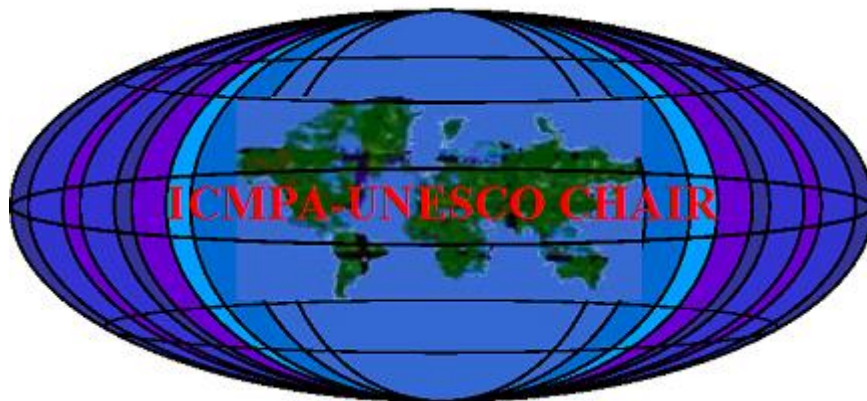


Variabilités climatiques et dynamiques des événements hydrométéorologiques dans le bassin béninois du fleuve Niger



Chaire Internationale en Physique Mathématique et Applications
(CIPMA - Chaire UNESCO)

072 B.P. : 50 Cotonou, Rép. du Bénin.

DOCTORAT DE L'UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI
Hydrologie et Gestion Intégrées des Ressources en Eau (HGIRE)

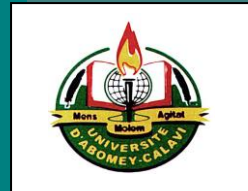
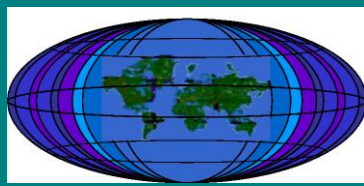
Présenté par

YAROU Halissou

Sous la Direction de :

Dr. ALAMOU Adéchina Eric

Université d'Abomey-Calavi (UAC)
Cotonou, République du Bénin



Université d'Abomey-Calavi (UAC), BENIN
Faculté des Sciences et Techniques (FAST)
Chaire Internationale en Physique Mathématique et Applications
(CIPMA - Chaire UNESCO)

Ph.D N°...../PhD/CIPMA/UAC/2021

**Variabilités climatiques et dynamiques des évènements
hydrométéorologiques dans le bassin béninois du fleuve
Niger**

Thèse de Doctorat
En
Hydrologie et Gestion Intégrée des Ressources en Eau

Présentée et Soutenue Publiquement le 15/11/2021 par

YAROU Halissou

Jury:

Président : M. VISSIN W. Expédit, Professeur Titulaire, Université d'Abomey-Calavi (Bénin)

Examineur : M. AMOUSSOU Ernest, Professeur Titulaire, Université de Parakou (Bénin)

Rapporteurs :

M. KOUASSI Kouakou Lazare, Professeur Titulaire, Université Jean Lorougnon Guédé (Côte d'Ivoire)

M. KAMAGATÉ Bamory, Professeur Titulaire, Université Nangui Abrogoua, Abidjan (Côte d'Ivoire)

Membre invité : M. AGBAHUNGBA A. Georges, Docteur Ingénieur, Université d'Abomey-Calavi (Bénin)

Directeur de thèse : M. Adéchina Eric ALAMOU, Maître de Conférences, Université des Sciences, Technologies, Ingénierie et Mathématiques d'Abomey (Bénin)

Cotonou, Rép. du Bénin, 15/11/2021

Permettez-moi de dédier cette recherche à mes parents (ISSA Fatouma et YAROU Ousmane), mon épouse (MANSA Rachidatou) et ma fille (YAROU Gnirinré Zeynab) afin qu'ils y trouvent satisfaction et reconnaissance pour leur amour, soutiens, abnégation et sacrifices.

Remerciements

Après avoir remercié le Créateur pour la santé et la force dont Il m'a gratifié au cours de ma vie, qu'il me soit permis d'exprimer mes reconnaissances et remerciements à un certain nombre de personnes qui grâce à leur assistance, conseils, encouragement et appui ont favorisé l'aboutissement à bien de cette œuvre.

Je commence par présenter ma profonde gratitude au superviseur de mon travail. Je nomme ici, Monsieur Adéchina Éric ALAMOU qui malgré son calendrier chargé a accepté l'aménager pour diriger mon travail. Cher professeur, je me souviens encore de la première fois que vous m'avez taquiné alors qu'on était à votre cours (hydrologie de surface) en disant ceci « *petit bariba, je suis ton roi* » et j'avais murmuré « *non, c'est moi le roi* », vous avez répliqué « *en bon ?* », j'avais répondu automatiquement « *non* » en ajoutant « *Dr vous serez l'encadreur de mon mémoire de licence* » et vous avez dit « *moi, encadrer un bariba, jamais* », on avait tous (vous, moi et les camarades d'amphi) rigolé. C'était en 2012, quand j'étais en première année de licence. En mai 2014, le Professeur Abel AFOUDA que je remercie au passage attribuait les encadreurs aux étudiants d'hydrologie quantitative selon leurs ambitions de recherche. Pépé (car c'est comme ça je l'appelle souvent) me dit : « *toi, contacte ALAMOU de ma part, tu vas travailler avec lui* ». Je n'étais ni étonné ni surpris, car je suis dirigé vers une personne qui voulait voir tout le monde réussir. Oui, qu'il me souviennent les moments où vous utilisez votre téléphone et vos unités pour contacter les enseignants pour nous. Par ma bouche, mes amis de formation vous disent un grand merci. En master, nos chemins se rencontrent une fois encore pour la rédaction de mon mémoire de master qui a bénéficié d'un appui financier de l'AAE. Aujourd'hui nous voici de nouveau où vous avez accepté diriger cette recherche. Cher professeur, vous avez tenu mes mains pour que j'empreinte les marches d'escaliers de l'hydrologie. Je ne saurai jamais vous remercier assez. A défaut, je prie le Créateur qu'il me donne la force de ne pas vous décevoir. Recevez ici, mes sincères remerciements pour vos conseils, votre disponibilité et vos apports scientifiques pour le présent travail et les précédents.

