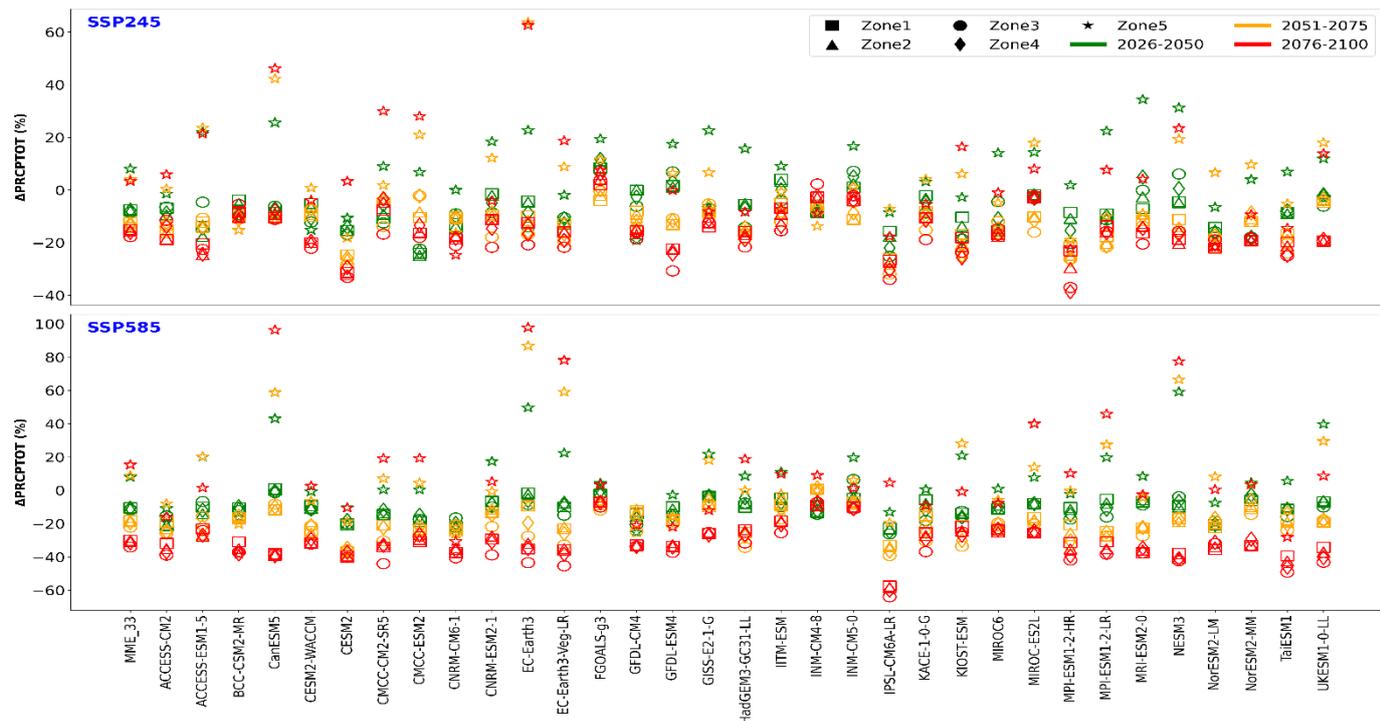


Figure IV.2 : Variations relatives en pourcentage de l'indice PRCPTOT à travers les modèles, l'ensemble multi-modèles et les scénarios pour les périodes futures (2026-2100) comparées à la période historique (1990-2014) dans les cinq zones de l'Algérie.

L'utilisation de l'ensemble multi-modèle MME-33 confirme ces observations, avec une diminution générale des précipitations dans les zones 1, 2, 3 et 4, et une augmentation dans la zone 5, indépendamment du scénario ou de la période, comme illustré à la figure IV.2. Ainsi, sous le scénario SSP245, les résultats obtenus avec l'ensemble de multi-modèles MME-33 révèlent une tendance à la diminution des précipitations dans les zones 1, 2, 3 et 4 pour la période 2026-2050, avec des portions variant de 7,5% à 8,5%. Cette tendance se renforce au fil du temps, avec des pourcentages de diminution atteignant jusqu'à 15% dans la zone 1, 14,3% dans la zone 3 et 16,1% dans la zone 4 pour la période 2076-2100. En revanche, une augmentation des précipitations est observée dans la zone 5, avec des pourcentages respectifs de 8,01%, 4,04% et 3,31% pour les périodes (2026-2050), (2051-2075) et (2076-2100). Sous le scénario SSP585 et pour la période 2026-2050, les diminutions avec MME-33 varient de 7,5% dans la zone 1 à 8,5% dans la zone 3, et de 7,7% dans la zone 4. Cette tendance

s'accroît au fil du temps, avec des pourcentages de diminution atteignant jusqu'à 15,1% dans la zone 1, 14,3% dans la zone 3 et 16,1% dans la zone 4 pour la période 2076-2100. Cependant, l'augmentation des précipitations dans la zone 5 est de 8,1%, 4,1% et 3,3% respectivement pour les périodes de (2026-2050), (2051-2075) et (2076-2100).

1.1.2. Précipitations annuelles maximales sur 1 jour (RX1day)

En ce qui concerne le changement relatif (%) de l'indice RX1day pour les trois périodes et les deux scénarios, une tendance générale à l'augmentation par l'ensemble des simulations de modèles est observée dans les cinq zones comme illustrée par la figure IV.3. Pour la Zone 1 sous le scénario SSP245, le modèle KACE-1-0-G a montré la plus forte augmentation des RX1day pour la période 2026-2050, atteignant 26,62%. Cette tendance s'est maintenue pour les périodes suivantes, avec des valeurs de 26,03% pour 2051-2075 et 31,26% pour 2076-2100, toutes enregistrées avec le même modèle. Sous le scénario SSP585, le modèle KACE-1-0-G a présenté la plus forte augmentation de rx1day pour la période 2026-2050, avec une valeur de 20,36. Cette tendance s'est maintenue pour la période 2076-2100, avec une augmentation de 31,02, toutes deux enregistrées avec le modèle KACE-1-0-G. Pour la Zone 2 sous le scénario SSP245, le modèle UKESM1-0-LL a présenté la plus forte augmentation de l'indice RX1day pour la période 2026-2050, avec une valeur de 15,44 %. En revanche, pour les périodes 2051-2075 et 2076-2100, le modèle FGOALS-G3 a enregistré les augmentations les plus marquées, avec des valeurs de 16,47% et 16,18% respectivement. Sous le scénario SSP585, le modèle cmcc-esm2 a montré la plus forte augmentation de Rx1day pour la période 2026-2050, avec une valeur de 18,87. En revanche, pour les périodes 2051-2075 et 2076-2100, le modèle FGOALS-g3 a enregistré les augmentations les plus marquées, avec des valeurs de 14,31 et 11,51 respectivement. Pour la Zone 3 sous le scénario SSP245, le modèle NESM3 a montré la plus forte augmentation de l'indice RX1day pour la période 2026-2050, avec 20,28%. Cette tendance s'est maintenue pour la période 2076-2100, avec une augmentation de 29,43%, tandis que pour la période 2051-2075, c'est le modèle MIROC6 qui a enregistré la plus forte augmentation, avec 17,83%. Sous le scénario SSP585, les modèles CMCC-ESM2 a montré les plus fortes augmentations de RX1day pour la période 2026-2050, avec un taux de 17,06%. Pour la période 2051-2075, c'est le modèle NESM3 qui a enregistré la plus forte augmentation, avec une valeur de 20,76%, tandis que pour la période 2076-2100, c'est le modèle MIROC6 qui a montré la plus forte augmentation, avec une valeur de 17,05%. Pour la Zone 4 sous le scénario SSP245, le modèle CESM2-WACCM a montré les plus fortes

augmentations de l'indice RX1day pour la période 2051-2075, avec des valeurs de 16,92%. Pour la période 2026-2050, c'est le modèle nesm3 qui a enregistré la plus forte augmentation, avec 16,35 %, tandis que pour la période 2076-2100, c'est le modèle fgoals-g3 qui a montré la plus forte augmentation, avec 14,99 %. Sous le scénario SSP585, les modèles cmcc-esm2 a montré les plus fortes augmentations de Rx1day pour la période 2026-2050, avec un taux de 18,34%. Pour la période 2051-2075, c'est le modèle CANESM5 qui a enregistré la plus forte augmentation, avec un taux de 14,66%, tandis que pour la période 2076-2100, c'est le modèle fgoals-g3 qui a montré la plus forte augmentation, avec un taux de 11,67%. Pour la Zone 5 sous le scénario SSP245, le modèle MRI-ESM2-0 a enregistré la plus forte augmentation de l'indice RX1day pour la période 2026-2050, avec 32,22%. Pour les périodes suivantes, les augmentations les plus marquées ont été enregistrées avec le modèle KIOST-ESM, avec des taux de 29,34% pour 2051-2075 et de 26,38% pour 2076-2100. Sous le scénario ssp585, le modèle NESM3 a montré la plus forte augmentation de Rx1day pour la période 2026-2050, avec un taux de 47,11%. Pour les périodes 2051-2075 et 2076-2100, les augmentations les plus marquées ont été enregistrées avec le modèle KIOST-ESM, avec des taux de 45,76% et 59,83% respectivement.

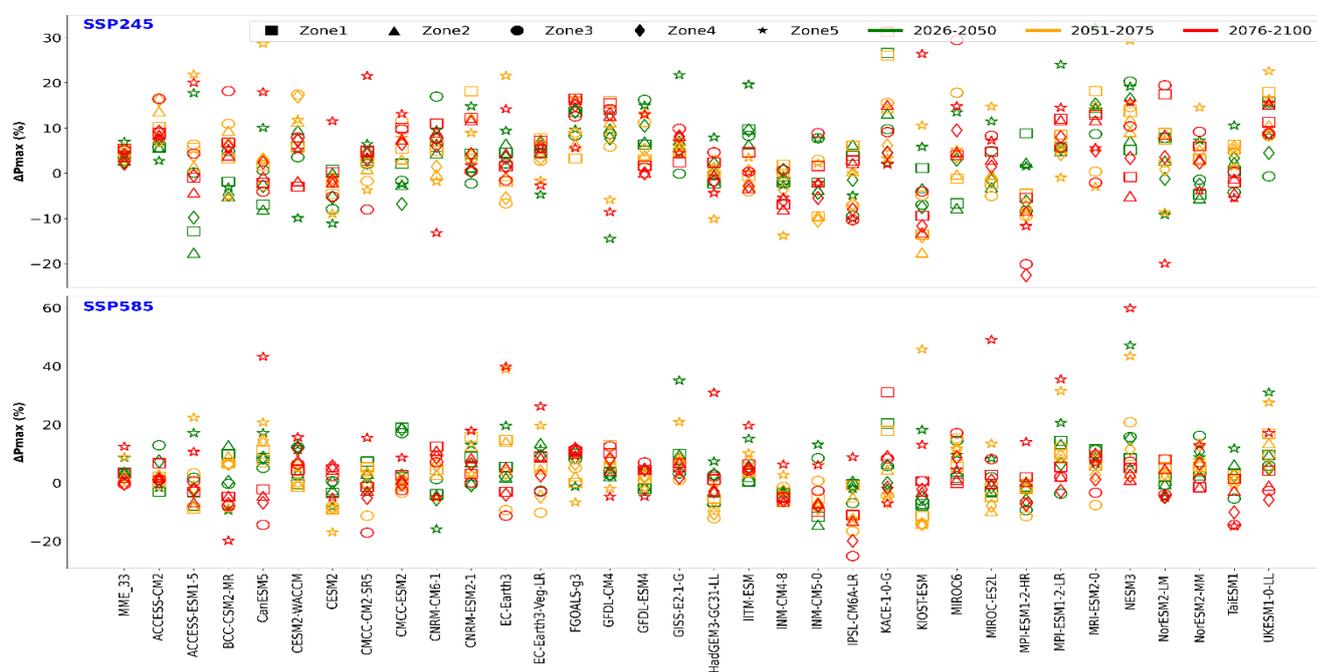


Figure IV.3 : Variations relatives en pourcentage de l'indice RX1day à travers les modèles, l'ensemble multi-modèles et les scénarios pour les périodes futures (2026-2100) comparées à la période historique (1990-2014) dans les cinq zones de l'Algérie.

L'utilisation de l'ensemble multi-modèle MME-33 confirme ces simulations, avec une augmentation générale de l'indice Rx1day pour les cinq zones indépendamment du scénario

ou de la période, comme illustré par la figure IV.3. De ce fait, sous le scénario SSP245, les résultats issus de l'ensemble multi-modèles MME-33 révèlent une tendance à l'augmentation de Rx1day dans les cinq zones pour la période 2026-2050, avec des taux variant de 2,5% à 7,0%. Cette tendance s'accroît au cours de la période suivante, 2051-2075, où les taux d'augmentation atteignent 5,0 % dans la zone 1, 3,85 % dans la zone 2, 4,15% dans la zone 3, 2,90% dans la zone 4 et 5,58% dans la zone 5. Cependant, pour la période 2076-2100, les taux montrent une légère diminution comparée à ceux enregistrés précédemment. Sous le scénario SSP585, pour la période 2026-2050, les taux d'augmentation enregistrés avec l'ensemble multi-modèles MME-33 varient de 3,56 % dans la zone 1 à 3,6% dans la zone 3, et il est de 8,63% dans la zone 5. Cette tendance à l'augmentation se renforce au cours de la période suivante, 2051-2075, avec des taux atteignant 4,1% dans la zone 1 et 8,83% dans la zone 5. Toutefois, pour la période 2076-2100, ces taux montrent une légère diminution à l'exception de la zone 5 où ce taux augmente jusqu'à 12,43%.

1.1.3. Précipitations annuelles maximales sur 5 jours (RX5day)

En ce qui concerne le changement relatif (%) de l'indice RX5day pour les trois périodes et les deux scénarios, une tendance générale à l'augmentation par l'ensemble des simulations de modèles est observée dans les cinq zones comme illustré à la figure IV.4. Sous le scénario SSP245, pour la période 2026-2050, la Zone 1 a enregistré une augmentation de 20,22% avec le modèle FGOALS-g3. Pour la Zone 2, l'augmentation était de 24,53 %, également avec le modèle FGOALS-g3. La Zone 3 a présenté une augmentation de 15,64 %, mesurée avec le modèle GFDL-ESM4. Concernant la Zone 4, l'augmentation était de 20,22 %, avec à nouveau le modèle FGOALS-g3. Enfin, pour la Zone 5, l'augmentation enregistrée était de 35,63 %, mesurée avec le modèle MRI-ESM2-0.

-Pour la période 2051-2075 sous le même scénario, les valeurs ont diminué dans l'ensemble des zones. Par exemple, la Zone 1 a enregistré une augmentation significative (17,22 %) donnée par le modèle GFDL-CM4. Pour la Zone 2, l'augmentation est de 13,68% pour le même le modèle. La Zone 3 a présenté une augmentation de 15,45 %, enregistrée avec le modèle GFDL-ESM4. Concernant la Zone 4, l'augmentation était de 12,08 %, mesurée avec le modèle CMCC-ESM2. Enfin, pour la Zone 5, l'augmentation enregistrée était de 38,13 %, mesurée avec le modèle CanESM5.

-Pour la période 2076-2100 sous le scénario SSP245, les valeurs ont continué à diminuer. Par exemple, la Zone 1 a enregistré une augmentation de seulement 11,26 %, avec le modèle

FGOALS-g3 alors qu'elle était de 20,22% durant la première période. Pour la Zone 2, l'augmentation était de 17,15 %, également avec le modèle FGOALS-g3. La Zone 3 a présenté une augmentation de 25,07 %, enregistrée avec le modèle MIROC6. Concernant la Zone 4, l'augmentation est de 15,71 %, mesurée à nouveau avec le modèle FGOALS-g3. Enfin, pour la Zone 5, l'augmentation enregistrée est de 33,79 %, mesurée avec le modèle CMCC-CM2-SR5.

-Pour le scénario SSP585, la tendance générale montre une augmentation des valeurs de l'indice RX5day dans toutes les zones pour les trois périodes étudiées. Pour la période 2026-2050, la Zone 1 a enregistré une augmentation de 7,68 % avec le modèle KACE-1-0-G. Dans la Zone 2, l'augmentation était de 9,48 %, mesurée avec le modèle GISS-E2-1-G. La Zone 3 a présenté une augmentation de 9,34 %, enregistrée avec le modèle INM-CM5-0. Concernant la Zone 4, l'augmentation était de 13,41 %, mesurée à nouveau avec le modèle GISS-E2-1-G. Enfin, pour la Zone 5, l'augmentation enregistrée était de 50,93 %, mesurée avec le modèle NESM3.

-Pour la période 2051-2075, la Zone 1 a enregistré une augmentation de 9,05 % avec le modèle EC-Earth3. Pour la Zone 2, l'augmentation était de 13,98 %, également avec le modèle EC-Earth3. La Zone 3 a présenté une augmentation de 12,21 %, enregistrée avec le modèle NESM3. Concernant la Zone 4, l'augmentation était de 14,91 %, donnée par le modèle NorESM2-MM. Enfin, pour la Zone 5, l'augmentation enregistrée était de 60,06 %, avec le modèle EC-Earth3.

-Pour la période 2076-2100, la Zone 1 a enregistré une augmentation de 5,52 % avec le modèle KACE-1-0-G. Pour la Zone 2, l'augmentation est de 8,82 %, mesurée avec le modèle FGOALS-g3. La Zone 3 a présenté une augmentation de 7,07 %, enregistrée avec le modèle MIROC6. Concernant la Zone 4, l'augmentation est de 10,81 %, mesurée à nouveau avec le modèle FGOALS-g3. Enfin, pour la Zone 5, l'augmentation enregistrée est de 73,48 %, avec le modèle CanESM5.

-Pour les deux scénarios, SSP245 et SSP585, des modèles ont prédit des diminutions des valeurs de l'indice RX5day dans certaines régions et pour certaines périodes. Ces diminutions varient d'une période à l'autre et d'une région à l'autre, avec des pourcentages de diminution variable pour les différentes combinaisons de modèles pour toutes les régions et les périodes.

-Pour le scénario SSP245, les diminutions minimales de l'indice RX5day sont les suivantes :

-Pour la période 2026-2050, les diminutions les plus prononcées ont été enregistrées dans différentes zones avec des pourcentages de diminution allant jusqu'à -22,22 %. Par exemple, dans la Zone 5, le modèle GFDL-CM4 a prédit une diminution de -22,22 %.

-Pour la période 2051-2075, les diminutions varient également selon les zones, avec des valeurs minimales allant jusqu'à -18,81 %. Dans la Zone 4, le modèle KIOST-ESM a enregistré une diminution de -18,81 %.

-Pour la période 2076-2100, les diminutions les plus importantes ont été observées, avec des valeurs minimales atteignant jusqu'à -28,87 %. Par exemple, dans la Zone 4, le modèle MPI-ESM1-2-HR a prédit une diminution de -28,87 %.

Pour le scénario SSP585, les valeurs minimales de l'indice RX5day sont les suivantes :

-Pour la période 2026-2050, les diminutions les plus marquées ont été enregistrées, avec des pourcentages de diminution allant jusqu'à -35,63 %. Par exemple, dans la Zone 3, le modèle TaiESM1 a prédit une diminution de -14,79 %.

-Pour la période 2051-2075, les diminutions varient également selon les zones, avec des valeurs minimales allant jusqu'à -21,43 %. Dans la Zone 3, le modèle HadGEM3-GC31-LL a enregistré une diminution de -21,43 %.

-Pour la période 2076-2100, les diminutions les plus importantes ont été observées, avec des valeurs minimales atteignant jusqu'à -35,63 %. Par exemple, dans la Zone 3, le modèle IPSL-CM6A-LR a prédit une diminution de -35,63 %.

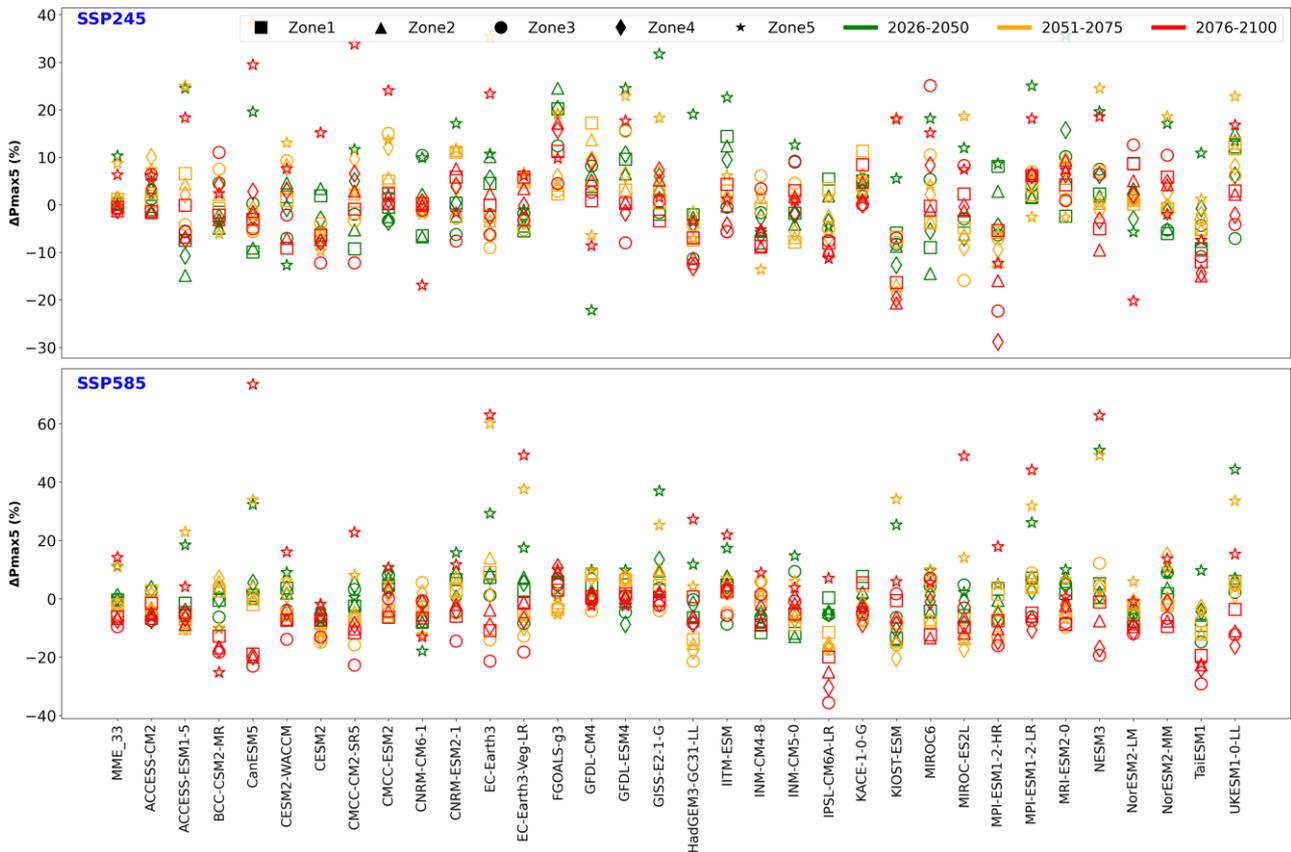


Figure IV.4 : Variations relatives en pourcentage de l'indice RX5day à travers les modèles, l'ensemble multi-modèles et les scénarios pour les périodes futures (2026-2100) comparées à la période historique (1990-2014) dans les cinq zones de l'Algérie.

L'utilisation de l'ensemble multi-modèle MME-33 permet de confirmer les tendances observées dans les simulations, révélant une augmentation globale de l'indice RX5day dans les cinq zones, indépendamment du scénario climatique considéré ou de la période analysée, comme illustré dans la figure IV.4. Sous le scénario SSP245, les résultats de l'ensemble multi-modèles MME-33 mettent en lumière une tendance à l'augmentation de l'indice RX5day dans toutes les zones pour la période 2026-2050, avec des taux variant de 0,02 % à 10,27 %. Cette tendance se renforce pour la période suivante, 2051-2075, où les taux d'augmentation atteignent jusqu'à 1,185 % dans la zone 1, 1,150 % dans la zone 4, et 8,710 % dans la zone 5. Cependant, une légère diminution est observée pour la période 2076-2100, bien que certains taux d'augmentation restent significatifs, avec des diminutions minimales variant de -1,289 % à -0,508 %. Sous le scénario SSP585, les taux d'augmentation enregistrés avec l'ensemble multi-modèles MME-33 montrent une variation similaire, avec des augmentations de 11,12 % à 14,19 % pour la période 2076-2100. Cette tendance à l'augmentation est particulièrement prononcée pour la zone 5, où le taux d'augmentation atteint jusqu'à 14,19 % pour la période 2076-2100, contrairement à une légère diminution observée dans les autres zones pour la même période. Ces résultats soulignent la robustesse des projections de l'ensemble multi-

modèle et mettent en évidence l'importance de considérer les variations régionales et temporelles dans l'analyse des impacts potentiels des changements climatiques.

1.1.4. Précipitations totales annuelles à partir de jours > 99e percentile (R99p)

En ce qui concerne le changement relatif (%) de l'indice R99p pour les trois périodes et les deux scénarios, une tendance générale à l'augmentation par l'ensemble des simulations de modèles est observée dans les cinq zones comme illustré dans la figure IV.5. Pour la Zone 1, sous le scénario SSP245, le modèle NorESM2-LM a enregistré la plus forte augmentation des valeurs de R99p pour la période 2026-2050, atteignant 45,72 %. Cette tendance s'est maintenue pour les périodes suivantes, avec des valeurs de 44,97 % pour 2051-2075 avec le modèle KACE-1-0-G et 49,78 % pour 2076-2100 avec le modèle NorESM2-LM. Sous le scénario SSP585, le modèle KACE-1-0-G a également présenté la plus forte augmentation de R99p pour les périodes 2026-2050 et 2076-2100, avec un taux de 46,06% et 81,02%, respectivement. Cette tendance s'est aussi observée avec le modèle GFDL-CM4 pour la période 2051-2075, avec une augmentation de 49,66%. Pour la Zone 2, sous le scénario SSP245, le modèle EC-Earth3 a montré la plus forte augmentation des valeurs de R99p pour la période 2026-2050, atteignant 37,91 %. Cette tendance s'est maintenue pour la période 2051-2075, avec une valeur de 42,89 % enregistrée avec le modèle MRI-ESM2-0. Pour la période 2076-2100, le modèle EC-Earth3-Veg-LR a présenté la plus forte augmentation, avec 41,38 %. Sous le scénario SSP585, le modèle CMCC-ESM2 a montré la plus forte augmentation pour la période 2026-2050, avec une valeur de 44,83, tandis que le modèle GISS-E2-1-G a enregistré la plus forte augmentation pour la période 2051-2075, avec une valeur de 42,91%. Cette tendance s'est également observée avec le modèle KACE-1-0-G pour la période 2076-2100, avec une augmentation de 50,61%. Pour la Zone 3, sous le scénario SSP245, le modèle CNRM-CM6-1 a montré la plus forte augmentation des valeurs de R99p pour la période 2026-2050, atteignant 56,15 %. Cette tendance s'est maintenue pour la période 2051-2075, avec une valeur de 82,18 % enregistrée avec le modèle MRI-ESM2-0. Pour la période 2076-2100, le modèle MIROC6 a présenté la plus forte augmentation, avec 62,80 %. Sous le scénario SSP585, le modèle NorESM2-MM a également montré la plus forte augmentation pour la période 2026-2050, avec une valeur de 43,39, tandis que le modèle GFDL-CM4 a enregistré la plus forte augmentation pour les périodes 2051-2075 et 2076-2100, avec un taux de 42,36% et 75,52, respectivement. Pour la Zone 4, sous le scénario SSP245, le modèle CMCC-CM2-SR5 a montré la plus forte augmentation des valeurs de R99p pour la période 2026-2050, atteignant 36,05 %. Cette tendance s'est maintenue pour la période 2051-2075, avec une valeur de 55,31 % enregistrée avec le modèle MRI-ESM2-0.

Pour la période 2076-2100, le modèle EC-Earth3-Veg-LR a présenté la plus forte augmentation, avec 35,88 %. Sous le scénario SSP585, le modèle BCC-CSM2-MR a montré la plus forte augmentation des valeurs de R99p pour la période 2026-2050, atteignant 38,47 %. Cette tendance s'est également observée avec le modèle GFDL-CM4 pour la période 2051-2075, avec une augmentation de 42,57%. De plus, le modèle GFDL-CM4 a enregistré la plus forte augmentation pour la période 2076-2100, avec une valeur de 48,39%.

Pour la Zone 5, sous le scénario SSP245, le modèle CNRM-CM6-1 a enregistré la plus forte augmentation des valeurs de R99p pour la période 2026-2050, atteignant 42,23 %. Cette tendance sera maintenue pour la période 2051-2075, avec une valeur de 52,87 % enregistrée avec le modèle NorESM2-LM. Pour la période 2076-2100, le modèle MRI-ESM2-0 a présenté la plus forte augmentation, avec 48,83 %. Sous le scénario SSP585, le modèle KIOST-ESM a montré la plus forte augmentation des valeurs de R99p pour la période 2026-2050, atteignant 44,72. Cette tendance s'est maintenue pour la période 2051-2075, avec une valeur de 44,98% enregistrée avec le modèle EC-Earth3-Veg-LR. Pour la période 2076-2100, le modèle KIOST-ESM a présenté la plus forte augmentation, avec une valeur de 59,38%.

Chapitre IV : Évolution de précipitations extrêmes en Algérie (1990-2100)

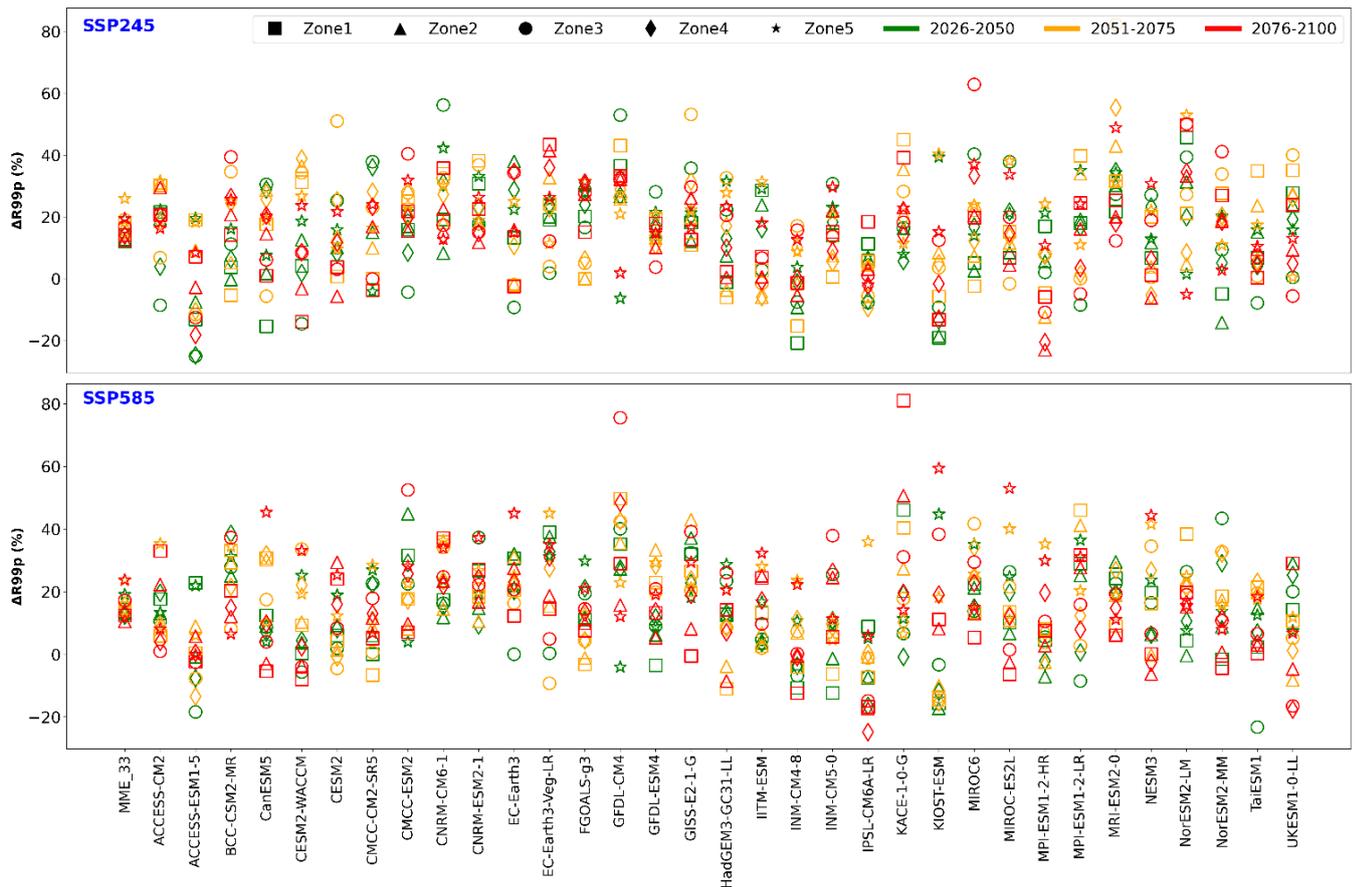


Figure IV.5 : Variations relatives en pourcentage de l'indice R99p à travers les modèles, l'ensemble multi-modèles et les scénarios pour les périodes futures (2026-2100) comparées à la période historique (1990-2014) dans les cinq zones de l'Algérie.

L'utilisation de l'ensemble multi-modèle MME-33 confirme ces simulations, avec une augmentation générale de l'indice R99p dans les cinq zones indépendamment du scénario ou de la période, comme illustré dans la figure IV.5. De ce fait, sous le scénario SSP245, les résultats issus de l'ensemble multi-modèles MME-33 révèlent une tendance à l'augmentation des valeurs de l'indice R99p dans les cinq zones pour la période 2026-2050. Les valeurs de l'indice R99p varient de 12% à 19,32% dans les différentes zones, la zone 5 affichant la valeur la plus élevée avec 19,32%. Pour la période 2051-2075, les valeurs augmentent, se situant entre 14,99% et 25,9%. Cette fois-ci, c'est la zone 5 qui enregistre la plus forte augmentation avec 25,9%. Pour la période 2076-2100, les valeurs diminuent légèrement par rapport à la période précédente, oscillant entre 12,29% et 19,45%. Dans cette période également, c'est la zone 5 qui présente la plus forte valeur, avec 19,45%. Pour le scénario SSP585, les taux d'augmentation enregistrés avec l'ensemble multi-modèles MME-33 varient différemment selon les périodes. Pour la période 2026-2050, les taux vont de 14,28% dans la zone 1 à 19,06% dans la zone 5. Lors de la période 2051-2075, ces taux connaissent une augmentation, s'étendant de 14,72% à 23,52%. En revanche, pour la période 2076-2100, une

variation se manifeste, avec des taux oscillant entre 12,42 % et 23,76 %. Ainsi, on observe une tendance générale à l'augmentation des taux d'augmentation des indices R99p au fil du temps, avec des variations spécifiques selon les zones et les périodes.

1.1.5. Précipitations totales annuelles à partir de jours > 95e centile (R95p)

En ce qui concerne le changement relatif (%) de l'indice R95p pour les trois périodes et les deux scénarios, une tendance générale à l'augmentation par l'ensemble des simulations de modèles est observée dans les cinq zones comme illustré dans la figure IV.6. Pour les deux scénarios, SSP245 et SSP585, une tendance générale à l'augmentation des valeurs de l'indice R95p est observée dans les cinq zones pour les trois périodes étudiées.

Dans la Zone 1, sous le scénario SSP245, le modèle FGOALS-g3 a enregistré la plus forte augmentation des valeurs de R95p pour la période 2026-2050, avec un maximum de 32,00%. Cette tendance s'est également observée pour la période 2076-2100, avec un maximum de 19,93% enregistré avec le modèle CNRM-ESM2-1. Sous le scénario SSP585, le modèle MRI-ESM2-0 a enregistré le maximum de R95p pour la période 2026-2050, avec une valeur de 25,34%. Cette tendance sera maintenue pour la période 2076-2100, avec un maximum de 13,57% enregistré avec le modèle FGOALS-g3.

Dans la Zone 2, sous le scénario SSP245, le modèle FGOALS-g3 a enregistré la plus forte augmentation des valeurs de R95p pour la période 2026-2050, avec un maximum de 37,55%. Cette tendance sera également observée pour la période 2076-2100, avec un maximum de 22,02% enregistré avec le modèle FGOALS-g3. Sous le scénario SSP585, le modèle MRI-ESM2-0 a enregistré le maximum de R95p pour la période 2026-2050, avec une valeur de 24,14%. Cette tendance maintenue pour la période 2076-2100, avec un maximum de 13,60% enregistré avec le modèle FGOALS-g3.

Dans la Zone 3, sous le scénario SSP245, le modèle NESM3 a montré la plus forte augmentation des valeurs de R95p pour la période 2026-2050, atteignant 35,04%. Cette tendance sera pour la période 2076-2100, avec un maximum de 41,82% enregistré avec le modèle MIROC6. Sous le scénario SSP585, le modèle NorESM2-MM a enregistré le maximum de R95p pour la période 2026-2050, avec une valeur de 19,32%. Cette tendance sera la même, pour la période 2076-2100, avec un maximum de 11,79% enregistré avec le modèle MIROC6.

Dans la Zone 4, sous le scénario SSP245, le modèle FGOALS-g3 a montré la plus forte augmentation des valeurs de R95p pour la période 2026-2050, atteignant 29,00%. Cette tendance sera également observée pour la période 2076-2100, avec un maximum de 26,27% enregistré avec le modèle FGOALS-g3. Sous le scénario SSP585, le modèle MPI-ESM1-2-HR a enregistré le maximum de R95p pour la période 2026-2050, avec une valeur de 43,78%. Cette tendance sera également observée avec le modèle GFDL-CM4 pour la période 2051-2075, avec un maximum de 22,40%.

Dans la Zone 5, sous le scénario SSP245, le modèle CNRM-CM6-1 a enregistré la plus forte augmentation des valeurs de R95p pour la période 2026-2050, atteignant 41,49%. Cette tendance sera maintenue pour la période 2076-2100, avec un maximum de 32,17% enregistré avec le modèle NESM3. Sous le scénario SSP585, le modèle MPI-ESM1-2-HR a enregistré le maximum de R95p pour la période 2026-2050, avec une valeur de 43,78%. Cette tendance sera de mise pour la période 2076-2100, avec un maximum de 67,67% enregistré avec le modèle CanESM5.

Pour les deux scénarios, SSP245 et SSP585, divers modèles ont anticipé des baisses des valeurs de l'indice R95p dans certaines régions et pour différentes périodes. Ces réductions fluctuent selon la période, la région et le modèle considérés, avec des pourcentages de diminution variables. Par exemple, dans la Zone 1 pour le scénario SSP245, le modèle ACCESS-ESM1-5 a enregistré une diminution maximale de -34,29% pour la période 2026-2050, tandis que dans la Zone 2, le modèle INM-CM5-0 a présenté une baisse de -21,04% pour la même période et le même scénario. Ces tendances se maintiendront pour d'autres périodes et d'autres régions, avec des valeurs minimales de diminution variant entre les différents modèles et scénarios. Par exemple, dans la Zone 5 pour le scénario SSP585, le modèle TaiESM1 a enregistré une baisse maximale de -11,22% pour la période 2076-2100. Ces résultats soulignent la complexité des projections climatiques et mettent en évidence la nécessité d'utiliser l'ensemble des modèles disponibles, tout en examinant attentivement les variations régionales et temporelles, pour mieux comprendre et cerner les impacts potentiels des changements climatiques sur la sécurité des biens et des personnes.

Chapitre IV : Évolution de précipitations extrêmes en Algérie (1990-2100)



Figure IV.6 : Variations relatives en pourcentage de l'indice R95p à travers les modèles, l'ensemble multi-modèles et les scénarios pour les périodes futures (2026-2100) comparées à la période historique (1990-2014) dans les cinq zones de l'Algérie.

L'analyse des projections pour l'indice R95p, effectuée à l'aide de l'ensemble multi-modèle MME-33 pour les scénarios SSP245 et SSP585, révèle une variabilité des tendances en termes d'augmentation et de diminution des valeurs de cet indice dans les différentes zones et pour chacune des périodes étudiées. Sous le scénario SSP245, l'ensemble des modèles prévoit à la fois des augmentations et des diminutions des valeurs de l'indice R95p dans toutes les zones pour les trois périodes examinées. Pour la période 2026-2050, on observe des diminutions dans toutes les zones, bien qu'allant de relativement faibles à faibles (-0,99% dans la zone 1 à 15,68% dans la zone 5). En revanche, pour la période 2051-2075, toutes les zones connaissent des augmentations, avec des valeurs allant de 0,051% dans la zone 2 à 19,226% dans la zone 5. Pour la période 2076-2100, une combinaison d'augmentations et de diminutions est observée, avec des diminutions allant de -2,054% dans la zone 3 à -13,34% dans la zone 1, et des augmentations allant de -0,016% dans la zone 4 à 15,468% dans la zone 5.

Sous le scénario SSP585, les tendances sont similaires, avec à la fois des augmentations et des diminutions des valeurs de l'indice R95p dans toutes les zones pour les trois périodes étudiées. Pour la période 2026-2050, les diminutions vont de -2,58% dans la zone 1 à 16,78% dans la

zone 5. Pour la période 2051-2075, les diminutions s'intensifient, allant de -4,99% dans la zone 2 à -8,72% dans la zone 3, tandis que pour la période 2076-2100, des diminutions plus marquées sont observées, allant de -11,36% dans la zone 4 à -14,69% dans la zone 2. Toutefois, malgré ces diminutions, des augmentations significatives sont également observées, en particulier dans la zone 5, où les valeurs augmentent de 20,25% pour la période 2076-2100. L'ensemble multi-modèle MME-33 confirme les résultats de prévision de chaque modèle individuellement considéré, en corroborant à la fois les tendances d'augmentation et de diminution observées. Cette confirmation renforce la crédibilité des projections climatiques, mettant en évidence la robustesse des résultats malgré la diversité et la provenance des modèles utilisés. Cela souligne également l'importance de considérer l'ensemble des modèles pour obtenir une vision plus complète et fiable des impacts potentiels des changements climatiques à l'échelle régionale.