Ma reconnaissance va à l'endroit du Professeur Expédit VISSIN (Université d'Abomey-Calavi) pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de présider malgré ses occupations, le jury chargé d'amender ce travail depuis les points de thèse jusqu'à la soutenance.

Ma reconnaissance va également à l'endroit du Professeur Ernest AMOUSSOU (Université de Parakou) pour avoir accepté d'examiner mes travaux depuis les points de thèse jusqu'à la soutenance.

Je remercie sincèrement le professeur KOUASSI Kouakou Lazare (Université Jean Lorougnon Guédé, Côte d'Ivoire) et le professeur KAMAGATÉ Bamory (Université Nangui Abrogoua, Abidjan, Côte d'Ivoire) pour avoir accepté de rapporter chacun la présente thèse et m'avoir fait l'honneur de participer à mon jury de thèse malgré leurs calendriers assez chargés.

Toute ma gratitude va à l'endroit du Dr. Ir. Georges A. AGBAHUNGBA (Université d'Abomey-Calavi) et du professeur Ezinvi BALOÏTCHA, Secrétaire Scientifique de la CIPMA pour leur disponibilité, conseils et apports tout au long de ces travaux de recherches.

Toute ma reconnaissance va à l'endroit des corps enseignant et administratif de la CIPMA. Je remercie particulièrement le professeur Norbert Mahouton HOUNKONNOU, Titulaire de la Chaire Internationale en Physique Mathématique et Applications (CIPMA).

J'adresse également mes sincères remerciements au Docteur Ezéchiel OBADA, enseignant-chercheur à l'Université des Sciences Technologiques, de l'Ingénierie et des Mathématiques d'Abomey (USTIMA), qui a été d'un apport considérable pour rendre ce document beaucoup plus original grâce à ses conseils, encouragements et critiques scientifiques constructifs.

Je remercie particulièrement les Docteurs Eliezer BIAO, Josué Esdras ZANDAGBA, Félicien BADOU et Amédée CHABI, pour leurs apports moraux et scientifiques.

Je remercie également les corps enseignant et administratif de l'INE. Je remercie particulièrement le professeur Daouda MAMA, le professeur Emmanuel A. LAWIN, Mme. Marcelline OLOU, M. Yacoubou TOBOUREGUI.

Ma profonde gratitude va à l'endroit de ma mère Fatouma ISSA pour son soutien et ses multiples prières. Chère maman, je me souviens encore de l'année 2004 quand tu as remis tout ton capital au comptable du CEG Titirou pour que j'aie une place en classe de 6^{ème}. Venant d'un parent non instruit, c'était très étonnant. C'était la première histoire marquante de mon cursus.

Ma profonde gratitude va également à l'endroit de mon père Ousmane YAROU pour son soutien, ses conseils et ses multiples prières. Un homme génial sur qui je me pose toujours des questions tels que <<Où est-ce que cet homme puise son endurance et son espoir ?>>. En 2008, quand je me battais pour avoir mon BEPC (Brevet d'Etude du Premier Cycle), il dit parmi mes enfants, Halissou lui sera un docteur. C'était un soir dans la cours de la maison pendant qu'on suivait le journal télévisé comme dans l'ancien temps. Venant d'un père qui n'a jamais mis pied

à l'école et qui avait déjà 83 ans, ceci m'étonnait. Mais, c'était simple, on était sous le régime de son Excellence Dr Boni YAYI. Le titre Dr était entendu dans toutes les ruelles du Bénin.

Je dis un grand merci à tous mes frères, sœurs, beaux-frères et belles sœurs (Mouhamed YAROU et son épouse, Aïchatou YAROU et son mari, Sahadatou YAROU et son mari, Akiyou YAROU et ses épouses, Daniyalou YAROU et ses épouses, Nourou-Dine YAROU et son épouse, Zoubédadou YAROU et son mari et Zahanounou YAROU) pour leurs multiples soutiens et prières.

Un grand merci aux familles ABDOULAYE de Parakou et BAKARI de Kandi pour leurs conseils et prières.

Toute ma reconnaissance va à l'endroit de mon épouse Rachidatou Gnanki MANSA et de ma fille YAROU Gninré Zeynab pour leurs soutiens et sacrifices.

Je dis un sincère merci à M. OROU GANNI Moctar pour son soutien indéfectible. On n'est pas peut être d'un même parent mais tu es un frère. Une fois encore merci pour tout.

Un grand merci à Mme Marcelline OLOU, M. Yacoubou TOBOUREGUI, M. OROU PETE Salifou, M. Moutaka TRAORE, M. Bio GUIDA, M. Razack SABI ZINGUI, pour leurs conseils et encouragements.

Je dis également merci à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail et à tous les âmes qui y trouvent satisfaction.

Résumé

Dans ce contexte de changement climatique du XXI^{ème} siècle qui inquiète la communauté scientifique, cette recherche se donne comme principal objectif l'évaluation de la variabilité climatique et la dynamique des événements hydrométéorologiques dans le bassin béninois du fleuve Niger. L'atteinte de l'objectif susmentionné a nécessité la collecte et le traitement des données météorologiques et hydrologiques historiques et futures de deux modèles climatiques régionaux et un modèle hydrologique basé sur le principe des moindres actions.

Au nombre des résultats obtenus apparaît un grand changement noté au niveau des extrêmes de précipitations et de températures au cours de la période historique comme dans l'avenir. En fait, les hausses chronologiques des indices sur les précipitations totales et les nombres de jours pluvieux sont observées sur le bassin d'étude au cours de la période historique. Les températures extrêmes ont connu également de grands changements avec l'augmentation des indices d'intensité de température et des séquences sèches, ce qui a conduit le bassin à un réchauffement. Les tendances des indices SDI et SPI sont à la hausse au cours de la période historique. Ce qui traduit l'augmentation des écoulements dans les années passées créant ainsi la baisse des sécheresses météorologiques et hydrologiques sur le bassin.

Par ailleurs, pour le bassin béninois du fleuve Niger, les prévisions montrent, selon la moyenne des modèles climatiques régionaux HIRHAM et REMO, une tendance à la hausse des indices d'intensité des extrêmes de températures et de fréquence de chaleur jusqu'en 2080. Les précipitations pour leur part sont prévues à la hausse au cours de 2021-2050 et à la baisse au cours de 2051-2080 avec de fortes variations au sein de ces extrêmes durant les mêmes périodes. Ces variations de précipitations au cours des périodes futures entraîneront pour le bassin des sécheresses météorologiques légères avec des durées de sécheresses très longues et de faibles magnitudes par rapport à la période de référence. Les mêmes résultats sont prévus pour les sécheresses hydrologiques quand les données des MCRs employés dans l'étude sont utilisées en entrée pour le modèle hydrologique ModHyPMA sur les cours d'eau du bassin. Dans l'ensemble des stations hydrologiques on observera de faibles risques de sécheresse. Par ailleurs, les changements observés sont seulement significatifs au test t de Student à un degré de confiance de 95% pour les indices TXx, WSDI, RX1day, RX5day et CDD.

Ces événements hydroclimatiques prévus pour le futur sur le bassin béninois du fleuve Niger nécessitent de la part de tous (décideurs, artisans, scientifiques...) de réflexions très approfondies.

Mots clés : précipitations extrêmes, températures extrêmes, sécheresse, bassin béninois du fleuve Niger

Abstract

In this context of 21st century climate change which worries the scientific community, this research has as its main objective the evaluation of climate variability and the dynamics of hydrometeorological events in the Benin basin of the Niger River. Achieving the above objective required the collection and processing of historical and future meteorological and hydrological data from two regional climate models and one hydrological model based on the principle of least actions.

Among the results obtained is a great change noted in the level of precipitation and temperature extremes during the historical period as well as in the future. In fact, the chronological increases in the indices of total precipitation and the number of rainy days are observed in the study basin during the historical period. Extreme temperatures also experienced big changes with increasing temperature intensity indices and dry spells, which led to the basin warming. The trends of the SDI and SPI indices are on the rise during the historical period. This reflects the increase in flows in past years, thus creating a decrease in meteorological and hydrological droughts in the basin.

In addition, for the Beninese Niger River basin, forecasts show, according to the average of the regional climate models HIRHAM and REMO, an upward trend in the intensity indices of temperature extremes and heat frequency until 2080. Precipitation for its part is forecast to increase during 2021-2050 and decrease during 2051-2080 with large variations within these extremes during the same periods. These variations in precipitation over future periods will lead to mild meteorological droughts for the basin with very long drought durations and low magnitudes compared to the reference period. The same results are expected for hydrological droughts when the data from the RCMs used in the study are used as input for the hydrological model ModHyPMA on the rivers of the basin. All the hydrological stations will show a low risk of drought. Furthermore, the changes observed are only significant on Student's t test at a 95% confidence level for the TXx, WSDI, RX1day, RX5day and CDD indices.

These hydroclimatic events planned for the future in the Benin basin of the Niger River require very in-depth reflections on the part of all (decision-makers, craftsmen, scientists, etc.).

Keywords: extreme rainfall, extreme temperatures, drought, Beninese basin of the Niger river

Table des matières

<i>Remerciements</i>	<i>ii</i>
<i>Résumé</i>	<i>v</i>
<i>Abstract</i>	<i>vi</i>
<i>Table des matières</i>	<i>vii</i>
<i>Liste des figures</i>	<i>xii</i>
<i>Liste des tableaux</i>	<i>xvii</i>
<i>Liste des sigles et acronymes</i>	<i>xviii</i>
INTRODUCTION GENERALE	1
PREMIERE PARTIE : GENERALITES	
CHAPITRE 1 : CADRE D'ETUDE	6
1.1. Milieu physique	6
1.1.1. Présentation du bassin béninois du fleuve Niger	6
1.1.2. Relief et réseau hydrographique	7
1.1.3. Formations pédologiques et géologiques	9
1.1.4. Végétation et couverture du sol	10
1.1.5. Pluviométrie du bassin béninois du fleuve Niger	11
1.1.6. Température du bassin béninois du fleuve Niger.....	13
1.2. Milieu socio-économique	14
1.2.1. Découpage administratif	14
1.2.2. Démographie	14
1.2.3. Groupes socio-culturels.....	14
1.2.4. Activités économiques	15
1.2.5. Accès à l'eau des populations du bassin béninois du fleuve Niger	16
CHAPITRE 2 : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	19
2. 1. Extrêmes hydrométéorologiques	19
2.1. 1. Extrêmes de précipitation	19
2.1.2. Extrêmes de température.....	20
2.2. Sécheresses	22

2.3. Modélisation pluie-débit.....	24
<i>DEUXIEME PARTIE : MATERIEL ET METHODES</i>	
<i>CHAPITRE 3 : MATERIEL</i>	28
3.1. Données observées	28
3.1.1. Données de précipitations	28
3.1.2. Données de températures	28
3.1.3. Données de débits	28
3.2. Données des modèles climatiques	29
<i>CHAPITRE 4 : METHODES</i>	31
4.1. Détermination de la variabilité climatique du bassin béninois du fleuve Niger.....	31
4.2. Caractérisation des variabilités climatiques extrêmes du bassin béninois du fleuve Niger	32
4.2.1. Indice de température.....	32
4.2.2. Estimation des seuils et période de base pour le calcul des indices de températures	33
4.2.3. Indice de précipitation extrême.....	34
4.2.4. Indice de Précipitation Normalisé (SPI)	35
4.2.5. Evaluation de la tendance	38
4.2.6. Evaluation des changements	39
4.3. Analyse de l'évolution des extrêmes hydrologiques du bassin béninois du fleuve Niger	40
4.3.1. Analyse fréquentielle hydropluviométrique.....	40
4.3.1.1. Loi GEV (Generalized Extremes Values)	40
4.3.1.2. Loi Gumbel	40
4.3.2. Analyse de la sécheresse hydrologique (Sécheresse d'Écoulement Normalisé (SDI))	41
4.4. Traitement et analyse des données	42
4.4.1. Qualité des données observées.....	42
4.4.2. Correction des biais des paramètres climatiques utilisés.....	43
4.4.3. Calcul de l'ETP	43
4.4.4. Description du modèle choisi pour l'estimation des débits (<i>ModHyPMA</i>)	45