1.1.6. Nombre de jours de fortes précipitations (R20mm)

La figure IV.7 illustre une fluctuation mixte des valeurs de l'indice R20mm dans toutes les zones et pour les deux scénarios, indiquant à la fois des augmentations et des diminutions. Les augmentations observées vont jusqu'à 1,5 jour et les diminutions jusqu'à -1,6 jour. Pour la Zone 1, sous le scénario SSP245, le modèle GFDL-CM4 a enregistré la plus forte augmentation des valeurs de R20mm pour la période 2026-2050, atteignant 1,17 jour. Cette tendance sera maintenue pour les périodes suivantes, avec des valeurs de 1,43 jour pour 2051-2075 avec le modèle GFDL-CM4 et 0,58 jour pour 2076-2100 avec le modèle MPI-ESM1-2-LR. Sous le scénario SSP585, le modèle MRI-ESM2-0 a présenté la plus forte augmentation de R20mm pour la période 2026-2050, avec une valeur de 0,77 jours. Pour la période 2051-2075, c'est le modèle GFDL-CM4 qui a enregistré la plus forte augmentation avec une valeur de 1,33 jour. Enfin, pour la période 2076-2100, c'est le modèle FGOALS-G3 qui a présenté la plus forte augmentation avec un taux de 0,51 jours. Pour la Zone 2, sous le scénario SSP245, le modèle IITM-ESM a montré la plus forte augmentation des taux de R20mm pour la période 2026-2050, atteignant 1,18 jour. Cette tendance s'est maintenue pour les périodes suivantes, avec un taux maximum de 0,88 jour pour 2051-2075 et de 0,89 jour pour 2076-2100 avec le modèle GFDL-CM4 pour les deux périodes. Sous le scénario SSP585, le modèle MRI-ESM2-0 a montré la plus forte augmentation de R20mm pour la période 2026-2050, avec une valeur de 0,71 jour. Pour la période 2051-2075, c'est le modèle GFDL-CM4 qui a enregistré la plus forte augmentation avec une valeur de 0,94 jour. Pour la période 2076-2100, c'est le modèle

FGOALS-g3 qui a présenté la plus forte augmentation avec une valeur de 0,50 jours. Pour la Zone 3, sous le scénario SSP245, le modèle GFDL-CM4 a enregistré la plus forte augmentation des valeurs de R20mm pour la période 2026-2050, atteignant 0.94 jour. Cette tendance sera de mise pour les périodes suivantes, avec des valeurs de 0.57 jour pour 2051-2075 avec le modèle BCC-CSM2-MR et 0.79 jour pour 2076-2100 avec le modèle MIROC6. Sous le scénario SSP585, le modèle NorESM2-MM a enregistré la plus forte augmentation de R20mm pour la période 2026-2050, avec une valeur de 0,57 jour. Pour la période 2051-2075, c'est le modèle NESM3 qui a montré la plus forte augmentation avec un taux de 0,54day. Enfin, pour la période 2076-2100, c'est le modèle GFDL-CM4 qui a présenté la plus forte augmentation avec une valeur de 0,69 jour. Pour la Zone 4, sous le scénario SSP245, le modèle GFDL-CM4 a montré la plus forte augmentation des valeurs de R20mm pour la période 2026-2050, atteignant 0.84 jour. Cette tendance s'est maintenue pour les périodes suivantes, avec des valeurs de 0.60 jour pour 2051-2075 avec le modèle CMCC-CM2-SR5 et 0.89 jour pour 2076-2100 avec le modèle GFDL-CM4. Sous le scénario SSP585, le modèle NorESM2-MM a enregistré la plus forte augmentation de R20mm pour la période 2026-2050, avec une valeur de 0,60jours. Pour la période 2051-2075, cette valeur a diminué pour atteindre 0,47 jour, toujours avec le modèle NorESM2-MM. Enfin, pour la période 2076-2100, le modèle FGOALS-G3 a présenté la plus forte augmentation avec une valeur de 0,28 jour. Pour la Zone 5, sous le scénario SSP245, le modèle MRI-ESM2-0 a enregistré la plus forte augmentation des valeurs de R20mm pour la période 2026-2050, atteignant 0.11 jour. Cette tendance s'est maintenue pour les périodes suivantes, avec des valeurs de 0.06 jour pour 2051-2075 avec le modèle ACCESS-CM2 et 0.09 jour pour 2076-2100 avec le modèle CMCC-CM2-SR5. Sous le scénario SSP585, le modèle NESM3 a maintenu une valeur constante de R20mm pour les périodes 2026-2050 et 2051-2075, avec une valeur de 0,06 jour. En revanche, pour la période 2076-2100, le modèle MIROC-ES2L a présenté une légère augmentation avec une valeur de 0,09 jour.

Chapitre IV : Évolution de précipitations extrêmes en Algérie (1990-2100)

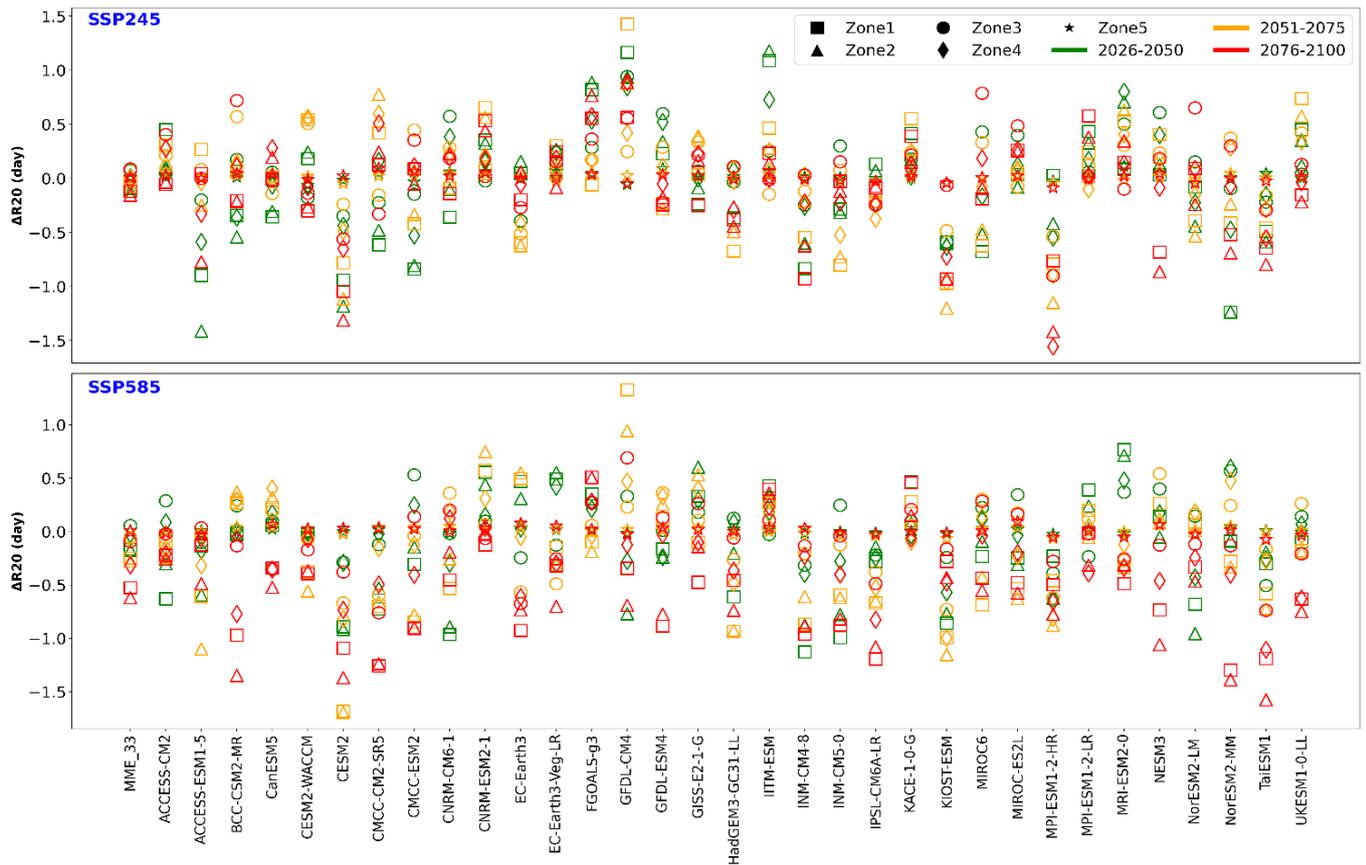


Figure IV.7 : Variations absolues en jour de l'indice R20mm à travers les modèles, l'ensemble multi-modèles et les scénarios pour les périodes futures (2026-2100) comparées à la période historique (1990-2014) dans les cinq zones de l'Algérie.

Les modèles individuels ainsi que l'ensemble multi-modèles MME-33 montrent la même tendance, avec à la fois des augmentations et des diminutions dans les variations simulées des cinq zones pour les différentes périodes sous les deux scénarios (Figure IV.7). Pour la Zone 1, sous le scénario SSP245, on observe une diminution de -0,09 jour de 2026 à 2050, suivie d'une légère augmentation de -0,028 jour de 2051 à 2075, et d'une diminution plus marquée de -0,118 jour de 2076 à 2100. Dans la Zone 2, les valeurs diminuent progressivement de -0,12 à -0,16 sur les trois périodes. En revanche, dans la Zone 3, une tendance à l'augmentation est observée, passant de 0,07 à 0,09 jour sur la même période. Quant aux Zones 4 et 5, elles affichent des variations stables, oscillant autour de 0 jour. Sous le scénario SSP585, les variations de l'indice R20mm sont également variables dans les cinq zones pour les différentes périodes. Dans la Zone 1, une diminution est observée, passant de -0,17 jour de 2026 à 2050 à -0,53 jour de 2076 à 2100. La Zone 2 affiche une tendance similaire avec des valeurs variant de -0,18 jour à -0,62 jour sur la même période. Cependant, dans la Zone 3, on observe une augmentation légère de 0,06 jour de 2026 à 2050, suivie d'une diminution à partir de 2051 jusqu'à -0,09 jour en 2076-2100. Les Zones 4 et 5 montrent également des tendances à la baisse, bien que moins prononcées que dans les Zones 1 et 2, avec des valeurs allant de -

0,03 jour à -0,32 jour pour la Zone 4 et restant relativement stables autour de 0 jour pour la Zone 5.

1.1.7. Nombre de jours de fortes précipitations (R10mm)

La figure IV.8 illustre une fluctuation des valeurs de l'indice R10mm dans toutes les zones et pour les deux scénarios, indiquant à la fois des augmentations et des diminutions. Les augmentations observées vont jusqu'à 1,5 jour et les diminutions jusqu'à -11,25 jours.

En ce qui concerne les augmentations, pour la période 2026-2050 sous le scénario SSP245, la Zone 1 a enregistré la valeur maximale la plus élevée, atteignant les 2,23 jours, avec le modèle FGOALS-g3. Cette tendance à des valeurs plus élevées s'est également manifestée dans d'autres régions pour la même période, comme pour la Zone 2 avec 2,03 jours, également avec le modèle FGOALS-g3. La Zone 4 a présenté une valeur maximale de 1,42 jour pour la période 2026-2050, associée au même modèle. Pour la période 2051-2075, les valeurs maximales ont diminué dans l'ensemble des régions sous le scénario SSP245. Par exemple, la Zone 1 a enregistré une baisse significative, avec seulement 0,15 jours, observée avec le modèle CMCC-CM2-SR5. La Zone 3 a également montré une diminution de la valeur maximale, tombant à 0,43 jours avec le modèle UKESM1-0-LL. Enfin, pour la période 2076-2100, la tendance à la baisse des valeurs maximales sera poursuivie. La Zone 1 a enregistré une valeur maximale de seulement 0,36 jour, avec le modèle MIROC-ES2L. De même, la Zone 3 a présenté une valeur maximale de 0,74 jour, également avec le modèle FGOALS-g3.

Relativement au scénario SSP585, les valeurs maximales étaient généralement plus faibles pour l'ensemble des régions et des périodes. Par exemple, pour la période 2026-2050, la Zone 1 a enregistré une valeur maximale de seulement 0,13 jours avec le modèle CanESM5. De même, pour la Zone 2, la valeur maximale était de 0,33 jours, observée avec le modèle EC-Earth3. Pour la période 2051-2075, la tendance à la baisse des valeurs maximales s'est poursuivie dans la plupart des régions. Par exemple, la Zone 3 a enregistré une valeur maximale de seulement 0,22 jours avec le modèle INM-CM4-8. De même, la Zone 4 a présenté une valeur maximale de 0,29 jours, également avec le modèle INM-CM4-8. Enfin, pour la période 2076-2100, les valeurs maximales sont restées généralement faibles, avec des modèles tels que FGOALS-g3 enregistrant des valeurs négatives pour certaines régions, indiquant une diminution significative des événements de précipitations intenses.

Concernant les diminutions attendues, pour la Zone 1 sous le scénario SSP245, le modèle CMCC-ESM2 a enregistré la plus forte diminution des valeurs de R10mm pour la période 2026-2050, atteignant -5,03 jours. Cette tendance sera maintenue pour les périodes suivantes, avec des valeurs minimales de -5,24 jours pour 2051-2075 avec le modèle NorESM2-LM et -6,86 jours pour 2076-2100 avec le modèle CESM2. Sous le scénario SSP585, le modèle CNRM-CM6-1 a présenté la plus forte diminution de R10mm pour la période 2026-2050, avec une valeur de -5,31 jours. Pour la période 2051-2075, c'est le modèle CESM2 qui a enregistré la valeur minimale la plus basse avec -7,86 jours. Enfin, pour la période 2076-2100, c'est le modèle GFDL-CM4 qui a présenté la valeur minimale la plus basse avec -11,25 jours.

Pour la Zone 2, sous le scénario SSP245, le modèle CMCC-ESM2 a montré la plus forte diminution des valeurs de R10mm pour la période 2026-2050, atteignant -4,81 jours. Cette tendance s'est maintenue pour les périodes suivantes, avec des valeurs minimales de -6,23 jours pour 2076-2100 avec le modèle CESM2. Sous le scénario SSP585, le modèle GFDL-CM4 a enregistré la plus forte diminution de R10mm pour la période 2026-2050 avec -5,57 jours. Pour la période 2051-2075, c'est également le modèle CESM2 qui a enregistré la valeur la plus basse avec -7,19 jours. Enfin, pour la période 2076-2100, c'est le modèle GFDL-CM4 qui a présenté la valeur minimale la plus basse avec -10,05 jours.

Pour la Zone 3, sous le scénario SSP245, le modèle MPI-ESM1-2-HR a enregistré la plus forte diminution des valeurs de R10mm pour la période 2026-2050, atteignant -2,81 jours. Cette tendance s'est maintenue pour les périodes suivantes, avec des valeurs minimales de -3,36 jours pour 2051-2075 avec le modèle KIOST-ESM et -4,64 jours pour 2076-2100 avec le modèle MPI-ESM1-2-HR. Sous le scénario SSP585, le modèle GFDL-CM4 a présenté la plus forte diminution de R10mm pour la période 2026-2050 avec -4,13 jours. Pour la période 2051-2075, c'est également le modèle KIOST-ESM qui a enregistré la valeur la plus basse avec -4,62 jours. Enfin, pour la période 2076-2100, c'est le modèle TaiESM1 qui a présenté la valeur minimale la plus basse avec -5,35 jours.

Pour la Zone 4, sous le scénario SSP245, le modèle KIOST-ESM a montré la plus forte diminution des valeurs de R10mm pour la période 2026-2050, atteignant -2,60 jours. Cette tendance s'est maintenue pour les périodes suivantes, avec des valeurs minimales de -3,63 jours pour 2051-2075 avec le modèle KIOST-ESM et -5,25 jours pour 2076-2100 avec le modèle MPI-ESM1-2-HR. Sous le scénario SSP585, le modèle GFDL-CM4 a présenté la plus forte diminution de R10mm pour la période 2026-2050 avec -4,54 jours. Pour la période 2051-2075, c'est également le modèle CESM2 qui a enregistré la valeur la plus basse avec -

4,05 jours. Enfin, pour la période 2076-2100, c'est le modèle GFDL-CM4 qui a présenté la valeur minimale la plus basse avec -6,42 jours.

Pour la Zone 5, sous le scénario SSP245, le modèle CESM2-WACCM a enregistré la plus forte diminution des valeurs de R10mm pour la période 2026-2050, atteignant -0,24 jours. Cette tendance s'est maintenue pour les périodes suivantes, avec des valeurs minimales de -0,22 jours pour 2051-2075 avec le modèle CESM2 et -0,37 jours pour 2076-2100 avec le modèle MPI-ESM1-2-HR. Sous le scénario SSP585, le modèle GFDL-CM4 a présenté la plus forte diminution de R10mm pour la période 2026-2050 avec -0,29 jours. Pour la période 2051-2075, c'est également le modèle MPI-ESM1-2-HR qui a enregistré la valeur la plus basse avec -0,30 jour. Enfin, pour la période 2076-2100, c'est le modèle GFDL-CM4 qui a présenté la valeur minimale la plus basse avec -0,39 jour.

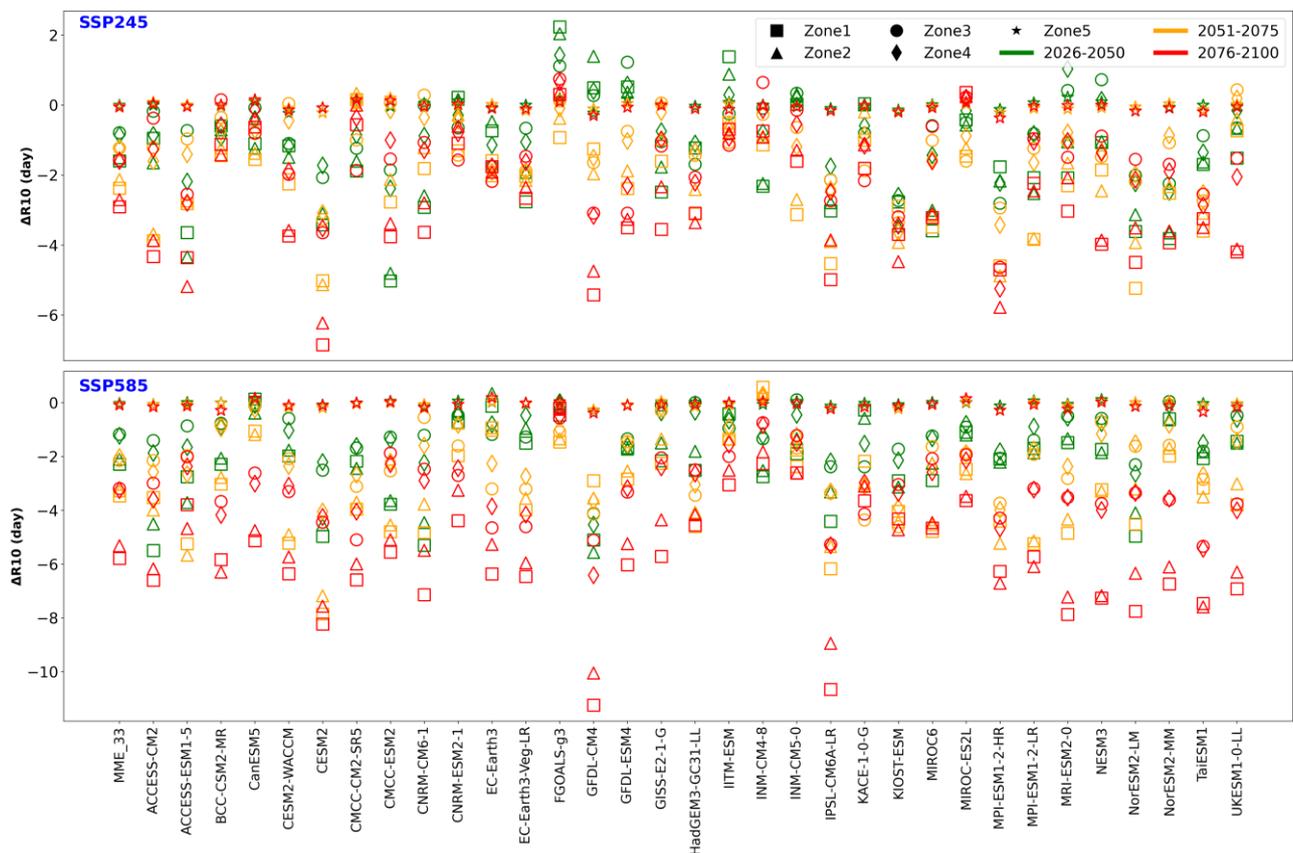


Figure IV.8 : Variations absolues en jour de l'indice R10mm à travers les modèles, l'ensemble multi-modèles et les scénarios pour les périodes futures (2026-2100) comparées à la période historique (1990-2014) dans les cinq zones de l'Algérie.

L'analyse des projections pour l'indice R10mm en jour, effectuée à l'aide de l'ensemble multi-modèle MME-33 pour les scénarios SSP245 et SSP585, révèle une variabilité des tendances en termes d'augmentation et de diminution dans les différentes zones et périodes étudiées. Sous le scénario SSP245, on observe à la fois des diminutions des valeurs de l'indice R10mm dans toutes les zones pour les trois périodes projetées. Pour la période 2026-2050, ces diminutions vont de -1,60% dans la zone 1 à -0,01% dans la zone 5. Pour la période 2051-2075, les diminutions s'intensifient, allant de -2,380% dans la zone 1 à -0,041% dans la zone 5, et pour la période 2076-2100, elles se poursuivent avec des valeurs allant de -2,913% dans la zone 1 à -0,061% dans la zone 5.

Sous le scénario SSP585, les tendances sont similaires, avec à nouveau des diminutions des valeurs de l'indice R10mm dans toutes les zones pour les trois périodes étudiées. Pour la période 2026-2050, ces diminutions vont de -2,30% dans la zone 1 à -0,04% dans la zone 5. Pour la période 2051-2075, elles s'intensifient, allant de -3,47% dans la zone 1 à -0,07% dans la zone 5, et pour la période 2076-2100, elles se poursuivent avec des valeurs allant de -5,79% dans la zone 1 à -0,10% dans la zone 5.

L'ensemble multi-modèle MME-33 confirme ainsi les tendances de diminution des valeurs de l'indice R10mm prédites par chaque modèle utilisé pour les deux scénarios. Cette concordance renforce la crédibilité des projections climatiques, mettant en lumière la robustesse des résultats malgré la diversité des modèles utilisés. Cet état de fait souligne également l'importance de considérer l'ensemble des modèles pour obtenir une vision plus complète et fiable des impacts potentiels des changements climatiques dans les différents domaines à l'échelle régionale.

1.2 Variations relatives (%) des indices pour chacune des zones par l'ensemble des modèles

Les diagrammes en boîte et en moustaches illustrant les variations relatives des 33 modèles climatiques dans chacune des zones pour les trois périodes futures selon les deux scénarios sont présentés dans les figures IV.9 (PRCPTOT), IV.10 (RX1day), IV.11 (RX5day), IV.12 (R99p), IV.13 (R95p), IV.14 (R20mm) et IV.15 (R10mm). Les cartes spatiales de chaque modèle, pour les sept indices, ainsi que leurs changements au cours des trois périodes futures selon les deux scénarios, sont compilées dans l'Annexe 1 sous forme d'une page **HTML**.

1.2.1. Précipitations totales annuelles en jours humides (PRCPTOT)

Les diagrammes en boîte et en moustaches représentant les changements relatifs (%) de l'indice PRCPTOT pour les 33 modèles climatiques dans chaque zone pour les trois périodes futures selon les deux scénarios sont présentés dans la figure IV.9.

L'analyse des changements de l'indice PRCPTOT selon les scénarios SSP245 et SSP585 sur trois périodes distinctes (2026-2050, 2051-2075 et 2076-2100) met en lumière des tendances générales tout en soulignant des disparités entre les régions géographiques. À travers chaque période, une diversité de valeurs est observée dans toutes les zones, allant de valeurs négatives à positives. Ces variations sont clairement représentées par les diagrammes en boîte, révélant des distributions asymétriques spécifiques à chaque zone. Pour le scénario SSP245, les changements moyens de l'indice PRCPTOT pour chaque zone sont généralement moins élevés que dans SSP585 sur les trois périodes. Par exemple, pour la Zone1 pendant la période 2026-2050, le changement moyen est de -7.66% dans SSP245, contre -10.09% dans SSP585. Cette tendance se vérifie à travers toutes les périodes et zones examinées, illustrant des variations moins marquées dans SSP245 par rapport à SSP585. Dans les deux scénarios, les zones 1 à 4 montrent une tendance à la baisse, caractérisée par des moyennes négatives et des quartiles indiquant une dispersion significative des changements relatifs de l'indice PRCPTOT, tandis que la zone 5 se distingue par une tendance à la hausse, suggérant une augmentation progressive des précipitations dans cette région au fil du temps. Malgré ces différences de moyennes, les variations entre les zones et les périodes demeurent cohérentes entre les deux scénarios, avec les zones 1 à 4 généralement en baisse et la Zone5 en hausse. Les descriptions des boîtes à moustaches de changements relatifs (%) de l'indice PRCPTOT de chaque période et de chaque scénario sont représentées en détail ci-dessous :

L'étude des variations de l'indice PRCPTOT selon le scénario SSP245 sur trois périodes distinctes (2026-2050, 2051-2075 et 2076-2100) met en évidence des disparités notables entre les différentes zones géographiques.

Pour la période 2026-2050, nous observons des différences marquées entre les zones. La Zone1 affiche une plage de valeurs allant de -24.10% à 8.35%, avec un minimum de -24.10%, un premier quartile (Q1) de -12.30%, une médiane de -7.54%, un troisième quartile (Q3) de -3.82%, et un maximum de 8.35%. Sa moyenne est de -7.66%. Les données pour la Zone2 montrent des variations de -24.89% à 11.04%, avec des quartiles respectifs de -13.33%, -8.18%, et -2.78%, et une moyenne de -7.47%. La Zone3 présente une distribution plus

étendue, avec des valeurs s'étalant de -25.21% à 7.44%, et des quartiles de -13.68%, -8.33%, et -4.91%, et une moyenne de -8.68%. Pour la Zone4, les valeurs varient de -23.41% à 11.66%, avec des quartiles de -10.91%, -7.81%, et -3.22%, et une moyenne de -7.70%. Enfin, la Zone5 se distingue par une distribution asymétrique, avec des valeurs allant de -19.16% à 34.36%, des quartiles de -1.85%, 8.48%, et 18.13%, et une moyenne de 7.85%.

La période 2051-2075 maintient ces tendances, avec des variations significatives entre les zones. La Zone1 présente des changements de -26.14% à -3.97%, avec des quartiles de -15.62%, -11.21%, et -9.53%, et une moyenne de -13.42%. Pour la Zone2, les valeurs vont de -27.64% à -2.06%, avec des quartiles de -15.93%, -10.99%, et -8.56%, et une moyenne de -13.48%. La Zone3 montre une dispersion plus importante, avec des valeurs allant de -31.88% à -0.52%, des quartiles de -17.89%, -13.87%, et -10.69%, et une moyenne de -15.05%. La Zone4 affiche des valeurs entre -30.19% et 0.20%, avec des quartiles de -16.52%, -11.64%, et -8.70%, et une moyenne de -12.83%. Quant à la Zone5, elle présente une distribution asymétrique, avec des valeurs allant de -18.98% à 63.64%, des quartiles de -8.46%, 2.90%, et 11.03%, et une moyenne de 11.36%.

Enfin, pour la période 2076-2100, les variations significatives se maintiennent. La Zone1 affiche des valeurs de -31.36% à 2.09%, avec des quartiles de -19.25%, -16.14%, et -10.75%, et une moyenne de -14.90%. Pour la Zone 2, les valeurs vont de -32.23% à 4.07%, avec des quartiles de -20.23%, -16.08%, et -10.61%, et une moyenne de -14.97%. La Zone3 montre une distribution étendue, avec des valeurs de -37.06% à 3.69%, des quartiles de -21.78%, -18.72%, et -14.92%, et une moyenne de -17.32%. La Zone4 affiche des valeurs entre -38.65% et 6.01%, avec des quartiles de -19.43%, -16.49%, et -11.99%, et une moyenne de -16.10%. Enfin, la Zone5 présente une distribution asymétrique, avec des valeurs allant de -24.74% à 62.57%, des quartiles de -8.77%, -0.58%, et 12.36%, et une moyenne de 9.55%.

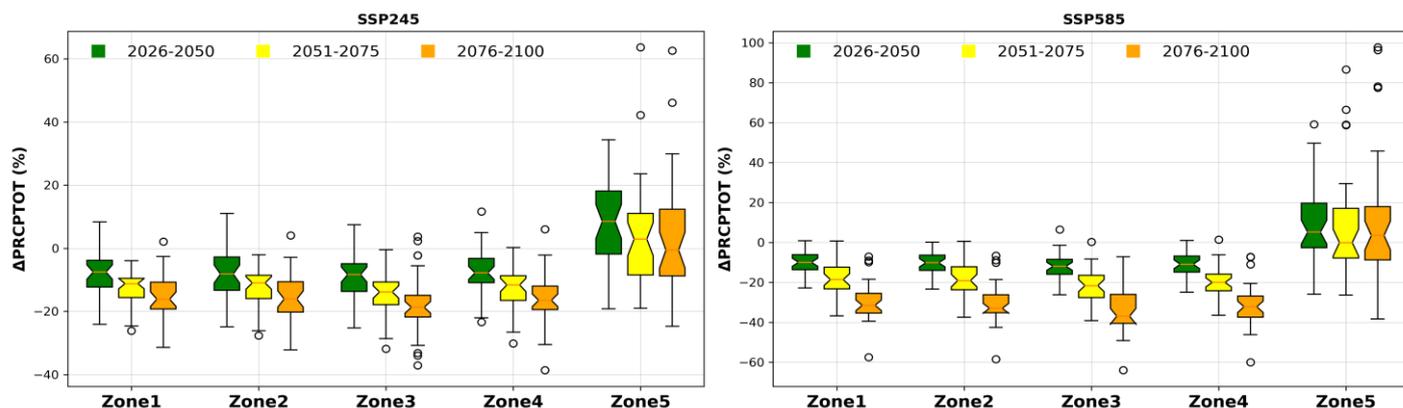


Figure IV.9 : Box-plots des changements relatifs de l'indice PRCPTOT des 33 modèles climatiques selon les scénarios SSP245 (A gauche) et SSP585 (A droite).

Pour le scénario SSP585, les statistiques des diagrammes en boîte et en moustaches pour l'indice PRCPTOT révèlent des variations significatives en générale entre les différentes zones géographiques pour les trois périodes examinées. Pour la période 2026-2050, la Zone1 présente une plage de valeurs allant de -22.82% à 0.83%, avec un premier quartile (Q1) de -13.41%, une médiane de -9.86%, un troisième quartile (Q3) de -5.92%, une moyenne de -10.09%, et des valeurs minimale et maximale respectives de -22.82% et 0.83%. La Zone2 affiche des données s'étendant de -23.38% à 0.08%, avec un Q1 de -13.81%, une médiane de -10.16%, un Q3 de -6.13%, une moyenne de -10.34%, et des valeurs minimale et maximale de -23.38% et 0.08%. Dans la Zone3, les valeurs se situent entre -26.23% et 6.46%, avec un Q1 de -16.16%, une médiane de -11.89%, un Q3 de -8.29%, une moyenne de -11.5 (9%, et des valeurs minimale et maximale de -26.23% et 6.46%. La Zone4 présente des variations allant de -24.92% à 1.01%, avec un Q1 de -14.8%, une médiane de -10.8%, un Q3 de -6.55%, une moyenne de -10.47%, et des valeurs minimale et maximale de -24.92% et 1.01%. Pour la Zone5, les valeurs s'étendent de -26.01% à 59.11%, avec un Q1 de -2.36%, une médiane de 5.11%, un Q3 de 19.76%, une moyenne de 8.53%, et des valeurs minimale et maximale de -26.01% et 59.11%.

Pour la période 2051-2075 et dans la Zone1, les valeurs vont de -36.78% à 0.61%, avec un Q1 de -23.4%, une médiane de -18.52%, un Q3 de -12.06%, une moyenne de -18.15%, et des valeurs minimale et maximale de -36.78% et 0.61%. Pour la Zone2, les données s'étendent de -37.43% à 0.55%, avec un Q1 de -23.98%, une médiane de -19.14%, un Q3 de -11.5%, une moyenne de -18.65%, et des valeurs minimale et maximale de -37.43% et 0.55%. La Zone3

présente des variations allant de -39.18% à 0.25%, avec un Q1 de -28.36%, une médiane de -21.12%, un Q3 de -16.25%, une moyenne de -22.05%, et des valeurs minimale et maximale de -39.18% et 0.25%. Les valeurs de la Zone4 vont de -36.57% à 1.44%, avec un Q1 de -23.09%, une médiane de -20.07%, un Q3 de -15.39%, une moyenne de -19.21%, et des valeurs minimale et maximale de -36.57% et 1.44%. Enfin, pour la Zone5, les valeurs s'étendent de -26.32% à 86.63%, avec un Q1 de -8.54%, une médiane de -0.14%, un Q3 de 18.62%, une moyenne de 8.53%, et des valeurs minimale et maximale de -26.32% et 86.63%.

Pour la période 2076-2100, la Zone1 présente des variations allant de -57.49% à -7.14%, avec un Q1 de -35.58%, une médiane de -31.53%, un Q3 de -25.09%, une moyenne de -30.0%, et des valeurs minimale et maximale de -57.49% et -7.14%. Pour la Zone2, les données s'étendent de -58.45% à -6.65%, avec un Q1 de -35.38%, une médiane de -33.02%, un Q3 de -25.75%, une moyenne de -30.67%, et des valeurs minimale et maximale de -58.45% et -6.65%. La Zone3 affiche des valeurs allant de -64.03% à -7.25%, avec un Q1 de -40.92%, une médiane de -36.98%, un Q3 de -25.45%, une moyenne de -33.95%, et des valeurs minimale et maximale de -64.03% et -7.25%. Dans la Zone4, les valeurs vont de -60.01% à -7.27%, avec un Q1 de -37.71%, une médiane de -32.11%, un Q3 de -26.8%, une moyenne de -31.37%, et des valeurs minimale et maximale de -60.01% et -7.27%. Enfin, pour la Zone5, les valeurs s'étendent de -38.39% à 97.63%, avec un Q1 de -8.1%, une médiane de 3.45%, un Q3 de 18.84%, une moyenne de 11.51%, et des valeurs minimale et maximale de -38.39% et 97.63%.

1.2.2. Précipitations annuelles maximales sur 1 jour (RX1day)

Les diagrammes en boîte et en moustaches illustrant les évolutions relatives (%) de l'indice RX1day pour les 33 modèles climatiques dans chaque zone au cours des trois périodes futures, selon les deux scénarios, sont présentés dans la figure IV.10. L'analyse des variations de l'indice RX1day selon les scénarios SSP245 et SSP585 sur les périodes 2026-2050, 2051-2075 et 2076-2100 révèle des résultats significatifs, mis en lumière par les changements issus des 33 modèles climatiques utilisés. Dans le scénario SSP245, les changements observés dans chaque zone au fil des périodes montrent une certaine cohérence. Globalement, les tendances varient entre des baisses et des hausses, avec des écarts relativement modérés. Par exemple, dans la Zone 1 pour la période 2026-2050, la moyenne des changements est de 4.0%, tandis que pour la période 2076-2100, elle est de 5.45%. Cette tendance générale est observée dans toutes les zones, bien que les variations puissent différer selon les périodes. En

revanche, dans le scénario SSP585, les variations sont plus prononcées, avec des écarts plus importants entre les périodes et les zones. Les moyennes des changements sont également plus élevées que dans SSP245, reflétant des variations plus importantes des précipitations extrêmes. Par exemple, dans la Zone 5 pour la période 2026-2050, la moyenne des changements est de 8.96%, tandis que pour la période 2076-2100, elle est de 12.76%. En résumé, les résultats montrent que le scénario SSP585 projette des variations plus importantes de l'indice RX1day par rapport à SSP245, avec des différences marquées entre les périodes. Alors que SSP245 présente des variations relativement stables et modérées, SSP585 révèle des tendances plus dynamiques et des variations plus importantes au fil du temps. Les descriptions des boîtes à moustaches de changements relatives (%) de l'indice RX1day de chaque période et de chaque scénario sont représentées en détail ci-dessous :

Dans le scénario SSP245 durant la période 2026-2050, les variations du changement relatif (%) de l'indice RX1day des 33 modèles climatiques dans chaque zone dévoilent une gamme de résultats significative. Dans la Zone 1, les taux de changement s'étendent de -12.83% à 26.62%, avec un premier quartile (Q1) de -1.32%, une médiane de 4.39%, un troisième quartile (Q3) de 6.25%, et une moyenne de 4.0%. La Zone 2 affiche des données s'étendant de -17.57% à 15.44%, avec un Q1 de -2.14%, une médiane de 3.09%, un Q3 de 6.89%, et une moyenne de 2.81%. Dans la Zone 3, les changements se situent entre -9.47% et 20.28%, avec un Q1 de -1.55%, une médiane de 3.59%, un Q3 de 8.17%, et une moyenne de 3.62%. La Zone 4 présente des variations allant de -9.81% à 16.35%, avec un Q1 de -2.29%, une médiane de 3.13%, un Q3 de 7.07%, et une moyenne de 2.55%. Pour la Zone 5, les valeurs s'étendent de -14.5% à 32.22%, avec un Q1 de -1.47%, une médiane de 7.77%, un Q3 de 12.96%, et une moyenne de 6.84%.

Pour la période 2051-2075, les variations du taux de changement dans la Zone 1 vont de -13.55% à 26.03%, avec un premier quartile (Q1) de 0.1%, une médiane de 4.75%, un troisième quartile (Q3) de 8.32%, et une moyenne de 4.97%. Dans la Zone 2, les données s'étendent de -17.53% à 16.47%, avec un Q1 de -0.31%, une médiane de 3.55%, un Q3 de 8.72%, et une moyenne de 3.86%. Pour la Zone 3, les variations vont de -9.51% à 17.83%, avec un Q1 de -1.34%, une médiane de 4.27%, un Q3 de 8.81%, et une moyenne de 4.16%. Les valeurs observées dans la Zone 4 vont de -13.94% à 16.92%, avec un Q1 de 0.59%, une médiane de 3.88%, un Q3 de 6.14%, et une moyenne de 2.9%. Enfin, pour la Zone 5, les valeurs varient de -13.83% à 29.34%, avec un Q1 de -2.72%, une médiane de 4.31%, un Q3 de 12.92%, et une moyenne de 5.43%.

Pour la période 2076-2100, les variations attendues dans la Zone 1 varient de -9.38% à 31.26%, avec un premier quartile (Q1) de 0.56%, une médiane de 4.69%, un troisième quartile (Q3) de 10.79%, et une moyenne de 5.45%. Pour la Zone 2, les variations attendues s'étendent de -13.11% à 16.18%, avec un Q1 de -1.63%, une médiane de 3.74%, un Q3 de 8.51%, et une moyenne de 3.56%. Dans la Zone 3, les changements attendus vont de -20.12% à 29.43%, avec un Q1 de 0.3%, une médiane de 5.37%, un Q3 de 9.57%, et une moyenne de 5.04%. Les variations attendues dans la Zone 4 vont de -22.57% à 14.99%, avec un Q1 de -1.42%, une médiane de 3.23%, un Q3 de 6.36%, et une moyenne de 2.09%. Enfin, pour la Zone 5, les variations attendues s'étendent de -20.0% à 26.38%, avec un Q1 de -3.56%, une médiane de 5.27%, un Q3 de 13.93%, et une moyenne de 4.72%.

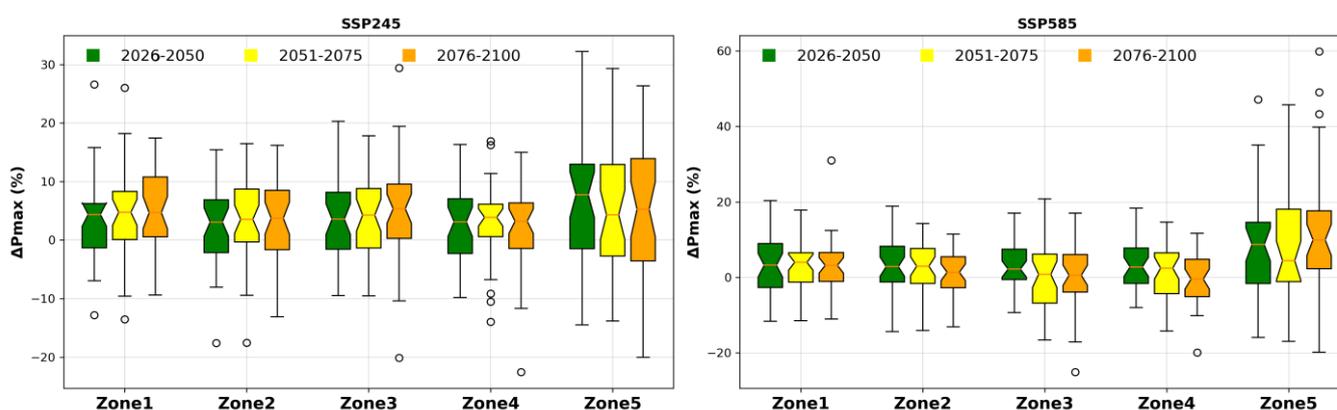


Figure IV.10 : Box-plots des changements relatifs de l'indice RX1day des 33 modèles climatiques selon les scénarios SSP245 (A gauche) et SSP585 (A droite).

Pour le scénario SSP585, les statistiques de diagramme en boîte et en moustache pour l'indice RX1day révèlent des variations significatives entre les différentes zones géographiques pour les trois périodes examinées. Pour la période 2026-2050, la Zone1 présente une plage de valeurs allant de -11.62% à 20.36%, avec un premier quartile (Q1) de -2.27%, une médiane de 3.25%, un troisième quartile (Q3) de 9.18%, une moyenne de 3.77%. La Zone2 affiche des données s'étendant de -14.34% à 18.87%, avec un Q1 de -1.57%, une médiane de 2.86%, un Q3 de 8.87%, une moyenne de 3.23%. Dans la Zone3, les valeurs se situent entre -9.34% et 17.06%, avec un Q1 de -0.58%, une médiane de 2.07%, un Q3 de 6.43%, une moyenne de 3.05%. La Zone4 présente des variations allant de -7.95% à 18.34%, avec un Q1 de -1.75%, une médiane de 2.61%, un Q3 de 8.1%, une moyenne de 2.98%. Enfin, pour la Zone5, les changements s'étendent de -15.88% à 47.11%, avec un Q1 de -1.42%, une médiane de 8.82%, un Q3 de 15.61%, une moyenne de 8.96%.

Pour la période 2051-2075, les changements dans la Zone1 varié de -11.49% à 17.86%, avec un Q1 de -1.58%, une médiane de 4.94%, un Q3 de 6.69%, une moyenne de 3.42%. Pour la Zone2, les données s'étendent de -14.04% à 14.31%, avec un Q1 de -2.54%, une médiane de 3.35%, un Q3 de 8.35%, une moyenne de 2.25%. La Zone3 présente des variations allant de -16.56% à 20.76%, avec un Q1 de -7.73%, une médiane de 1.12%, un Q3 de 6.43%, une moyenne de 0.34%. Les valeurs de la Zone4 vont de -14.16% à 14.66%, avec un Q1 de -5.19%, une médiane de 2.9%, un Q3 de 6.63%, une moyenne de 1.47%. Enfin, pour la Zone5, les valeurs s'étendent de -16.92% à 45.76%, avec un Q1 de -1.33%, une médiane de 4.42%, un Q3 de 19.89%, une moyenne de 9.07%.

Pour la période 2076-2100, la Zone1 présente des variations allant de -11.01% à 31.02%, avec un Q1 de -1.43%, une médiane de 2.9%, un Q3 de 6.4%, une moyenne de 3.24%. Pour la Zone2, les données s'étendent de -13.09% à 11.51%, avec un Q1 de -2.79%, une médiane de 1.07%, un Q3 de 5.9%, une moyenne de 1.65%. La Zone3 affiche des valeurs allant de -25.11% à 17.05%, avec un Q1 de -4.24%, une médiane de 0.57%, un Q3 de 6.6%, une moyenne de -0.52%. Dans la Zone4, les valeurs vont de -19.92% à 11.67%, avec un Q1 de -5.36%, une médiane de -1.1%, un Q3 de 5.11%, une moyenne de -0.38%. Enfin, pour la Zone5, les valeurs s'étendent de -19.84% à 59.83%, avec un Q1 de 1.48%, une médiane de 9.94%, un Q3 de 18.28%, une moyenne de 12.76%.

1.2.3. Précipitations annuelles maximales sur 5 jours (RX5day)

Les graphiques en boîte et en moustaches détaillent les variations relatives (%) de l'indice RX5day pour les 33 modèles climatiques dans chaque zone géographique au cours des périodes 2026-2050, 2051-2075 et 2076-2100, selon les scénarios SSP245 et SSP585. Ils mettent en évidence les différences entre les scénarios et les évolutions temporelles. Sous le scénario SSP245, les projections pour l'indice RX5day entre 2026 et 2050 montrent des variations significatives dans chaque zone. Par exemple, dans la Zone 1, les valeurs vont de -34.29% à 32.0%, avec une moyenne de -0.99%. Des variations similaires sont observées dans les autres zones, avec des moyennes allant de -0.78% à 15.68%. Ces tendances persistent durant les périodes suivantes, avec des moyennes évoluant différemment selon les zones et les scénarios. En revanche, sous le scénario SSP585, les projections pour l'indice RX5day montrent également des variations importantes dans chaque zone géographique. Par exemple, dans la Zone 1 entre 2026 et 2050, les valeurs fluctuent de -27.32% à 25.34%, avec une moyenne de -1.97%. Ces variations se poursuivent dans les périodes suivantes, avec des

moyennes variant de -2.3% à 20.71%. Ces observations soulignent l'importance de considérer une gamme de scénarios dans l'évaluation des risques climatiques futurs. Les différences entre les scénarios SSP245 et SSP585, ainsi que les évolutions temporelles, peuvent avoir des implications importantes pour la planification en infrastructures et l'adaptation et la résilience aux changements climatiques.

Dans le scénario SSP245, les prévisions pour la période 2026-2050 révèlent des variations importantes dans le changement relatif (%) de l'indice RX5day, tel que projeté par 33 modèles climatiques pour différentes zones géographiques. Dans la Zone 1, les changements relatifs indiquent une gamme étendue de variations, allant d'une diminution de 9.94% à une augmentation de 20.22%, avec un premier quartile (Q1) de -5.82%, une médiane de -0.4%, un troisième quartile (Q3) de 4.35%, et une moyenne de 0.28%. La Zone 2 présente des variations encore plus marquées, avec des valeurs oscillant entre -14.88% et 24.53%, et des quartiles respectifs de -5.21%, -0.51%, et 3.49%, et une moyenne proche de zéro à 0.02%. Pour la Zone 3, les changements varient de -11.37% à 15.64%, avec des quartiles de -5.25%, -1.63%, et 5.14%, et une moyenne de 0.23%. Dans la Zone 4, les valeurs vont de -12.73% à 20.22%, avec des quartiles de -3.06%, -0.76%, et 5.45%, et une moyenne de 1.0%. Enfin, la Zone 5 affiche les variations les plus extrêmes, avec des valeurs allant de -22.22% à 35.63%, et des quartiles de 2.52%, 11.24%, et 19.12%, et une moyenne de 10.15%.

Pour la période 2051-2075, les projections continuent de montrer des variations significatives dans le changement relatif de l'indice RX5day. Dans la Zone 1, les valeurs vont de -7.85% à 17.22%, avec des quartiles de -3.46%, 0.61%, et 3.89%, et une moyenne de 1.19%. Pour la Zone 2, les données indiquent des variations allant de -16.83% à 13.68%, avec des quartiles de -3.08%, 1.71%, et 4.25%, et une moyenne de 0.76%. La Zone 3 présente des variations allant de -15.93% à 15.45%, avec des quartiles de -4.19%, 0.67%, et 4.45%, et une moyenne de 0.52%. Dans la Zone 4, les valeurs varient de -18.81% à 12.08%, avec des quartiles de -2.05%, 2.13%, et 6.22%, et une moyenne de 1.15%. Enfin, la Zone 5 affiche des variations allant de -13.63% à 38.13%, avec des quartiles de -1.26%, 6.39%, et 18.5%, et une moyenne de 8.53%.

Pour la période 2076-2100, les projections continuent de montrer des variations importantes dans le changement relatif de l'indice RX5day. Dans la Zone 1, les valeurs vont de -16.33% à 11.26%, avec des quartiles de -4.63%, -0.07%, et 3.89%, et une moyenne de -0.51%. Pour la Zone 2, les données indiquent des variations allant de -20.69% à 17.15%, avec des quartiles de -6.99%, -0.17%, et 4.02%, et une moyenne de -1.29%. La Zone 3 présente des variations

allant de -22.36% à 25.07%, avec des quartiles de -6.82%, -0.95%, et 5.69%, et une moyenne de -0.79%. Dans la Zone 4, les valeurs varient de -28.87% à 15.71%, avec des quartiles de -4.08%, -0.07%, et 4.15%, et une moyenne de -1.19%. Enfin, la Zone 5 affiche des variations allant de -20.24% à 33.79%, avec des quartiles de -1.94%, 6.23%, et 17.45%, et une moyenne de 6.38%.

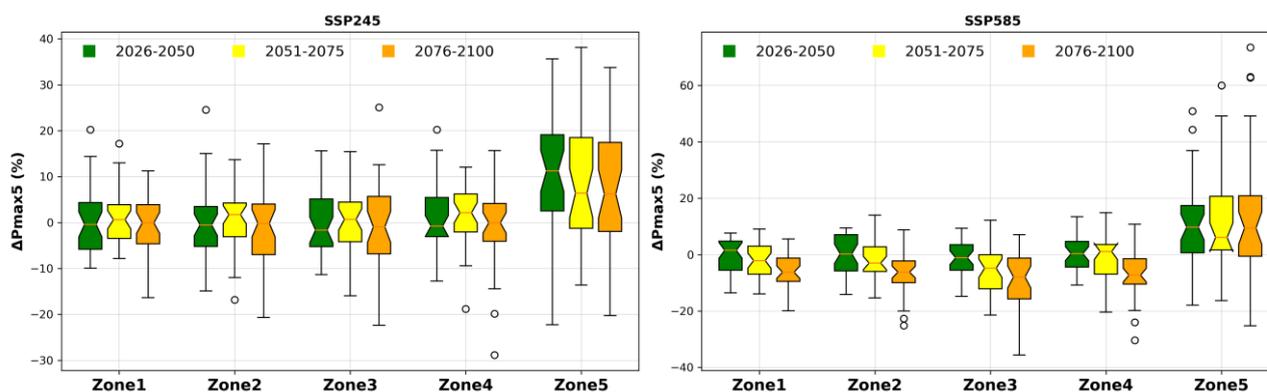


Figure IV.11 : Box-plots des changements relatifs de l'indice RX5day des 33 modèles climatiques selon les scénarios SSP245 (A gauche) et SSP585 (A droite).

Dans le scénario SSP585, les prévisions pour la période 2026-2050 révèlent des variations importantes dans le changement relatif (%) de l'indice RX5day, tel que projeté par 33 modèles climatiques pour différentes zones géographiques. Dans la Zone 1, les changements relatifs indiquent une gamme étendue de variations, allant d'une diminution de 13.59% à une augmentation de 7.68%, avec un premier quartile (Q1) de -5.12%, une médiane de 1.84%, un troisième quartile (Q3) de 4.8%, et une moyenne proche de zéro à -0.14%. La Zone 2 présente des variations encore plus marquées, avec des valeurs oscillant entre -14.09% et 9.48%, et des quartiles respectifs de -5.83%, 1.26%, et 7.1%, et une moyenne proche de zéro à 0.18%. Pour la Zone 3, les changements varient de -14.79% à 9.34%, avec des quartiles de -5.71%, -1.48%, et 3.83%, et une moyenne de -1.25%. Dans la Zone 4, les valeurs vont de -10.75% à 13.41%, avec des quartiles de -4.58%, -0.07%, et 4.86%, et une moyenne de 0.54%. Enfin, la Zone 5 affiche les variations les plus extrêmes, avec des valeurs allant de -17.91% à 50.93%, et des quartiles de 0.98%, 9.76%, et 17.7%, et une moyenne de 11.58%.

Pour la période 2051-2075, les projections continuent de montrer des variations significatives dans le changement relatif de l'indice RX5day. Dans la Zone 1, les valeurs vont de -13.96% à 9.05%, avec des quartiles de -6.96%, -2.56%, et 3.28%, et une moyenne de -2.16%. Pour la Zone 2, les données indiquent des variations allant de -15.34% à 13.98%, avec des quartiles de -6.27%, -2.85%, et 3.63%, et une moyenne de -2.37%. La Zone 3 présente des variations allant de -21.43% à 12.21%, avec des quartiles de -12.95%, -4.83%, et 1.45%, et une

moyenne de -5.03%. Dans la Zone 4, les valeurs varient de -20.35% à 14.91%, avec des quartiles de -7.08%, 1.28%, et 3.89%, et une moyenne de -1.83%. Enfin, la Zone 5 affiche des variations allant de -16.28% à 60.06%, avec des quartiles de 1.23%, 6.12%, et 23.48%, et une moyenne de 11.14%.

Pour la période 2076-2100, les projections continuent de montrer des variations importantes dans le changement relatif de l'indice RX5day. Dans la Zone 1, les valeurs vont de -19.9% à 5.52%, avec des quartiles de -9.55%, -6.45%, et -0.99%, et une moyenne de -6.28%. Pour la Zone 2, les données indiquent des variations allant de -25.1% à 8.82%, avec des quartiles de -10.35%, -6.19%, et -2.13%, et une moyenne de -6.83%. La Zone 3 présente des variations allant de -35.63% à 7.07%, avec des quartiles de -16.63%, -7.93%, et -0.82%, et une moyenne de -9.64%. Dans la Zone 4, les valeurs varient de -30.38% à 10.81%, avec des quartiles de -10.94%, -6.94%, et -1.38%, et une moyenne de -7.37%. Enfin, la Zone 5 affiche des variations allant de -25.26% à 73.48%, avec des quartiles de 0.23%, 9.43%, et 22.09%, et une moyenne de 14.83%.

1.2.4. Précipitations totales annuelles à partir de jours > 99e percentile (R99p)

Les diagrammes en boîte et en moustaches représentant les changements relatifs (%) de l'indice R99p pour les 33 modèles climatiques dans chaque zone pour les trois périodes futures selon les deux scénarios sont présentés dans la figure IV.12.

L'analyse des variations de l'indice R99p selon les scénarios SSP245 et SSP585 révèle des différences significatives entre les différentes zones géographiques et les périodes étudiées. Sous le scénario SSP245, les variations de l'indice R99p pour les périodes 2026-2050, 2051-2075 et 2076-2100 montrent des écarts notables. Les valeurs varient de façon importante, avec des moyennes qui augmentent progressivement au fil du temps dans chaque zone. Par exemple, pour la période 2026-2050, les moyennes des changements pour la Zone1, Zone2, Zone3, Zone4, et Zone5 sont respectivement de 12.0%, 12.67%, 14.13%, 14.04%, et 19.32%. Les tendances similaires sont observées pour les périodes suivantes, avec des moyennes de changement croissant. De même, sous le scénario SSP585, des variations significatives sont observées entre les différentes zones géographiques pour les trois périodes analysées. Les moyennes des changements sont plus élevées que sous le scénario SSP245, indiquant des variations plus importantes des précipitations extrêmes. Par exemple, pour la période 2026-2050, les moyennes des changements pour les différentes zones sont respectivement de 14.17%, 12.99%, 12.48%, 12.1%, et 19.24%. Les variations sont également observées dans

les périodes suivantes, avec des moyennes de changement qui continuent d'augmenter. Les descriptions des boîtes à moustaches de changements relatifs (%) de l'indice RX1day de chaque période et de chaque scénario sont détaillées ci-dessous.

Dans le cadre du scénario SSP245, les données relatives aux changements de l'indice R99p révèlent des variations significatives entre les différentes zones géographiques pour les trois périodes analysées. Pour la période 2026-2050, les évolutions observées dans la Zone1 vont de -20.78% à 45.72%. Les statistiques montrent un premier quartile (Q1) de 3.93%, une médiane de 13.7%, un troisième quartile (Q3) de 19.98%, et une moyenne de 12.0%. Concernant la Zone2, les données s'étendent de -18.54% à 37.91%, avec un Q1 de 6.65%, une médiane de 13.56%, un Q3 de 19.79%, et une moyenne de 12.67%. Dans la Zone3, les valeurs varient entre -25.08% et 56.15%, avec un Q1 de -6.76%, une médiane de 15.28%, un Q3 de 29.89%, et une moyenne de 14.13%. Quant à la Zone4, les valeurs vont de -24.82% à 36.05%, avec un Q1 de 5.82%, une médiane de 16.76%, un Q3 de 23.22%, et une moyenne de 14.04%. Enfin, pour la Zone5, les valeurs s'étendent de -6.36% à 42.23%, avec un Q1 de 14.32%, une médiane de 20.69%, un Q3 de 24.65%, et une moyenne de 19.32%.

Pour la période 2051-2075, les variations observées s'étendent de -15.31% à 44.97% dans la Zone1. Les statistiques indiquent un premier quartile (Q1) de 0.19%, une médiane de 18.33%, un troisième quartile (Q3) de 30.95%, et une moyenne de 16.09%. Dans la Zone2, les données varient de -12.43% à 42.89%, avec un Q1 de 4.83%, une médiane de 13.32%, un Q3 de 27.04%, et une moyenne de 14.99%. Pour la Zone3, les valeurs vont de -11.64% à 82.18%, avec un Q1 de 1.51%, une médiane de 18.08%, un Q3 de 32.59%, et une moyenne de 19.07%. Concernant la Zone4, les données s'étendent de -10.5% à 55.31%, avec un Q1 de 6.49%, une médiane de 16.36%, un Q3 de 25.1%, et une moyenne de 15.7%. Enfin, pour la Zone5, les valeurs varient de 0.41% à 52.87%, avec un Q1 de 16.63%, une médiane de 22.17%, un Q3 de 27.52%, et une moyenne de 22.16%.

Pour la période 2076-2100, les variations observées dans la Zone1 vont de -13.91% à 49.78%. Les statistiques indiquent un premier quartile (Q1) de 1.46%, une médiane de 14.64%, un troisième quartile (Q3) de 23.59%, et une moyenne de 14.2%. Dans la Zone2, les données varient de -23.0% à 41.38%, avec un Q1 de 1.21%, une médiane de 14.93%, un Q3 de 21.54%, et une moyenne de 12.29%. Pour la Zone3, les valeurs s'étendent de -12.58% à 62.8%, avec un Q1 de 6.23%, une médiane de 15.35%, un Q3 de 25.95%, et une moyenne de 16.85%. Concernant la Zone4, les données vont de -20.58% à 35.88%, avec un Q1 de 5.19%, une médiane de 14.32%, un Q3 de 22.51%, et une moyenne de 13.96%. Enfin, pour la Zone5,

les valeurs varient de -5.1% à 48.83%, avec un Q1 de 12.76%, une médiane de 19.84%, un Q3 de 26.1%, et une moyenne de 19.45%.

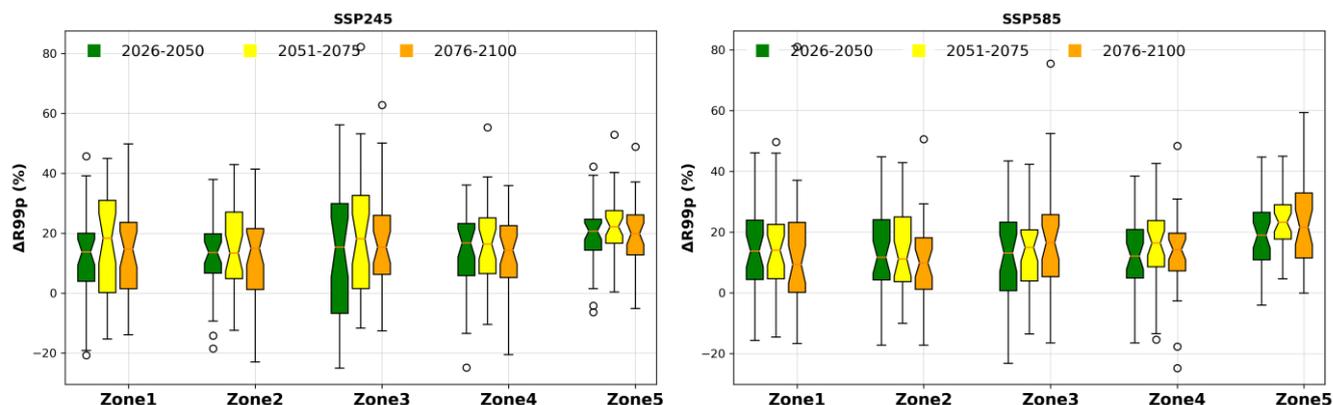


Figure IV.12 : Box-plots des changements relatifs de l'indice R99p des 33 modèles climatiques selon les scénarios SSP245 (A gauche) et SSP585 (A droite).

Pour le scénario SSP585, les statistiques des variations de l'indice R99p révèlent des écarts significatifs entre les différentes zones géographiques pour les trois périodes étudiées. Entre 2026 et 2050, les variations dans la Zone1 vont de -15.67% à 46.06%. Les données montrent un premier quartile (Q1) de 3.85%, une médiane de 12.98%, un troisième quartile (Q3) de 24.88%, et une moyenne de 14.17%. Dans la Zone2, les variations s'étendent de -17.3% à 44.83%, avec un Q1 de 3.67%, une médiane de 10.48%, un Q3 de 25.05%, et une moyenne de 12.99%. Pour la Zone3, les valeurs se situent entre -23.28% et 43.39%, avec un Q1 de 0.22%, une médiane de 15.02%, un Q3 de 23.95%, et une moyenne de 12.48%. La Zone4 affiche des valeurs allant de -16.49% à 38.47%, avec un Q1 de 4.17%, une médiane de 11.3%, un Q3 de 21.39%, et une moyenne de 12.1%. Enfin, pour la Zone5, les valeurs vont de -4.09% à 44.72%, avec un Q1 de 10.26%, une médiane de 18.99%, un Q3 de 27.37%, et une moyenne de 19.24%.

Pour la période 2051-2075, les variations observées dans la Zone1 s'étendent de -14.63% à 49.66%. Les statistiques révèlent un premier quartile (Q1) de 3.26%, une médiane de 13.97%, un troisième quartile (Q3) de 23.8%, et une moyenne de 15.0%. Dans la Zone2, les données vont de -10.05% à 42.91%, avec un Q1 de 2.31%, une médiane de 11.15%, un Q3 de 26.13%, et une moyenne de 14.28%. Pour la Zone3, les valeurs varient de -13.53% à 42.36%, avec un Q1 de 3.51%, une médiane de 16.89%, un Q3 de 21.01%, et une moyenne de 13.84%. La Zone4 présente des valeurs allant de -15.38% à 42.57%, avec un Q1 de 8.18%, une médiane de 17.54%, un Q3 de 24.59%, et une moyenne de 15.82%. Enfin, pour la Zone5, les données

s'étendent de 4.59% à 44.98%, avec un Q1 de 17.09%, une médiane de 22.67%, un Q3 de 28.65%, et une moyenne de 23.16%.

Pour la période 2076-2100, les variations observées dans la Zone1 vont de -16.75% à 81.02%. Les statistiques révèlent un premier quartile (Q1) de -0.05%, une médiane de 7.54%, un troisième quartile (Q3) de 21.29%, et une moyenne de 11.78%. Dans la Zone2, les données vont de -17.31% à 50.61%, avec un Q1 de 0.34%, une médiane de 8.95%, un Q3 de 17.16%, et une moyenne de 10.1%. Pour la Zone3, les valeurs varient de -16.54% à 75.52%, avec un Q1 de 6.11%, une médiane de 16.86%, un Q3 de 26.92%, et une moyenne de 17.71%. La Zone4 présente des valeurs allant de -24.87% à 48.39%, avec un Q1 de 7.66%, une médiane de 14.8%, un Q3 de 20.17%, et une moyenne de 13.35%. Enfin, pour la Zone5, les données s'étendent de -0.11% à 59.38%, avec un Q1 de 11.85%, une médiane de 21.61%, un Q3 de 33.29%, et une moyenne de 24.25%.

1.2.5. Précipitations totales annuelles à partir de jours > 95e centile (R95p)

Les graphiques en boîte et en moustaches décrivent de manière détaillée les variations relatives (%) de l'indice R95p pour les 33 modèles climatiques dans chaque zone géographique au cours des périodes 2026-2050, 2051-2075 et 2076-2100, selon les scénarios SSP245 et SSP585. Ces graphiques mettent en lumière les différences notables entre les scénarios et les évolutions temporelles et spatiales.

Sous le scénario SSP245, les projections pour l'indice R95p pendant la période 2026-2050 révèlent des variations significatives dans chaque zone. Par exemple, dans la Zone 1, les valeurs vont de -34.29% à 32.0%, avec une moyenne de -0.99%. Ces variations sont également observées dans les autres zones, avec des moyennes allant de -0.78% à 15.68%. Au fil du temps, ces variations persistent, comme en témoignent les projections pour les périodes 2051-2075 et 2076-2100, avec des moyennes évoluant différemment selon les zones et les scénarios.

En revanche, sous le scénario SSP585, les projections pour l'indice R95p montrent également des variations importantes dans chaque zone géographique. Par exemple, dans la Zone 1 pendant la période 2026-2050, les valeurs fluctuent de -27.32% à 25.34%, avec une moyenne de -1.97%. Ces variations se poursuivent également dans les périodes suivantes, avec des moyennes variant de -2.3% à 20.71%.

Ces observations soulignent l'importance de considérer une gamme de scénarios dans l'évaluation des risques climatiques futurs, car les différences entre les scénarios SSP245 et SSP585 ainsi que les évolutions temporelles peuvent avoir des implications importantes pour la planification et l'adaptation aux changements climatiques.

Dans le cadre du scénario SSP245, les projections climatiques pour l'indice R95p pendant la période 2026-2050 révèlent des variations significatives dans chaque zone géographique. Dans la Zone 1, les valeurs fluctuent de -34.29% à 32.0%, avec des quartiles de -12.22%, -0.93%, et 5.83%, et une moyenne de -0.99%. Pour la Zone 2, les données montrent une gamme de -35.51% à 37.55%, avec des quartiles de -11.88%, -1.02%, et 9.28%, et une moyenne de -0.78%. La Zone 3 affiche des valeurs allant de -27.74% à 35.04%, avec des quartiles de -13.33%, -0.57%, et 12.22%, et une moyenne de 0.45%. Dans la Zone 4, les valeurs varient de -28.89% à 29.0%, avec des quartiles de -5.49%, 2.21%, et 13.08%, et une moyenne de 2.18%. Enfin, pour la Zone 5, les données indiquent une plage de -15.54% à 41.49%, avec des quartiles de 5.16%, 14.21%, et 23.46%, et une moyenne de 15.68%.

Pendant la période 2051-2075, les projections continuent à montrer des variations significatives dans l'indice R95p. Dans la Zone 1, les valeurs vont de -21.26% à 31.12%, avec des quartiles de -9.03%, -1.29%, et 7.77%, et une moyenne de 1.0%. Pour la Zone 2, les données indiquent une gamme de -28.27% à 23.3%, avec des quartiles de -8.72%, -1.06%, et 10.92%, et une moyenne de 0.05%. La Zone 3 affiche des valeurs allant de -25.7% à 26.06%, avec des quartiles de -8.44%, -2.35%, et 7.52%, et une moyenne de -0.9%. Dans la Zone 4, les valeurs varient de -27.03% à 21.16%, avec des quartiles de -5.53%, 1.27%, et 11.84%, et une moyenne de 1.67%. Enfin, pour la Zone 5, les données montrent une plage de -0.8% à 55.69%, avec des quartiles de 5.97%, 17.33%, et 23.34%, et une moyenne de 16.68%.

Pour la période 2076-2100, les projections continuent de montrer des variations importantes dans l'indice R95p. Dans la Zone 1, les valeurs vont de -22.98% à 19.93%, avec des quartiles de -10.26%, -2.26%, et 8.78%, et une moyenne de -1.5%. Pour la Zone 2, les données indiquent une gamme de -36.29% à 22.02%, avec des quartiles de -10.27%, 0.08%, et 7.61%, et une moyenne de -2.3%. La Zone 3 affiche des valeurs allant de -44.27% à 41.82%, avec des quartiles de -12.99%, -3.0%, et 7.1%, et une moyenne de -2.05%. Dans la Zone 4, les valeurs varient de -46.85% à 26.27%, avec des quartiles de -8.0%, 1.28%, et 10.29%, et une moyenne proche de zéro à -0.02%. Enfin, pour la Zone 5, les données montrent une plage de -17.11% à 32.17%, avec des quartiles de 9.68%, 18.91%, et 22.66%, et une moyenne de 15.47%.

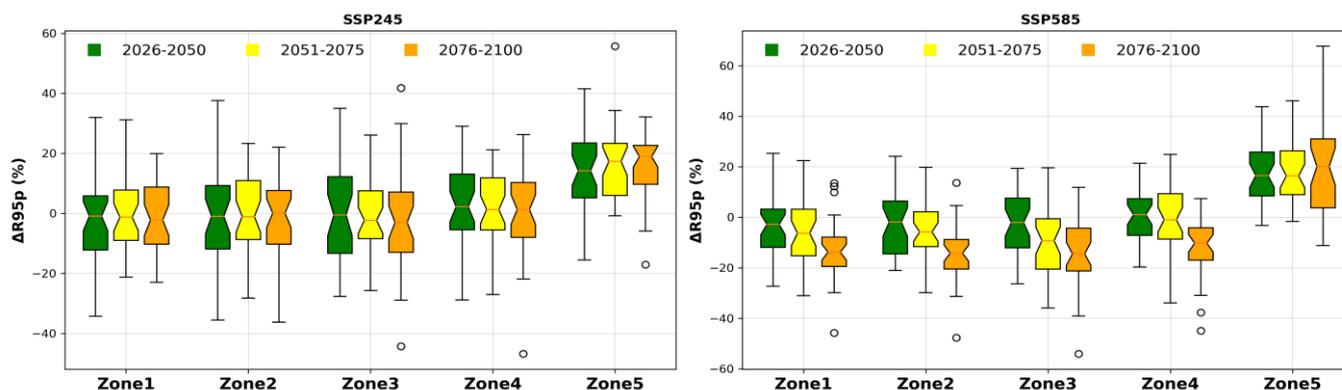


Figure IV.13 : Box-plots des changements relatifs de l'indice R95p des 33 modèles climatiques selon les scénarios SSP245 (A gauche) et SSP585 (A droite).

Dans le cadre du scénario SSP585, les projections climatiques pour l'indice R95p, pendant la période 2026-2050, révèlent des variations significatives dans chaque zone géographique considérée. Dans la Zone 1, les valeurs fluctuent de -27.32% à 25.34%, avec des quartiles de -11.02%, -2.52%, et 3.65%, et une moyenne de -1.97%. Pour la Zone 2, les données montrent une gamme de -21.04% à 24.14%, avec des quartiles de -13.77%, -0.38%, et 7.08%, et une moyenne de -1.68%. La Zone 3 affiche des valeurs allant de -26.39% à 19.32%, avec des quartiles de -12.8%, -2.11%, et 8.66%, et une moyenne de -2.5%. Dans la Zone 4, les valeurs varient de -19.69% à 21.37%, avec des quartiles de -7.65%, 1.23%, et 7.67%, et une moyenne de 0.57%. Enfin, pour la Zone 5, les données indiquent une plage de -3.2% à 43.78%, avec des quartiles de 8.67%, 17.67%, et 25.95%, et une moyenne de 17.23%.

Pendant la période 2051-2075, les projections continuent à montrer des variations significatives dans l'indice R95p. Dans la Zone 1, les valeurs vont de -31.05% à 22.4%, avec des quartiles de -15.79%, -6.82%, et 3.42%, et une moyenne de -5.92%. Pour la Zone 2, les données indiquent une gamme de -29.85% à 19.73%, avec des quartiles de -11.62%, -5.62%, et 2.62%, et une moyenne de -4.8%. La Zone 3 affiche des valeurs allant de -35.89% à 19.61%, avec des quartiles de -20.62%, -9.21%, et 0.26%, et une moyenne de -8.63%. Dans la Zone 4, les valeurs varient de -33.87% à 24.82%, avec des quartiles de -9.61%, -0.16%, et 9.93%, et une moyenne de -1.34%. Enfin, pour la Zone 5, les données montrent une plage de -1.61% à 46.05%, avec des quartiles de 8.66%, 16.1%, et 27.3%, et une moyenne de 18.06%.

Pour la période 2076-2100, les projections continuent de montrer des variations importantes dans l'indice R95p. Dans la Zone 1, les valeurs vont de -45.76% à 13.57%, avec des quartiles de -19.52%, -14.56%, et -7.27%, et une moyenne de -13.44%. Pour la Zone 2, les données indiquent une gamme de -47.66% à 13.6%, avec des quartiles de -20.6%, -13.4%, et -8.42%,

et une moyenne de -14.69%. La Zone 3 affiche des valeurs allant de -54.08% à 11.79%, avec des quartiles de -21.73%, -13.91%, et -3.7%, et une moyenne de -14.57%. Dans la Zone 4, les valeurs varient de -44.89% à 7.38%, avec des quartiles de -17.96%, -10.1%, et -3.79%, et une moyenne de -11.24%. Enfin, pour la Zone 5, les données montrent une plage de -11.22% à 67.67%, avec des quartiles de 2.61%, 20.24%, et 31.16%, et une moyenne de 20.71%.

1.2.6. Nombre de jours de fortes précipitations (R20mm)

Les diagrammes en boîte et en moustaches illustrant les évolutions de changement absolu (jours) de l'indice R20mm pour les 33 modèles climatiques dans chaque zone au cours des trois périodes futures, selon les deux scénarios, sont présentés dans la figure IV.14.

Les changements absolus de l'indice R20mm sous le scénario SSP245 montrent des différences relativement faibles dans chaque zone géographique et pour les trois périodes analysées. Les tendances générales indiquent des fluctuations légères autour de zéro, avec des moyennes proches de zéro dans la plupart des zones. Sous le scénario SSP585, les variations absolues de l'indice R20mm présentent des tendances similaires à celles observées sous SSP245, mais avec des moyennes légèrement plus prononcées autour de zéro. Les différences entre les zones restent relativement faibles, bien que certains écartements puissent être observés. Dans l'ensemble, les variations sont proches de zéro, ce qui signifie que les moyennes de changement de l'indice R20mm sont relativement faibles et que les valeurs fluctuent autour de zéro, à la fois en positif et en négatif. Cela suggère une stabilité générale de l'indice R20mm dans les différentes zones géographiques et pour les périodes étudiées, avec des changements minimes dans la plupart des cas.

Les variations absolues (en jours) de l'indice R20mm, selon le scénario SSP245 pour la période 2026-2050, démontrent des différences relativement faibles dans chaque zone géographique. Dans la Zone1, ces changements s'étendent de -1.24 jour à 1.17 jour, avec un premier quartile (Q1) de -0.46 jour, une médiane de -0.02 jour, un troisième quartile (Q3) de 0.22 jour, et une moyenne de -0.09 jour. Dans la Zone2, les valeurs varient de -1.41 jour à 1.18 jour, avec un Q1 de -0.51 jour, une médiane de -0.1 jour, un Q3 de 0.22 jour, et une moyenne de -0.12 jour. Pour la Zone3, les variations vont de -0.59 jour à 0.94 jour, avec un Q1 de -0.2 jour, une médiane de 0.06 jour, un Q3 de 0.28 jour, et une moyenne de 0.07 jour. Dans la Zone4, les variations s'étendent de -0.63 jour à 0.84 jour, avec un Q1 de -0.23 jour, une médiane de 0.01 jour, un Q3 de 0.17 jour, et une moyenne de 0.01 jour. Enfin, pour la

Zone5, les variations vont de -0.06 jour à 0.11 jour, avec un Q1 de -0.0 jour, une médiane de 0.01 jour, un Q3 de 0.04 jour, et une moyenne de 0.01 jour.

Pour la période 2051-2075, les variations dans la Zone1 s'étendent de -0.97 jour à 1.43 jour, avec un premier quartile (Q1) de -0.45 jour, une médiane de -0.0 jour, un troisième quartile (Q3) de 0.38 jour, et une moyenne de -0.03 jour. Pour la Zone2, les valeurs vont de -1.2 jour à 0.88 jour, avec un Q1 de -0.44 jour, une médiane de 0.0 jour, un Q3 de 0.25 jour, et une moyenne de -0.08 jour. Dans la Zone3, les variations vont de -0.54 jour à 0.57 jour, avec un Q1 de -0.14 jour, une médiane de 0.1 jour, un Q3 de 0.29 jour, et une moyenne de 0.08 jour. Pour la Zone4, les valeurs vont de -0.96 jour à 0.6 jour, avec un Q1 de -0.1 jour, une médiane de 0.06 jour, un Q3 de 0.23 jour, et une moyenne de 0.01 jour. Enfin, dans la Zone5, les valeurs varient de -0.05 jour à 0.06 jour, avec un Q1 de -0.01 jour, une médiane de 0.01 jour, un Q3 de 0.03 jour, et une moyenne de 0.01 jour.

Pour la période 2076-2100, les variations dans la Zone1 s'étendent de -1.05 jour à 0.58 jour, avec un premier quartile (Q1) de -0.29 jour, une médiane de -0.1 jour, un troisième quartile (Q3) de 0.14 jour, et une moyenne de -0.12 jour. Pour la Zone2, les valeurs vont de -1.42 jour à 0.89 jour, avec un Q1 de -0.4 jour, une médiane de -0.09 jour, un Q3 de 0.19 jour, et une moyenne de -0.16 jour. Dans la Zone3, les variations varient de -0.9 jour à 0.79 jour, avec un Q1 de -0.09 jour, une médiane de 0.1 jour, un Q3 de 0.28 jour, et une moyenne de 0.09 jour. En ce qui concerne la Zone4, les valeurs vont de -1.56 jour à 0.89 jour, avec un Q1 de -0.18 jour, une médiane de 0.01 jour, un Q3 de 0.18 jour, et une moyenne de -0.03 jour. Enfin, pour la Zone5, les valeurs varient de -0.09 jour à 0.09 jour, avec un Q1 de -0.01 jour, une médiane de 0.01 jour, un Q3 de 0.03 jour, et une moyenne de 0.01 jour.

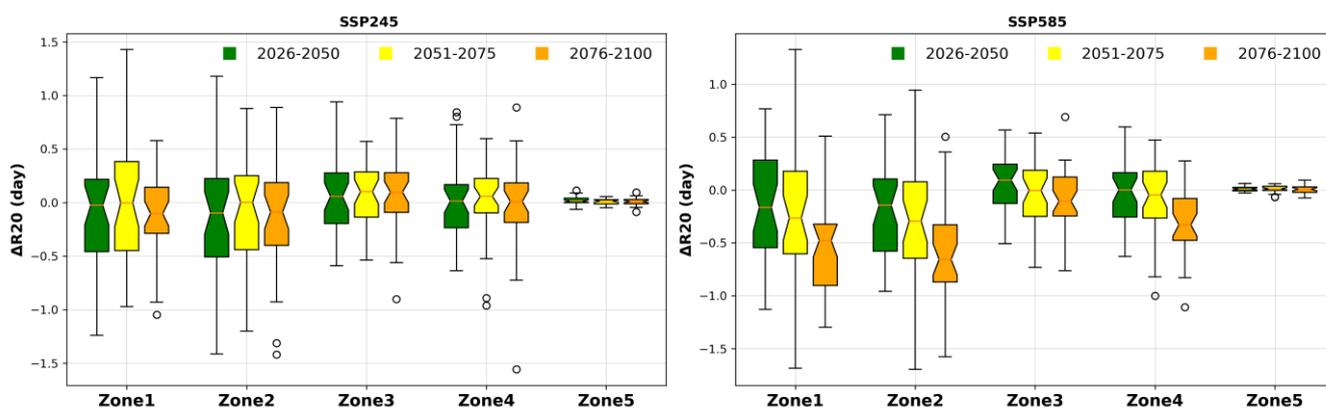


Figure IV.14 : Box-plots des changements relatifs de l'indice R20mm des 33 modèles climatiques selon les scénarios SSP245 (A gauche) et SSP585 (A droite).

Pour le scénario SSP585, pendant la période 2026-2050, les variations absolues (en jours) de l'indice R20mm des 33 modèles climatiques diffèrent d'une zone à l'autre, mais présentent des tendances similaires à celles observées dans le scénario SSP245. En Zone1, la moyenne de changement de l'indice R20mm est de -0.15 jour, avec une médiane et un premier quartile (Q1) de -0.15 jour et -0.41 jour respectivement. Le troisième quartile (Q3) se situe à 0.34 jour, et la plage de variation va de -1.13 jour à 0.77 jour. Pour la Zone2, la moyenne de changement est de -0.17 jour, avec une médiane de -0.12 jour, un Q1 de -0.6 jour et un Q3 de 0.14 jour, et une plage de -0.96 jour à 0.71 jour. Dans la Zone3, la moyenne est de 0.05 jour, avec une médiane de 0.09 jour, un Q1 de -0.15 jour et un Q3 de 0.24 jour, et une plage de -0.51 jour à 0.57 jour. La Zone4 affiche une moyenne de -0.03 jour, une médiane de 0.0 jour, un Q1 de -0.26 jour, un Q3 de 0.17 jour, et une plage de -0.63 jour à 0.6 jour. Enfin, pour la Zone5, la moyenne de changement est de 0.01 jour, avec une médiane de 0.01 jour, un Q1 de -0.01 jour, un Q3 de 0.03 jour, et une plage de -0.03 jour à 0.06 jour.

Entre 2051 et 2075, les variations dans les moyennes de changement sont observées dans chaque zone géographique. Dans la Zone1, la moyenne de changement s'établit à -0.25 jour, avec une médiane de -0.31 jour, un premier quartile (Q1) de -0.62 jour, et un troisième quartile (Q3) de 0.2 jour. Les données varient de -1.68 jour à 1.33 jour. Pour la Zone2, la moyenne de changement est de -0.28 jour, avec une médiane de -0.31 jour, un Q1 de -0.65 jour, et un Q3 de 0.12 jour. La plage de variation s'étend de -1.7 jour à 0.94 jour. Dans la Zone3, la moyenne est de -0.05 jour, avec une médiane de 0.04 jour, un Q1 de -0.26 jour, et un Q3 de 0.2 jour. Les données fluctuent de -0.73 jour à 0.54 jour. Pour la Zone4, la moyenne est de -0.07 jour, avec une médiane de -0.04 jour, un Q1 de -0.28 jour, et un Q3 de 0.18 jour. Les valeurs varient de -1.0 jour à 0.47 jour. Enfin, dans la Zone5, le changement moyen est de 0.01 jour, avec une médiane de 0.01 jour, un Q1 de -0.0 jour, et un Q3 de 0.04 jour. La dispersion des données va de -0.07 jour à 0.06 jour.

Entre 2076 et 2100, les évolutions moyennes de changement se démarquent dans chaque zone géographique. Dans la Zone1, la moyenne de changement est de -0.53 jour, avec une médiane de -0.48 jour, un premier quartile (Q1) de -0.91 jour et un troisième quartile (Q3) de -0.33 jour. Les données s'étendent de -1.3 jour à 0.51 jour. Pour la Zone2, la moyenne est de -0.63 jour, avec une médiane de -0.7 jour, un Q1 de -0.89 jour et un Q3 de -0.35 jour. La dispersion des données va de -1.58 jour à 0.5 jour. Dans la Zone3, la moyenne est de -0.1 jour, avec une médiane de -0.12 jour, un Q1 de -0.26 jour et un Q3 de 0.13 jour. Les valeurs fluctuent de -0.76 jour à 0.69 jour. Pour la Zone4, la moyenne est de -0.32 jour, avec une médiane de -0.35

jour, un Q1 de -0.48 jour et un Q3 de -0.07 jour. Les données vont de -1.11 jour à 0.28 jour. Enfin, dans la Zone5, le changement moyen est de 0.01 jour, avec une médiane de 0.01 jour, un Q1 de -0.02 jour et un Q3 de 0.03 jour. La dispersion des données s'étend de -0.08 jour à 0.09 jour.