<i>TROISIEME PARTIE: RESULTATS ET DISCUSSION.....</i>	
<i>CHAPITRE 5 : ANALYSE DE LA VARIABILITE HYDROCLIMATIQUE.....</i>	<i>47</i>
5.1. Variabilité de la température	47
5.2. Variabilité de la pluviométrie	48
5.3. Stationnarité des variables d’ETP.....	48
5.4. Stationnarité des variables de débits.....	49
5.5. Analyses et traitements des données issues des modèles climatiques.....	50
5.5.1. Analyse des performances des corrections des biais à l’échelle annuelle	50
5.5.2. Simulation des débits futurs.....	53
<i>CHAPITRE 6 : ANALYSE DES EXTREMES DE TEMPERATURE.....</i>	<i>55</i>
6.1. Tendence historique des indices de température extrême	55
6.1.1. Indices d’intensité de température extrême (TXx, TNn et DTR)	55
6.1.2. Indices de fréquence de température extrême (CSDI, WSDI, TX90p et TN90p).	56
6.2. Tendence projetée des indices de température extrême au cours 2021-2050.....	57
6.2.1. Indices d’intensité de température extrême (TXx, TNn et DTR)	57
6.2.2. Indices de fréquence de température extrême (CSDI, WSDI, TX90p et TN90p).	59
6.3. Tendence projetée des indices de température extrême au cours de la période 2051-2080	62
6.3.1. Indices d’intensité de température extrême (TXx, TNn et DTR)	62
6.3.2. Indices de fréquence de température extrême (CSDI, WSDI, TN90p et TX90p).	63
6.4. Quantification des changements et leur significativité pour les indices de température.....	66
6.5. Synthèse sur les indices de température	69
<i>CHAPITRE 7 : ANALYSE DES EXTREMES DE PRECIPITATION.....</i>	<i>71</i>
7.1. Analyse de l’évolution des indices de précipitation extrêmes.....	71
7.1.1. Variabilité spatiale et tendances dans la période historique	71
7.1.1.1. Indices d’intensité (PRCPTOT, R95p, RX1day et RX5day)	71
7.1.1.2. Indices de fréquence (R1mm et CDD).....	72
7.1.2. Variabilité spatiale et tendances dans les périodes futures	73
7.1.2.1. Variabilité spatiale et tendances dans le futur proche (2021-2050).....	73
7.1.2.1.1. Indices d’intensité (PRCPTOT, R95p, RX1day et RX5day)	73

7.1.2.1.2. Indices de fréquence (R1mm et CDD)	76
7.1.2.2. Variabilité spatiale et tendance dans le futur lointain (2051-2080)	77
7.1.2.2.1. Indices d'intensité (PRCPTOT, R95p, RX1day et RX5day)	77
7.1.2.2.2. Indices de fréquence (R1mm et CDD)	80
7.1.3. Quantification des changements et leur significativité pour les indices de pluie ...	82
7.1.4. Synthèses sur les indices de précipitation	85
7.2. Analyse des extrêmes de sécheresses (indices SPI) sur le bassin béninois du fleuve Niger	86
7.2.1. Analyse historique des indices SPI	86
7.2.2. Analyse future des indices SPI	89
7.2.2.1. Analyse des indices SPI au cours du proche futur (2021-2050)	89
7.2.2.2. Analyse des indices SPI au cours du futur lointain (2051-2080)	93
7.2.3. Quantification des changements et leur significativité pour les SPI	97
7.2.4. Synthèse sur les SPI	100
<i>CHAPITRE 8 : ANALYSE DE L'EVOLUTION DES EXTRÊMES HYDROLOGIQUES DU BASSIN BENINOIS DU FLEUVE NIGER</i>	<i>103</i>
8.1. Analyse fréquentielle des écoulements et pluie de pointe sur le bassin béninois du fleuve Niger.	103
8.2. Analyse des sécheresses hydrologiques (indices SDI)	107
8.2.1. Analyse historique des SDI	107
8.2.2. Analyse future des indices SDI	110
8.2.2.1. Analyse des indices SDI au cours du futur proche (2021-2050)	110
8.2.2.1. Analyse des indices SDI au cours du futur lointain (2051-2080)	114
8.2.3. Quantification des changements et leur significativité pour les SDI	117
8.5. Synthèse sur les SDI	122
<i>CHAPITRE 9 : DISCUSSION GENERALE</i>	<i>124</i>
9.1. Extrême de précipitation	124
9.2. Extrême de température	124
9.3. Extrême de sécheresse (SPI et SDI)	125
<i>CONCLUSION GENERALE</i>	<i>127</i>

Perspectives	130
<i>Références bibliographiques</i>	<i>131</i>
<i>ANNEXES</i>	
Annexe 0.0 : Liste de publications	I
Annexe 0.1 : Stations météorologiques	I
Annexe 0.2 : Stations hydrologiques	II
Annexe 1 : Futurs indices d'intensité (2021-2050)	II
Annexe 2 : Futurs indices de fréquence (2021-2050).....	IV
Annexe 3 : Futurs indices d'intensité (2051-2080)	IV
Annexe 4 : Futurs indices de fréquence (2051-2080).....	VI
Annexe 5 : Changements et significativités des indices de pluies.	VI
Annexe 6 : Indice de température pour le futur proche.	VII
Annexe 7 : Indice de température pour le futur lointain.....	IX
Annexe 8 : Taux de changement et significativité des changements.	XI
Annexe 9 : Indices SPI.	XII
Annexe 10 : Indices SDI.....	XXIII