1.2.7. Nombre de jours de fortes précipitations (R10mm)

Les graphiques en boîte et en moustaches représentant les évolutions relatives (%) de l'indice R10mm pour les 33 modèles climatiques dans chaque zone géographique au cours des périodes 2026-2050, 2051-2075 et 2076-2100, selon les scénarios SSP245 et SSP585, sont illustrés dans la figure IV.15. L'analyse des variations de l'indice R10mm selon ces scénarios révèle des résultats significatifs. Ils reflétant les changements projetés par les 33 modèles climatiques utilisés.

Dans le scénario SSP245, les changements observés montrent une certaine cohérence dans chaque zone au fil des périodes. Globalement, les tendances varient entre des baisses et des hausses, avec des écarts relativement modérés. Par exemple, dans la Zone 1 pour la période 2026-2050, la moyenne des changements est de -1.6 jours, tandis que pour la période 2076-2100, elle est de -2.91 jours. Cette tendance générale est observée dans toutes les zones, bien que les variations puissent différer selon les périodes.

En revanche, dans le scénario SSP585, les variations sont plus prononcées, avec des écarts plus importants entre les périodes et les zones. Les moyennes des changements sont également plus élevées que dans SSP245, reflétant des variations plus importantes des précipitations extrêmes. Par exemple, dans la Zone 5 pour la période 2026-2050, la moyenne des changements est de -2.2 jours, tandis que pour la période 2076-2100, elle est de -5.77 jours.

En résumé, les résultats montrent que le scénario SSP585 projette des variations plus importantes du nombre de jours de fortes précipitations par rapport à SSP245, avec des différences marquées entre les périodes. Alors que SSP245 présente des variations relativement stables et modérées, SSP585 révèle des tendances plus dynamiques et des variations plus importantes au fil du temps.

Dans la période 2026-2050, le nombre de jours de fortes précipitations (R10mm) varie de -5.03 jours à 2.23 jours dans la Zone1 pour le scénario SSP245. Les quartiles sont de -2.77 jours pour Q1, -1.65 jours pour la médiane, et -0.63 jours pour Q3, avec une moyenne de -1.6

jours. Pour la Zone2, ce nombre se situe entre -4.81 jours et 2.03 jours, avec un Q1 de -2.58 jours, une médiane de -1.56 jours, un Q3 de -0.6 jours et une moyenne de -1.51 jours. Dans la Zone3, les jours de fortes précipitations vont de -2.81 jours à 1.22 jours, avec un Q1 de -1.59 jours, une médiane de -0.7 jours, un Q3 de -0.12 jours et une moyenne de -0.79 jours. Pour la Zone4, ce nombre varie de -2.6 jours à 1.42 jours, avec un Q1 de -1.42 jours, une médiane de -0.86 jours, un Q3 de -0.2 jours et une moyenne de -0.86 jours. Enfin, la Zone5 montre un nombre de jours de fortes précipitations allant de -0.24 jours à 0.22 jours, avec un Q1 de -0.07 jours, une médiane de -0.01 jours, un Q3 de 0.06 jours et une moyenne de -0.01 jours.

Dans la période 2051-2075, le nombre de jours de fortes précipitations (R10mm) varie de -5.24 jours à 0.15 jours dans la Zone1 pour le scénario SSP245. Les quartiles sont de -3.13 jours pour Q1, -2.28 jours pour la médiane, et -1.45 jours pour Q3, avec une moyenne de -2.38 jours. Pour la Zone2, ce nombre se situe entre -5.14 jours et 0.33 jours, avec un Q1 de -3.01 jours, une médiane de -2.08 jours, un Q3 de -1.23 jours et une moyenne de -2.13 jours. Dans la Zone3, les jours de fortes précipitations vont de -3.36 jours à 0.43 jours, avec un Q1 de -1.83 jours, une médiane de -1.15 jours, un Q3 de -0.67 jours et une moyenne de -1.24 jours. Pour la Zone4, ce nombre varie de -3.63 jours à 0.18 jours, avec un Q1 de -1.64 jours, une médiane de -1.11 jours, un Q3 de -0.48 jours et une moyenne de -1.23 jours. Enfin, dans la Zone5, le nombre de jours de fortes précipitations va de -0.22 jours à 0.2 jours, avec un Q1 de -0.11 jours, une médiane de -0.03 jours, un Q3 de 0.02 jours et une moyenne de -0.04 jours.

Dans la période 2076-2100, le nombre de jours de fortes précipitations (R10mm) s'étend de -6.86 jours à 0.36 jours dans la Zone1 pour le scénario SSP245. Les quartiles sont de -3.97 jours pour Q1, -3.24 jours pour la médiane, et -1.65 jours pour Q3, avec une moyenne de -2.91 jours. Pour la Zone2, cette mesure varie de -6.23 jours à 0.38 jours, avec un Q1 de -3.8 jours, une médiane de -2.95 jours, un Q3 de -1.33 jours et une moyenne de -2.71 jours. Dans la Zone3, les jours de fortes précipitations vont de -4.64 jours à 0.74 jours, avec un Q1 de -2.18 jours, une médiane de -1.55 jours, un Q3 de -0.91 jours et une moyenne de -1.58 jours. Pour la Zone4, ce nombre varie de -5.25 jours à 0.64 jours, avec un Q1 de -2.2 jours, une médiane de -1.49 jours, un Q3 de -0.95 jours et une moyenne de -1.6 jours. Enfin, dans la Zone5, le nombre de jours de fortes précipitations va de -0.37 jours à 0.15 jours, avec un Q1 de -0.11 jours, une médiane de -0.06 jours, un Q3 de -0.01 jours et une moyenne de -0.06 jours.

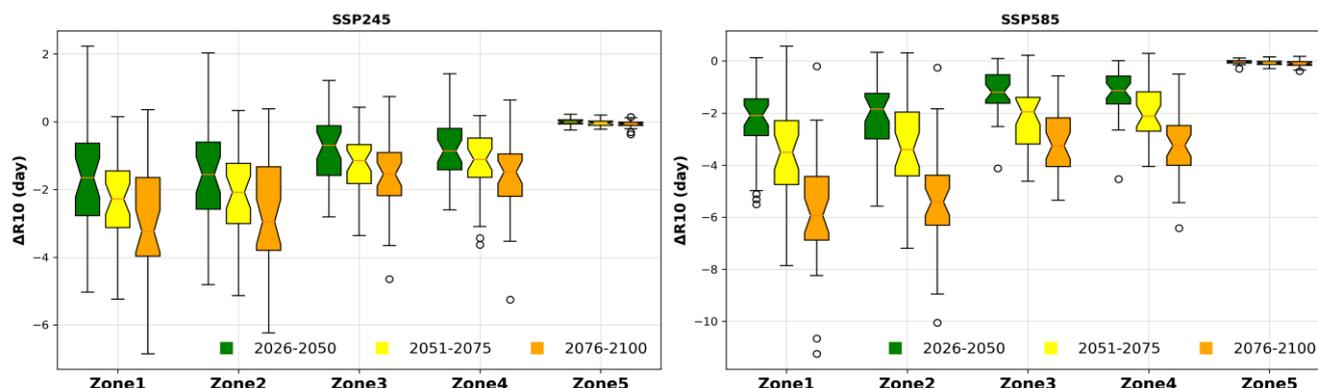


Figure IV.15 : Box-plots des changements relatifs de l'indice R20mm des 33 modèles climatiques selon les scénarios SSP245 (A gauche) et SSP585 (A droite).

Dans la période 2026-2050, pour le scénario SSP585, le nombre de jours de fortes précipitations (R10mm) varie de -5.31 jours à 0.13 jours dans la Zone1. Les quartiles sont de -2.8 jours pour Q1, -2.04 jours pour la médiane, et -1.36 jours pour Q3, avec une moyenne de -2.2 jours. Pour la Zone2, ce nombre se situe entre -5.57 jours et 0.33 jours, avec un Q1 de -2.68 jours, une médiane de -1.83 jours, un Q3 de -1.15 jours et une moyenne de -2.03 jours. Dans la Zone3, les jours de fortes précipitations vont de -4.13 jours à 0.1 jours, avec un Q1 de -1.7 jours, une médiane de -1.2 jours, un Q3 de -0.5 jours et une moyenne de -1.18 jours. Pour la Zone4, ce nombre varie de -4.54 jours à 0.01 jours, avec un Q1 de -1.63 jours, une médiane de -0.97 jours, un Q3 de -0.54 jours et une moyenne de -1.22 jours. Enfin, la Zone5 montre un nombre de jours de fortes précipitations allant de -0.29 jours à 0.12 jours, avec un Q1 de -0.08 jours, une médiane de -0.02 jours, un Q3 de 0.02 jours et une moyenne de -0.03 jours.

Dans la période 2051-2075, pour le scénario SSP585, le nombre de jours de fortes précipitations (R10mm) varie de -7.86 jours à 0.56 jours dans la Zone1. Les quartiles sont de -4.79 jours pour Q1, -3.52 jours pour la médiane, et -2.24 jours pour Q3, avec une moyenne de -3.47 jours. Pour la Zone2, ce nombre se situe entre -7.19 jours et 0.31 jours, avec un Q1 de -4.46 jours, une médiane de -3.4 jours, un Q3 de -1.75 jours et une moyenne de -3.26 jours. Dans la Zone3, les jours de fortes précipitations vont de -4.62 jours à 0.22 jours, avec un Q1 de -3.21 jours, une médiane de -1.91 jours, un Q3 de -1.31 jours et une moyenne de -2.16 jours. Pour la Zone4, ce nombre varie de -4.05 jours à 0.29 jours, avec un Q1 de -2.71 jours, une médiane de -2.04 jours, un Q3 de -1.13 jours et une moyenne de -2.01 jours. Enfin, dans la Zone5, le nombre de jours de fortes précipitations va de -0.3 jours à 0.16 jours, avec un Q1 de -0.14 jours, une médiane de -0.06 jours, un Q3 de -0.0 jours et une moyenne de -0.07 jours.

Dans la période 2076-2100, pour le scénario SSP585, le nombre de jours de fortes précipitations (R10mm) s'étend de -11.25 jours à 0.36 jours dans la Zone1. Les quartiles sont

de -6.98 jours pour Q1, -5.94 jours pour la médiane, et -4.38 jours pour Q3, avec une moyenne de -5.77 jours. Pour la Zone2, cette mesure varie de -10.05 jours à 0.38 jours, avec un Q1 de -6.32 jours, une médiane de -5.38 jours, un Q3 de -4.31 jours et une moyenne de -5.3 jours. Dans la Zone3, les jours de fortes précipitations vont de -5.35 jours à 0.74 jours, avec un Q1 de -4.18 jours, une médiane de -3.32 jours, un Q3 de -2.08 jours et une moyenne de -3.2 jours. Pour la Zone4, ce nombre varie de -6.42 jours à 0.64 jours, avec un Q1 de -4.02 jours, une médiane de -3.21 jours, un Q3 de -2.44 jours et une moyenne de -3.25 jours. Enfin, dans la Zone5, le nombre de jours de fortes précipitations va de -0.39 jours à 0.18 jours, avec un Q1 de -0.17 jours, une médiane de -0.1 jours, un Q3 de -0.02 jours et une moyenne de -0.1 jours.

2. Discussion et conclusion

La comparaison de la variabilité spatiale sur cinq régions climatiques de l'Algérie et de l'évolution temporelle des éventuels changements des sept indices de précipitations extrêmes au cours des trois périodes à venir à savoir : 2026-2050, 2051-2075 et 2076-2100, selon les scénarios SSP245 et SSP585, par rapport à la période historique (1990-2014) a été réalisée. Pour se faire, 33 modèles de simulation provenant du NEX-GDDP-CMIP6. Trois conclusions essentielles ont été déduites de ce chapitre :

1- Malgré les différences entre les différents modèles, l'ensemble multi-modèles MME-33 prévoit une diminution des précipitations annuelles dans les zones 1 (côtier est), 2 (entre la côte Est et les hauts plateaux), 3 (régions de la côte ouest) et 4 (hauts plateaux), et une augmentation relative dans la zone 5 (régions à climat aride). Le taux d'augmentation ou de diminution projeté par les 33 modèles, pour le scénario SSP585, est plus élevé que celui projeté par le scénario SSP245. De plus, ce taux de changement augmente progressivement de la période 2026-2050 à la période 2076-2100. L'ensemble de multi-modèles MME-33 montre une tendance à la diminution des précipitations dans les zones 1, 2, 3 et 4 pour la période 2026-2050, avec des pourcentages variant de 7,5% à 8,5% sous le scénario SSP245 et de 7,5% dans la zone 1 et 2 et 8,5% dans la zone 3, et de 7,7% dans la zone 4 sous le scénario SSP585. Cette tendance s'accroît au fil du temps, avec des pourcentages de diminution atteignant jusqu'à 15% dans la zone 1, 14,3% dans la zone 3 et 16,1% dans la zone 4 pour la période 2076-2100 sous le scénario SSP245, et 15,1% dans la zone 1, 14,3% dans la zone 3 et 16,1% dans la zone 4 pour la période 2076-2100 sous le scénario SSP585. En revanche, sous le scénario SSP245, l'augmentation des précipitations dans la zone 5 est respectivement de

8,01%, 4,04% et 3,31% pour les périodes (2026-2050), (2051-2075) et (2076-2100) ce qui montre une réduction à la fin du siècle. Sous le scénario SSP585, ces augmentations seront de 8,1%, 4,1% et 3,5% pour les mêmes périodes et avec la même remarque que précédemment. La moyenne des changements pour les trois périodes étudiées est estimée par l'ensemble des modèles à -11% (zone 1), -12,5% (zones 2 et 4), -14% (zone 3) et 5% (zone 5) sous le scénario SSP245, et à -19% (zone 1), -20% (zones 2 et 4), -23% (zone 3) et 11% (zone 5) sous le scénario SSP585. Les mêmes changements seront observés dans les différentes régions du bassin méditerranéen ([Bağçaci et al, 2021](#); [Seker et Gumus, 2022](#)). Par exemple, dans une étude utilisant les simulations de modèles climatiques régionaux RCA4, [Bouabdelli et al, \(2020\)](#) et [Zeroual et al. \(2021\)](#) ont trouvé des diminutions de précipitations allant de -0,5 à -1,5 mm/an (RCP4.5) et de -1,5 à -2,5 mm/an (RCP8.5) dans le nord de l'Algérie, tandis que pas de changement dans le sud de l'Algérie. Par rapport à la période de référence allant de 1986 à 2005, en utilisant les simulations de CMIP5 et CMIP6, [Cos et al, \(2022\)](#) ont prédit une baisse significative des précipitations hivernales à long terme, arrivant jusqu'à -20 % à -40 % sur l'Afrique du Nord. Comparativement à la période de référence 1985–2014, [Majdi et al. \(2022\)](#) ont constaté une diminution des précipitations pour les deux périodes futures (2020-2049 et 2050-2079) sous le scénario SSP5-8.5 de 81 mm dans les zones nord de la région MENA, auxquelles appartiennent les Zones 1, 2 et 3 étudiées. En revanche, des augmentations allant jusqu'à 189 mm ont été observées dans les régions sud de la MENA, où se situe la Zone 5 de notre étude par les mêmes auteurs.

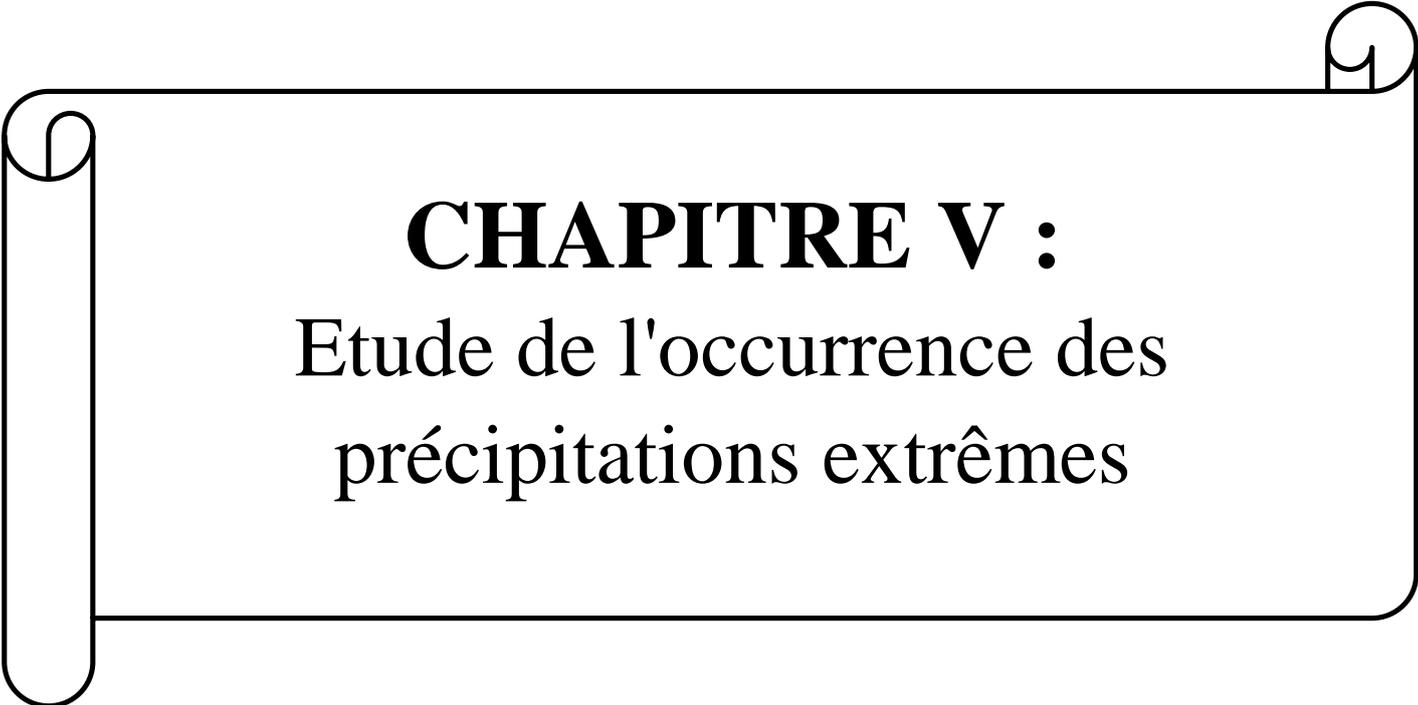
2- Les indices de précipitations maximales en une journée (Rx1day) et de précipitations extrêmement importantes (R99p) montrent une tendance à la hausse dans toutes les zones, selon la quasi-totalité des modèles. Les résultats de l'ensemble multi-modèles MME-33 révèlent une tendance à l'augmentation de l'indice Rx1day et de l'indice R99p dans les cinq zones. Pour la période 2026-2050, les taux d'augmentation varient de 2,5% à 7,0% sous le scénario SSP245 et de 3,6% à 8,6% sous le scénario SSP585 pour l'indice Rx1day, et de 12,0% à 19,3% sous SSP245 et de 14,3% à 19,1% sous SSP585 pour l'indice R99p. Cette tendance se renforce pour la période suivante (2051-2075) où les taux d'augmentation varient de 3,9% à 5,6% sous SSP245 et de 4,1% à 8,8% sous SSP585 pour l'indice Rx1day, et de 15,0% à 25,9% sous SSP245 et de 14,3% à 19,1% sous SSP585 pour l'indice R99p. Cependant, pour la période 2076-2100, une légère diminution des taux d'augmentation est observée, à l'exception de la zone 5 où ce taux augmente jusqu'à 12,4% sous SSP585 pour l'indice Rx1day, tandis qu'il oscille entre 12,3% et 19,5% sous SSP245 et entre 14,7% et

23,5% sous SSP585 pour l'indice R99p. La moyenne des changements pour les trois périodes étudiées est estimée par l'ensemble des modèles à +14% (zone 1), +13,5% (zones 2 et 4), +17% (zone 3) et +21% (zone 5) pour l'indice Rx1day sous le scénario SSP245. Elle est de +5% (zone 1), +3% (zones 2 et 4), +4% (zone 3) et +8% (zone 5) pour l'indice R99p sous le scénario SSP245. Sous le SSP585, les changements sont de +15% (zone 1), +14% (zones 2 et 4), +14% (zone 3) et +22% (zone 5) pour l'indice Rx1day, et de 3% (zone 1), +2% (zones 2 et 4), +1% (zone 3) et +12% (zone 5) pour l'indice R99p. [Li et al. \(2021\)](#) et [Seneviratne et al. \(2021\)](#) ont constaté des évolutions similaires en Algérie, marquées par une augmentation de l'intensité et de la fréquence des fortes précipitations (Rx1day) pour la période 2071-2100 sous les scénarios SSP1-2.6 et SSP5-8.5, par rapport à la période de référence 1985-2014. Plus précisément, [Li et al. \(2021\)](#) ont observé des augmentations variant de 10% à 20% des événements Rx1day et Rx5day sur une période de 50 ans, ainsi que de 5% à 10% dans les événements annuels Rx1day et Rx5day durant la période 2071-2100 sous le scénario SSP5-8.5. D'autres études régionales, dont l'Algérie fait partie, et basées sur les simulations CMIP5 et les modèles régionaux (RCM), corroborent avec nos résultats en montrant une augmentation de l'intensité des fortes précipitations ([Samuels et al., 2018](#), [Cardell et al., 2020](#) ; [Driouech et al., 2020](#)). Par exemple, dans une étude portant sur la région MENA, [Driouech et al., \(2020\)](#) ont observé des changements futurs (%) positifs des journées extrêmement pluvieuses (R99p) pour la période 2071-2100 par rapport à la période de référence 1976-2005. Pour l'indice R99p, les changements sont de +5% à +10% (zone 1), +5% à +10% (zones 2, 3 et 4), et supérieurs à +40% (zone 5) sous le RCP4.5, tandis que sous le RCP8.5, les changements sont de +5% à +20% (zone 1), +20% à +40% (zones 2, 3 et 4), et de +40% à +100% (zone 5).

3- Les 33 modèles ainsi que l'ensemble multi-modèles MME-33 montrent la même tendance, avec à la fois des augmentations et des diminutions dans les changements simulés des indices de précipitations extrêmes pour les trois périodes futures sous les deux scénarios par rapport à la période historique dans les cinq zones (Figure IV.5). Cependant, il est important de noter que ces changements sont minimes et ne dépassant pas une journée dans le cas de l'ensemble multi-modèles MME-33. Dans la Zone 1, l'ensemble multi-modèles MME-33 prévoit des diminutions pour les périodes 2026-2050, 2051-2075 et 2076-2100, respectivement de -0,09 jours, -0,03 jours et -0,12 jours sous le scénario SSP245, et de -0,1 jours, -0,17 jours et -0,12 jours sous le scénario SSP585. Dans la Zone 2, les valeurs de.... diminuent progressivement de -0,12 à -0,16 jours sur les trois périodes sous le scénario SSP245, et de -0,18 jour à -0,62

jour sous le scénario SSP585. Sous le scénario SSP245, dans la Zone 3, une tendance à l'augmentation est observée, passant de 0,07 à 0,09 jour. Quant au scénario SSP585, une légère augmentation de 0,06 jour est observée de 2026 à 2050, suivie d'une diminution progressive jusqu'à -0,09 jour pour la période 2076-2100. Sous les deux scénarios et pour les trois périodes futures, les Zones 4 et 5 présentent des variations relativement stables, oscillant autour de 0 jour. La moyenne des changements pour les trois périodes étudiées est estimée pour l'ensemble des modèles à -0,1 jour (zone 1 et 2), +0,1 jour (zones 3, 4 et 5) sous le scénario SSP245, et à -0,36 jour (zone 1 et 2), -0,14 jour (zones 3) et 0,01 jour (zones 4 et 5) sous le scénario SSP585.

La réduction actuelle des précipitations et l'augmentation des précipitations extrêmes dans certain zone de l'Algérie, comme signalée dans le chapitre III, ainsi que l'augmentation des températures (Kabli et al., 2024; Taïbi et al., 2021; Zeroual et al., 2017), soulèvent des inquiétudes majeures pour les différents secteurs socio-économiques ainsi que la sécurité des biens et des vies humaines. De plus, les prévisions anticipent une diminution future des précipitations dans toutes les régions de l'Algérie, ainsi qu'une augmentation projetée des précipitations maximales journalières et des précipitations extrêmement importantes. Ces tendances pourraient entraîner de nombreux problèmes, notamment des perturbations dans les cycles agricoles, une diminution de la disponibilité en eau, des défis croissants en matière de gestion des ressources naturelles et de l'environnement, ainsi que des risques accrus d'inondations, avec des conséquences néfastes sur les infrastructures, les habitations et la société en général. Il est également judicieux d'exploiter les ressources en eau liées aux précipitations maximales en construisant des bassins de rétention d'eau dans les zones urbaines et de construire des barrages pour mieux gérer les crues et stocker l'eau excédentaire pour une utilisation ultérieure, notamment dans l'irrigation agricole. Cette approche contribuerait à optimiser la gestion des ressources en eau et à atténuer les effets néfastes des événements météorologiques extrêmes sur les populations et les infrastructures. Il est essentiel d'intégrer ces considérations dans les plans de développement socio-économique futurs pour renforcer la résilience face aux changements climatiques. En fournissant des informations précieuses aux décideurs politiques, aux planificateurs et aux chercheurs, cette étude contribue à renforcer la résilience de l'Algérie face aux défis croissants posés par les extrêmes de précipitations dans un contexte de changement climatique rapide.

A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left and a horizontal strip at the top, both ending in rounded, scroll-like shapes.

CHAPITRE V :

Etude de l'occurrence des précipitations extrêmes

Dans le chapitre précédent, l'évolution future des indices de précipitations extrêmes dans différentes zones en Algérie, en se basant sur 33 modèles (MCG) et l'ensemble multi-modèle MME-33 sous les scénarios SSP245 et SSP585 ont été étudiés. Les résultats révèlent une diversité de tendances selon les indices, les modèles et les régions. Globalement, une diminution des précipitations annuelles est projetée dans les zones côtières et les Hauts Plateaux (zones 1 à 4), tandis qu'une augmentation relative est prévue dans les régions présaharienne et saharienne (zone 5). Pour les indices de précipitations extrêmes tels que Rx1day, Rx5day et R99p, une tendance à la hausse est observée dans toutes les zones, avec des pourcentages variant selon les scénarios et les périodes. En revanche, pour l'indice du nombre de jours de fortes précipitations (R20mm), des variations sont notées d'une zone à une autre, avec des diminutions dans les zones côtières et des augmentations dans les autres régions. Ces résultats soulignent la complexité des projections climatiques et mettent en évidence l'importance de considérer plusieurs facteurs dans l'évaluation des changements futurs des précipitations extrêmes.

Dans ce chapitre, l'analyse des projections de précipitations extrêmes en Algérie en se penchant sur deux aspects essentiels sera approfondie. Tout d'abord, nous examinerons comment les différents modèles climatiques simulent les changements dans l'évolution des indices de précipitations extrêmes, et le nombre de modèles qui prévoient une augmentation ou une diminution de ces indices sera déterminé. Cette démarche permettra d'évaluer la fiabilité des projections et d'identifier les tendances dominantes qui pourraient façonner le climat futur de l'Algérie. Ensuite, il sera question d'identifier les seuils critiques associés aux changements projetés avec une comparaison des valeurs des indices les plus probables observées durant la période historique avec celles des trois périodes futures. Cette analyse nous permettra également d'évaluer si les valeurs dépassant les seuils les plus probables augmenteront, diminueront ou resteront stables, ainsi que la probabilité associée à chaque scénario. Une telle approche aide à mieux anticiper les éventuelles catastrophes à l'avenir et à prendre des décisions éclairées. Par exemple, dans un contexte où les précipitations totales diminuent, il est crucial de déterminer quelles sont les valeurs les plus probables à observer dans le futur. Cette information est essentielle pour ajuster les pratiques agricoles, planifier la gestion des ressources en eau et concevoir des infrastructures résilientes capables de faire face à des conditions météorologiques changeantes. De même, une augmentation des précipitations maximales journalières soulève des questions sur la fréquence et l'intensité des événements

météorologiques extrêmes, ainsi que sur les mesures d'adaptation nécessaires pour atténuer leurs impacts potentiels sur les communautés et les écosystèmes.

En évaluant les probabilités d'occurrence des différentes valeurs d'indice et en les comparant aux données historiques, les tendances futures et les incertitudes associées seront mieux comprises dans leur évolution. Cette approche probabiliste permet d'anticiper les risques climatiques et d'identifier les zones les plus vulnérables, ce qui est essentiel pour orienter les politiques d'adaptation et de gestion des risques à l'échelle locale, régionale et nationale. Pour atteindre ces objectifs, la méthodologie s'est articulée autour des étapes suivantes :

Après avoir calculé la moyenne du changement relatif (%) et du changement absolu (en jours) pour chaque zone et chaque modèle climatique sur les trois périodes futures, selon les scénarios SSP245 et SSP585 dans le chapitre IV, le nombre de modèles parmi les 33 qui indiquent une augmentation ou une diminution de l'indice de précipitations extrêmes sera évalué. Une augmentation ou une diminution est considérée comme significative si elle est simulée par au moins 22 modèles, soit les 2/3 de l'ensemble des modèles (33 modèles) ou 66 % de modèles (Haensler et al. 2013).

Pour chaque indice de précipitations extrêmes ETCCDI de chaque modèle climatique, les cellules de grille spécifiques pour chaque zone seront identifiées et le tracé de la distribution de densité de noyau (KDD) pour la période historique (1990-2014), ainsi que pour les trois périodes futures ((2026-2050), (2051-2075) et (2076-2100)) selon les deux scénarios SSP245 et SSP585 sera réalisé. L'analyse en identifiant les cellules de grille spécifiques pour chaque zone à partir de l'ensemble des modèles en même temps sera effectuée. Pour ce faire, La distribution de densité de noyau (KDD) (Jones, 1990) sera utilisée. Elle est une approche non paramétrique utilisée pour estimer la distribution de probabilité des données en fonction de leur densité, sans supposer une forme de distribution spécifique. Elle repose sur l'utilisation de noyaux, généralement des fonctions de densité de probabilité comme la gaussienne, pour estimer la densité de probabilité à chaque point de données. La KDD est largement utilisée dans l'analyse de données et est disponible dans la bibliothèque Python seaborn sous le module `sns.kdeplot()`. La bande passante, un paramètre clé de la méthode, contrôle la largeur de la fenêtre autour de chaque point à partir de laquelle les données sont prises en compte pour l'estimation. Une bande passante plus large produit une estimation plus lisse, mais peut perdre des détails, tandis qu'une bande passante plus étroite peut capturer des variations locales avec plus de bruit. Jones (1990) a étudié les performances des fonctions de densité de

noyau, tandis que Kamalov (2020) a démontré l'applicabilité de la KDD dans divers contextes. Dans ce chapitre de la thèse, une bande passante de 0.1 est utilisée, ce qui lisse les données sur une fenêtre de 0.1 unité pour équilibrer le lissage et la capture des variations locales.

1. Résultats

1.1. Analyse de la significativité des changements des indices de précipitations extrêmes : Analyse du consensus des modèles

La figure V.1 présente le pourcentage de modèles ayant un changement relatif positif pour chaque zone et sur trois périodes futures selon les scénarios SSP245 et SSP585, accompagné d'un seuil de 66 % pour mettre en évidence la significativité de l'augmentation. De plus, nous avons ajouté un seuil inférieur de 33%. Si le pourcentage de modèles avec un changement relatif positif est inférieur à ce seuil de 33%, cela indique une diminution significative.

1.1.1. Précipitations totales annuelles en jours humides (PRCPTOT)

Pour le scénario SSP245 (Figure V.1), les zones 1, 2, 3 et 4 présentent des variations importantes dans le pourcentage de modèles avec un changement relatif positif au fil du temps. Plus spécifiquement, les zones 1 et 2 affichent des pourcentages oscillants entre 0 % et 15,15 % (<33%) pour la période 2026-2050, ce qui indique un consensus significatif dans les projections des modèles à la diminution de l'indice PRCPTOT. Cependant, ces pourcentages diminuent considérablement au fil du temps pour atteindre 0 % pour la période 2076-2100. La zone 5 présente des pourcentages plus élevés, dépassant 66 % pour les trois périodes, ce qui suggère une augmentation significative de l'indice PRCPTOT dans cette zone. Pour le scénario SSP585, les résultats montrent des tendances similaires, bien que les pourcentages de modèles avec un changement relatif positif soient généralement plus faibles (ne dépassant pas 3,5 %) par rapport au SSP245. Dans l'ensemble, les zones 1, 2, 3 et 4 affichent des pourcentages qui diminuent progressivement au fil du temps, atteignant finalement 0 % pour la période 2076-2100, ce qui indique un consensus significatif dans les projections des modèles à la diminution de l'indice PRCPTOT. Cependant, la zone 5 présente des variations importantes, avec des pourcentages supérieurs à 66 % pour la première et la dernière période, indiquant une augmentation significative de l'indice PRCPTOT.

1.1.2. Précipitations annuelles maximales sur 1 jour (RX1day)

Pour le scénario SSP245, les zones 1, 2, 3, et 5 présentent des variations significatives dans le pourcentage de modèles avec un changement relatif positif au fil du temps pour l'indice RX1day (Figure V.1). Plus spécifiquement, les zones 1 et 2 affichent des pourcentages élevés, oscillant entre 60,61% et 72,73% pour la période 2026-2050, indiquant un consensus significatif dans les projections des modèles à l'augmentation de l'indice RX1day. Ces pourcentages diminuent légèrement au fil du temps, mais restent globalement élevés pour toutes les périodes. La zone 3 montre une tendance à l'augmentation du pourcentage de modèles avec le temps, atteignant jusqu'à 75,76% pour la période 2076-2100. La zone 4 présente des pourcentages qui varient entre 63,64% et 75,76% tout au long de la période d'étude. Pour le scénario SSP585, les résultats montrent des tendances similaires, bien que les pourcentages de modèles avec un changement relatif positif soient généralement plus faibles par rapport au SSP245. Les zones 1, 2 et 5 affichent des pourcentages qui diminuent légèrement au fil du temps, tandis que la zone 3 montre une diminution plus prononcée, atteignant 57,58% pour la dernière période. La zone 4 montre également une diminution progressive du pourcentage de modèles avec le temps, avec des valeurs comprises entre 48,48% et 63,64%.

1.1.3. Précipitations annuelles maximales sur 5 jours (RX5day)

Pour le scénario SSP245, les zones 1, 2, 3 et 4 montrent des variations peu significatives dans le pourcentage de modèles prédisant un changement relatif positif de l'indice RX5day au fil du temps (Figure V.1). Pour les périodes 2026-2050, 2051-2075 et 2076-2100, ces quatre zones présentent des pourcentages élevés, compris entre 42% et 48%, entre 52% et 64%, et entre 41% et 58% respectivement. Pour le scénario SSP585, les résultats montrent des tendances similaires dans les quatre zones (1, 2, 3 et 4) pour la période 2026-2050, avec des pourcentages de modèles prédisant un changement relatif positif variant entre 42% et 57%. Cependant, entre 2051-2075, ces pourcentages ont diminué de 36% à 54% dans les zones 1, 2 et 4, tandis que dans la zone 3, ils sont passés en dessous de 33%, indiquant un consensus significatif dans les projections des modèles à la diminution de l'indice RX5day. Cette tendance à la diminution se poursuit pour la période 2076-2100, avec des pourcentages qui diminuent encore (variant entre 12% et 18%) et deviennent inférieurs à 33%, ce qui souligne un consensus significatif dans les projections des modèles à la diminution de l'indice RX5day. En revanche, dans les deux scénarios, la zone 5 présente des variations significatives, avec des pourcentages variant entre 67% et 75% pour les trois périodes,

indiquant un consensus parmi les modèles quant à l'augmentation de l'indice RX5day dans cette zone.

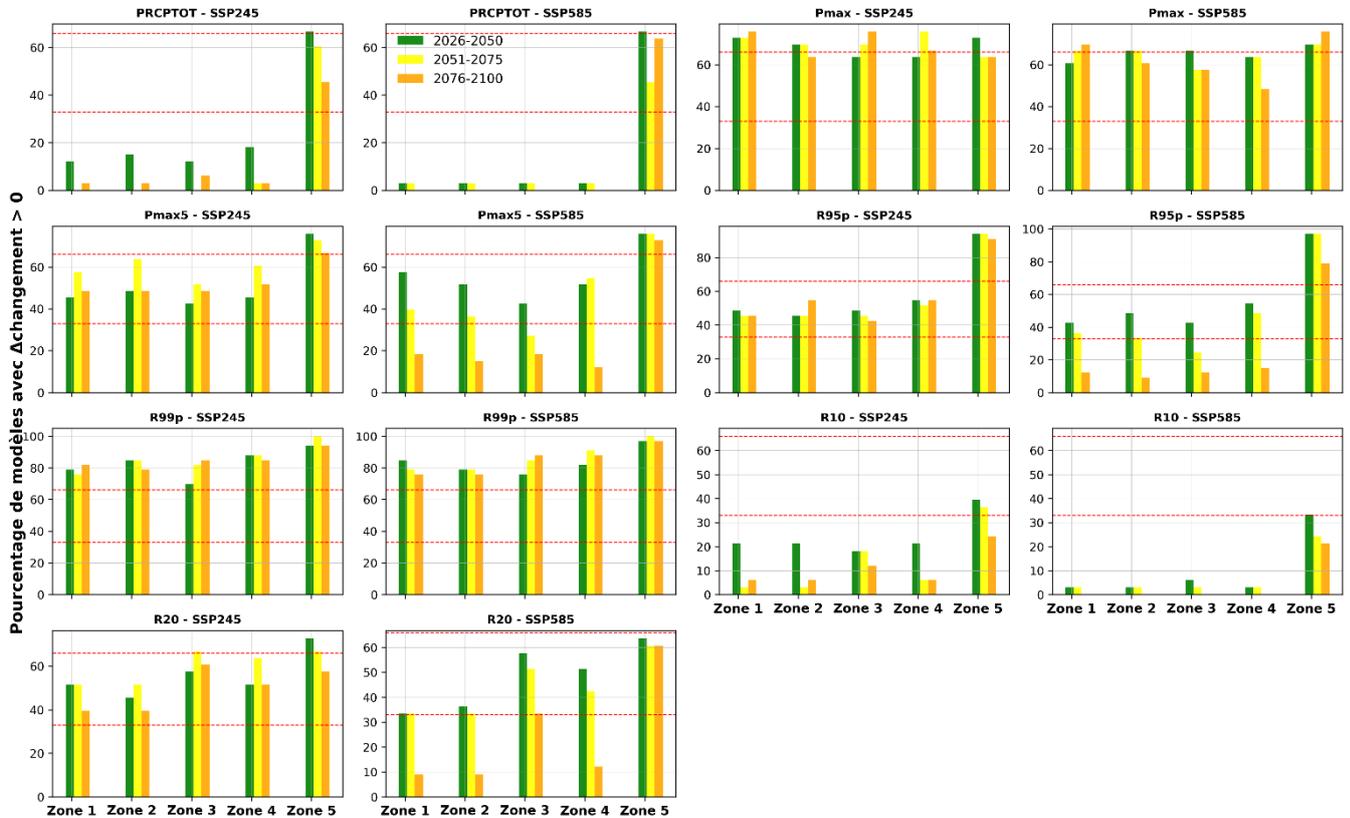


Figure V.1 : Pourcentage de modèles avec un changement relatif positif selon les scénarios sur trois périodes futures, avec les seuils de significativité.

1.1.4. Précipitations totales annuelles à partir de jours > 99e percentile (R99p)

Pour les deux scénarios et les trois périodes, un consensus significatif dans les projections des modèles à l'augmentation de l'indice R99p a été observé (Figure V.1). Pour le scénario SSP245, toutes les zones montrent des variations dans le pourcentage de modèles avec un changement relatif positif au fil du temps pour l'indice R99p. Les zones 1, 2 et 3 affichent des pourcentages élevés dès le début de la période d'étude, avec des valeurs allant de 69,70% à 87,88% pour la période 2026-2050. Ces pourcentages restent élevés au cours du temps, bien que la zone 5 présente une diminution du pourcentage de modèles avec le temps, passant de 93,94% à 87,88% entre les périodes 2051-2075 et 2076-2100. Pour le scénario SSP585, les tendances sont similaires, avec des pourcentages généralement plus faibles par rapport au SSP245. Les zones 1, 2 et 3 présentent des pourcentages élevés au début de la période d'étude, mais ceux-ci diminuent progressivement au fil du temps. La zone 5 montre une tendance à la

diminution également, bien que les pourcentages restent élevés, dépassant 90 % pour les deux dernières périodes.

1.1.5. Précipitations totales annuelles à partir de jours > 95e percentile (R99p)

Pour le scénario SSP245, les zones 1, 2, 3 et 4 montrent des variations peu significatives dans le pourcentage de modèles prédisant un changement relatif positif de l'indice R99p au fil du temps (Figure V.1). Pour les périodes 2026-2050, 2051-2075 et 2076-2100, ces quatre zones présentent des pourcentages élevés, compris entre 45% et 52%, entre 45% et 51%, et entre 42% et 45% respectivement. Pour le scénario SSP585, les résultats montrent des tendances similaires dans les quatre zones (1, 2, 3 et 4) pour la période 2026-2050, avec des pourcentages de modèles prédisant un changement relatif positif variant entre 42% et 55%. Cependant, entre 2051-2075, ces pourcentages ont diminué de 34% à 48% dans les zones 1, 2 et 4, tandis que dans la zone 3, ils sont passés en dessous de 33%, indiquant un consensus significatif dans les projections des modèles à la diminution de l'indice R99p. Cette tendance à la diminution se poursuit pour la période 2076-2100, avec des pourcentages qui diminuent encore (variant entre 9% et 15%) et deviennent inférieurs à 33%, ce qui souligne un consensus significatif dans les projections des modèles à la diminution de l'indice R99p. En revanche, dans les deux scénarios, la zone 5 présente des variations significatives, avec des pourcentages variants entre 78% et 96% pour les trois périodes, indiquant un consensus parmi les modèles

1.1.6. Nombre de jours de fortes précipitations (R20mm)

Pour les deux scénarios et les trois périodes, un consensus dans les projections des modèles à l'augmentation de l'indice R20mm a été observé (Figure V.1). Pour le scénario SSP245, toutes les zones présentent des variations importantes dans le pourcentage de modèles avec un changement relatif positif au fil du temps. Plus spécifiquement, les zones 1, 2 et 3 affichent des pourcentages élevés dès le début de la période d'étude, avec des valeurs allant de 45,45% à 57,58% pour la période 2026-2050. Cependant, ces pourcentages diminuent progressivement au fil du temps, atteignant finalement 39,39 % pour la période 2076-2100 (Figure V.1). La zone 5 se distingue par des pourcentages plus élevés, dépassant les 66% pour les trois périodes (2026-2050, 2051-2075, 2076-2100), indiquant une augmentation significative de l'indice R20mm dans cette zone tout au long de la période étudiée. Pour la zone 3, une augmentation significative est également observée pendant la période 2051-2075, avec un pourcentage dépassant les 66%. Pour le scénario SSP585, les pourcentages de

modèles avec un changement relatif positif sont généralement plus faibles par rapport au SSP245. Les zones 1, 2, 3 et 4 présentent des pourcentages élevés au début de la période d'étude (34% à 57%), mais ceux-ci diminuent progressivement au fil du temps, atteignant finalement 9,09 % dans les zones 1 et 2 et 12,12% pour la zone 4 pour la période 2076-2100. Cela suggère une diminution significative de l'indice R20mm dans ces zones pour la période 2076-2100. La zone 5 montre une tendance à l'augmentation, bien que les pourcentages restent élevés, mais ne dépassent pas 66 % pour les trois périodes.

1.1.7. Nombre de jours de fortes précipitations (R10mm)

À l'exception de la zone 5 pour les périodes 2026-2050 et 2051-2075, un consensus dans les projections des modèles à la diminution de l'indice R10mm a été observé pour les cinq zones pour les deux scénarios et les trois périodes (Figure V.1).

1.2. Distribution de densité par noyau (KDD) pour les indices de précipitations extrêmes à travers les périodes et les régions étudiées à l'aide de MME-33

Dans cette section, la comparaison des distributions de densité de noyau (KDD) pour les trois périodes futures selon les scénarios SSP245 et SSP585 par rapport à la période historique, pour chaque indice de précipitations extrêmes sera analysée. Elle est réalisée pour chaque zone en utilisant l'ensemble multi-modèle MME-33. Cependant, les figures montrant la comparaison des densités de probabilité de chaque modèle pris individuellement sont regroupées dans l'annexe 1 sous forme d'une page HTML.

1.2.1. Précipitations totales annuelles en jours humides (PRCPTOT)

La figure V.2 illustre la comparaison, dans chaque zone, les KDD des trois périodes futures de l'indice PRCPTOT selon les scénarios SSP245 et SSP585 par rapport à la période historique, en utilisant l'ensemble multi-modèles MME-33 simultanément.

Les courbes KDD de l'indice PRCPTOT indiquent un déplacement vers la gauche des périodes futures sous tous les scénarios par rapport à la période de référence dans les quatre premières zones. En revanche, dans la cinquième zone, la répartition des valeurs de l'indice PRCPTOT dans les périodes futures est presque similaire à celle de la période de référence. Pour la période historique (1990-2014), les précipitations annuelles correspondant à la KDD maximale dans la zone 1 et 2 sont approximativement égales à 580 mm, ce qui signifie que cette valeur est la plus fréquemment observée au cours de cette période. Pour les trois

périodes futures sous le scénario SSP245, la probabilité relative est supérieure à celle de la période historique, mais avec des valeurs de précipitation annuelle inférieure à 580 mm. Dans la région 1, les niveaux de précipitations les plus probables sont identiques pour les scénarios SSP245 et SSP585. Ils sont estimés à 520 mm pour la période de 2026 à 2050, puis à 480 mm pour la période de 2051 à 2075. Cependant, pour la période 2076-2100, les précipitations probables diffèrent significativement pour les deux scénarios, avec 480 mm sous SSP245 et 290 mm sous SSP585. Pour la région 2, les précipitations les plus probables sous SSP245 sont de 480 mm pour les périodes 2026-2050 et 2051-2075, et de 420 mm pour la période 2076-2100. Sous SSP585, on observe également des précipitations de 480 mm pour 2026-2050, 440 mm pour 2051-2075, et 290 mm pour 2076-2100. En outre, il est important de noter que pour les deux régions 1 et 2 ainsi que pour les trois périodes futures sous les deux scénarios SSP245 et SSP585, les précipitations annuelles inférieures à 580 mm seront plus probables comparé à la période historique, ce qui signifie que les précipitations supérieures à 580 mm seront moins probables dans le futur. Pendant la période historique, les précipitations annuelles les plus fréquemment observées dans les zones 3 et 4 étaient respectivement de 380 mm et 350 mm. Pour ces zones, les précipitations les plus probables pourraient diminuer dans le futur sous le scénario SSP245, atteignant les 300 mm pour les périodes 2026-2050 et 2051-2075, puis diminuent à 250 mm pour la période 2076-2100. Sous le scénario SSP585, les précipitations annuelles les plus probables seront de 280 mm pour 2026-2050 et de 200 mm pour les deux périodes 2051-2075 et 2076-2100. De plus, il est important de noter que pour les régions 3 et 4, ainsi que pour les trois périodes futures et sous les deux scénarios, les précipitations annuelles inférieures à 380 mm seront plus probables que lors de la période historique, tandis que les précipitations supérieures à 380 mm seront moins probables. Il convient également de mentionner que la probabilité de voir des précipitations annuelles de moins de 380 mm est plus élevée durant la période 2076-2100 que pour les deux périodes 2026-2050 et 2051-2075. Pour la zone 5, il sera plus probable d'observer des précipitations annuelles nulles sous les deux scénarios SSP245 et SSP585, que ce soit durant la période historique ou dans les périodes futures. Cependant, cette probabilité est plus élevée dans la période 2076-2100 que dans les deux périodes 2026-2050 et 2051-2075, ainsi que pendant la période historique. Pour les trois périodes futures, les précipitations annuelles de 20 mm à 100 mm ont une probabilité, bien que minimale, supérieure à celle observée historiquement.

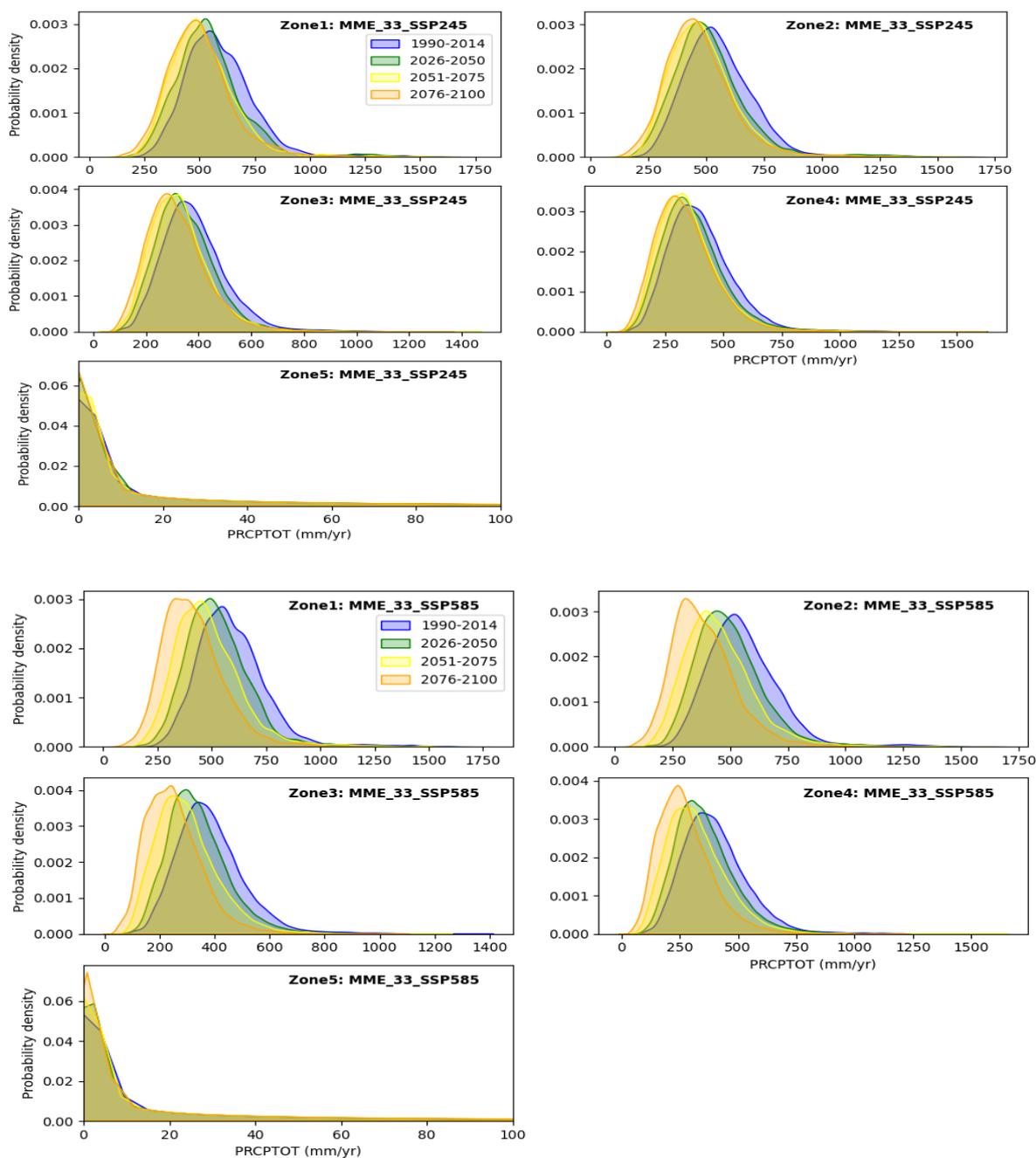


Figure V.2 : Comparaison des distributions de densité de noyau des valeurs de l'indice PRCPTOT pour les périodes futures selon les scénarios SSP245 et SSP585 par rapport à la période historique.

1.2.2. Précipitations annuelles maximales sur 1 jour (RX1day)

La figure V.3 illustre la comparaison dans chaque zone des KDD des trois périodes futures, de l'indice RX1day, selon les scénarios SSP245 et SSP585 par rapport à la période historique en utilisant l'ensemble multi-modèles MME-33 simultanément.

Le KDD de RX5day présente un schéma presque similaire et devient plus plat dans le futur sous les deux scénarios par rapport à la période de référence. Cependant, par rapport à la

période historique, on observe une augmentation de la probabilité d'occurrence des précipitations maximales journalières dépassant les 35 mm dans les quatre zones du nord. Ces valeurs pourraient atteindre les 100 mm par jour, mais avec une probabilité d'apparition relativement faible. Sous les deux scénarios, les précipitations maximales journalières les plus probables pour la période historique sont presque similaires à celles des trois périodes futures. Ces valeurs sont d'environ 25 mm dans la zone 1, 28 mm dans la zone 2, 18 mm dans la zone 3, 22 mm dans la zone 4 et 0 mm dans la zone 5. De plus, il convient de souligner que pour les régions 1, 2, 3 et 4, ainsi que pour les trois périodes futures sous les deux scénarios, les précipitations maximales journalières, dépassant les 35 mm, seront plus probables par rapport à la période historique. Ces précipitations pourraient varier de 60 mm à 100 mm, bien que leur probabilité reste relativement faible. En ce qui concerne la zone 5, des précipitations maximales journalières allant de 20 mm à 100 mm pourraient être observées dans le futur, mais avec une fréquence faible.

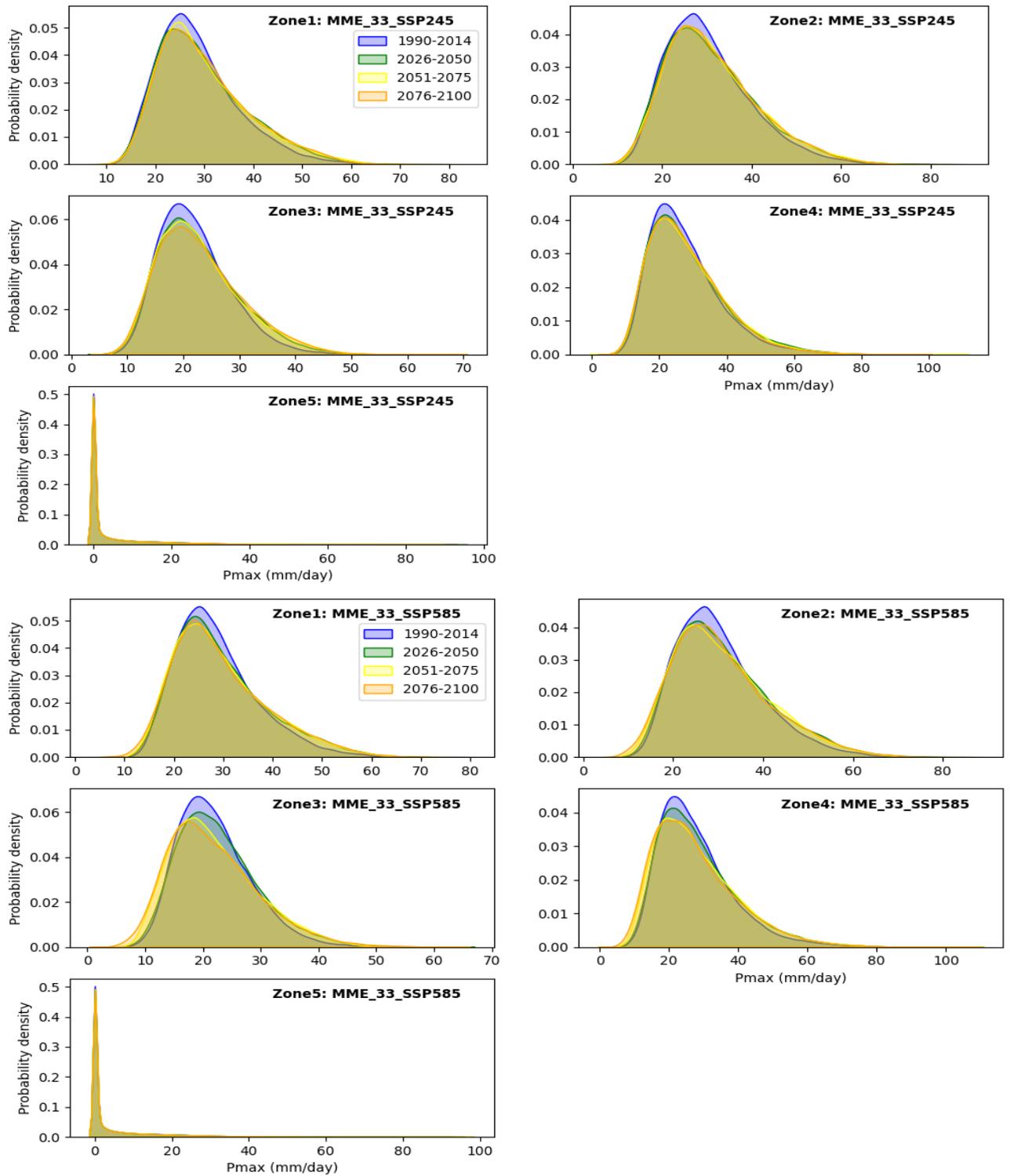


Figure V.3 : Comparaison des distributions de densité de noyau des valeurs l'indice RX1day pour les périodes futures selon les scénarios SSP245 et SSP585 par rapport à la période historique.

1.2.3. Précipitations annuelles maximales de 5 jours (RX5day)

La figure V.4 illustre la comparaison, dans chaque zone, les KDD des trois périodes futures de l'indice RX5day selon les scénarios SSP245 et SSP585 par rapport à la période historique, en utilisant l'ensemble multi-modèles MME-33 simultanément.

Le KDD de RX5day présente un schéma presque similaire et deviennent plus plat dans le futur sous les deux scénarios par rapport à la période de référence. Cependant, par rapport à la période historique, on observe une augmentation de la probabilité d'occurrence des précipitations maximales de 5 jours dépassant les 90mm/5jours dans les zones 1, 3 et 4, 100 mm/5jours dans la zone 3. Ces valeurs pourraient atteindre jusqu'à 200 mm/5jours, mais avec une probabilité relativement faible. Sous les deux scénarios, les précipitations maximales de 5 jours les plus probables pour la période historique sont presque similaires à celles des trois périodes futures. Ces valeurs sont d'environ 60 mm dans les zones 1 et 2, 50 mm dans la zone 3 et 4 et 0 mm dans la zone 5. De plus, il convient de souligner que pour les régions 1, 2, 3 et 4, ainsi que pour les trois périodes futures sous les deux scénarios, les précipitations maximales de 5 jours dépassant les 100 mm seront plus probables par rapport à la période historique. Ces précipitations pourraient varier de 100 mm à 200 mm, bien que leur probabilité d'occurrence reste relativement faible. En ce qui concerne la zone 5, des précipitations maximales de 5 jours allant de 20 mm à 100 mm pourraient être observées dans le futur avec une probabilité trop faible.

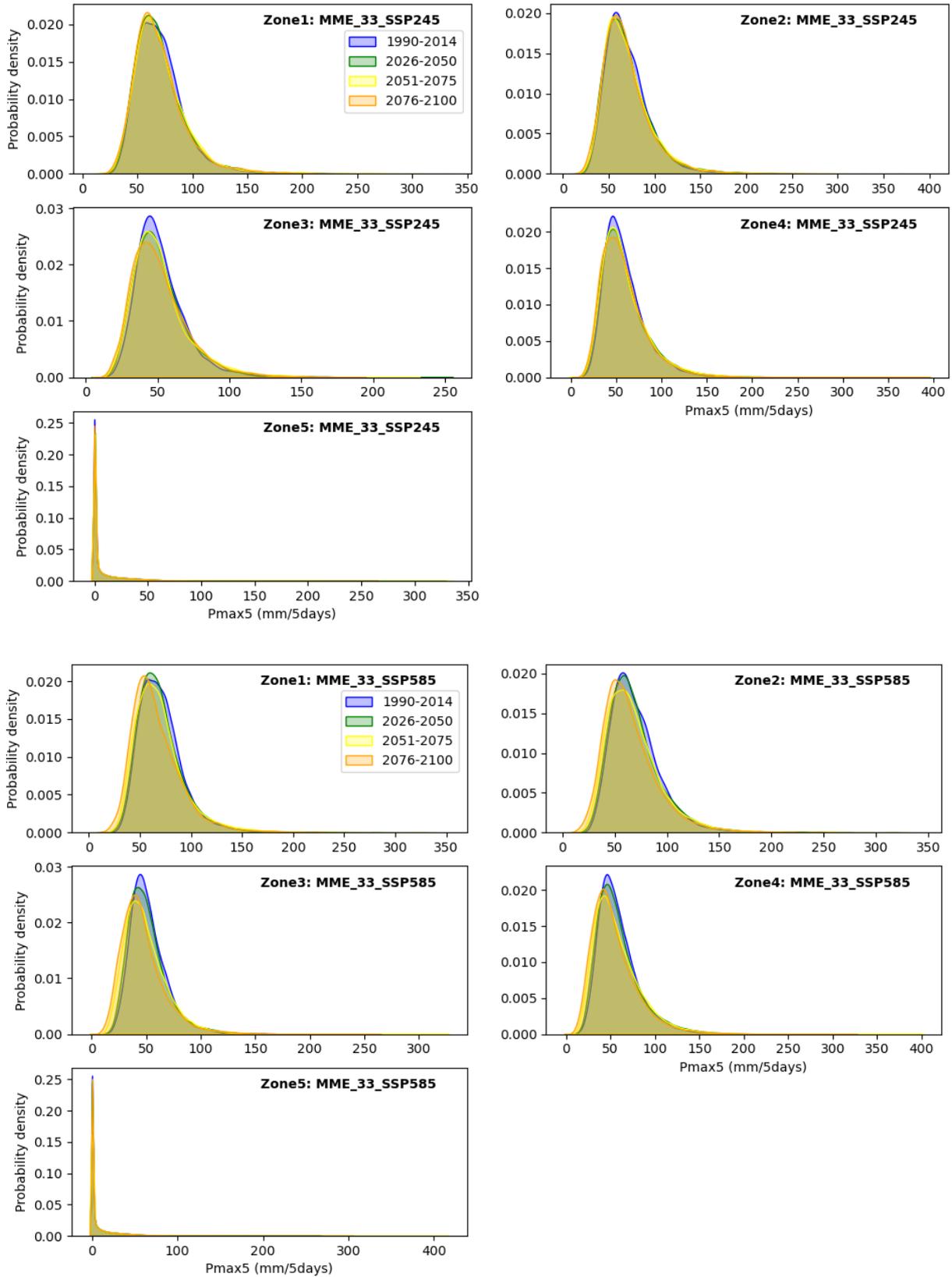


Figure V.4 : Comparaison des distributions de densité du noyau des valeurs l'indice RX5day pour les périodes futures selon les scénarios SSP245 et SSP585 par rapport à la période historique.

1.2.4. Précipitations totales annuelles à partir de jours > 99e percentile (R99p)

La figure V.5 illustre la comparaison, dans chaque zone, les KDD des trois périodes futures de l'indice R99p selon les scénarios SSP245 et SSP585 par rapport à la période historique, en utilisant l'ensemble multi-modèles MME-33 simultanément.

Les KDD de R99p indiquent que les périodes futures seront décalées vers la droite et deviennent plus plates sous tous les scénarios par rapport à la période de référence. En comparaison avec la période historique, nous constatons une augmentation de la probabilité de voir des précipitations extrêmement importantes (R99p) dépassant les 50 mm dans les cinq zones. Ces valeurs pourraient atteindre jusqu'à 200 mm par an, bien que leur probabilité reste relativement faible. Les indices R99p les plus probables pour la période historique sont presque similaires à ceux des trois périodes futures sous les deux scénarios, oscillent autour de 30 mm dans les zones 1, 2, 3 et 5, et de 25 mm dans la zone 4. En outre, il est à noter que ces précipitations extrêmement importantes seront plus probables dans les périodes futures par rapport à la période historique, bien que leur occurrence reste rare.

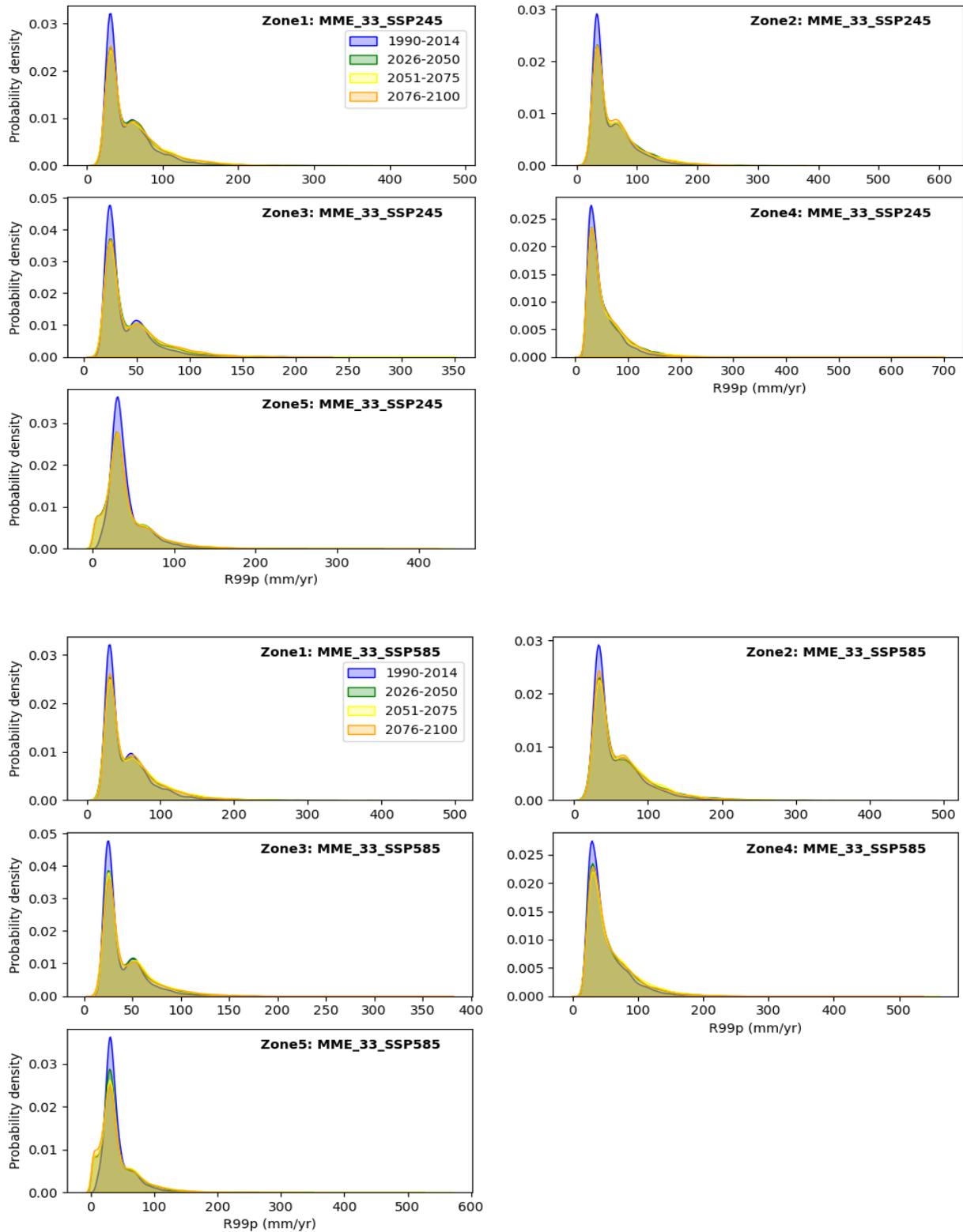


Figure V.5 : Comparaison des distributions de densité du noyau des valeurs de l'indice R99p pour les périodes futures selon les scénarios SSP245 et SSP585 par rapport à la période historique.

1.2.5. Précipitations totales annuelles à partir de jours > 95e percentile (R95p)

La figure V.6 illustre la comparaison, dans chaque zone, les KDD des trois périodes futures de l'indice R95p selon les scénarios SSP245 et SSP585 par rapport à la période historique, en utilisant l'ensemble multi-modèles MME-33 simultanément.

Les KDD de R95p indiquent que les périodes futures seront décalées un peu vers la gauche sous tous les scénarios par rapport à la période historique. En comparaison avec la période historique, nous observons sous le scénario SSP585 une diminution, et sous le scénario SSP245 une augmentation, de la probabilité de voir des précipitations extrêmement importantes (R95p) dépassant les 200 mm dans les zones 1, 2, 3 et 4, et dépassant 90 mm dans la zone 5. Ces valeurs pourraient atteindre les 400 mm par an, bien que leur probabilité reste relativement faible. Les indices R95p les plus probables pour la période historique sont inférieurs à ceux des trois périodes futures sous les deux scénarios, variant autour de 90 mm dans les zones 1, 2, 3 et 4, et de 20 mm dans la zone 5. En outre, il est à noter que ces précipitations extrêmement importantes seront plus probables durant les périodes futures par rapport à la période historique.

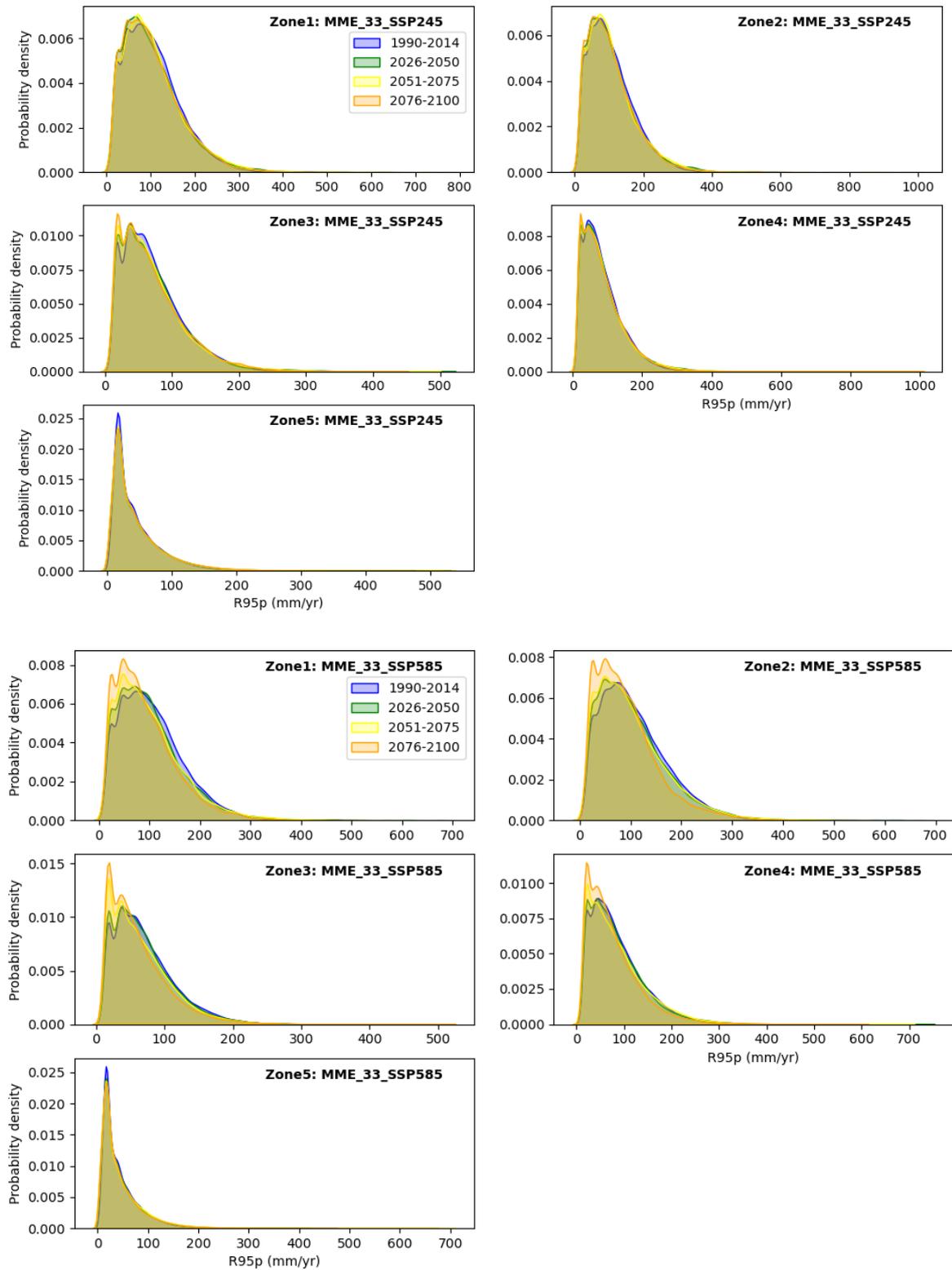


Figure V.6 : Comparaison des distributions de densité du noyau des valeurs de l'indice R95p pour les périodes futures selon les scénarios SSP245 et SSP585 par rapport à la période historique.

1.2.6. Nombre de jours de fortes précipitations (R20mm)

La figure V.7 illustre la comparaison, dans chaque zone, des KDD des trois périodes futures de l'indice R20mm selon les scénarios SSP245 et SSP585 par rapport à la période historique, en utilisant l'ensemble multi-modèles MME-33 simultanément.

IL est à noter que l'ensemble des zones présentent des pics doubles et triples dans la distribution de la probabilité de R20mm alors que ces distributions seront plus plates dans la période future par rapport à la période historique. Comparativement à la période historique, il y a une augmentation de la probabilité de voir le nombre annuel de jours où les précipitations quotidiennes sont ≥ 20 mm dépassant 8 jours dans les zones 1, 2 et 4, et dépassant 2 jours dans les zones 3 et 5. Ces chiffres pourraient aller jusqu'à 25 jours dans les zones 1, 2 et 4, et jusqu'à 16 jours dans les zones 3 et 5, bien que leur probabilité reste relativement faible pour les deux scénarios. De plus, il est à noter que la probabilité de voir le nombre de jours annuel où les précipitations quotidiennes sont ≥ 20 mm, variant entre 1 et 5 jours, pourrait augmenter pour les trois périodes futures sous les deux scénarios par rapport à la période historique dans les zones 1, 2 et 4.

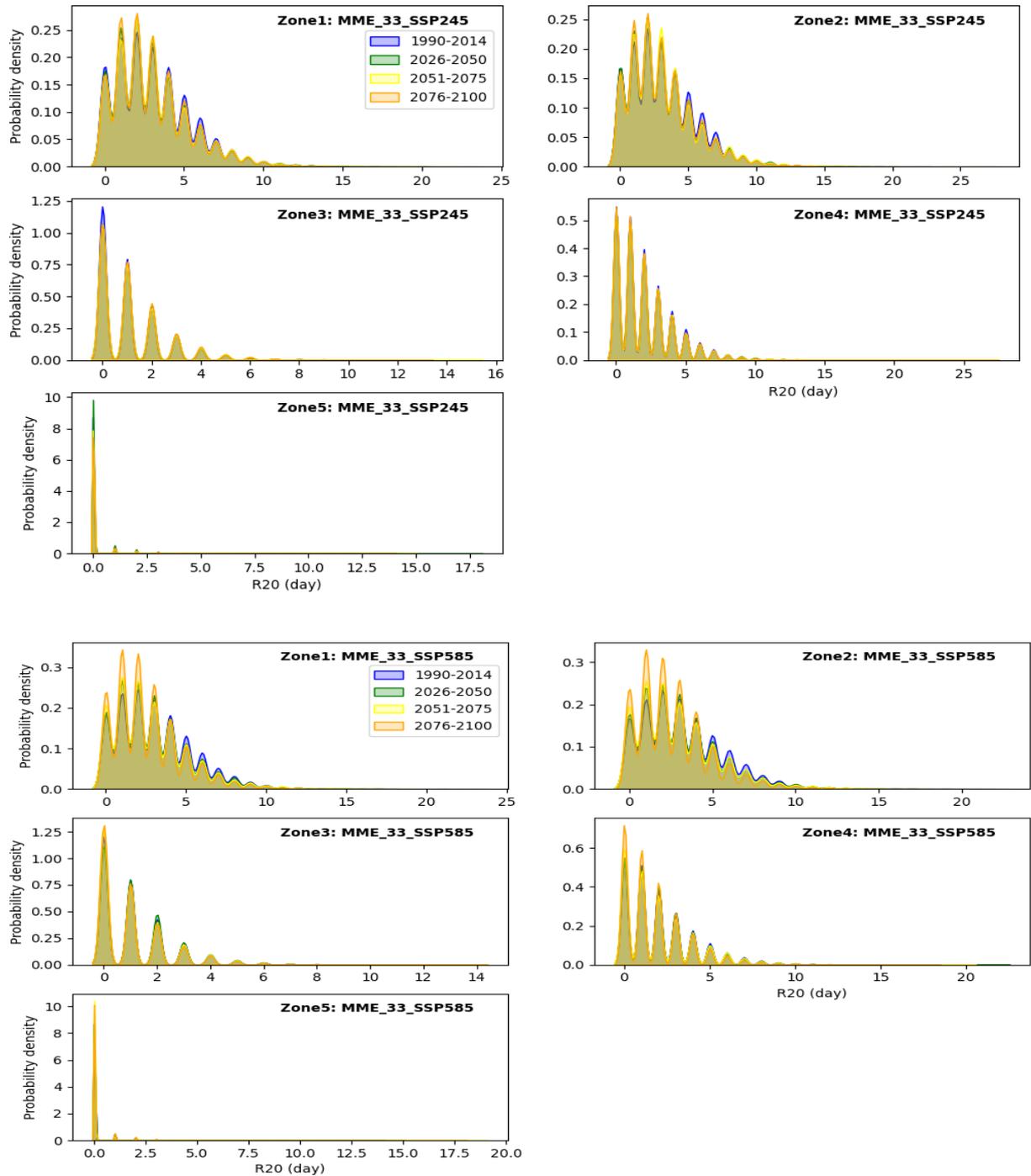


Figure V.7 : Comparaison des distributions de densité du noyau des valeurs de l'indice R20mm pour les périodes futures selon les scénarios SSP245 et SSP585 par rapport à la période historique.

1.2.7. Nombre de jours de fortes précipitations (R10mm)

La figure V.8 illustre la comparaison, dans chaque zone, des KDD des trois périodes futures de l'indice R10mm selon les scénarios SSP245 et SSP585 par rapport à la période historique, en utilisant l'ensemble multi-modèles MME-33 simultanément.

Les KDD de R10mm indiquent que les trois périodes futures sont décalées vers la gauche sous tous les scénarios par rapport à la période historique. De plus, il est à noter que les zones 3, 4 et 5 présentent des pics multiples dans la distribution de R10mm. Les distributions des trois périodes futures ont des allures presque similaires à celle de la période historique. Comparativement à la période historique, il y aura une diminution de la probabilité de voir que le nombre de jours annuel où les précipitations journalières sont ≥ 10 mm dépassant les 20 jours dans la zone 1, 17 jours dans la zone 2 et 10 jours dans les zones 3 et 4. De plus, il convient de noter que la probabilité maximale de voir le nombre annuel de jours où les précipitations journalières sont ≥ 10 mm pendant la période historique est de 15 jours dans les zones 1 et 2, et de 7 jours dans les zones 3 et 4. Ces seuils pourraient augmenter dans les trois périodes futures sous les deux scénarios par rapport à la période historique dans les quatre zones.

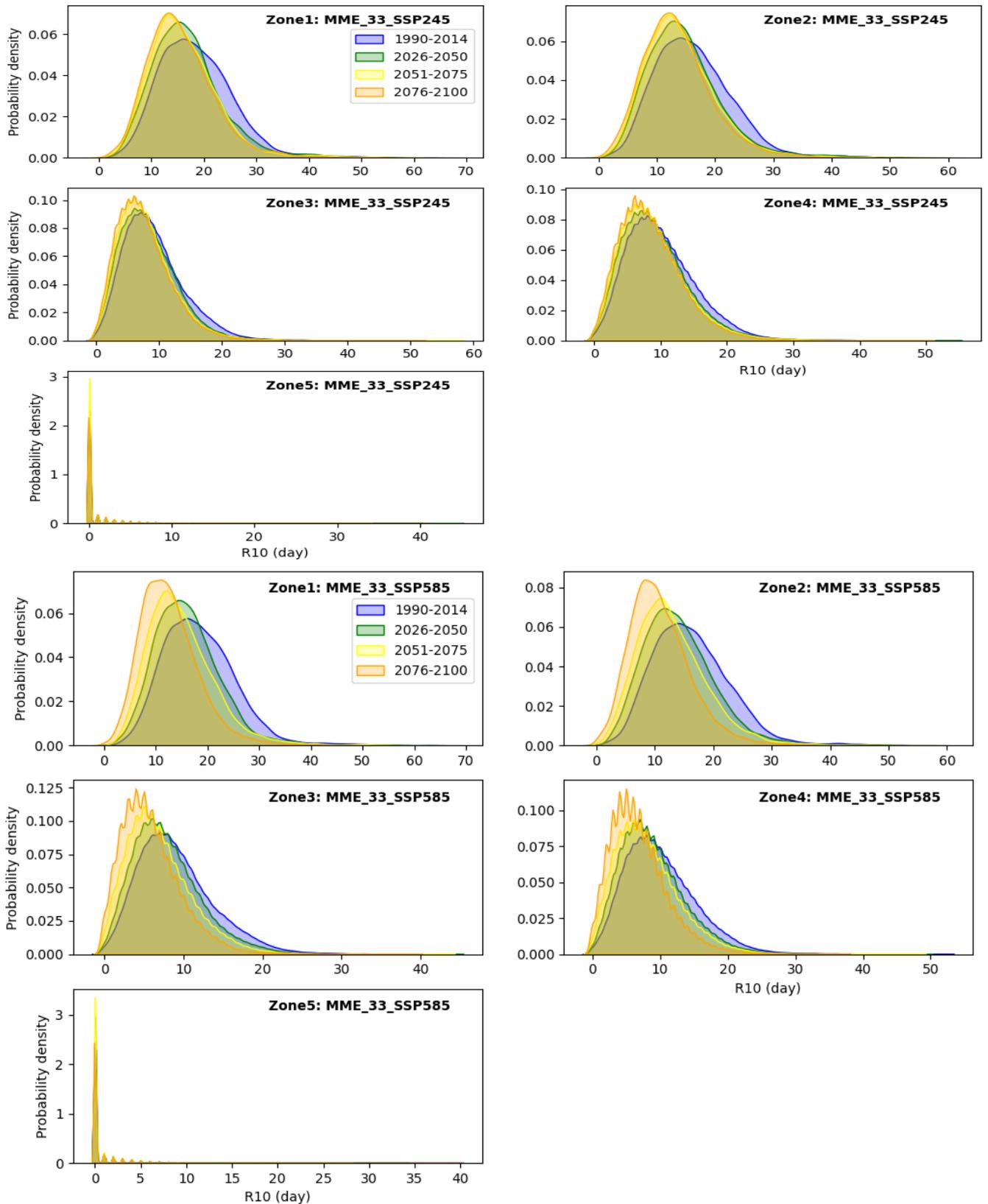


Figure V.8 : Comparaison des distributions de densité du noyau des valeurs de l'indice R10mm pour les périodes futures selon les scénarios SSP245 et SSP585 par rapport à la période historique.