Liste des figures

Figure 1 : Localisation du bassin béninois du fleuve Niger	7
Figure 2 : Formations géologiques du bassin béninois du fleuve Niger.	10
Figure 3 : Occupation des sols dans le bassin béninois du fleuve Niger (Badou, 2016).	11
Figure 4 : Spatialisation de la précipitation sur le bassin béninois du fleuve Niger (1976-2019).	12
Figure 5 : Régime pluviométrique des stations du bassin béninois du fleuve Niger.	13
Figure 6 : Variation des paramètres moyens mensuels de température (Moyenne, Maximale et minimale (1976-2019))	13
Figure 7 : Carte administratif du bassin béninois du fleuve Niger.	14
Figure 8 : Culture de coton sur le bassin béninois du fleuve Niger (Kouandé) (Yarou, 2015).	15
Figure 9 : Cheptel de bovin dans le bassin béninois du fleuve Niger (Kandi) (Yarou, 2021).16	
Figure 10 : Représentation stylée des extrêmes (Zhang et al. 2011).....	20
Figure 11 : Exemple des indices qui tiennent compte des différents points de la distribution (Zhang et al. 2011).	21
Figure 12 : Représentation du fonctionnement d'un modèle hydrologique (Toudja, 2017)...	26
Figure 13 : Localisation des stations de mesures considérées pour l'étude.....	29
Figure 14 : Schéma du modèle ModHyPMA et principales équations du modèle (Afouda et Alamou, 2010 ; Gaba et al. 2015 ; Obada, 2017).....	46
Figure 15 : Variabilités et indices d'anomalie des variables de la température sur la période 1976-2019.....	47
Figure 16 : Variabilité et indice d'anomalie de la précipitation sur la période 1976-2019.	48
Figure 17 : Variabilité et indice d'anomalie de l'évapotranspiration potentielle.....	49
Figure 18 : Variabilité et indice d'anomalie de l'écoulement (débits) sur la période 1976-2019.	50
Figure 19 : Performance de la méthode de correction sur les maxima annuels de températures (ligne1= données brutes, ligne 2=données corrigées).	51
Figure 20 : Performance de la méthode de correction sur les minima annuels de températures (ligne1= données brutes, ligne 2=données corrigées).	51
Figure 21 : Performance de la méthode de correction sur les pluies annuelles (ligne1= données brutes, ligne 2=données corrigées).....	52
Figure 22 : Valeurs de critère de NASH et coefficient de détermination par station hydrologique.....	53

Figure 23 : Résultats du modèle ModHyPMA en calage et validation par station hydrologique.	54
Figure 24 : Variation et significativité des indices d'intensité de température extrême aux stations de Kandi, Natitingou et Parakou sur la période 1976-2019.	56
Figure 25 : Variation et significativité historique des indices de fréquence de température extrême aux stations de Kandi, Natitingou et Parakou sur la période 1976-2019.	57
Figure 26 : Tendances et significativités des indices d'intensité de température (futur proche).	59
Figure 27 : Tendances et significativités des indices de fréquence de température (futur proche).	61
Figure 28 : Tendances et significativités des indices d'intensité de température (futur lointain).	63
Figure 29 : Tendances et significativités des indices d'intensité de température (futur lointain).	65
Figure 30 : Changement des indices entre les projections et la période de référence.	68
Figure 31 : Spatialisations, tendances et significativités des indices d'intensité.	72
Figure 32 : Spatialisations, tendances et significativités des indices de fréquence.	73
Figure 33 : Spatialisations, tendances et significativités futures (2021-2050) de l'indice PRCPTOT.	75
Figure 34 : Spatialisations, tendances et significativités futures (2021-2050) de l'indice R1mm.	77
Figure 35 : Spatialisations, tendances et significativités futures (2051-2080) de l'indice PRCPTOT.	80
Figure 36 : Spatialisations, tendances et significativités futures (2051-2080) de l'indice R1mm.	82
Figure 37 : Changements et leur significativité pour les indices d'intensité (2021-2050).	85
Figure 38 : Changements et leur significativité pour les indices de fréquence (2021-2050).	85
Figure 39 : Occurrence moyenne des types de sécheresse.	87
Figure 40 : Spatialisation des durées et intensité de sécheresse.	87
Figure 41 : Evolution chronologique du SPI-12 mois.	88
Figure 42 : Spatialisation de l'occurrence des types de sécheresse.	88
Figure 43 : Spatialisation des risques de sécheresse.	88
Figure 44 : Occurrence moyenne des sécheresses pour le futur proche.	91
Figure 45 : Spatialisation des durées des sécheresses et pics pour le futur proche.	91

Figure 46 : Evolution chronologique des SPI pour le futur proche	91
Figure 47 : Spatialisation des types de sécheresses pour le futur proche.....	92
Figure 48 : Spatialisation des risques de sécheresse pour le futur proche.	92
Figure 49 : Occurrence moyenne des sécheresses pour le futur lointain.	95
Figure 50 : Spatialisation des durées des sécheresses et pics pour le futur lointain.	95
Figure 51 : Evolution chronologique des SPI pour le futur lointain.	95
Figure 52 : Spatialisation des types de sécheresses pour le futur lointain.	96
Figure 53 : Spatialisation des risques de sécheresse pour le futur lointain.	96
Figure 54 : Changement des types de sécheresse projetés par rapport à la période référence.99	
Figure 55 : Changement des risques, durées et pics de sécheresse projetés par rapport à la période de référence.	100
Figure 56 : Significativité des changements prévus par les scénarii.....	100
Figure 57 : Ajustement de la loi GEV aux Qmax de la station de Couberi.	104
Figure 58 : Ajustement de la loi Gumbel aux Qmax de la station de Couberi.	105
Figure 59 : Comparaison des ajustements GEV et Gumbel à la station de Couberi.....	105
Figure 60 : Spatialisation des quantiles de précipitations de période de retour 5, 10 et 50 ans	107
Figure 61 : Evolution chronologique des indices SDI par station hydrologique.	109
Figure 62 : Occurrence des classes de sécheresse au niveau de chaque station hydrologique.	109
Figure 63 : Durées et pics de sécheresse par station hydrologique.....	110
Figure 64 : Risques de sécheresse par station hydrologique.....	110
Figure 65 : Tendances projetées du SDI-12 mois par station hydrologique (2021-2050)...	112
Figure 66 : Occurrences projetées des classes de sécheresse pour chaque station hydrologique pour le SDI-12 mois (2021-2050).	113
Figure 67 : Durées, pics et risques projetés pour toutes les stations hydrologiques à l'échelle 12 mois du SDI (2021-2050).....	113
Figure 68 : Tendances projetées du SDI-12 mois par station hydrologique (2051-2080)...	116
Figure 69 : Occurrences projetées des classes de sécheresse pour chaque station hydrologique pour le SDI-12 mois (2051-2080).	116
Figure 70 : Durées, pics et risques projetés pour toutes les stations hydrologiques à l'échelle 12 mois du SDI (2051-2080).....	117
Figure 71 : Changement des types de sécheresses entre la période de base et les périodes de projection (échelle 12 mois du SDI).	121