2. Conclusion

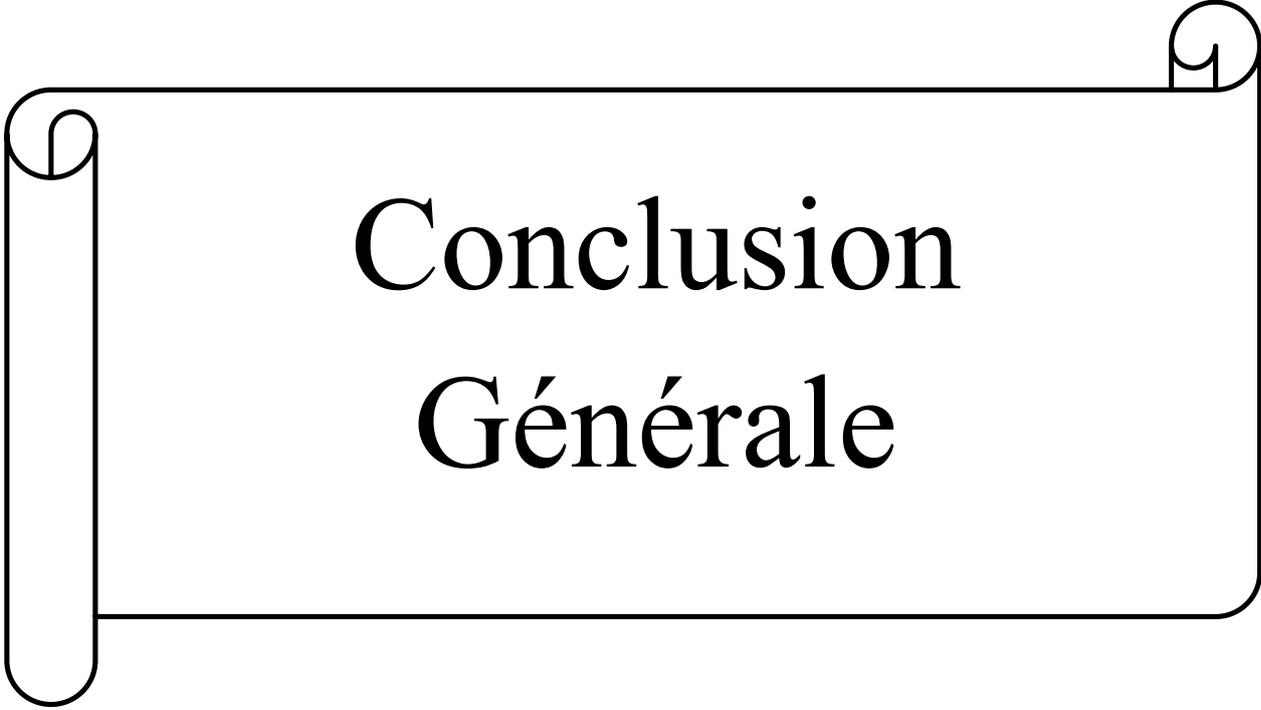
En conclusion, ce chapitre a été dédié à la compréhension des projections de précipitations extrêmes en Algérie en adoptant une approche basée sur le consensus des modèles renforcée par une analyse probabiliste. Dans le chapitre précédent, une diversité de tendances selon les indices, les modèles et les régions, mettant en lumière la complexité des projections climatiques a été observée. Ces résultats soulignent l'importance de considérer plusieurs facteurs dans l'évaluation des changements futurs des précipitations extrêmes. Deux conclusions principales se dégagent de ce chapitre :

1- Pour les trois périodes futures sous les deux scénarios, la diminution des précipitations annuelles dans les zones 1, 2, 3 et 4, ainsi que l'augmentation relative des précipitations annuelles dans la zone 5, et l'augmentation des indices Rx1day et R99p dans toutes les zones ont été prédites par plus de 70 % des modèles. Cependant, pour l'indice R20mm, dans les zones 1, 2, 3 et 4, le nombre de modèles indiquant des augmentations, atteignant 45,5 % à 57,6 % durant la première période, mais ces pourcentages diminuent progressivement dans les deuxième et troisième périodes, chutant à 9,09 % et à 12,12 % de modèles. La zone 5 se distingue par des pourcentages plus élevés, dépassant les 66 % pour les deux premières périodes avec le scénario SSP245. Ces taux d'augmentation restent élevés, mais n'excèdent guère les 66 % pour la troisième période sous SSP245 et pour les trois périodes sous SSP585.

2- La comparaison des densités de probabilité pour les trois périodes futures des sept indices, selon les scénarios SSP245 et SSP585 par rapport à la période historique, révèle les faits suivants : a) Les précipitations annuelles inférieures aux valeurs les plus probables observées dans chaque zone au cours de la période historique deviendront plus probables à l'avenir, tandis que les précipitations dépassant ces valeurs seront moins probables. Par exemple, dans la région 1, où les précipitations les plus probables étaient de 580 mm, elles devraient diminuer pour atteindre 520 mm pour la période 2026-2050 et 480 mm pour la période 2051-2075 sous SSP245, et 290 mm pour la période 2076-2100 sous SSP585. De même, dans la région 2, où les précipitations les plus probables étaient de 480 mm, elles devraient diminuer à 420 mm pour la période 2076-2100 sous SSP245, et à 290 mm pour la même période sous SSP585. Dans les zones 3 et 4, où les précipitations les plus probables étaient respectivement de 380 mm et 350 mm, elles devraient également diminuer pour atteindre 300 mm pour les périodes 2026-2050 et 2051-2075 sous SSP245, et 250 mm pour la période 2076-2100 sous le

même scénario. Sous SSP585, les précipitations les plus probables seraient de 280 mm pour 2026-2050 et de 200 mm pour les périodes 2051-2075 et 2076-2100. Ainsi, dans toutes les régions et pour toutes les périodes futures sous les deux scénarios, les précipitations annuelles inférieures aux valeurs historiques sont plus probables, tandis que les précipitations dépassant ces valeurs sont moins probables ; b) L'indice RX1day pour les trois périodes futures montre une augmentation par rapport à la période historique dans la probabilité d'occurrence de précipitations journalières maximales dépassant 35 mm dans les quatre zones du Nord. Ces valeurs pourraient atteindre jusqu'à 100 mm par jour, avec une probabilité relativement faible. En ce qui concerne la zone 5, des précipitations journalières maximales allant de 20 mm à 100 mm pourraient être observées dans le futur, mais avec une occurrence faible ; c) Comparativement à la période historique, il y a une augmentation dans la probabilité de précipitations extrêmement abondantes (R99p) dépassant 50 mm dans les cinq zones examinées. De plus, ces événements de précipitations extrêmement abondantes devraient être plus probables dans les périodes futures par rapport à la période historique, bien que leur occurrence reste faible. Par rapport à la période historique, les modèles anticipent une augmentation dans la probabilité de dépasser les seuils de précipitations quotidiennes ≥ 20 mm dans les zones 1, 2 et 4 (8 jours), ainsi que dans les zones 3 et 5 (2 jours) pour les périodes futures. De plus, il est à noter que la probabilité d'observer entre 1 et 5 jours avec des précipitations quotidiennes ≥ 20 mm pourrait augmenter dans les trois périodes futures dans les zones 1, 2 et 4 par rapport à la période historique.

Ainsi, en combinant les perspectives du consensus des modèles et de l'analyse probabiliste, une vision plus complète des projections de précipitations extrêmes en Algérie est établie. Ces informations sont essentielles pour orienter les politiques d'adaptation et de gestion des risques climatiques à l'échelle locale, régionale et nationale. En anticipant les tendances futures et en identifiant les zones les plus vulnérables, le pays sera mieux armé pour faire face aux défis climatiques à venir et de prendre des décisions éclairées pour assurer la résilience des communautés et des écosystèmes et de protéger les vies humaines ainsi que les biens matériels publics et privés.



Conclusion Générale

Conclusion Générale

Le changement climatique représente l'un des plus grands défis auxquels l'humanité est confrontée. L'étendue géographique de ce problème le rend d'une importance capitale et cruciale, nécessitant un effort planétaire de la part de tous, non seulement dans le contexte de la recherche, mais aussi pour une multitude d'autres objectifs d'un intérêt socio-économique et de développement durable. Du point de vue de l'ingénierie, par exemple, savoir comment peut-on considérer l'évolution temporelle et spatiale des événements des précipitations extrêmes permettrait d'améliorer les critères de conception qui peuvent augmenter la résilience des infrastructures hydrauliques pour les années à venir dans ce contexte de changement. Un approfondissement des connaissances de ce phénomène pourrait aider à progresser rapidement vers la phase d'adaptation au changement climatique. De plus, les décideurs politiques et techniques pourraient et devraient également bénéficier de ces connaissances, afin de définir des objectifs clairs sur les politiques liées au climat à poursuivre aux niveaux national et international, et élaborer des stratégies et des politiques efficaces pour atténuer l'impact potentiel des événements de précipitations extrêmes sur le cycle hydrologique et les écosystèmes ainsi que les vies humaines et les biens publics et privés.

Au niveau académique, il existe une grande littérature scientifique à l'échelle mondiale sur les effets du changement climatique sur les événements pluviométriques extrêmes. La plupart de ces documents ont récemment étayé les conclusions du « Sixième rapport d'évaluation » (RE6), publié en 2021 par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), tout en affirmant que la fréquence et l'intensité des événements de précipitations extrêmes sont susceptibles d'avoir augmenté dans la plupart des régions du globe disposant d'un bon réseau d'observations. Néanmoins, peu d'études ont été menées en Algérie, ce qui a motivé la réalisation de ce travail qui s'inscrit dans le cadre d'une thèse de doctorat.

L'objectif était l'étude des effets du changement climatique sur les précipitations extrêmes. Ces événements peuvent avoir un impact significatif sur l'environnement, l'agriculture, l'économie et la sécurité, rendant indispensable la connaissance des changements des indices caractérisant les précipitations extrêmes ainsi que la surveillance étroite de leurs tendances à court et à long terme pour une meilleure compréhension des impacts climatiques et le développement de stratégies efficaces d'atténuation, d'adaptation et de résilience.

Le premier objectif a visé à analyser l'évolution de différents indices obtenus à partir des enregistrements de précipitations journalières dans les différentes zones climatiques de

l'Algérie, en utilisant le test de Mann-Kendall original et six tests modifiés pour éliminer les effets de la persistance à court et à long terme. L'étude couvre plus de 50 années de mesure (1969 à 2021) en utilisant 16 stations météorologiques bien représentatives des quatre zones climatiques de l'Algérie. Le deuxième objectif de cette thèse a porté sur l'étude des changements des paramètres statistiques des indices de précipitations extrêmes en réponse au changement climatique à l'aide de 33 simulations de modèles provenant des projections climatiques journalières globale de la NASA Earth Exchange (NEX-GDDP-CMIP6), qui sont corrigées de biais et statistiquement réduites de l'échelle. Les changements de sept indices de précipitations extrêmes sur trois périodes futures (à savoir le futur proche (2026-2050), le futur moyen (2051-2075) et le futur lointain (2076-2100)) sous les scénarios SSP2-4.5 et SSP5-8.5, comparativement à la période historique (1990-2014) ont été évalués. Les principales conclusions de cette recherche sont résumées ci-dessous :

Principales conclusions

1. Augmentation de la variabilité temporelle de la plupart des indices de précipitations extrêmes dans la zone climatique méditerranéenne chaude (Csa) de l'Algérie de 1969 à 2021, à l'exception de l'indice CDD.
2. Tendances à la baisse de la plupart des indices dans les zones semi-arides froides/chaudes (BSK/BSH), sauf pour l'indice CWD.
3. Résultats hétérogènes dans la zone climatique désertique froide (Bwk), avec des tendances négatives dans certaines stations et des tendances positives dans d'autres.
4. Similarité avec les résultats antérieurs et l'élargissement des connaissances sur les tendances des précipitations extrêmes en Algérie, notamment dans les zones côtières.
5. Identification de ruptures brusques dans la moyenne des indices de précipitations extrêmes dans la plupart des stations, bien que la synchronisation entre les indices ne soit pas de mise.
6. Impact significatif des changements dans les moyennes des séries d'indices sur les tendances à long terme, confirmé par les tests de Lombard et de Pettitt.
7. Influence significative des effets de la persistance à court terme et de la persistance à long terme sur la caractérisation des tendances des indices de précipitations extrêmes, avec une réduction des tendances significatives après leur prise en compte.

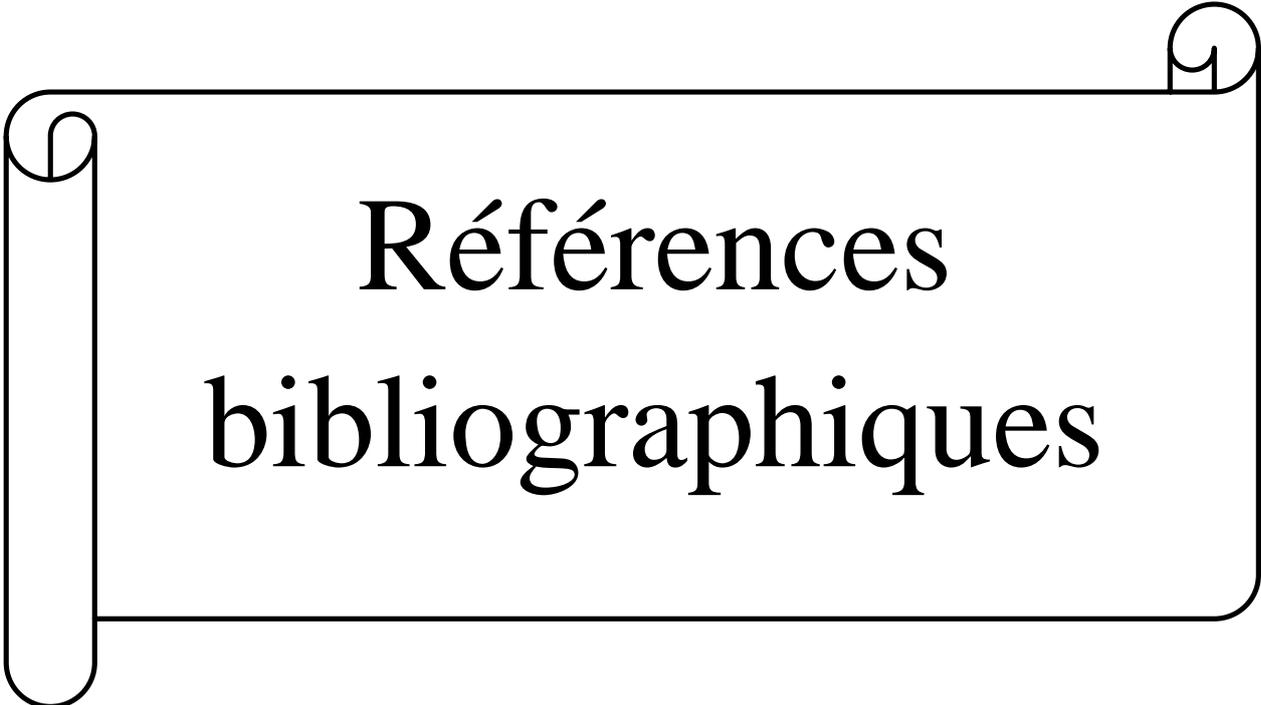
8. Diminution des précipitations annuelles dans les zones 1, 2, 3 et 4, avec des pourcentages moyens allant jusqu'à 16,1 %, et augmentation relative dans la zone 5 jusqu'à 8,1 %.
9. Augmentation des indices de précipitations maximales d'un jour (Rx1jour) et de précipitations de jour extrêmement humides (R99p) dans toutes les zones, avec des pourcentages sous SSP245 allant de 2,5 % à 19,3 %, et sous SSP585 allant jusqu'à 25,9 %.
10. Tendence à la diminution du nombre de jours de fortes précipitations (R20mm) dans les zones 1 et 2 sous SSP585, avec une tendance à la hausse dans la zone 3.
11. Prédiction par plus de 70 % des modèles d'une diminution des précipitations annuelles dans les zones 1, 2, 3 et 4, et d'une augmentation dans la zone 5, ainsi que d'une augmentation des indices Rx1jour et R99p dans toutes les zones pour les trois périodes futures.
12. Prédominance des modèles indiquant des augmentations pour l'indice R20mm dans les zones 1, 2, 3 et 4 au début de la période d'étude, mais diminution progressive de ces pourcentages dans les périodes suivantes.
13. Augmentation de la probabilité d'occurrence de précipitations extrêmement fortes (R99p) dépassant les 50 mm dans les cinq zones par rapport à la période historique, avec une probabilité plus élevée à l'avenir, bien que leur occurrence reste rare.
14. Augmentation de la probabilité de dépassement des seuils quotidiens de précipitations ≥ 20 mm dans les zones 1, 2 et 4 pour les périodes futures, avec une augmentation potentielle de l'occurrence d'événements entre 1 et 5 jours avec des précipitations quotidiennes ≥ 20 mm dans les zones 1, 2 et 4.

Enfin cette étude contribue précieusement à la compréhension des impacts locaux du changement climatique. Bien que les événements de précipitations extrêmes puissent augmenter dans certaines parties de l'Algérie, mais la tendance à long terme peut ne pas être statistiquement significative, soulignant la nécessité de réévaluer les résultats des études précédentes pour une perspective plus actuelle. De même, les résultats prévoient des précipitations plus fréquentes et plus intenses ainsi qu'une diminution dans les moyennes annuelles des précipitations dans le Nord de l'Algérie avec des pourcentages variant selon les modèles et les scénarios futurs.

Recommandations pour de futures recherches

Comprendre les tendances futures de l'intensité des précipitations est essentiel pour prévoir les inondations catastrophiques. Une stratégie possible consiste à étudier le lien entre le seuil de fortes précipitations, la source d'humidité et la température de l'air. Utiliser des modèles climatiques pour simuler les conditions atmosphériques et étudier comment les changements dans les concentrations de gaz à effet de serre et d'autres facteurs influent sur les précipitations extrêmes à l'échelle régionale. L'utilisation de modèles climatiques avec une haute résolution spatiale inférieure à 10 km offre également des perspectives prometteuses. L'utilisation de cette dernière permettrait de simuler avec précision les conditions atmosphériques et étudier comment les changements dans les concentrations de gaz à effet de serre et d'autres facteurs influent sur les précipitations extrêmes à l'échelle régionale. De même, il serait judicieux d'intégrer les données satellitaires qui fournissent des informations précieuses sur les schémas de précipitations à grande échelle. Elles permettent une surveillance en temps réel et une analyse à long terme des événements extrêmes. Il est également recommandé d'examiner l'impact de différentes techniques de correction des biais sur les tendances des indices de fortes précipitations liés au changement climatique. Enfin, il est fortement conseillé d'évaluer les éventuels changements futurs dans la Pluie Maximal Probable (PMP), étant donné que les extrêmes de précipitations pourraient augmenter à l'avenir. Pour garantir une gestion efficace des risques associés aux précipitations extrêmes, il est nécessaire d'intégrer les projections de changement des PMP dans les normes de conception des infrastructures. Cela pourrait impliquer une réévaluation des normes existantes pour s'assurer qu'elles restent adaptées aux conditions futures. Ces normes et directives sont toutefois entièrement construites sur des observations du passé historique, et donc si la fréquence et l'ampleur des événements de précipitations extrêmes changent, ces normes pourraient conduire à une mauvaise préparation face aux risques futurs.

En outre, il est important d'adopter une approche holistique de la gestion des risques, en tenant compte des aspects socio-économiques et environnementaux. Cela pourrait impliquer une collaboration étroite entre les décideurs, les institutions, les communautés locales et les experts en gestion des risques pour développer des stratégies efficaces de prévention, de préparation et de réponse aux événements de précipitations extrêmes.



Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Achite, M., Caloiero, T., Wałęga, A., Krakauer, N., & Hartani, T. (2021). Analysis of the spatiotemporal annual rainfall variability in the Wadi Cheliff Basin (Algeria) over the period 1970 to 2018. *Water*, 13(11), 1477. <https://doi.org/10.3390/w13111477>
- Achour, K., Meddi, M., Zeroual, A., Bouabdelli, S., Maccioni, P., & Moramarco, T. (2020). Spatio-temporal analysis and forecasting of drought in the plains of northwestern Algeria using the standardized precipitation index. *Journal of Earth System Science*, 129, 1-22. ACKERMAN, Frank. *Worst-case economics: Extreme events in climate and finance*. Anthem Press, 2017. <https://doi.org/10.1007/s12040-019-1306-3>
- Adamowski, K., & Bougadis, J. (2003). Detection of trends in annual extreme rainfall. *Hydrological Processes*, 17(18), 3547-3560. <https://doi.org/10.1002/hyp.1353>
- Adamowski, K., Prokoph, A., & Adamowski, J. (2009). Development of a new method of wavelet aided trend detection and estimation. *Hydrological Processes: An International Journal*, 23(18), 2686-2696. <https://doi.org/10.1002/hyp.7260>
- Ahmed, K., Shahid, S., Chung, E. S., Ismail, T., & Wang, X. J. (2017). Spatial distribution of secular trends in annual and seasonal precipitation over Pakistan. *Climate Research*, 74(2), 95-107. <https://doi.org/10.3354/cr01489>
- Ajjur, S. B., & Al-Ghamdi, S. G. (2021). Evapotranspiration and water availability response to climate change in the Middle East and North Africa. *Climatic Change*, 166(3-4), 28. <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03122-z>[Return to ref 2021 in article](#)
- Alavinia, S. H., & Zarei, M. (2021). Analysis of spatial changes of extreme precipitation and temperature in Iran over a 50-year period. *International Journal of Climatology*, 41, E2269-E2289. <https://doi.org/10.1002/joc.6845>
- Alexander, L. V., Zhang, X., Peterson, T. C., Caesar, J., Gleason, B., Klein Tank, A. M. G., ... & Vazquez-Aguirre, J. L. (2006). Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D5). <https://doi.org/10.1029/2005JD006290>
- Alexander, L. V., Fowler, H. J., Bador, M., Behrangi, A., Donat, M. G., Dunn, R., ... & Venugopal, V. (2019). On the use of indices to study extreme precipitation on sub-daily and daily timescales. *Environmental Research Letters*, 14(12), 125008. doi: [10.1088/1748-9326/ab51b6](https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab51b6).
- Algerian National Agency for Dams and Transfers (ANBT) (2023). ANBT Internal Document of Algerian National Agency for Dams and Transfers. <http://www.soudoud-dzair.com/>
- Ali, H., & Mishra, V. (2018). Contributions of dynamic and thermodynamic scaling in subdaily precipitation extremes in India. *Geophysical Research Letters*, 45(5), 2352-2361. <https://doi.org/10.1002/2018GL077065>
- Alimonti, G., Mariani, L., Prodi, F., & Ricci, R. A. (2022). RETRACTED ARTICLE: A critical assessment of extreme events trends in times of global warming. *The European Physical Journal Plus*, 137(1), 1-20. <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-021-02243-9>
- Allan, R. P., Barlow, M., Byrne, M. P., Cherchi, A., Douville, H., Fowler, H. J., ... & Zolina, O. (2020). Advances in understanding large-scale responses of the water cycle to climate change. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1472(1), 49-75. <https://doi.org/10.1111/nyas.14337>
- Allen, M. R., and W. J. Ingram, (2002). Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle. *Nature*, 419(6903), 224-232., <https://doi.org/10.1038/nature01092>.
- Alpert, P., Baldi, M., Ilani, R., Krichak, S., Price, C., Rodó, X., ... & Xoplaki, E. (2006). Relations between climate variability in the Mediterranean region and the tropics: ENSO, South Asian and African monsoons, hurricanes and Saharan dust. In *Developments in earth and environmental sciences* (Vol. 4, pp. 149-177). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S1571-9197\(06\)80005-4](https://doi.org/10.1016/S1571-9197(06)80005-4).
- Anctil, F., & Coulibaly, P. (2004). Wavelet analysis of the interannual variability in southern Québec streamflow. *Journal of climate*, 17(1), 163-173. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<0163:WAOTIV>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<0163:WAOTIV>2.0.CO;2)

- Añel, J. A., López Moreno, J. I., Otto, F. E. L., Vicente Serrano, S. M., Schaller, N., Massey, N., ... & Allen, M. R. (2014). The extreme snow accumulation in the western Spanish Pyrenees during winter and spring 2013. Doi: [10.1175/1520-0477-95.9.s1.1](https://doi.org/10.1175/1520-0477-95.9.s1.1).
- Angéllil, O., Stone, D., Perkins-Kirkpatrick, S., Alexander, L. V., Wehner, M., Shiogama, H., ... & Christidis, N. (2018). On the nonlinearity of spatial scales in extreme weather attribution statements. *Climate Dynamics*, 50, 2739-2752. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3768-9>
- Asadieh, B., & Krakauer, N. Y. (2015). Global trends in extreme precipitation: climate models versus observations. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(2), 877-891. <https://doi.org/10.5194/hess-19-877-2015>
- Ashley, W. S., Haberlie, A. M., & Gensini, V. A. (2023). The future of supercells in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 104(1), E1-E21. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-22-0027.1>.
- Assani, A. A., Zeroual, A., Roy, A., & Kinnard, C. (2021). Impacts of Agricultural Areas on Spatio-Temporal Variability of Daily Minimum Extreme Flows during the Transitional Seasons (Spring and Fall) in Southern Quebec. *Water*, 13(24), 3487. <https://doi.org/10.3390/w13243487>
- Assani, A., Zeroual, A., Kinnard, C., & Roy, A. (2022). Spatial-temporal variability of seasonal daily minimum flows in southern Quebec: synthesis on the impacts of climate, agriculture and wetlands. *Hydrology Research*, 53(12), 1494-1509. <https://doi.org/10.2166/nh.2022.070>
- Ayalew, D. W. (2019). *Evaluating the potential impact of climate change on the hydrology of Ribb catchment, Blue Nile Basin, Ethiopia* (Master's thesis). <http://repository.pauwes-cop.net/handle/1/345>
- Beauchamp, M., Assani, A. A., Landry, R., & Massicotte, P. (2015). Temporal variability of the magnitude and timing of winter maximum daily flows in southern Quebec (Canada). *Journal of Hydrology*, 529, 410-417. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.07.053>
- Beguiría, S., Tomas-Burguera, M., Serrano-Notivoli, R., Peña-Angulo, D., Vicente-Serrano, S. M., & González-Hidalgo, J. C. (2019). Gap filling of monthly temperature data and its effect on climatic variability and trends. *Journal of Climate*, 32(22), 7797-7821. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0244.1>
- Benabdellouahab, T., Gadouali, F., Boudhar, A., Lebrini, Y., Hadria, R., & Salhi, A. (2020). Analysis and trends of rainfall amounts and extreme events in the Western Mediterranean region. *Theoretical and Applied Climatology*, 141, 309-320. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03205-4>
- Berhane, A., Hadgu, G., Worku, W., & Abrha, B. (2020). Trends in extreme temperature and rainfall indices in the semi-arid areas of Western Tigray, Ethiopia. *Environmental Systems Research*, 9, 1-20. <https://doi.org/10.1186/s40068-020-00165-6>
- Bessaklia, H., Serrano-Notivoli, R., Ghenim, A. N., Chikh, H. A., & Megnounif, A. (2021). Extreme precipitation trends in northeast Algeria using a high-resolution gridded daily dataset. *International Journal of Climatology*, 41(15), 6573-6588. <https://doi.org/10.1002/joc.7213>
- Birsan, M. V., Molnar, P., Burlando, P., & Pfaundler, M. (2005). Streamflow trends in Switzerland. *Journal of hydrology*, 314(1-4), 312-329. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.06.008>
- Blanchet, J., Molinié, G., & Touati, J. (2018). Spatial analysis of trend in extreme daily rainfall in southern France. *Climate Dynamics*, 51, 799-812. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3122-7>
- Board, F. S. (2017). Recommendations of the task force on climate-related financial disclosures. <https://assets.bbhub.io/company/sites/60/2020/10/FINAL-2017-TCFD-Report11052018.pdf>
- Bouabdelli, S., Zeroual, A., Meddi, M., & Assani, A. (2022). Impact of temperature on agricultural drought occurrence under the effects of climate change. *Theoretical and Applied Climatology*, 148(1), 191-209. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-03935-7>
- Bouabdelli, S., Zeroual, A., Meddi, M., Djelloul, F., & Alkama, R. (2020). Past and future drought in Northwestern Algeria: the Beni Bahdel Dam catchment. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 383, 315-318. <https://doi.org/10.5194/piahs-383-315-2020>

- Boucekima, B. (2003). A small solar desalination plant for the production of drinking water in remote arid areas of southern Algeria. *Desalination*, 159(2), 197-204. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(03\)90071-3](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(03)90071-3)
- Brewster, M. Q. (2015). Evaporation and condensation of water mist/cloud droplets with thermal radiation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 88, 695-712. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.03.055>
- Brosca, L. H., Poganietz, W. R., & Vögelea, S. (2020). Extreme events defined—A conceptual discussion applying a complex systems approach. *Futures*, 115, 102490. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2019.102490>
- Burn, D. H., & Elnur, M. A. H. (2002). Detection of hydrologic trends and variability. *Journal of hydrology*, 255(1-4), 107-122. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00514-5](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00514-5)
- Burn, D. H., Sharif, M., & Zhang, K. (2010). Detection of trends in hydrological extremes for Canadian watersheds. *Hydrological processes*, 24(13), 1781-1790. <https://doi.org/10.1002/hyp.7625>
- Bustos Usta, D. F., & Torres Parra, R. R. (2021). Ocean and atmosphere changes in the Caribbean Sea during the twenty-first century using CMIP5 models. *Ocean Dynamics*, 71(6), 757-777. <https://doi.org/10.1007/s10236-021-01462-z>
- Caloiero, T. (2015). Analysis of rainfall trend in New Zealand. *Environmental Earth Sciences*, 73, 6297-6310. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3852-y>
- Caloiero, T., Caloiero, P., & Frustaci, F. (2018). Long-term precipitation trend analysis in Europe and in the Mediterranean basin. *Water and Environment Journal*, 32(3), 433-445. <https://doi.org/10.1111/wej.12346>
- Caloiero, T., Veltri, S., Caloiero, P., & Frustaci, F. (2018). Drought analysis in Europe and in the Mediterranean basin using the standardized precipitation index. *Water*, 10(8), 1043. <https://doi.org/10.3390/w10081043>
- Cardell, M. F., Amengual, A., Romero, R., & Ramis, C. (2020). Future extremes of temperature and precipitation in Europe derived from a combination of dynamical and statistical approaches. *International Journal of Climatology*, 40(11), 4800-4827. <https://doi.org/10.1002/joc.6490>
- Cardona, O. D., Van Aalst, M. K., Birkmann, J., Fordham, M., Mc Gregor, G., Rosa, P., ... & Thomalla, F. (2012). Determinants of risk: exposure and vulnerability. In *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: special report of the intergovernmental panel on climate change* (pp. 65-108). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139177245.005>
- Carvalho, L. M. V. (2019). Assessing precipitation trends in the Americas with historical data: A review. *WIREs Climate Change*, 11(2), e627. <https://doi.org/10.1002/wcc.627>
- Casanueva, A., Rodríguez-Puebla, C., Frías, M. D., & González-Reviriego, N. (2014). Variability of extreme precipitation over Europe and its relationships with teleconnection patterns. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(2), 709-725. <https://doi.org/10.5194/hess-18-709-2014>
- Castro, L. M., Gironás, J., & Fernández, B. (2014). Spatial estimation of daily precipitation in regions with complex relief and scarce data using terrain orientation. *Journal of Hydrology*, 517, 481-492. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.05.064>
- CDP and TCFD.” <https://www.cdp.net/en/guidance/how-cdp-is-aligned-to-the-tcfid> (accessed Jan. 26, 2023).
- Chan, S. C., Kendon, E. J., Berthou, S., Fosser, G., Lewis, E., & Fowler, H. J. (2020). Europe-wide precipitation projections at convection permitting scale with the Unified Model. *Climate Dynamics*, 55, 409-428. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05192-8>
- Chan, S. C., Kendon, E. J., Fowler, H. J., Blenkinsop, S., Roberts, N. M., & Ferro, C. A. (2014). The value of high-resolution Met Office regional climate models in the simulation of multihourly precipitation extremes. *Journal of Climate*, 27(16), 6155-6174. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00723.1>

- Chaouche, K., Neppel, L., Dieulin, C., Pujol, N., Ladouche, B., Martin, E., Salas, D., Caballero, Y. (2010). Analyses of precipitation, temperature and evapotranspiration in a French Mediterranean region in the context of climate change. *Comptes Rendus. Géoscience*, 342(3), 234-243. DOI : [10.1016/j.crte.2010.02.001](https://doi.org/10.1016/j.crte.2010.02.001)
- Chen, J., Brissette, F. P., Chaumont, D., & Braun, M. (2013). Finding appropriate bias correction methods in downscaling precipitation for hydrologic impact studies over North America. *Water Resources Research*, 49(7), 4187–4205. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20331>
- Chen, Y., Li, W., Jiang, X., Zhai, P., & Luo, Y. (2021). Detectable intensification of hourly and daily scale precipitation extremes across eastern China. *Journal of Climate*, 34(3), 1185-1201. Doi: [10.1175/jcli-d-20-0462.1](https://doi.org/10.1175/jcli-d-20-0462.1).
- Chingombe, W., Gutierrez, J. E., Pedzisai, E., & Siziba, E. (2005). A study of hydrological trends and variability of Upper Mazowe Catchment-Zimbabwe. *Journal of Sustainable Development in Africa*, 7(1), 1-17.
- Chingombe, W., Gutierrez, J.E., Pedzisai, E., Siziba, E., 2005. A study of hydrological trends and variability of Upper Mazowe Catchment-Zimbabwe. *Journal of Sustainable Development in Africa*, 7(1): ISSN:1520-550 Fayetteville State University, Fayetteville, North Carolina.
- Chou, C., Chiang, J. C. H., Lan, C.-W., Chung, C.-H., Liao, Y.-C., & Lee, C.-J. (2013). Increase in the range between wet and dry season precipitation. *Nature Geoscience*, 6, 263–267. <https://doi.org/10.1038/ngeo1744>
- Cioffi, F., Lall, U., Rus, E., & Krishnamurthy, C. K. B. (2015). Space-time structure of extreme precipitation in Europe over the last century. *International Journal of Climatology*, 35(8), 1749-1760. Doi: [10.1002/joc.4116](https://doi.org/10.1002/joc.4116).
- Clarke, B., Otto, F., Stuart-Smith, R., & Harrington, L. (2022). Extreme weather impacts of climate change: an attribution perspective. *Environmental Research: Climate*, 1(1), 012001. DOI: [10.1088/2752-5295/ac6e7d](https://doi.org/10.1088/2752-5295/ac6e7d)
- Climate Change - CDP.”
<https://guidance.cdp.net/en/guidance?cid=46&ctype=theme&idtype=ThemeID&incchild=1µsite=0&otype=Questionnaire&tags=TAG-646%2CTAG-605%2CTAG-599> (accessed Feb. 02, 2023)
- Cluis, D., Langlois, C., Van Coillie, R., & Laberge, C. (1989). Development of a software package for trend detection in temporal series: application to water and industrial effluent quality data for the St. Lawrence River. *Environmental monitoring and assessment*, 13, 429-441. <https://doi.org/10.1007/BF00394243>
- CMIP6 and Shared Socio-economic Pathways overview.” Government of Canada, Jan. 17, 2023. [Online]. Available: <https://climate-scenarios.canada.ca/?page=cmip6-overviewnotes#cmip5-versus-cm>
- Coll, M., Piroddi, C., Steenbeek, J., Kaschner, K., Ben Rais Lasram, F., Aguzzi, J., ... & Voultsiadou, E. (2010). The biodiversity of the Mediterranean Sea: estimates, patterns, and threats. *PLoS one*, 5(8), e11842. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0011842>
- Colorado-Ruiz, G., & Cavazos, T. (2021). Trends of daily extreme and non-extreme rainfall indices and intercomparison with different gridded data sets over Mexico and the southern United States. *International Journal of Climatology*, 41(11), 5406-5430. <https://doi.org/10.1002/joc.7225>
- Conte, M., Giuffrida, A., and Tedesco, S. (1989) The mediterranean oscillation: impact on precipitation and hydrology in Italy, pp. 121–137.
- Cook, B. I., Mankin, J. S., Marvel, K., Williams, A. P., Smerdon, J. E., & Anchukaitis, K. J. (2020). Twenty-first century drought projections in the CMIP6 forcing scenarios. *Earth's Future*, 8(6), e2019EF001461. <https://doi.org/10.1029/2019EF001461>
- Cook, B.I. et al., 2020: Twenty-First Century Drought Projections in the CMIP6 Forcing Scenarios. *Earth's Future*, 8(6), e2019EF001461. <https://doi.org/10.1029/2019EF001461>
- Copernicus Climate Change Service, “CMIP6 climate projections.” ECMWF, 2021. Doi: [10.24381/CDS.C866074C](https://cds.climate.copernicus.eu/10.24381/CDS.C866074C). <https://cds.climate.copernicus.eu/>
- Coppola, E. et al., (2021). Assessment of the European Climate Projections as Simulated by the Large EURO-CORDEX Regional and Global Climate Model Ensemble. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(4), e2019JD032356. Doi: [10.1029/2019jd032356](https://doi.org/10.1029/2019jd032356).

- Cos, J., Doblas-Reyes, F., Jury, M., Marcos, R., Bretonnière, P. A., & Samsó, M. (2022). The Mediterranean climate change hotspot in the CMIP5 and CMIP6 projections. *Earth System Dynamics*, 13(1), 321-340.
- Cramer, W., Guiot, J., Marini, K., Azzopardi, B., Balzan, M. V., Cherif, S., ... & Xoplaki, E. (2020). MedECC 2020 summary for policymakers. *Climate and Environmental Change in the Mediterranean Basin—Current Situation and Risks for the Future. First Mediterranean Assessment Report*, 11-40. www.medecc.org/first-mediterranean-assessment-report-mar1/.
- De Lima, M. I. P., Santo, F. E., Ramos, A. M., & Trigo, R. M. (2015). Trends and correlations in annual extreme precipitation indices for mainland Portugal, 1941–2007. *Theoretical and Applied Climatology*, 119, 55-75. <https://doi.org/10.1007/s00704-013-1079-6>
- DeGaetano, A. T. (2009). Time-dependent changes in extreme-precipitation return-period amounts in the continental United States. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48(10), 2086-2099. <https://doi.org/10.1175/2009JAMC2179.1>
- Deitch, M. J., Sapundjieff, M. J., & Feirer, S. T. (2017). Characterizing precipitation variability and trends in the world's Mediterranean-climate areas. *Water*, 9(4), 259. <https://doi.org/10.3390/w9040259>
- Deodhar, M. J. (2008). *Elementary engineering hydrology*. Pearson Education India.
- Dereczynski, C., Chou, S. C., Lyra, A., Sondermann, M., Regoto, P., Tavares, P., ... & de los Milagros Skansi, M. (2020). Downscaling of climate extremes over South America—Part I: Model evaluation in the reference climate. *Weather and Climate Extremes*, 29, 100273. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2020.100273>
- Déry, S. J., & Wood, E. F. (2005). Decreasing river discharge in northern Canada. *Geophysical research letters*, 32(10). <https://doi.org/10.1029/2005GL022845>
- Dey, R., Lewis, S. C., Arblaster, J. M., & Abram, N. J. (2019). A review of past and projected changes in Australia's rainfall. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 10(3), e577. <https://doi.org/10.1002/wcc.577>
- Di Stefano, C., Ferro, V., Porto, P., 2000. Applying the bootstrap technique for studying soil redistribution by caesium-137 measurements at basin scale. *Hydrological Sciences Journal*, 45(2): 171-183. <https://doi.org/10.1080/02626660009492318>
- Diffenbaugh, N. S., Scherer, M., & Trapp, R. J. (2013). Robust increases in severe thunderstorm environments in response to greenhouse forcing. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(41), 16361-16366. <https://doi.org/10.1073/pnas.1307758110>.
- Dimri, A. P., Niyogi, D., Barros, A. P., Ridley, J., Mohanty, U. C., Yasunari, T., & Sikka, D. R. (2015). Western disturbances: a review. *Reviews of Geophysics*, 53(2), 225-246. <https://doi.org/10.1002/2014RG000460>
- Donat, M. G., Alexander, L. V., Herold, N., & Dittus, A. J. (2016a). Temperature and precipitation extremes in century-long gridded observations, reanalyses, and atmospheric model simulations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(19), 11-174. <https://doi.org/10.1002/2016JD025480>
- Donat, M. G., Alexander, L. V., Yang, H., Durre, I., Vose, R., Dunn, R. J. H., Willett, 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., ... Kitching, S. (2013a). 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. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50150>
- Donat, M. G., Alexander, L. V., Yang, H., Durre, I., Vose, R., Dunn, R. J., ... & Kitching, S. (2013b). Updated analyses of temperature and precipitation extreme indices since the beginning of the twentieth century: The HadEX2 dataset. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(5), 2098-2118. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50150>
- Donat, M. G., Angéilil, O., & Ukkola, A. M. (2019). Intensification of precipitation extremes in the world's humid and water-limited regions. *Environmental Research Letters*, 14(6), 065003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab1c8e>

- Donat, M. G., Lowry, A. L., Alexander, L. V., O’Gorman, P. A., & Maher, N. (2016). More extreme precipitation in the world’s dry and wet regions. *Nature Climate Change*, 6(5), 508-513. <https://doi.org/10.1038/nclimate2941>
- Donat, M. G., Peterson, T. C., Brunet, M., King, A. D., Almazroui, M., Kolli, R. K., ... & Al Shekaili, M. N. (2014). Changes in extreme temperature and precipitation in the Arab region: long-term trends and variability related to ENSO and NAO. *International Journal of Climatology*, 34(3), 581-592. <https://doi.org/10.1002/joc.3707>
- Douglas, E. M., Vogel, R. M., & Kroll, C. N. (2000). Trends in floods and low flows in the United States: impact of spatial correlation. *Journal of hydrology*, 240(1-2), 90-105. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00336-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00336-X)
- Driouech, F., ElRhaz, K., Moufouma-Okia, W., Arjald, K., & Balhane, S. (2020). Assessing future changes of climate extreme events in the CORDEX-MENA region using regional climate model ALADIN-climate. *Earth Systems and Environment*, 4(3), 477-492. <https://doi.org/10.1007/s41748-020-00169-3>
- Driouech, F., Stafi, H., Khouakhi, A., Moutia, S., Badi, W., ElRhaz, K., & Chehbouni, A. (2021). Recent observed country-wide climate trends in Morocco. *International Journal of Climatology*, 41, E855-E874. <https://doi.org/10.1002/joc.6734>
- Drobinski, P., Alonzo, B., Bastin, S., Silva, N. D., & Muller, C. (2016). Scaling of precipitation extremes with temperature in the French Mediterranean region: What explains the hook shape?. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(7), 3100-3119. <https://doi.org/10.1002/2015JD023497>
- Du, H., Alexander, L. V., Donat, M. G., Lippmann, T., Srivastava, A., Salinger, J., ... & Wu, Z. (2019). Precipitation from persistent extremes is increasing in most regions and globally. *Geophysical Research Letters*, 46(11), 6041-6049. <https://doi.org/10.1029/2019GL081898>
- Dunn, R. J. H., Alexander, L. V., Donat, M. G., Zhang, X., Bador, M., Herold, N., Lippmann, T., Allan, R., Aguilar, E., Barry, A. A., Brunet, M., Caesar, J., Chagnaud, G., Cheng, V., Cinco, T., Durre, I., Guzman, R., Htay, T. M., Wan Ibadullah, W. M., ... Bin Hj Yussof, M. N. A. (2020). Development of an updated global land in situ-based data set of temperature and precipitation extremes: HadEX3. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 125(16), e2019JD032263. <https://doi.org/10.1029/2019JD032263>
- Dunn, R. J., Donat, M. G., & Alexander, L. V. (2022). Comparing extremes indices in recent observational and reanalysis products. *Frontiers in Climate*, 4, 989505. <https://doi.org/10.3389/fclim.2022.989505>
- Dunn, R. J., Herold, N., Alexander, L. V., Donat, M. G., Allan, R., Bador, M., ... & Zhang, X. (2024). Observed global changes in sector-relevant climate extremes indices—An extension to HadEX3. *Earth and Space Science*, 11(4), e2023EA003279. <https://doi.org/10.1029/2023EA003279>
- Durdu, O. F. (2010). Effects of climate change on water resources of the Büyük Menderes river basin, western Turkey. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 34(4), 319-332. <https://doi.org/10.3906/tar-0909-402>
- Easterling, D. R., Kunkel, K. E., Arnold, J. R., Knutson, T., LeGrande, A. N., Leung, L. R., Vose, R. S., Waliser, D. E., & Wehner, M. F. (2017). Precipitation change in the United States. In D. J. Wuebbles, D. W. Fahey, K. A. Hibbard, D. J. Dokken, B. C. Stewart, & T. K. Maycock (Eds.), *Climate science special report: Fourth National Climate Assessment* (Vol. I, pp. 207–230). U.S. Global Change Research Program. <https://doi.org/10.7930/JOH993CC>
- Easterling, D. R., Kunkel, K. E., Wehner, M. F., & Sun, L. (2016). Detection and attribution of climate extremes in the observed record. *Weather and Climate Extremes*, 11, 17-27. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2016.01.001>
- Ehret, U., Zehe, E., Wulfmeyer, V., Warrach-Sagi, K., & Liebert, J. (2012). HESS Opinions “Should we apply bias correction to global and regional climate model data?” *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(9), 3391–3404. <https://doi.org/10.5194/hess-16-3391-2012>
- Ehsanzadeh, E., & Adamowski, K. (2010). Trends in timing of low stream flows in Canada: Impact of autocorrelation and long-term persistence. *Hydrological Processes: An International Journal*, 24(8), 970-980. <https://doi.org/10.1002/hyp.7533>

- Emori, S., & Brown, S. J. (2005). Dynamic and thermodynamic changes in mean and extreme precipitation under changed climate. *Geophysical Research Letters*, 32(17), 1–5. <https://doi.org/10.1029/2005GL023272>
- Expert Team for Climate Change Detection Monitoring and Indices (ETCCDMI), 2003 : CCI/CLIVAR first team meeting report, Zuckerman Inst/Clim. Res. Unit, Aguilar E. Univ., Norwick, UK.
- Faci, M., Matari, A., Oubadi, M., Boudjemline, F., & Farhi, Y. (2016). Analyse des journées de forte chaleur à l'Ouest Algérien. *JARA, Numéro spécial Canic-ule, 2016*, 21-27.
- Faranda, D., Messori, G., Jezequel, A., Vrac, M., & Yiou, P. (2023). Atmospheric circulation compounds anthropogenic warming and impacts of climate extremes in Europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 120(13), e2214525120. <https://doi.org/10.1073/pnas.2214525120>
- Fathian, F., Dehghan, Z., Bazrkar, M. H., & Eslamian, S. (2016). Trends in hydrological and climatic variables affected by four variations of the Mann-Kendall approach in Urmia Lake basin, Iran. *Hydrological Sciences Journal*, 61(5), 892-904. <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.932911>
- Feng, S., Hu, Q., & Qian, W. (2004). Quality control of daily meteorological data in China, 1951–2000: a new dataset. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 24(7), 853-870. <https://doi.org/10.1002/joc.1047>
- Filahi, S., Tanarhte, M., Mouhir, L., El Morhit, M., & Trambly, Y. (2016). Trends in indices of daily temperature and precipitations extremes in Morocco. *Theoretical and Applied Climatology*, 124, 959-972. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1472-4>
- Fischer, E. M., & Knutti, R. (2015). Anthropogenic contribution to global occurrence of heavy-precipitation and high-temperature extremes. *Nature Climate Change*, 5, 560–564. <https://doi.org/10.1038/nclimate2617>
- Fischer, E. M., & Knutti, R. (2016). Observed heavy precipitation increase confirms theory and early models. *Nature Climate Change*, 6, 986– 991. <https://doi.org/10.1038/nclimate3110>
- Fischer, E. M., & Schär, C. (2009). Future changes in daily summer temperature variability: driving processes and role for temperature extremes. *Climate dynamics*, 33(7), 917-935. <https://doi.org/10.1007/s00382-008-0473-8>
- Fowler, H. J., Lenderink, G., Prein, A. F., Westra, S., Allan, R. P., Ban, N., ... & Zhang, X. (2021). Anthropogenic intensification of short-duration rainfall extremes. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2(2), 107-122. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-00128-6>
- Frich, P. A. L. V., 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(3), 193-212. Doi: [10.3354/cr019193](https://doi.org/10.3354/cr019193)
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Davenport, F., Becker, A., Schneider, U., ... & Shukla, S. (2020). Algorithm and data improvements for version 2.1 of the Climate hazards center's infrared precipitation with stations data set. *Satellite Precipitation Measurement: Volume 1*, 409-427. Doi: [10.1007/978-3-030-24568-9_23](https://doi.org/10.1007/978-3-030-24568-9_23)
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., ... & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific data*, 2(1), 1-21. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- Gajić-Čapka, M., Cindrić, K., & Pasarić, Z. (2015). Trends in precipitation indices in Croatia, 1961–2010. *Theoretical and applied climatology*, 121, 167-177. <https://doi.org/10.1007/s00704-014-1217-9>
- García-Cueto, O. R., Santillán-Soto, N., López-Velázquez, E., Reyes-López, J., Cruz-Sotelo, S., & Ojeda-Benítez, S. (2019). Trends of climate change indices in some Mexican cities from 1980 to 2010. *Theoretical and Applied Climatology*, 137, 775-790. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2620-4>
- Gardiner, E. P., Herring, D. D., & Fox, J. F. (2019). The US climate resilience toolkit: evidence of progress. *Climatic Change*, 153, 477-490. <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2216-0>

- Ge, G., Shi, Z., Yang, X., Hao, Y., Guo, H., Kossi, F., ... & Liu, J. (2017). Analysis of precipitation extremes in the Qinghai-Tibetan Plateau, China: Spatio-temporal characteristics and topography effects. *Atmosphere*, 8(7), 127. <https://doi.org/10.3390/atmos8070127>
- Gehrels, R. (2010). Sea-level changes since the Last Glacial Maximum: an appraisal of the IPCC Fourth Assessment Report. *Journal of Quaternary Science*, 25(1), 26-38. <https://doi.org/10.1002/jqs.1273>
- Gensini, V. A., & Mote, T. L. (2014). Estimations of hazardous convective weather in the United States using dynamical downscaling. *Journal of Climate*, 27(17), 6581-6589. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00777.1>
- Gensini, V. A., Haberlie, A. M., & Ashley, W. S. (2023). Convection-permitting simulations of historical and possible future climate over the contiguous United States. *Climate Dynamics*, 60(1), 109-126. <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06306-0>
- Ghosh, S., Das, D., Kao, S. C., & Ganguly, A. R. (2012). Lack of uniform trends but increasing spatial variability in observed Indian rainfall extremes. *Nature Climate Change*, 2, 86-91. <https://doi.org/10.1038/nclimate1327>
- GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat) (2013) : Changements climatiques 2013, les éléments scientifique., OMM, PNU, 27 p. <http://www.ipcc.ch/>
- Jimeno, L., Dominguez, F., Nieto, R., Trigo, R., Drumond, A., Reason, C. J., ... & Marengo, J. (2016). Major mechanisms of atmospheric moisture transport and their role in extreme precipitation events. *Annual Review of Environment and Resources*, 41, 117-141. <https://doi.org/10.1146/annurev-env>
- Jimeno, L., Sorí, R., Vazquez, M., Stojanovic, M., Algarra, I., Eiras-Barca, J., ... & Nieto, R. (2022). Extreme precipitation events. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 9(6), e1611. <https://doi.org/10.1002/wat2.1611>
- Giorgi, F. (2006). Climate change hot-spots. *Geophysical research letters*, 33(8). <https://doi.org/10.1029/2006GL025734>
- Giorgi, F., & Gutowski Jr, W. J. (2015). Regional dynamical downscaling and the CORDEX initiative. *Annual review of environment and resources*, 40, 467-490. <https://doi.org/10.1146/annurevenviron-102014-021217>
- Giorgi, F., & Lionello, P. (2008). Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and planetary change*, 63(2-3), 90-104. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.09.005>
- Giorgi, F., Raffaele, F., & Coppola, E. (2019). The response of precipitation characteristics to global warming from climate projections. *Earth System Dynamics*, 10(1), 73-89. <https://doi.org/10.5194/esd-10-73-2019>
- Global Meteorological Forcing Dataset for land surface modeling. *Princeton Global Forcings* <http://hydrology.princeton.edu/data.pgf.php> (2018). (Accessed October, 2022)
- Groisman, P. Y., Knight, R. W., Easterling, D. R., Karl, T. R., Hegerl, G. C., & Razuvaev, V. N. (2005). Trends in intense precipitation in the climate record. *Journal of climate*, 18(9), 1326-1350. <https://doi.org/10.1175/JCL>
- Gu, G., & Adler, R. F. (2015). Spatial patterns of global precipitation change and variability during 1901-2010. *Journal of Climate*, 28(11), 4431-4453. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00201.1>
- Gu, L., Yin, J., Gentile, P., Wang, H. M., Slater, L. J., Sullivan, S. C., ... & Guo, S. (2023). Large anomalies in future extreme precipitation sensitivity driven by atmospheric dynamics. *Nature Communications*, 14(1), 3197. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39039-7>
- Gudmundsson, L., & Seneviratne, S. I. (2016). Anthropogenic climate change affects meteorological drought risk in Europe. *Environmental Research Letters*, 11(4), 044005. Doi: [10.1088/1748-9326/11/4/044005](https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/4/044005).
- Guerfi, N., Assani, A. A., Mesfioui, M., & Kinnard, C. (2015). Comparison of the temporal variability of winter daily extreme temperatures and precipitations in southern Quebec (Canada) using the Lombard and copula methods. *International Journal of Climatology*, 35(14), 4237-4246. <https://doi.org/10.1002/joc.4282>
- Guerreiro, S. B., Fowler, H. J., Barbero, R., Westra, S., Lenderink, G., Blenkinsop, S., ... & Li, X. F. (2018). Detection of continental-scale intensification of hourly rainfall extremes. *Nature Climate Change*, 8(9), 803-807. Doi: [10.1038/s41558-018-0245-3](https://doi.org/10.1038/s41558-018-0245-3).

- Guga, S. ; Peut.; Riao, D. ; Zhi, F. ; Xu, J. ; Zhang, J. (2023). Surveillance de la sécheresse de la canne à sucre et des caractéristiques de variation dynamique sous le réchauffement climatique : une étude de cas du Guangxi, Chine. *Agricole. Gestion de l'eau*, 275, 108035.
- Guo, L. Y., Gao, Q., Jiang, Z. H., & Li, L. (2018). Bias correction and projection of surface air temperature in LMDZ multiple simulation over central and eastern China. *Advances in Climate Change Research*, 9(1), 81-92. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2018.02.003>
- Haberlie, A. M., Ashley, W. S., Battisto, C. M., & Gensini, V. A. (2022). Thunderstorm activity under intermediate and extreme climate change scenarios. *Geophysical Research Letters*, 49(14), e2022GL098779. <https://doi.org/10.1029/2022GL098779>.
- Hadi, S. J., & Tombul, M. (2018). Long-term spatiotemporal trend analysis of precipitation and temperature over Turkey. *Meteorological Applications*, 25(3), 445-455. <https://doi.org/10.1002/met.1712>
- Hadji, I., Sardou, M., Missoum, H., & Maouche, S. (2021). Flood-related deaths in Northwestern Algeria from 1966 to 2019. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(18), 1923. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08309-3>
- Haensler, A., Saeed, F., & Jacob, D. (2013). Assessing the robustness of projected precipitation changes over central Africa on the basis of a multitude of global and regional climate projections. *Climatic Change*, 121, 349-363. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0863-8>
- Hamed, K. H. (2008). Trend detection in hydrologic data: The Mann–Kendall trend test under the scaling hypothesis. *Journal of hydrology*, 349(3-4), 350-363. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.11.009>
- Hamed, K. H., & Rao, A. R. (1998). A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of hydrology*, 204(1-4), 182-196. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00125-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00125-X)
- Hamitouche, Y., Zeroual, A., Meddi, (2023) Changements dans les indices de précipitations extrêmes à travers les zones climatiques de l'Algérie. International Seminar "Water, Climate Change, Agriculture and Territorial Development" from October 1 to 4, 2023. <https://eng.univ-setif.dz/articles/243>
- Hamitouche, Y., Zeroual, A., Meddi, M., Assani, A. A., & Alkama, R. (2024). Changes in extreme precipitation indices across Algeria climate zones. *International Journal of Climatology*. <https://doi.org/10.1002/joc.8467>
- Hamitouche, Y., Zeroual, A., Meddi, M., Assani, A. A., & Alkama, R., Şen, Z. and Zhang, X (2024). Projected changes in extreme precipitation patterns across Algerian sub-regions. *Water MDPI*. Accepted.
- Hardwick-Jones, R., Westra, S., & Sharma, A. (2010). Observed relationships between extreme sub-daily precipitation, surface temperature, and relative humidity. *Geophysical Research Letters*, 37(22), L22805. <https://doi.org/10.1029/2010GL045081>
- Harrington, L., & Renwick, J. (2014). Secular changes in New Zealand rainfall characteristics 1950-2009. *Weather and Climate*, 34, 50-59. Doi: [10.2307/26169744](https://doi.org/10.2307/26169744).
- Hegerl, G. C., Black, E., Allan, R. P., Ingram, W. J., Polson, D., Trenberth, K. E., ... & Zhang, X. (2015). Challenges in quantifying changes in the global water cycle. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(7), 1097-1115. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00212.1>
- Hegerl, G. C., Zwiers, F. W., Stott, P. A., & Kharin, V. V. (2004). Detectability of anthropogenic changes in temperature and precipitation extremes. *Journal of Climate*, 17, 3683–3700. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)0172.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)0172.0.CO;2)
- Held, I. M., & Soden, B. J. (2006). Robust responses of the hydrological cycle to global warming. *Journal of Climate*, 19(21), 5686–5699. <https://doi.org/10.1175/JCLI3990.1>
- Hertig, E., Seubert, S., Paxian, A., Vogt, G., Paeth, H., & Jacobeit, J. (2014). Statistical modelling of extreme precipitation indices for the Mediterranean area under future climate change. *International Journal of Climatology*, 34(4), 1132-1156. <https://doi.org/10.1002/joc.3751>

- Hidalgo, H. G., Alfaro, E. J., & Quesada-Montano, B. (2017). Observed (1970–1999) climate variability in Central America using a high-resolution meteorological dataset with implication to climate change studies. *Climatic Change*, *141*, 13-28. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1786-y>
- Hirsch, R. M., & Slack, J. R. (1984). A nonparametric trend test for seasonal data with serial dependence. *Water resources research*, *20*(6), 727-732. <https://doi.org/10.1029/WR020i006p00727>
- Hoerling, M., Eischeid, J., Perlwitz, J., Quan, X. W., Wolter, K., & Cheng, L. (2016). Characterizing recent trends in US heavy precipitation. *Journal of Climate*, *29*(7), 2313-2332. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0441.1>
- Hoogewind, K. A., Baldwin, M. E., & Trapp, R. J. (2017). The impact of climate change on hazardous convective weather in the United States: Insight from high-resolution dynamical downscaling. *Journal of Climate*, *30*(24), 10081-10100. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D16-0885.1>
- Howarth, M. E., Thorncroft, C. D., & Bosart, L. F. (2019). Changes in extreme precipitation in the northeast United States: 1979–2014. *Journal of Hydrometeorology*, *20*(4), 673-689. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-18-0155.1>
- Hoy, A., Schucknecht, A., Sepp, M. and Matschullat, J. (2014) Large-scale synoptic types and their impact on European precipitation. *Theoretical and Applied Climatology*, *116*, 19–35. <https://doi.org/10.1007/s00704-013-0897-x>.
- Hu, Y., Tao, L., & Liu, J. (2013). Poleward expansion of the hadley circulation in CMIP5 simulations. *Advances in Atmospheric Sciences*, *30*, 790–795. <https://doi.org/10.1007/s00376-012-2187-4>
- Hu, Z., Li, Q., Chen, X., Teng, Z., Chen, C., Yin, G., & Zhang, Y. (2016). Climate changes in temperature and precipitation extremes in an alpine grassland of Central Asia. *Theoretical and Applied Climatology*, *126*, 519-531. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1568-x>
- Hu, Z., Liu, S., Zhong, G., Lin, H., & Zhou, Z. (2020). Modified Mann-Kendall trend test for hydrological time series under the scaling hypothesis and its application. *Hydrological Sciences Journal*, *65*(14), 2419-2438. <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1810253>
- Huang, H., Winter, J. M., Osterberg, E. C., Horton, R. M., & Beckage, B. (2017). Total and extreme precipitation changes over the northeastern United States. *Journal of Hydrometeorology*, *18*(6), 1783-1798. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-16-0195.1>
- Hunt, K. M., Turner, A. G., & Shaffrey, L. C. (2018). Extreme daily rainfall in Pakistan and north India: Scale interactions, mechanisms, and precursors. *Monthly Weather Review*, *146*(4), 1005-1022. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-17-0258.1>
- Hurst, H. E. (1951). Long-term storage capacity of reservoirs. *Transactions of the American society of civil engineers*, *116*(1), 770-799. <https://doi.org/10.1061/TACEAT.0006518>
- Insua-Costa, D., Senande-Rivera, M., Llasat, M. C., & Miguez-Macho, G. (2022). A global perspective on western Mediterranean precipitation extremes. *npj Climate and Atmospheric Science*, *5*(1), 9. <https://doi.org/10.1038/s41612-022-00234-w>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). Water. In *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 551–712). chapter, Cambridge: Cambridge University Press. Doi:[10.1017/9781009325844.006](https://doi.org/10.1017/9781009325844.006)
- IPCC (2014a) Summary for policymakers. In: *Climate change 2014a: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B. et al., (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA., 1132 pp., www.ipcc.ch/report/ar5/wg2.
- IPCC (2014b) *Climate Change 2014b: Africa. Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1199–1265

- IPCC (2021). Summary for policymakers. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou (Eds.), *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* (pp. 3–32). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>
- IPCC Fifth assessment report (AR5) (2013). *Climate change 2013: The physical science basis*. In T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, & P. M. Midgley (Eds.), *Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* (p. 1535 pp. Retrieved from). Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_all_final.pdf
- IPCC First assessment report (FAR) (1990) *Climate change: the IPCC scientific assessment*. Cambridge University Press, Cambridge
- IPCC Fourth assessment report (AR4) (2007) *Climate change 2007: climate change impacts, adaptation and vulnerability. Working Group II contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report. Summary for policymakers*, 23
- IPCC Second assessment report (SAR) (1996) *Climate change 1995: the science of climate change. Contribution of working group I to the second assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK
- IPCC Third assessment report (TAR) (2001) *Climate change 2001: the scientific basis. Contribution of working group I to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*
- IPCC, “Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,” Cambridge University Press, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. [Online]. Doi:[10.1017/9781009325844](https://doi.org/10.1017/9781009325844)
- J Jacob, D., Kotova, L., Teichmann, C., Sobolowski, S. P., Vautard, R., Donnelly, C., ... & van Vliet, M. T. (2018). Climate impacts in Europe under+ 1.5 C global warming. *Earth's Future*, 6(2), 264-285. <https://doi.org/10.1002/2017EF000710>
- Jakob, D., & Walland, D. (2016). Variability and long-term change in Australian temperature and precipitation extremes. *Weather and Climate Extremes*, 14, 36-55. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2016.11.001>
- Jansà A, Alpert P, Arbogast P, Buzzi A, Ivancan-Picek B, Kotroni V, Llasat MC, Ramis C, Richard E, Romero R, Speranza A (2014) MEDEX: a general overview. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 14:1965–1984. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-1965-2014>
- Janssen, E., Wuebbles, D. J., Kunkel, K. E., Olsen, S. C., & Goodman, A. (2014). Observational-and model-based trends and projections of extreme precipitation over the contiguous United States. *Earth's Future*, 2(2), 99-113. <https://doi.org/10.1002/2013EF000185>.
- Jones, M. C. (1990). The performance of kernel density functions in kernel distribution function estimation. *Statistics & Probability Letters*, 9(2), 129-132. [https://doi.org/10.1016/0167-7152\(92\)90006-Q](https://doi.org/10.1016/0167-7152(92)90006-Q)
- Jones, R., Boer, R., Magezi, S., & Mearns, L. (2004). Assessing current climate risks. *Adaptation Policy Framework for Climate change: Developing strategies, policies and measures, UNDP, Cambridge University Press, Cambridge, UK*, 91-117.
- Jury, M. W., Prein, A. F., Truhetz, H., & Gobiet, A. (2015). Evaluation of CMIP5 Models in the Context of Dynamical Downscaling over Europe. *Journal of Climate*, 28(14), 5575–5582. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00430.1>
- Kabli, S., Zeroual, A., & Meddi, M. (2024). Spatiotemporal sensitivity analysis of surface soil moisture to precipitation and temperature variations: a case study of the Cheliff Basin in Algeria. *Theoretical and Applied Climatology*, 1-24. <https://doi.org/10.1007/s00704-024-04875-0>
- Kallache, M., Rust, H. W., & Kropp, J. (2005). Trend assessment: applications for hydrology and climate research. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 12(2), 201-210. <https://doi.org/10.5194/npg-12-201-2005>

- Kamalov, F. (2020). Kernel density estimation based sampling for imbalanced class distribution. *Information Sciences*, 512, 1192-1201. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2019.10.017>
- Karaburun, A., Demirci, A., & Kara, F. (2011). Analysis of spatially distributed annual, seasonal and monthly temperatures in Istanbul from 1975 to 2006. *World Applied Sciences Journal*, 12(10), 1662-1675.
- Kastali, A., Zeroual, A., Remaoun, M., Serrano-Notivoli, R., & Moramarco, T. (2021). Design flood and flood-prone areas under rating curve uncertainty: area of Vieux-Ténès, Algeria. *Journal of Hydrologic Engineering*, 26(3), 05020054. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0002049](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0002049)
- Kastali, A., Zeroual, A., Zeroual, S., & Hamitouche, Y. (2022). Auto-calibration of HEC-HMS model for historic flood event under rating curve uncertainty. case study: Allala Watershed, Algeria. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 26(1), 482-493. <https://doi.org/10.1007/s12205-021-1051-4>
- Kendall MG (1975). *Rank Correlation Methods*, 4th edition. Charles Griffin, London, U.K
- Kendon, E. J., Blenkinsop, S., & Fowler, H. J. (2018). When will we detect changes in short-duration precipitation extremes? *Journal of Climate*, 31, 2945–2964. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0435>.
- Khan, N., Pour, S. H., Shahid, S., Ismail, T., Ahmed, K., Chung, E. S., ... & Wang, X. (2019). Spatial distribution of secular trends in rainfall indices of Peninsular Malaysia in the presence of long-term persistence. *Meteorological Applications*, 26(4), 655-670. <https://doi.org/10.1002/met.1792>
- Kharin, V. V., Flato, G. M., Zhang, X., Gillett, N. P., Zwiers, F., & Anderson, K. J. (2018). Risks from climate extremes change differently from 1.5 C to 2.0 C depending on rarity. *Earth's Future*, 6(5), 704-715. <https://doi.org/10.1002/2018EF000813>
- Kharin, V. V., Zwiers, F. W., Zhang, X., & Hegerl, G. C. (2007). Changes in temperature and precipitation extremes in the IPCC ensemble of global coupled model simulations. *Journal of Climate*, 20(8), 1419-1444. <https://doi.org/10.1175/JCLI4066.1>.
- Kharin, V. V., Zwiers, F. W., Zhang, X., & Wehner, M. (2013). Changes in the temperature and precipitation extremes in the CMIP5 ensemble. *Climatic Change*, 119, 345–357. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0705-8>
- Kim, I. W., Oh, J., Woo, S., & Kripalani, R. H. (2019). Evaluation of precipitation extremes over the Asian domain: observation and modelling studies. *Climate Dynamics*, 52, 1317-1342. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4193-4>
- Kim, S. (2004). Wavelet analysis of precipitation variability in northern California, USA. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 8, 471-477. <https://doi.org/10.1007/BF02829169>
- Kim, S., Eghdamirad, S., Sharma, A., & Kim, J. H. (2020). Quantification of uncertainty in projections of extreme daily precipitation. *Earth and Space Science*, 7, e2019EA001052. <https://doi.org/10.1029/2019EA001052>
- King, A. D., Reid, K. J., & Saunders, K. R. (2023). Communicating the link between climate change and extreme rain events. *Nature Geoscience*, 16(7), 552-554. <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01223-1>
- Kirchmeier-Young, M. C., & Zhang, X. (2020). Human influence has intensified extreme precipitation in North America. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117(24), 13308–13313. <https://doi.org/10.1073/pnas.1921628117>
- Kirkup, H., Pitman, A. J., Hogan, J., & Brierley, G. (2001). An initial analysis of river discharge and rainfall in coastal New South Wales, Australia using wavelet transforms. *Australian Geographical Studies*, 39(3), 313-334. <https://doi.org/10.1111/1467-8470.00149>
- Korichi K, Hazzab A, Atallah M (2016) Flash floods risk analysis in ephemeral streams: a case study on Wadi Mekerra (northwestern Algeria). *Arab J Geosci* 9:589. <https://doi.org/10.1007/s12517-016-2624-2>
- Koutsoyiannis, D. (2003). Climate change, the Hurst phenomenon, and hydrological statistics. *Hydrological Sciences Journal*, 48(1), 3-24. <https://doi.org/10.1623/hysj.48.1.3.43481>

- Kumar, S., Merwade, V., Kam, J., & Thurner, K. (2009). Streamflow trends in Indiana: effects of long term persistence, precipitation and subsurface drains. *Journal of Hydrology*, 374(1-2), 171-183. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.06.012>
- Kumari A, Kumar P, Dubey AK, et al (2021) Dynamical and thermodynamical aspects of precipitation events over India. *Int J Climatol* p joc.7409. <https://doi.org/10.1002/joc.7409>
- Kunkel, K. E., Karl, T. R., Easterling, D. R., Redmond, K., Young, J., Yin, X., & Hennon, P. (2013). Probable maximum precipitation and climate change. *Geophysical Research Letters*, 40(7), 1402-1408. <https://doi.org/10.1002/grl.50334>.
- Kysely J, Beguería S, Beranová R, Gaál L, López-Moreno JI (2012) Different patterns of climate change scenarios for short-term and multi-day precipitation extremes in the Mediterranean. *Glob Planet Chang* 98–99:63–72. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.06.010>
- Lee, J. Y., Marotzke, J., Bala, G., Cao, L., Corti, S., Dunne, J. P., ... & Zhou, T. (2021). Future global climate: scenario-based projections and near-term information. In *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* (pp. 553-672). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.006>
- Lemaitre F (2002). Recensement des tests de détection de tendances ou de ruptures adaptés à l'analyse de stationnarité des régimes de crues en France. Travail de fin d'étude, ENTPE, Cemagref Lyon, 2002 (94 p.)
- Lenderink, G., & Van Meijgaard, E. (2008). Increase in hourly precipitation extremes beyond expectations from temperature changes. *Nature Geoscience*, 1(8), 511–514. <https://doi.org/10.1038/ngeo262>
- Lenderink, G., Mok, H. Y., Lee, T. C., & Van Oldenborgh, G. J. (2011). Scaling and trends of hourly precipitation extremes in two different climate zones - Hong Kong and The Netherlands. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(9), 3033–3041. <https://doi.org/10.5194/hess15-3033-2011>
- Li, C., Zwiers, F., Zhang, X., Li, G., Sun, Y., & Wehner, M. (2021). Changes in annual extremes of daily temperature and precipitation in CMIP6 models. *Journal of Climate*, 34(9), 3441-3460. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-1013.1>
- Li, G., Yang, H., Zhang, Y., Huang, C., Pan, X., Ma, M., ... & Zhao, H. (2019). More extreme precipitation in Chinese deserts from 1960 to 2018. *Earth and Space Science*, 6(7), 1196-1204. <https://doi.org/10.1029/2018EA000538>
- Lins, H. F., & Slack, J. R. (1999). Streamflow trends in the United States. *Geophysical research letters*, 26(2), 227-230. <https://doi.org/10.1029/1998GL900291>
- Lionello, P. (Ed.). (2012). *The climate of the Mediterranean region: From the past to the future*. Elsevier.
- Lionello, P., & Scarascia, L. (2020). The relation of climate extremes with global warming in the Mediterranean region and its north versus south contrast. *Regional Environmental Change*, 20(1), 31. <https://doi.org/10.1007/s10113-020-01610-z>
- Liu, D., Chen, X., Lian, Y., & Lou, Z. (2010). Impacts of climate change and human activities on surface runoff in the Dongjiang River basin of China. *Hydrological Processes: An International Journal*, 24(11), 1487-1495. <https://doi.org/10.1002/hyp.7609>
- Llasat, M. D. C., Llasat-Botija, M., Prat, M. A., Porcu, F., Price, C., Mugnai, A., ... & Nicolaidis, K. (2010). High-impact floods and flash floods in Mediterranean countries: the FLASH preliminary database. *Advances in Geosciences*, 23, 47-55. <https://doi.org/10.5194/adgeo-23-47-2010>
- Lochbihler, K., Lenderink, G., & Siebesma, A. P. (2017). The spatial extent of rainfall events and its relation to precipitation scaling. *Geophysical Research Letters*, 44, 8629–8636. <https://doi.org/10.1002/2017GL074857>
- Lombard, F. (1987). Rank tests for changepoint problems. *Biometrika*, 74(3), 615-624. <https://doi.org/10.1093/biomet/74.3.615>

- Lovino, M. A., Müller, O. V., Berbery, E. H., & Müller, G. V. (2018). How have daily climate extremes changed in the recent past over northeastern Argentina?. *Global and Planetary Change*, 168, 78-97. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.06.008>
- Lugo, A. E. (2018). *Social-ecological-technological effects of hurricane María on Puerto Rico: planning for resilience under extreme events*. Springer.
- Machiwal, D., Jha, M. K., Machiwal, D., & Jha, M. K. (2012). Analysis of trends in low-flow time series of Canadian rivers. *Hydrologic Time Series Analysis: Theory and Practice*, 201-221. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1861-6_10
- Madakumbura, G. D., Thackeray, C. W., Norris, J., Goldenson, N., & Hall, A. (2021). Anthropogenic influence on extreme precipitation over global land areas seen in multiple observational datasets. *Nature Communications*, 12, 3944. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-24262-x>
- Madhura, R. K., Krishnan, R., Revadekar, J. V., Mujumdar, M., & Goswami, B. N. (2015). Changes in western disturbances over the Western Himalayas in a warming environment. *Climate Dynamics*, 44, 1157-1168. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2166-9>
- Mahmood R, Jia S, Zhu W (2019) Analysis of climate variability, trends, and prediction in the most active parts of the Lake Chad basin, Africa. *Sci Rep* 9:6317. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42811-9>
- Majdi, F., Hosseini, S. A., Karbalaee, A., Kaseri, M., & Marjanian, S. (2022). Future projection of precipitation and temperature changes in the Middle East and North Africa (MENA) region based on CMIP6. *Theoretical and Applied Climatology*, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03916-2>
- Malaekheh, S., Safaie, A., Shiva, L., & Tabari, H. (2022). Spatio-temporal variation of hydro-climatic variables and extreme indices over Iran based on reanalysis data. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 36(11), 3725-3752. <https://doi.org/10.1007/s00477-022-02223-0>
- Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 245–259. Doi: [10.2307/1907187](https://doi.org/10.2307/1907187)
- Mann, H. B., & Whitney, D. R. (1947). On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. *The annals of mathematical statistics*, 50-60. <https://doi.org/10.1214/aoms/1177730491>
- Marelle, L., Myhre, G., Hodnebrog, Ø., Sillmann, J., & Samset, B. H. (2018). The changing seasonality of extreme daily precipitation. *Geophysical Research Letters*, 45(20), 11352–11360. <https://doi.org/10.1029/2018GL079567>
- Markonis, Y. and Koutsoyiannis, D. (2015) Scale-dependence of persistence in precipitation records. *Nature Climate Change*, 2015, 399–401. <https://doi.org/10.1038/NCLIMATE2894>
- Markonis, Y., & Koutsoyiannis, D. (2016). Scale-dependence of persistence in precipitation records. *Nature Climate Change*, 6(4), 399-401. <https://doi.org/10.1038/nclimate2894>
- Martins, E. S. P. R., Coelho, C., Haarsma, R., Otto, F., King, A., van Oldenborgh, G., ... & Cullen, H. (2017). A multimethod attribution analysis of the prolonged northeast Brazil hydrometeorological drought (2012–16). *Explaining Extreme Events of 2016 from a Climate Perspective. Special Supplement to the Bulletin of the American Meteorological Society*. Doi: [10.1175/bams-d-17-0102.1](https://doi.org/10.1175/bams-d-17-0102.1).
- Martin-Vide, J. and Lopez-Bustins, J.-A. (2006) The western Mediterranean oscillation and rainfall in the Iberian Peninsula. *International Journal of Climatology*, 26, 1455–1475. <https://doi.org/10.1002/joc.1388>.
- Mathbout, S., Lopez-Bustins, J. A., Royé, D., Martin-Vide, J., Bech, J., & Rodrigo, F. S. (2018). Observed changes in daily precipitation extremes at annual timescale over the eastern Mediterranean during 1961–2012. *Pure and Applied Geophysics*, 175, 3875-3890. <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1695-7>
- Maurer, E. P., & Hidalgo, H. G. (2008). Utility of daily vs. monthly large-scale climate data: an intercomparison of two statistical downscaling methods. *Hydrology and Earth System Sciences*, 12(2), 551-563. <https://doi.org/10.5194/hess-12-551-2008>

- Maurer, E. P., Brekke, L., Pruitt, T., & Duffy, P. B. (2007). Fine-resolution climate projections enhance regional climate change impact studies. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 88(47), 504–504. <https://doi.org/10.1029/2007EO470006>
- Mauritsen, T., & Stevens, B. (2015). Missing iris effect as a possible cause of muted hydrological change and high climate sensitivity in models. *Nature Geoscience*, 8(5), 346–351. <https://doi.org/10.1038/ngeo2414>
- McLeod, A. I., Hipel, K. W., & Bodo, B. A. (1991). Trend analysis methodology for water quality time series. *Environmetrics*, 2(2), 169–200. <https://doi.org/10.1002/env.3770020205>
- McPhillips, L. E., Chang, H., Chester, M. V., Depietri, Y., Friedman, E., Grimm, N. B., Kominoski, J. S., McPhearson, T., Méndez-Lazaro, P., Rosi, E. J., & Shafiei Shiva, J. (2018). Defining extreme events: A cross-disciplinary review. *Earth's Future*, 6(3), 441–455. <https://doi.org/10.1002/2017EF000686>
- Meddi, M., Eslamian, S. (2021). Uncertainties in Rainfall and Water Resources in Maghreb Countries Under Climate Change. In: Oguge, N., Ayal, D., Adeleke, L., da Silva, I. (eds) *African Handbook of Climate Change Adaptation*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-45106-6_114
- Mekis, É., Vincent, L. A., Shephard, M. W., & Zhang, X. (2015). Observed trends in severe weather conditions based on humidex, wind chill, and heavy rainfall events in Canada for 1953–2012. *Atmosphere-Ocean*, 53(4), 383–397. <https://doi.org/10.1080/07055900.2015.1086970>
- Min, S. K., Zhang, X., Zwiers, F. W., & Hegerl, G. C. (2011). Human contribution to more-intense precipitation extremes. *Nature*, 470, 378–381. <https://doi.org/10.1038/nature09763>
- Mizuta, R., & Endo, H. (2020). Projected changes in extreme precipitation in a 60-km AGCM large ensemble and their dependence on return periods. *Geophysical Research Letters*, 47(13), e2019GL086855. <https://doi.org/10.1029/2019GL086855>
- Mohsin, T., & Gough, W. A. (2010). Trend analysis of long-term temperature time series in the Greater Toronto Area (GTA). *Theoretical and applied climatology*, 101, 311–327. <https://doi.org/10.1007/s00704-009-0214-x>
- Monjo, R., Gaitán, E., Pórtoles, J., Ribalaygua, J., & Torres, L. (2016). Changes in extreme precipitation over Spain using statistical downscaling of CMIP5 projections. *International Journal of Climatology*, 36(2), 757–769. <https://doi.org/10.1002/joc.4380>
- Morak, S., Hegerl, G. C., & Kenyon, J. (2011). Detectable regional changes in the number of warm nights. *Geophysical Research Letters*, 38(17). <https://doi.org/10.1029/2011GL048531>
- Mueller, B., & Seneviratne, S. I. (2012). Hot days induced by precipitation deficits at the global scale. *Proceedings of the national academy of sciences*, 109(31), 12398–12403. <https://doi.org/10.1073/pnas.1204330109>
- Mukherjee, S., Aadhar, S., Stone, D., & Mishra, V. (2018). Increase in extreme precipitation events under anthropogenic warming in India. *Weather and climate extremes*, 20, 45–53. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2018.03.005>
- Murali, G., Iwamura, T., Meiri, S., & Roll, U. (2023). Future temperature extremes threaten land vertebrates. *Nature*, 615(7952), 461–467. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05606-z>
- Murray-Tortarolo, G., Jaramillo, V. J., Maass, M., Friedlingstein, P., & Sitch, S. (2017). The decreasing range between dry-and wet-season precipitation over land and its effect on vegetation primary productivity. *PloS one*, 12(12), e0190304. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0190304>
- Myhre, G., Alterskjær, K., Stjern, C. W., Hodnebrog, Ø., Marelle, L., Samset, B. H., ... & Stohl, A. (2019). Frequency of extreme precipitation increases extensively with event rareness under global warming. *Scientific reports*, 9(1), 16063. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52277-4>
- Nashwan, M. S., & Shahid, S. (2020). A novel framework for selecting general circulation models based on the spatial patterns of climate. *International Journal of Climatology*, 40(10), 4422–4443. <https://doi.org/10.1002/joc.6465>

- National Risk Index.” FEMA, Nov. 2021. [Online]. Available: <https://www.fema.gov/flood-maps/products-tools/national-risk-index>
- Nazarenko, L., Schmidt, G. A., Miller, R. L., Tausnev, N., Kelley, M., Ruedy, R., ... & Zhang, J. (2015). Future climate change under RCP emission scenarios with GISS M odelE2. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 7(1), 244-267. <https://doi.org/10.1002/2014MS000403>
- Norris, J., Chen, G., & Neelin, J. D. (2019). Thermodynamic versus dynamic controls on extreme precipitation in a warming climate from the Community Earth System Model Large Ensemble. *Journal of Climate*, 32(4), 1025-1045. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0302.1>
- Notaro, M., Bennington, V., & Lofgren, B. (2015). Dynamical downscaling–based projections of Great Lakes water levels. *Journal of climate*, 28(24), 9721-9745. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00847.1>
- Noto, L. V., Cipolla, G., Francipane, A., & Pumo, D. (2023). Climate change in the mediterranean basin (part I): Induced alterations on climate forcings and hydrological processes. *Water Resources Management*, 37(6), 2287-2305. <https://doi.org/10.1007/s11269-022-03400-0>
- O’Mahony, M. (1986). *Sensory evaluation of food: statistical methods and procedures*, volume 16. CRC Press
- O’Gorman, P. A. (2012). Sensitivity of tropical precipitation extremes to climate change. *Nature Geoscience*, 5(10), 697–700. <https://doi.org/10.1038/ngeo1568>
- O’Gorman, P. A., & Muller, C. J. (2010). How closely do changes in surface and column water vapor follow Clausius-Clapeyron scaling in climate change simulations? *Environmental Research Letters*, 5(2), 025207. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/5/2/025207>
- O’Gorman, P. A., & Schneider, T. (2009). The physical basis for increases in precipitation extremes in simulations of 21st-century climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(35), 14773–14777. <https://doi.org/10.1073/pnas.0907610106>
- O’Neill, B. C., Tebaldi, C., Van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., ... & Sanderson, B. M. (2016). The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(9), 3461-3482. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>
- Önöz, B., & Bayazit, M. (2003). The power of statistical tests for trend detection. *Turkish journal of engineering and environmental sciences*, 27(4), 247-251.
- Otto, F. E., Massey, N., van Oldenborgh, G. J., Jones, R. G., & Allen, M. R. (2012). Reconciling two approaches to attribution of the 2010 Russian heat wave. *Geophysical Research Letters*, 39(4). <https://doi.org/10.1029/2011GL050422>
- Ozturk, T., Ceber, Z. P., Türkes, M., & Kurnaz, M. L. (2015). Projections of climate change in the Mediterranean Basin by using downscaled global climate model outputs. *International Journal of Climatology*, 35(14), 4276-4292. <https://doi.org/10.1002/joc.4285>
- Pai, D. S., Sridhar, L., Badwaik, M. R., & Rajeevan, M. (2015). Analysis of the daily rainfall events over India using a new long period (1901–2010) high resolution (0.25× 0.25) gridded rainfall data set. *Climate dynamics*, 45, 755-776. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2307-1>
- Pall, P., Aina, T., Stone, D. A., Stott, P. A., Nozawa, T., Hilberts, A. G., ... & Allen, M. R. (2011). Anthropogenic greenhouse gas contribution to flood risk in England and Wales in autumn 2000. *Nature*, 470(7334), 382-385. <https://doi.org/10.1038/nature09762>
- Pall, P., Patricola, C. M., Wehner, M. F., Stone, D. A., Paciorek, C. J., & Collins, W. D. (2017). Diagnosing conditional anthropogenic contributions to heavy Colorado rainfall in September 2013. *Weather and Climate Extremes*, 17, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2017.03.004>
- Pan, L. L., Chen, S. H., Cayan, D., Lin, M. Y., Hart, Q., Zhang, M. H., ... & Wang, J. (2011). Influences of climate change on California and Nevada regions revealed by a high-resolution dynamical downscaling study. *Climate dynamics*, 37, 2005-2020. <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0961-5>