Figure 72 : Changement des durées, pics et risques de sécheresse (échelle de 12 mois).	121
Figure 73 : Significativité des changements des SDI.....	122
Figure 74 : Spatialisation des moyennes de R95p, sa tendance et la significativité (2021-2050).	II
Figure 75 : Spatialisation des moyennes de RX1day, sa tendance et la significativité (2021-2050).....	III
Figure 76 : Spatialisation des moyennes de RX5day, sa tendance et la significativité (2021-2050).....	III
Figure 77 : Spatialisation des moyennes de CDD, sa tendance et la significativité (2021-2050).	IV
Figure 78 : Spatialisation des moyennes de R95p, sa tendance et la significativité (2051-2080).	IV
Figure 79 : Spatialisation des moyennes de RX1day, sa tendance et la significativité (2051-2080).....	V
Figure 80 : Spatialisation des moyennes de RX5day, sa tendance et la significativité (2051-2080).....	V
Figure 81 : Spatialisation des moyennes de CDD, sa tendance et la significativité (2051-2080).	VI
Figure 82 : Changement et significativité des indices d'intensité de pluies (2051-2080).....	VI
Figure 83 : Changement et significativité des indices de fréquence de pluies (2051-2080)..	VII
Figure 84 : Variations futures des indices d'intensité de température extrême (2021-2050).	VII
Figure 85 : Variations futures des indices de fréquence de température extrême (2021-2050).	VIII
Figure 86 : Variations futures des indices d'intensité de température extrême (2051-2080)..	IX
Figure 87 : Variations futures des indices de fréquence de température extrême (2051-2080).	X
Figure 88 : Changement des indices de température par rapport à la période de référence....	XI
Figure 89 : Significativité des changements des indices de température par rapport à la période de référence.	XI
Figure 90 : Tendance du SPI 36 mois au cours de la période historique.	XII
Figure 91 : Spatialisation des types de sécheresse au cours de 1976-2019 (SPI-36 mois)....	XII
Figure 92 : Spatialisation des durées et pics de sécheresse projetés à l'échelle 12 mois du SPI (2021-2050).....	XII

Figure 93 : Spatialisation des types de sécheresse projetés à l'échelle 36 mois du SPI (2021-2050).....	XIII
Figure 94 : Spatialisation des durées et pics de sécheresse projetés à l'échelle 12 mois du SPI (2021-2050).....	XIII
Figure 95 : Spatialisation des types de sécheresse projetés à l'échelle 36 mois du SPI (2051-2080).....	XIV
Figure 96 : Spatialisation des changements sur les types de sécheresse à l'échelle 12 mois du SPI (2021-2050).	XV
Figure 97 : Spatialisation des changements sur les types de sécheresse à l'échelle 36 mois du SPI (2021-2050).	XVI
Figure 98 : Spatialisation des changements sur les types de sécheresse à l'échelle 12 mois du SPI (2051-2080).	XVII
Figure 99 : Spatialisation des changements sur les types de sécheresse à l'échelle 36 mois du SPI (2051-2080).	XVIII
Figure 100 : Spatialisation des changements sur les durées, pics et risques de sécheresse à l'échelle 12 mois du SPI (2021-2050).....	XIX
Figure 101 : Spatialisation des changements sur les durées, pics et risques de sécheresse à l'échelle 36 mois du SPI (2021-2050).....	XX
Figure 102 : Spatialisation des changements sur les durées, pics et risques de sécheresse à l'échelle 12 mois du SPI (2051-2080).....	XXI
Figure 103 : Spatialisation des changements sur les durées, pics et risques de sécheresse à l'échelle 36 mois du SPI (2051-2080).....	XXII
Figure 104 : Variation chronologique des indices SDI-36 mois (2021-2050).....	XXIII
Figure 105 : Occurrences des types de sécheresses hydrologique à l'échelle 36 mois (2021-2050).....	XXIII
Figure 106 : Moyennes des durées, pics et risques de sécheresse hydrologique à l'échelle 36 mois (2021-2050).	XXIV
Figure 107 : Variation chronologique des indices SDI-36 mois (2051-2080).....	XXIV
Figure 108 : Occurrences des types de sécheresses hydrologique à l'échelle 36 mois (2051-2080).....	XXV
Figure 109 : Moyennes des durées, pics et risques de sécheresse hydrologique à l'échelle 36 mois (2051-2080).	XXV
Figure 110 : Changement des types de sécheresse par rapport à la période de référence à l'échelle 12 mois du SDI.....	XXVI

Figure 111 : Changement des types de sécheresse par rapport à la période de référence à l'échelle 36 mois du SDI.....	XXVI
Figure 112 : Changement des durées, pics et risques de sécheresse par rapport à la période de référence à l'échelle 36 mois du SDI.....	XXVII

Liste des tableaux

Tableau 1 : Sources d'approvisionnement en eau des communes du bassin béninois du fleuve Niger.....	16
Tableau 2 : Taux de desserte des communes du bassin béninois du fleuve Niger.	17
Tableau 3 : Caractéristiques des MCRs utilisés.....	30
Tableau 4 : Catégories de sécheresses définies par les valeurs du SPI.....	37
Tableau 5 : Classes de l'indice SDI.....	42
Tableau 6 : Performance de la méthode de correction sur les variables climatiques.....	52
Tableau 7 : Performances du modèle ModHyPMA au niveau de chaque station.....	53
Tableau 8 : Significativités des changements des indices de température extrême.....	68
Tableau 9 : Statistiques descriptives des séries.....	103
Tableau 10 : Paramètres statistiques	104
Tableau 11 : Quantiles de précipitations maximales et de débits de pointe observés	105
Tableau 12 : Stations météorologiques	I
Tableau 13 : Stations hydrologiques	II