- Papalexiou, S. M., & Montanari, A. (2019). Global and regional increase of precipitation extremes under global warming. *Water Resources Research*, 55(6), 4901-4914. <https://doi.org/10.1029/2018wr024067>
- Papalexiou, S. M., & Montanari, A. (2019). Global and regional increase of precipitation extremes under global warming. *Water Resources Research*, 55, 4901–4914. <https://doi.org/10.1029/2018wr024067>
- Parmesan, C., Morecroft, M. D., & Trisurat, Y. (2022). *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability* (Doctoral dissertation, GIEC). <https://hal.science/hal-03774939>
- Partal, T. (2010). Wavelet transform-based analysis of periodicities and trends of Sakarya basin (Turkey) streamflow data. *River research and applications*, 26(6), 695-711. <https://doi.org/10.1002/rra.1264>
- Partal, T., & Küçük, M. (2006). Long-term trend analysis using discrete wavelet components of annual precipitations measurements in Marmara region (Turkey). *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 31(18), 1189-1200. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2006.04.043>
- Paxian, A., Hertig, E., Seubert, S., Vogt, G., Jacobeit, J., & Paeth, H. (2015). Present-day and future Mediterranean precipitation extremes assessed by different statistical approaches. *Climate dynamics*, 44, 845-860. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2428-6>
- Pedron, I. T., Silva Dias, M. A., de Paula Dias, S., Carvalho, L. M., & Freitas, E. D. (2017). Trends and variability in extremes of precipitation in Curitiba–Southern Brazil. *International Journal of Climatology*, 37(3), 1250-1264. <https://doi.org/10.1002/joc.4773>
- Peña-Angulo, D., Reig-Gracia, F., Domínguez-Castro, F., Revuelto, J., Aguilar, E., van der Schrier, G., & Vicente-Serrano, S. M. (2020). ECTACI: European climatology and trend atlas of climate indices (1979–2017). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(16), e2020JD032798. <https://doi.org/10.1029/2020JD032798>
- Pendergrass, A. G., & Hartmann, D. L. (2014). Changes in the distribution of rain frequency and intensity in response to global warming. *Journal of Climate*, 27, 8372–8383. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00183.1>
- Pendergrass, A. G., Coleman, D. B., Deser, C., Lehner, F., Rosenbloom, N., & Simpson, I. R. (2019). Nonlinear response of extreme precipitation to warming in CESM1. *Geophysical research letters*, 46(17-18), 10551-10560. <https://doi.org/10.1029/2019GL084826>
- Pendergrass, A. G., Knutti, R., Lehner, F., Deser, C., & Sanderson, B. M. (2017). Precipitation variability increases in a warmer climate. *Scientific Reports*, 7(1), 17966. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-17966-y>
- Peterson, T., Folland, C., Gruza, G., Hogg, W., Mokssit, A., & Plummer, N. (2001). *Report on the activities of the working group on climate change detection and related rapporteurs* (p. 143). Geneva: World Meteorological Organization.
- Pettitt, A. N. (1979). A non-parametric approach to the change-point problem. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, 28(2), 126-135.. <https://doi.org/10.2307/2346729>
- Pfahl, S., O’Gorman, P. A., & Fischer, E. M. (2017). Understanding the regional pattern of projected future changes in extreme precipitation. *Nature Climate Change*, 7(6), 423-427. <https://doi.org/10.1038/nclimate3287>
- Pithan, F., & Mauritsen, T. (2014). Arctic amplification dominated by temperature feedbacks in contemporary climate models. *Nature geoscience*, 7(3), 181-184. <https://doi.org/10.1038/ngeo2071>
- Piyosh, A. K., & Ghosh, S. K. (2017). Effect of autocorrelation on temporal trends in rainfall in a valley region at the foothills of Indian Himalayas. *Stochastic environmental research and risk assessment*, 31, 2075-2096. <https://doi.org/10.1007/s00477-016-1347-y>
- Polade, S. D., Gershunov, A., Cayan, D. R., Dettinger, M. D., & Pierce, D. W. (2017). Precipitation in a warming world: Assessing projected hydro-climate changes in California and other Mediterranean climate regions. *Scientific reports*, 7(1), 10783. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11285-y>
- Politi, N., Vlachogiannis, D., Sfetsos, A., & Nastos, P. T. (2023). High resolution projections for extreme temperatures and precipitation over Greece. *Climate Dynamics*, 61(1), 633-667. <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06590-w>

- Powers, J. G., Klemp, J. B., Skamarock, W. C., Davis, C. A., Dudhia, J., Gill, D. O., ... & Duda, M. G. (2017). The weather research and forecasting model: Overview, system efforts, and future directions. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(8), 1717-1737. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00308.1>.
- Prein, A. F., Langhans, W., Fosser, G., Ferrone, A., Ban, N., Goergen, K., ... & Leung, R. (2015). A review on regional convection-permitting climate modeling: Demonstrations, prospects, and challenges. *Reviews of geophysics*, 53(2), 323-361. <https://doi.org/10.1002/2014RG000475>.
- Prein, A. F., Liu, C., Ikeda, K., Trier, S. B., Rasmussen, R. M., Holland, G. J., & Clark, M. P. (2017). Increased rainfall volume from future convective storms in the US. *Nature Climate Change*, 7(12), 880-884. <https://doi.org/10.1038/s41558-017-0007-7>.
- Priya, P., Krishnan, R., Mujumdar, M., & Houze, R. A. (2017). Changing monsoon and midlatitude circulation interactions over the Western Himalayas and possible links to occurrences of extreme precipitation. *Climate Dynamics*, 49, 2351-2364. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3458-z>
- Prokoph, A., Adamowski, J., & Adamowski, K. (2012). Influence of the 11 year solar cycle on annual streamflow maxima in Southern Canada. *Journal of Hydrology*, 442, 55-62. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.03.038>
- Pulido-Velazquez, D., Collados-Lara, A. J., & Fernandez-Chacon, F. (2022). The impact of climate change scenarios on droughts and their propagation in an arid Mediterranean basin. A useful approach for planning adaptation strategies. *Science of The Total Environment*, 820, 153128. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153128>
- Quadrelli, R., Pavan, V., & Molteni, F. (2001). Wintertime variability of Mediterranean precipitation and its links with large-scale circulation anomalies. *Climate Dynamics*, 17, 457-466. <https://doi.org/10.1007/s003820000121>.
- Quessy, J. F., Favre, A. C., Saïd, M., & Champagne, M. (2011). Statistical inference in Lombard's smooth-change model. *Environmetrics*, 22(7), 882-893. <https://doi.org/10.1002/env.1108>
- R Core Team (2016) R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna
- Rahimzadeh, F., Asgari, A., & Fattahi, E. (2009). Variability of extreme temperature and precipitation in Iran during recent decades. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 29(3), 329-343. <https://doi.org/10.1002/joc.1739>
- Rahmani, V., Hutchinson, S. L., Harrington Jr, J. A., & Hutchinson, J. S. (2016). Analysis of frequency and magnitude of extreme rainfall events with potential impacts on flooding: A case study from the central United States. *International Journal of Climatology*, 36(10), 3578-3587. <https://doi.org/10.1002/joc.4577>
- Rajbhandari, R., Shrestha, A. B., Kulkarni, A., Patwardhan, S. K., & Bajracharya, S. R. (2015). Projected changes in climate over the Indus river basin using a high resolution regional climate model (PRECIS). *Climate Dynamics*, 44, 339-357. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2183-8>
- Rajczak, J., & Schär, C. (2017). Projections of future precipitation extremes over Europe: A multimodel assessment of climate simulations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(20), 10-773. <https://doi.org/10.1002/2017JD027176>
- Rajczak, J., Pall, P., & Schär, C. (2013). Projections of extreme precipitation events in regional climate simulations for Europe and the Alpine Region. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(9), 3610-3626. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50297>
- Raymond, F., Drobinski, P., Ullmann, A., & Camberlin, P. (2018). Extreme dry spells over the Mediterranean Basin during the wet season: Assessment of HyMeX/Med-CORDEX regional climate simulations (1979–2009). *International Journal of Climatology*, 38(7), 3090-3105. <https://doi.org/10.1002/joc.5487>
- Reale, M., & Lionello, P. (2013). Synoptic climatology of winter intense precipitation events along the Mediterranean coasts. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(7), 1707-1722. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-1707-2013>, 2013.

- Reek, T., Doty, S. R., & Owen, T. W. (1992). A deterministic approach to the validation of historical daily temperature and precipitation data from the cooperative network. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 73(6), 753-765. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1992\)073<0753:ADATTV>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1992)073<0753:ADATTV>2.0.CO;2)
- Reisinger, A., Howden, M., Vera, C., Garschagen, M., Hurlbert, M., Kreibiehl, S., ... & Ranasinghe, R. (2020). The concept of risk in the IPCC Sixth Assessment Report: A summary of cross-working group discussions. *Intergovernmental Panel on Climate Change*, 15. <https://www.ipcc.ch/event/guidance-note-concept-of-risk-in-the-6ar-cross-wg-discussions/>
- Riahi, K., Van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., ... & Tavoni, M. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global environmental change*, 42, 153-168. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>
- Ribas, A., Olcina, J., & Sauri, D. (2020). More exposed but also more vulnerable? Climate change, high intensity precipitation events and flooding in Mediterranean Spain. *Disaster Prevention and Management: An International Journal*, 29(3), 229-248.
- Ribes, A., Thao, S., Vautard, R., Dubuisson, B., Somot, S., Colin, J., ... & Soubeyroux, J. M. (2019). Observed increase in extreme daily rainfall in the French Mediterranean. *Climate dynamics*, 52, 1095-1114. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4179-2>
- Ridley, J., Wiltshire, A., & Mathison, C. (2013). More frequent occurrence of westerly disturbances in Karakoram up to 2100. *Science of the Total Environment*, 468, S31-S35. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.03.074>
- Robinson, E. D., Trapp, R. J., & Baldwin, M. E. (2013). The geospatial and temporal distributions of severe thunderstorms from high-resolution dynamical downscaling. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52(9), 2147-2161. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-12-0131.1>
- Roca, R., & Fiolleau, T. (2020). Extreme precipitation in the tropics is closely associated with long-lived convective systems. *Communications Earth & Environment*, 1(1), 18. <https://doi.org/10.1038/s43247-020-00015-4>
- Roxy, M. K., Ghosh, S., Pathak, A., Athulya, R., Mujumdar, M., Murtugudde, R., ... & Rajeevan, M. (2017). A threefold rise in widespread extreme rain events over central India. *Nature communications*, 8(1), 1-11. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00744-9>
- Ruml, M., Gregorić, E., Vujadinović, M., Radovanović, S., Matović, G., Vuković, A., ... & Stojičić, D. (2017). Observed changes of temperature extremes in Serbia over the period 1961– 2010. *Atmospheric Research*, 183, 26-41. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.08.013>
- Salzmann, M. (2016). Global warming without global mean precipitation increase?. *Science advances*, 2(6), e1501572. DOI: 10.1126/sciadv.1501572
- Samuels, R., Hochman, A., Baharad, A., Givati, A., Levi, Y., Yosef, Y., ... & Alpert, P. (2018). Evaluation and projection of extreme precipitation indices in the Eastern Mediterranean based on CMIP5 multi-model ensemble. *International Journal of Climatology*, 38(5), 2280-2297. <https://doi.org/10.1002/joc.5334>
- Sánchez-Arcilla, A., Mössö, C., Sierra, J. P., Mestres, M., Harzallah, A., Senouci, M., & El Raey, M. (2011). Climatic drivers of potential hazards in Mediterranean coasts. *Regional Environmental Change*, 11, 617-636. <https://doi.org/10.1007/s10113-010-0193-6>
- Santos, E. B., Lucio, P. S., & Santos e Silva, C. M. (2016). Estimating return periods for daily precipitation extreme events over the Brazilian Amazon. *Theoretical and applied climatology*, 126, 585-595. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1605-9>
- Sarricolea, P., Meseguer-Ruiz, Ó., Serrano-Notivoli, R., Soto, M. V., & Martin-Vide, J. (2019). Trends of daily precipitation concentration in Central-Southern Chile. *Atmospheric research*, 215, 85-98. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.09.005>

- Schilling, J., Freier, K. P., Hertig, E., & Scheffran, J. (2012). Climate change, vulnerability and adaptation in North Africa with focus on Morocco. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 156, 12-26. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.04.021>
- Scoccimarro, E., Gualdi, S., Bellucci, A., Zampieri, M., & Navarra, A. (2013). Heavy precipitation events in a warmer climate: Results from CMIP5 models. *Journal of Climate*, 26, 7902–7911. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00850.1>
- Seker, M., & Gumus, V. (2022). Projection of temperature and precipitation in the Mediterranean region through multi-model ensemble from CMIP6. *Atmospheric Research*, 280, 106440. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106440>
- Şen, Z. (1998). Average areal precipitation by percentage weighted polygon method. *Journal of Hydrologic Engineering*, 3(1), 69-72. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(1998\)3:1\(69\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(1998)3:1(69))
- Şen, Z. (2017). Hydrological trend analysis with innovative and over-whitening procedures. *Hydrological Sciences Journal*, 62(2), 294-305. <https://doi.org/10.1080/02626667.2016.1222533>
- Şen, Z. (2022). Over-whitening or Pre-whitening in Hydro-climatological Trend Analysis?. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1183199/v1>
- Seneviratne, S. I., & Hauser, M. (2020). Regional climate sensitivity of climate extremes in CMIP6 versus CMIP5 multimodel ensembles. *Earth's Future*, 8(9), e2019EF001474. <https://doi.org/10.1029/2019EF001474>
- Seneviratne, S. I., Zhang, X., Adnan, M., Badi, W., Dereczynski, C., Di Luca, A., ... & Zhou, B. (2021). Weather and climate extreme events in a changing climate (Chapter 11). Doi: [10.1017/9781009157896.013](https://doi.org/10.1017/9781009157896.013).
- Serinaldi, F., & Kilsby, C. G. (2016). The importance of prewhitening in change point analysis under persistence. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 30, 763-777. <https://doi.org/10.1007/s00477-015-1041-5>
- Serrano-Notivoli, R., & Tejedor, E. (2021). From rain to data: A review of the creation of monthly and daily station-based gridded precipitation datasets. *Wiley Interdisciplinary Reviews : Water*, 8(6), e1555. <https://doi.org/10.1002/wat2.1555>
- Serrano-Notivoli, R., Beguería, S., Saz, M. Á., & De Luis, M. (2018). Recent trends reveal decreasing intensity of daily precipitation in Spain. *International Journal of Climatology*, 38(11), 4211-4224. <https://doi.org/10.1002/joc.5562>
- Serrano-Notivoli, R., de Luis, M., & Beguería, S. (2017). An R package for daily precipitation climate series reconstruction. *Environmental Modelling & Software*, 89, 190-195. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.11.005>
- Serrano-Notivoli, R., de Luis, M., Saz, M. Á., & Beguería, S. (2017). Spatially based reconstruction of daily precipitation instrumental data series. *Climate Research*, 73(3), 167-186. <https://doi.org/10.3354/cr01476>
- Shahid, S., Wang, X. J., & Harun, S. (2014). Unidirectional trends in rainfall and temperature of Bangladesh. *IAHS-Aish Proceedings and Reports*, 363, 177-182.
- Shao, Q., Li, Z., & Xu, Z. (2010). Trend detection in hydrological time series by segment regression with application to Shiyang River Basin. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 24, 221-233. <https://doi.org/10.1007/s00477-009-0312-4>
- Shaw, T. A., Baldwin, M., Barnes, E. A., Caballero, R., Garfinkel, C. I., Hwang, Y. T., ... & Voigt, A. (2016). Storm track processes and the opposing influences of climate change. *Nature Geoscience*, 9(9), 656-664. <https://doi.org/10.1038/ngeo2783>
- Shen, X., Liu, B., & Lu, X. (2018). Weak cooling of cold extremes versus continued warming of hot extremes in China during the recent global surface warming hiatus. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(8), 4073-4087. <https://doi.org/10.1002/2017JD027819>
- Shephard, M. W., Mekis, E., Morris, R. J., Feng, Y., Zhang, X., Kilcup, K., & Fleetwood, R. (2014). Trends in Canadian short-duration extreme rainfall: Including an intensity–duration–frequency perspective. *Atmosphere-Ocean*, 52(5), 398-417. <https://doi.org/10.1080/07055900.2014.969677>

- Sillmann J, Kharin VV, Zwiers FW, Zhang X, Bronaugh D (2013) Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: part 2. Future climate projections. *J Geophys Res Atmos* 118:2473–2493. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50188>
- Sillmann, J., Kharin, V. V., Zhang, X., Zwiers, F. W., & Bronaugh, D. (2013). Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 1. Model evaluation in the present climate. *Journal of geophysical research: atmospheres*, 118(4), 1716-1733. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50203>
- Siswanto, Van Oldenborgh, G. J., Van Der Schrier, G., Lenderink, G., & Van Den Hurk, B. (2015). 26. TRENDS IN HIGH-DAILY PRECIPITATION EVENTS IN JAKARTA AND THE FLOODING OF JANUARY 2014. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(12), S131-S135. Doi: [10.1175/bams-d-15-00128.1](https://doi.org/10.1175/bams-d-15-00128.1).
- Skamarock, W. C., & Klemp, J. B. (2008). A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications. *Journal of computational physics*, 227(7), 3465-3485. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2007.01.037>.
- Skansi, M. D. L. M., Brunet, M., Sigró, J., Aguilar, E., Arevalo Groening, J. A., Bentancur, O. J., ... & Jones, P. D. (2013). Warming and wetting signals emerging from analysis of changes in climate extreme indices over South America. *Global and Planetary Change*, 100, 295-307. Doi: [10.1016/j.gloplacha.2012.11.004](https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.11.004).
- Solomon, S. (Ed.). (2007). *Climate change 2007-the physical science basis: Working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC* (Vol. 4). Cambridge university press. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ar4_wg1_full_report-1.pdf
- Spinoni, J., Barbosa, P., Buchignani, E., Cassano, J., Cavazos, T., Christensen, J. H., ... & Dosio, A. (2020). Future global meteorological drought hot spots: a study based on CORDEX data. *Journal of Climate*, 33(9), 3635-3661. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0084.1>
- Spinoni, J., Naumann, G., Vogt, J. V., & Barbosa, P. (2015). The biggest drought events in Europe from 1950 to 2012. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 3, 509-524. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.01.001>
- Storch H von Navarra A 1995 Analysis of Climate Variability, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 334p.
- Sun, Q., Zhang, X., Zwiers, F., Westra, S., & Alexander, L. V. (2021). A global, continental, and regional analysis of changes in extreme precipitation. *Journal of Climate*, 34(1), 243-258. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0892.1>
- Sun, Y., Solomon, S., Dai, A., & Portmann, R. W. (2007). How often will it rain? *Journal of Climate*, 20(19), 4801–4818. <https://doi.org/10.1175/JCLI4263.1>
- Sunyer, M. A., Huntecha, Y., Lawrence, D., Madsen, H., Willems, P., Martinkova, M., ... & Yücel, I. (2015). Inter-comparison of statistical downscaling methods for projection of extreme precipitation in Europe. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(4), 1827-1847. <https://doi.org/10.5194/hess-19-1827-2015>
- Su-Ping, N., Yong, L., Wei-Ping, L., Tong-Wen, W., Xue-Li, S., & Zai-Zhi, W. (2012). Quality control and analysis of global gauge-based daily precipitation dataset from 1980 to 2009. *Advances in Climate Change Research*, 3(1), 45-53. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1248.2012.00045>
- Svensson, C., Kundzewicz, W. Z., & Maurer, T. (2005). Trend detection in river flow series: 2. Flood and low-flow index series/Détection de tendance dans des séries de débit fluvial: 2. Séries d'indices de crue et d'étiage. *Hydrological Sciences Journal*, 50(5). <https://doi.org/10.1623/hysj.2005.50.5.811>
- Tabari, H., Madani, K., & Willem, P. (2020). The contribution of anthropogenic influence to more anomalous extreme precipitation in Europe. *Environmental Research Letters*, 15(10), 104077. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abb268>
- Taibi, S., Feddal, M. A., Meddi, M., & Mahé, G. (2017). Etat de la variabilité pluviométrique du nord de l'Algérie entre 1936 et 2016: un retour vers la normale. In *7e conférence, Ressources en Eau & Changement Climatique «Impacts Anthropiques et Climatiques sur la Variabilité des Ressources en Eau»*. Hammamet (Vol. 2, No. 3).

- Taïbi, S., Zeroual, A. & Meddi, M. (2022) Effect of autocorrelation on temporal trends in air-temperature in Northern Algeria and links with teleconnections patterns. *Theor Appl Climatol* 147, 959–984. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03862-z>
- Tao, Y., Wang, W., Song, S., & Ma, J. (2018). Spatial and temporal variations of precipitation extremes and seasonality over China from 1961–2013. *Water*, 10(6), 719. <https://doi.org/10.3390/w10060719>
- Thrasher, B., Maurer, E. P., McKellar, C., & Duffy, P. B. (2012). Bias correcting climate model simulated daily temperature extremes with quantile mapping. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(9), 3309–3314. <https://doi.org/10.5194/hess-16-3309-2012>
- Thrasher, B., Wang, W., Michaelis, A., Melton, F., Lee, T., & Nemani, R. (2022). NASA global daily downscaled projections, CMIP6. *Scientific data*, 9(1), 262. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01393-4>
- Timofeev, A. A., & Sterin, A. M. (2010). Using the quantile regression method to analyze changes in climate characteristics. *Russian Meteorology and Hydrology*, 35(5), 310–319. <https://doi.org/10.3103/S106837391005002X>
- Tippett, M. K., Allen, J. T., Gensini, V. A., & Brooks, H. E. (2015). Climate and hazardous convective weather. *Current Climate Change Reports*, 1, 60–73. <https://doi.org/10.1007/s40641-015-0006-6>
- Todaro, V., D’Oria, M., Secci, D., Zanini, A., & Tanda, M. G. (2022). Climate change over the Mediterranean region: Local temperature and precipitation variations at five pilot sites. *Water*, 14(16), 2499. <https://doi.org/10.3390/w14162499>
- Toreti, A., Naveau, P., Zampieri, M., Schindler, A., Scoccimarro, E., Xoplaki, E., Dijkstra, H. A., Gualdi, S., & Luterbacher, J. (2013). Projections of global changes in precipitation extremes from coupled model Intercomparison project phase 5 models. *Geophysical Research Letters*, 40, 4887–4892. <https://doi.org/10.1002/grl.5094>
- Touati, Bouzid. (2010) Les Barrages et la Politique Hydraulique en Algérie: état, Diagnostic et Perspectives d’un Aménagement Durable. Ph.D. Thèse, Université de *Mentouri*–Constantine, Algérie.
- Touma, D., Ashfaq, M., Nayak, M. A., Kao, S. C., & Diffenbaugh, N. S. (2015). A multi-model and multi-index evaluation of drought characteristics in the 21st century. *Journal of Hydrology*, 526, 196–207. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.12.011>
- Tramblay, Y., & Somot, S. (2018). Future evolution of extreme precipitation in the Mediterranean. *Climatic Change*, 151(2), 289–302. <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2300-5>
- Trapp, R. J., Robinson, E. D., Baldwin, M. E., Diffenbaugh, N. S., & Schwedler, B. R. (2011). Regional climate of hazardous convective weather through high-resolution dynamical downscaling. *Climate dynamics*, 37, 677–688. <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0826-y>
- Trenberth, K. E., Dai, A., Rasmussen, R. M., & Parsons, D. B. (2003). The changing character of precipitation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 84, 1205–1218. <https://doi.org/10.1175/BAMS-84-9-1>
- Treppiedi, D., Cipolla, G., Francipane, A., & Noto, L. V. (2021). Detecting precipitation trend using a multiscale approach based on quantile regression over a Mediterranean area. *International Journal of Climatology*, 41(13), 5938–5955. <https://doi.org/10.1002/joc.7161>
- Trigo, R., Xoplaki, E., Zorita, E., Luterbacher, J., Krichak, S. O., Alpert, P., ... & Mariotti, A. (2006). Relations between variability in the Mediterranean region and mid-latitude variability. In *Developments in Earth and Environmental Sciences* (Vol. 4, pp. 179–226). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S1571-9197\(06\)80006-6](https://doi.org/10.1016/S1571-9197(06)80006-6)
- Türkeş, M. and Erlat, E. (2005) Climatological responses of winter precipitation in Turkey to variability of the North Atlantic Oscillation during the period 1930–2001. *Theoretical and Applied Climatology*, 81, 45–69. <https://doi.org/10.1007/s00704-004-0084-1>
- Vallebona, C., Pellegrino, E., Frumento, P., & Bonari, E. (2015). Temporal trends in extreme rainfall intensity and erosivity in the Mediterranean region: a case study in southern Tuscany, Italy. *Climatic Change*, 128(1), 139–151. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1287-9>

- Valverde, M. C., & Marengo, J. A. (2014). Extreme Rainfall Indices in the Hydrographic Basins of Brazil. *Open Journal of Modern Hydrology*, 4(1), 10–26, Doi: [10.4236/ojmh.2014.41002](https://doi.org/10.4236/ojmh.2014.41002).
- Van den Besselaar, E. J. M., Klein Tank, A. M. G., & Buishand, T. A. (2013). Trends in European precipitation extremes over 1951–2010. *International Journal of Climatology*, 33(12), 2682–2689. <https://doi.org/10.1002/joc.3619>
- Varouchakis, E. A., Corzo, G. A., Karatzas, G. P., & Kotsopoulou, A. (2018). Spatio-temporal analysis of annual rainfall in Crete, Greece. *Acta Geophysica*, 66, 319–328. <https://doi.org/10.1007/s11600-018-0128-z>
- Vautard, R., Kadyrov, N., Iles, C., Boberg, F., Buonomo, E., Bülow, K., ... & Wulfmeyer, V. (2021). Evaluation of the large EURO-CORDEX regional climate model ensemble. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(17), e2019JD032344. <https://doi.org/10.1029/2019JD032344>
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., López-Moreno, J. I., El Kenawy, A. M., & Angulo-Martínez, M. (2009). Daily atmospheric circulation events and extreme precipitation risk in northeast Spain: Role of the North Atlantic Oscillation, the Western Mediterranean Oscillation, and the Mediterranean Oscillation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D8). <https://doi.org/10.1029/2008JD011492>.
- Vicente-Serrano, S. M., Domínguez-Castro, F., Murphy, C., Hannaford, J., Reig, F., Peña-Angulo, D., ... & El Kenawy, A. (2021). Long-term variability and trends in meteorological droughts in Western Europe (1851–2018). *International journal of climatology*, 41, E690–E717. <https://doi.org/10.1002/joc.6719>
- Vicente-Serrano, S. M., McVicar, T. R., Miralles, D. G., Yang, Y., & Tomas-Burguera, M. (2020). Unraveling the influence of atmospheric evaporative demand on drought and its response to climate change. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 11(2), e632. <https://doi.org/10.1002/wcc.632>
- Villarini, G., Smith, J. A., & Vecchi, G. A. (2013). Changing frequency of heavy rainfall over the central United States. *Journal of Climate*, 26(1), 351–357. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00043.1>
- Vincent, L. A., Zhang, X., Mekis, É., Wan, H., & Bush, E. J. (2018). Changes in Canada's climate: Trends in indices based on daily temperature and precipitation data. *Atmosphere-Ocean*, 56(5), 332–349. <https://doi.org/10.1080/07055900.2018.1514579>
- Vogel, J., Paton, E., Aich, V., & Bronstert, A. (2021). Increasing compound warm spells and droughts in the Mediterranean Basin. *Weather and Climate Extremes*, 32, 100312. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100312>
- Von Storch V (1995) Misuses of statistical analysis in climate research, In: Analysis of Climate Variability: Applications of Statistical Techniques. In: Navarra A (ed) von Storch V. Springer- Verlag, Berlin, pp 11–26.
- Walker, G. T., & Bliss, E. W. (1932). 1932: World weather V. *Memoirs of the Royal Meteorological Society*, 4, 53–84.
- Wan, H., Zhang, X., Zwiers, F. W., & Shiogama, H. (2013). Effect of data coverage on the estimation of mean and variability of precipitation at global and regional scales. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(2), 534–546. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50118>
- Wang, G., Wang, D., Trenberth, K. E., Erfanian, A., Yu, M., Bosilovich, M. G., & Parr, D. T. (2017). The peak structure and future changes of the relationships between extreme precipitation and temperature. *Nature Climate Change*, 7(4), 268–274. <https://doi.org/10.1038/nclimate3239>
- Wang, S., Zhang, M., Sun, M., Wang, B., & Li, X. (2013). Changes in precipitation extremes in alpine areas of the Chinese Tianshan Mountains, central Asia, 1961–2011. *Quaternary International*, 311, 97–107. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2013.07.008>
- Wen, X., Wu, X., & Gao, M. (2017). Spatiotemporal variability of temperature and precipitation in Gansu Province (Northwest China) during 1951–2015. *Atmospheric Research*, 197, 132–149. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.07.001>
- Wernberg, T., Smale, D., Tuya, F., Thomsen, M. S., Langlois, T. J., de Bettignies, T., Bennett, S., & Rousseaux, C. S. (2013). An extreme climatic event alters marine ecosystem structure in a global biodiversity hotspot. *Nature Climate Change*, 3, 78–82. <https://doi.org/10.1038/nclimate1627>

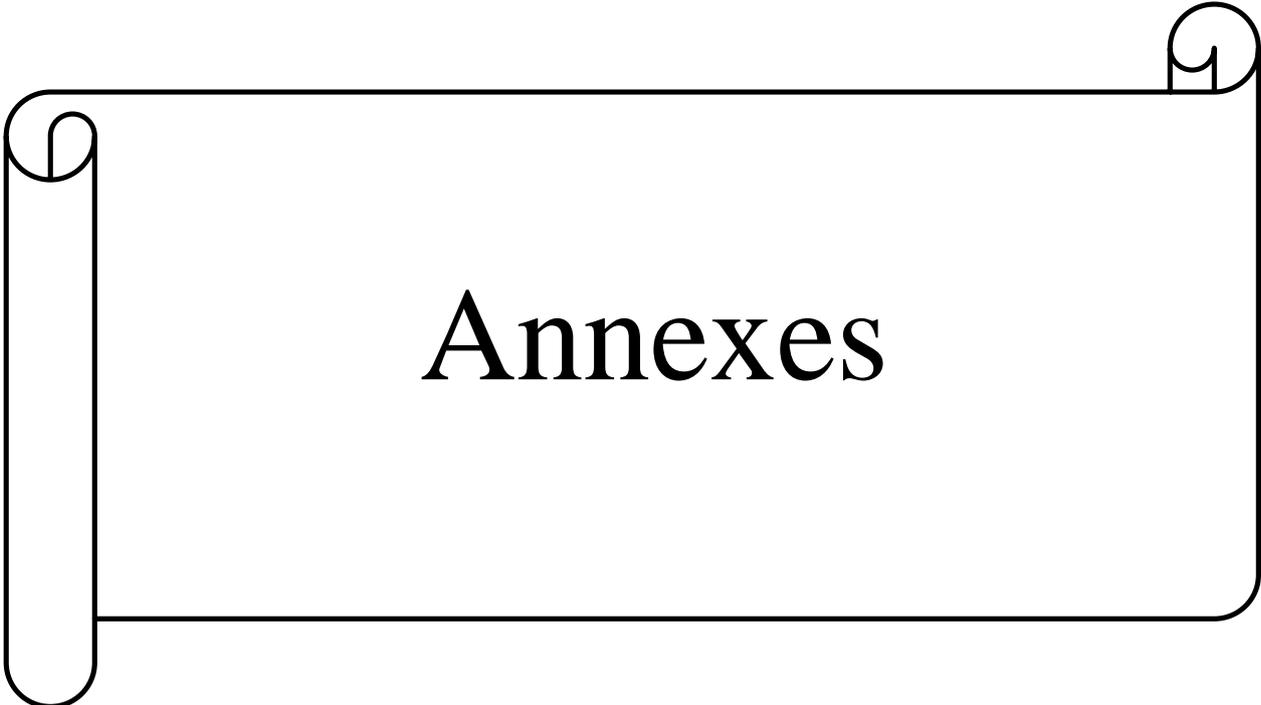
- Westra, S., Alexander, L. V., & Zwiers, F. W. (2013). Global increasing trends in annual maximum daily precipitation. *Journal of climate*, 26(11), 3904-3918. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00502.1>
- Westra, S., Fowler, H. J., Evans, J. P., Alexander, L. V., Berg, P., Johnson, F., Kendon, E. J., Lenderink, G., & Roberts, N. M. (2014). Future changes to the intensity and frequency of short-duration extreme rainfall. *Reviews of Geophysics*, 52, 522–555. <https://doi.org/10.1002/2014RG000464>
- Wood, A. W., Leung, L. R., Sridhar, V., & Lettenmaier, D. P. (2004). Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model outputs. *Climatic change*, 62, 189-216. <https://doi.org/10.1023/B:CLIM.0000013685.99609.9e>
- Wood, A. W., Maurer, E. P., Kumar, A., & Lettenmaier, D. P. (2002). Long-range experimental hydrologic forecasting for the eastern United States. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107(D20), ACL-6. <https://doi.org/10.1029/2001JD000659>
- Wu, S. Y. (2015). Changing characteristics of precipitation for the contiguous United States. *Climatic Change*, 132, 677-692. <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1453-8>
- Wu, Y., & Polvani, L. M. (2017). Recent trends in extreme precipitation and temperature over southeastern South America: The dominant role of stratospheric ozone depletion in the CESM Large Ensemble. *Journal of Climate*, 30(16), 6433-6441. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0124.1>
- Xie, Y., Liu, S., Huang, S., Fang, H., Ding, M., Huang, C., & Shen, T. (2022). Local trend analysis method of hydrological time series based on piecewise linear representation and hypothesis test. *Journal of Cleaner Production*, 339, 130695. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130695>
- Xoplaki, E., Trigo, R. M., García-Herrera, R., Barriopedro, D., D'andrea, F., Fischer, E. M., ... & Ziv, B. (2012). Large-scale atmospheric circulation driving extreme climate events in the Mediterranean and related impacts (chapitre 6). *The climate of the Mediterranean region*, 347-417. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-416042-2.00006-9>.
- Xu, L., Chen, N., & Zhang, X. (2019). Global drought trends under 1.5 and 2°C warming. *International Journal of Climatology*, 39(4), 2375–2385. <https://doi.org/10.1002/joc.5958>
- Yue, S., & Pilon, P. (2004). A comparison of the power of the t test, Mann-Kendall and bootstrap tests for trend detection/Une comparaison de la puissance des tests t de Student, de Mann-Kendall et du bootstrap pour la détection de tendance. *Hydrological Sciences Journal*, 49(1), 21-37. <https://doi.org/10.1623/hysj.49.1.21.53996>
- 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(3), 201-218. <https://doi.org/10.1023/B:WARM.0000043140.61082.60>
- Yue, S., & Wang, C. Y. (2002). Applicability of prewhitening to eliminate the influence of serial correlation on the Mann-Kendall test. *Water resources research*, 38(6), 4-1. <https://doi.org/10.1029/2001WR000861>
- Yue, S., Pilon, P., & Cavadias, G. (2002a). Power of the Mann–Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. *Journal of hydrology*, 259(1-4), 254-271. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00594-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00594-7)
- Yue, S., Pilon, P., Phinney, B., & Cavadias, G. (2002). The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. *Hydrological processes*, 16(9), 1807-1829. <https://doi.org/10.1002/hyp.1095>
- Zamani, R., Mirabbasi, R., Abdollahi, S., & Jhajharia, D. (2017). Streamflow trend analysis by considering autocorrelation structure, long-term persistence, and Hurst coefficient in a semi-arid region of Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 129, 33-45. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1747-4>
- Zandonadi, L., Acquaotta, F., Fratianni, S., & Zavattini, J. A. (2016). Changes in precipitation extremes in Brazil (Paraná River basin). *Theoretical and applied climatology*, 123, 741-756. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1391-4>

- Zazulie, N., Rusticucci, M., & Solomon, S. (2010). Changes in climate at high southern latitudes: a unique daily record at Orcadas spanning 1903–2008. *Journal of Climate*, 23(1), 189-196. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI3074.1>
- Zeroual, A., Assani, A. A., & Meddi, M. (2017). Combined analysis of temperature and rainfall variability as they relate to climate indices in Northern Algeria over the 1972–2013 period. *Hydrology Research*, 48(2), 584-595. <https://doi.org/10.2166/nh.2016.244>
- Zeroual, A., Assani, A. A., Meddi, H., Bouabdelli, S., Zeroual, S., & Alkama, R. (2020). Assessment of projected precipitations and temperatures change signals over Algeria based on regional climate model: RCA4 simulations. *Water Resources in Algeria-Part I: Assessment of Surface and Groundwater Resources*, 135-159. https://doi.org/10.1007/698_2020_526
- 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(1-2), 227-243. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4128-0>
- Zhang X, Alexander L, Hegerl G, Jones P and others (2011) Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *WIREs Clim Chang* 2: 851–870. <https://doi.org/10.1002/wcc.147>
- Zhang, Q., Xu, C. Y., Zhang, Z., Chen, Y. D., & Liu, C. L. (2009). Spatial and temporal variability of precipitation over China, 1951–2005. *Theoretical and Applied Climatology*, 95, 53-68. <https://doi.org/10.1007/s00704-007-0375-4>
- Zhang, W., & Zhou, T. (2019). Significant increases in extreme precipitation and the associations with global warming over the global land monsoon regions. *Journal of Climate*, 32(24), 8465-8488. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0662.1>
- Zhang, X., & Yang, F. (2004). RCLimDex (1.0) user manual. *Climate Research Branch Environment Canada*, 22, 13-14.
- Zhang, X., Alexander, L., Hegerl, G. C., Jones, P., Tank, A. K., Peterson, T. C., ... & Zwiers, F. W. (2011). Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2(6), 851-870. <https://doi.org/10.1002/wcc.147>
- Zhang, X., Harvey, K. D., Hogg, W. D., & Yuzyk, T. R. (2001). Trends in Canadian streamflow. *Water Resources Research*, 37(4), 987-998. <https://doi.org/10.1029/2000WR900357>
- Zhang, X., Zwiers, F. W., Li, G., Wan, H., & Cannon, A. J. (2017). Complexity in estimating past and future extreme short-duration rainfall. *Nature Geoscience*, 10(4), 255-259. <https://doi.org/10.1038/ngeo2911>
- Zhang, Z., Dehoff, A. D., Pody, R. D., & Balay, J. W. (2010). Detection of streamflow change in the Susquehanna River Basin. *Water resources management*, 24, 1947-1964. <https://doi.org/10.1007/s11269-009-9532-0>
- Zhao, L., Li, L., Li, Y., Yang, P., Liu, X., Zhou, Z., ... & Ding, Y. (2024). Global extreme precipitation characteristics: the perspective of climate and large river basins. *Climate Dynamics*, 62(2), 1013-1030. <https://doi.org/10.1007/s00382-023-06961-x>
- Zheng, X., Ma, Q., Wang, Y., Wang, X., Zhang, X., & Luan, Q. (2022). Assessing Impact of Temperature Variability of Climate Change on Mortality Based on Multiple GCM Projections in China. *Atmosphere*, 13(11), 1775. <https://doi.org/10.3390/atmos13111775>
- Zittis, G., Hadjinicolaou, P., Klangidou, M., Proestos, Y., & Lelieveld, J. (2019). A multi-model, multi-scenario, and multi-domain analysis of regional climate projections for the Mediterranean. *Regional Environmental Change*, 19(8), 2621-2635. <https://doi.org/10.1007/s10113-019-01565-w>
- Zobel, Z., Wang, J., Wuebbles, D. J., & Kotamarthi, V. R. (2018). Analyses for high-resolution projections through the end of the 21st century for precipitation extremes over the United States. *Earth's Future*, 6(10), 1471–1490. <https://doi.org/10.1029/2018EF000956>

Zollo, A. L., Rillo, V., Bucchignani, E., Montesarchio, M., & Mercogliano, P. (2016). Extreme temperature and precipitation events over Italy: assessment of high-resolution simulations with COSMO-CLM and future scenarios. *International Journal of Climatology*, 36(2), 987-1004. <https://doi.org/10.1002/joc.4401>

Zume, J. T., & Tarhule, A. (2006). Precipitation and streamflow variability in northwestern Oklahoma, 1894-2003. *Physical Geography*, 27(3), 189-205. <https://doi.org/10.2747/0272-3646.27.3.189>

Zwiers FW, Alexander LV, Hegerl GC, Knutson TR and others (2013) Climate extremes: challenges in estimating and understanding recent changes in the frequency and intensity of extreme climate and weather events. In: Asrar GR, Hurrell JW (eds) *Climate science for serving society*. Springer, Dordrecht, p 339–389 https://doi.org/10.1007/978-94-007-6692-1_13



Annexes

Annexe 1:

<https://drive.google.com/file/d/1DRnoSfXNyDN1DOh7oI5A8t6GwgeTRSDs/view?usp=sharing>