Liste des sigles et acronymes

BF	: Borne-Fontaine
CDD	: Jours consécutivement secs
CIPMA	: Chaire Internationale en Physiques Mathématiques et Applications
CORDEX	: Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment
CSDI	: Indice de durée des séquences fraîches
DG-Eau	: Direction Générale de l'Eau
DTR	: Rang des températures diurne
ETP	: Evapotranspiration Potentielle
GICC	: Gestion et Impact du Changement Climatique
GIEC	: Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
INSAE	: Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique
IPCC	: Intergovernmental Panel on Climate Change
MCR	: Modèles Climatiques Régionaux
PMH	: forage équipé de Pompe à Motricité Humaine
PM	: Puits moderne
PRCPTOT	: Précipitation totale
Q	: Débit
R1mm	: Jour pluvieux
R95p	: Pluie intense
RX1day	: Maximum des pluies journalières
RX5day	: Pluie maximal sur 5 jours consécutifs pluvieux
SA	: Source Aménagée
SDI	: Streamflow Drought Index
SPI	: Standardized Precipitation Index
TN90P	: Nuit chaude
TNn	: Minimum des températures minimales
TX90P	: jour chaud
TXx	: Maximum des températures maximales
WSDI	: Indice de durée des séquences chaudes

INTRODUCTION GENERALE

Les impacts des changements climatiques et des activités anthropiques sur les ressources en eau prédits par les climatologues pour le reste du XXI^e siècle méritent une attention particulière de la part des hommes. Les enjeux du suivi de la ressource en eau et notamment l'anticipation des situations de rareté, voire de pénurie, réclament de nos jours la mise en place des applications hydrologiques opérationnelles spécifiques, au même titre que celles développées ces dernières années pour la prévision des crues (Soubeyrou et *al.* 2010).

Il est constaté, au cours du dernier siècle, une tendance marquée par un réchauffement global rapide. Ainsi selon Rousseau et *al.* (2011), dans l'hémisphère nord, les 50 dernières années sont les plus chaudes des 1300 dernières années. D'après le même auteur (Rousseau et *al.* 2011) le réchauffement s'explique par l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre et des aérosols dans l'atmosphère liée à l'activité humaine (transport, déforestation...). Or, l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre ne fera probablement que s'accroître durant le XXI^e siècle, impliquant une hausse conséquente de la température de l'air (Rousseau et *al.* 2011). Ce réchauffement va s'accompagner de multiples modifications que sont : changement de l'humidité de l'air, de la formation des nuages, des précipitations et des rayonnements incidents (Rousseau et *al.* 2011).

Les événements climatiques extrêmes ont généralement de grands impacts sur la société, les ressources en eau, la santé, et le secteur agricole (Serhat et *al.*, 2013). Un petit changement dans les conditions moyennes peut causer probablement de grands changements pour un extrême (Serhat et *al.*, 2013). Une meilleure compréhension de la nature statistique et physique des événements climatiques extrêmes est une étape nécessaire avant de pouvoir répondre aux interrogations qui sont en lien avec ces indices. Il est important de noter que chaque année sèche implique des pertes socio-économiques et des dommages écologiques significatifs à travers le monde (Zengchao et *al.*, 2014). De la même manière qu'une année très humide engendre des pertes et des dommages socioéconomiques.

Ces phénomènes climatiques extrêmes affectent davantage l'écosystème et la société. Au cours de ces dernières années, les extrêmes climatiques ne cessent de battre des records. Les canicules estivales sur l'Europe centrale et de l'ouest en 2003 et sur l'Europe centrale et du sud-est en 2007, l'ouragan Katrina en 2005, l'inondation en Grande-Bretagne en juin-juillet 2007, la vague de froid en juillet 2007 en Argentine sont quelques exemples.

Il est très probable que les épisodes de chaleurs extrêmes, les vagues de chaleurs et les épisodes de fortes précipitations deviennent plus fréquents (GIEC, 2007). Parmi les industries, les établissements humains et les sociétés les plus vulnérables figurent ceux qui sont situés dans les plaines d'inondation côtières ou fluviales, ceux dont l'économie est étroitement liée aux ressources sensibles aux conditions climatiques et ceux qui sont situés dans des zones connaissant des phénomènes météorologiques extrêmes (GIEC, 2007).

La problématique générale en lien avec les changements climatiques repose sur le fait que selon les scénarios climatiques prévus, ils occasionneraient une fréquence plus élevée et une intensité plus forte des événements climatiques extrêmes (Giguère et al. 2006). Ces phénomènes sont encore plus accentués en Afrique où la déforestation est très importante (Gnanglè et al. 2011). Le sommet ministériel tenu en Afrique du sud en 2007 et ayant regroupé 70 nations reconnaît la grandeur du problème de sécheresse et ses impacts sur la sécurité alimentaire et la durabilité des ressources en eau, et met un accent sur la nécessité d'avoir des systèmes d'alerte précoce pour la sécheresse (Heim & Brewer, 2012).

Depuis la seconde moitié du XX^e siècle, l'Afrique de l'Ouest est la région du monde qui connaît le plus important déficit pluviométrique (Spinoni et al. 2013). Au Nigéria par exemple, il a été observé une tendance à la baisse dans 98,2% du paysage pour l'indice d'humidité (IM), 96,7% pour l'indice SPI et 98,2% pour l'indice SPEI, montrant des tendances d'assèchement dans le pays (Oguntundé et al, 2016). De même au Niger, les jours secs consécutifs ont considérablement augmenté et les jours humides consécutifs se sont réduits. Il en est de même pour les jours pluvieux. Dans le même temps, la proportion de la précipitation maximale quotidienne dans le total pluviométrique annuel s'est renforcée au fil du temps et la proportion des précipitations intenses dans le total pluviométrique annuel s'est significativement accentuée au cours des deux dernières décennies (Ozer et al, 2017). Pour le Bénin il est indiqué pour les indices d'intensité et de fréquence de pluie tels que les jours de pluie consécutifs et le jour extrêmement humide, respectivement une augmentation et une décroissance (Batablinle et al, 2019). Pour Kodja et al, (2019), sur le bassin de l'Ouémé on a assisté à un changement à la baisse des précipitations tandis que la vitesse de la température a révélé des changements à la hausse pour la période 1981-2010.

Ces évènements ont sans doute commencé au Bénin. En effet, une augmentation significative de la température moyenne (plus de 1°C), ainsi qu'une diminution perceptible de la pluviométrie (-5,5 mm/an en moyenne) et du nombre moyen annuel de jours de pluie sont indiqués dans les trois zones (soudanienne, soudano-guinéenne et guinéenne) climatique du

Bénin (Gnanglè et *al.* 2011) dont la partie septentrionale. De plus, du fait de l'évolution démographique et de l'augmentation rapide des besoins en eau pour la consommation, l'agriculture et l'industrie ; la disponibilité, la maîtrise et la gestion des ressources en eau constituent des défis majeurs pour les prochaines décennies. Les inondations de 2010 au nord et sud du Bénin et des débordements des cours d'eau au niveau de la basse vallée de l'Ouémé et du fleuve Niger en 2018 occasionnant des cas de noyade et des pertes de cultures en sont des exemples.

Par ailleurs, il faut noter que l'accroissement de l'aléa pluviométrique excédentaire extrême étant lié au changement climatique, cela pourrait donc se renforcer dans les décennies à venir et finalement engendrer de sérieuses répercussions sur l'agriculture et les infrastructures de la région (Ozer et *al.*, 2017).

En fait, le bassin béninois du fleuve Niger, situé dans la zone semi-aride, est d'autant plus affecté qu'il enregistre une augmentation démographique importante. Cet accroissement de la population intensifie les pressions anthropiques sur des ressources fragiles dont la dégradation est de plus en plus préoccupante (Ozer et *al.*, 2010). Aussi, il ressort que les précipitations connaîtront une tendance à la hausse (1,7 à 23,4%) sur l'ensemble du bassin béninois du fleuve Niger pour les modèles HIRHAM5 et RCSM sous les deux scénarii d'émissions RCP4.5 et RCP8.5 mais une variation de -8,5% à 17,3 % pour le modèle RCA4 (Badou, 2016).

Il s'avère donc indispensable de proposer des mesures d'adaptation ou d'atténuation pour limiter ou prédire les effets de ces phénomènes sur les populations. Pour réussir cette mission, il faut ainsi caractériser l'évolution des impacts des changements climatiques sur les événements hydrométéorologiques extrêmes dans le bassin béninois du fleuve Niger à travers l'étude des tendances passées et futures des variables hydrométéorologiques extrêmes et examiner quelques périodes de retour. Telle est la raison qui a donné naissance à notre sujet de recherche intitulé «**Variabilités climatiques et dynamiques des événements hydrométéorologiques dans le bassin béninois du fleuve Niger**».

Pour formuler les objectifs de cette étude, les questions de recherche spécifiques suivantes ont été posées :

- Quelle est la variabilité climatique dans le bassin béninois du fleuve Niger ?
- Quelles sont les caractéristiques des événements climatiques extrêmes sur le bassin béninois du fleuve Niger ?

- Quelle est l'évolution des évènements hydrologiques extrêmes sur le bassin béninois du fleuve Niger ?

Cette étude qui se veut de répondre à toutes ces préoccupations s'articule autour des hypothèses suivantes :

- Les paramètres climatiques du bassin béninois du fleuve Niger présentent des tendances à la hausse.
- Les évènements climatiques extrêmes du bassin béninois du fleuve Niger ont varié dans le temps et dans l'espace.
- Le bassin béninois du fleuve Niger est sujet des évènements hydrologiques extrêmes.

Cette étude a pour objectif principal d'étudier la variabilité climatique et dynamique des évènements hydrométéorologiques dans le bassin béninois du fleuve Niger.

De façon spécifique il s'agit de :

- ✓ déterminer la variabilité climatique du bassin béninois du fleuve Niger.
- ✓ caractériser les évènements climatiques extrêmes du bassin béninois du fleuve Niger.
- ✓ analyser l'évolution des extrêmes hydrologiques du bassin béninois du fleuve Niger.

Pour atteindre nos objectifs, nous avons adopté d'une part une démarche associative avec le développement et l'utilisation de multi-modèles conceptuels. Et d'autre part une démarche qui a également consisté à comparer les sorties de plusieurs modèles climatiques.

Mis à part l'introduction générale et la conclusion générale, le présent document de thèse est subdivisé en trois (03) grandes parties. La première partie, relative aux généralités, regroupe les chapitres 1 et 2. La deuxième partie traite, à travers les chapitres 3 et 4, des données utilisées et les méthodes employées. Enfin la troisième partie subdivisée en 6 chapitres présente les résultats obtenus et la discussion.

A la suite de cette introduction générale qui contextualise et justifie le sujet, suivi des questions de recherche et objectifs, vient le chapitre 1 qui est consacré à un bref rappel du cadre d'étude. Le chapitre 2 quant à lui aborde la revue bibliographique sur les différents paramètres et présente les modèles pendant que le chapitre 3 fait le point des données utilisées. Le chapitre 4 pour sa part détaille les méthodes mises en œuvre pour atteindre les objectifs. A la suite, le document s'est focalisé sur les résultats et discussion de l'étude. Ainsi, la variabilité climatique

de la zone d'étude est déterminée dans le chapitre 5. Les extrêmes climatiques de la zone d'étude sont caractérisés dans le temps et dans l'espace dans les chapitres 6 et 7. Le chapitre 8 fait l'analyse fréquentielle des événements hydrologiques et caractérise les sécheresses hydrologiques du bassin béninois du fleuve Niger à travers les indices SDI. Le chapitre 9 fait la discussion générale de l'étude. Le document finit par une conclusion générale qui conclut la recherche et présente quelques perspectives.

PREMIERE PARTIE : GENERALITES

CHAPITRE 1 : CADRE D'ETUDE

Cette section du travail aborde dans un premier temps les éléments du milieu physique du bassin béninois du fleuve Niger à savoir la situation géographique, le relief, le réseau hydrographique, la pédologie, la géologie et le couvert végétal. Dans sa deuxième section elle présente le milieu socio-économique du bassin à travers le découpage administratif, la démographie, les données socio-culturelles, les activités socio-économiques et l'accès à l'eau potable dans le bassin d'étude.

1.1. Milieu physique

1.1.1. Présentation du bassin béninois du fleuve Niger

Situé en zone soudano-sahélienne entre les latitudes 10°30 et 25°00 N et les longitudes 12°00 O et 4°00 E (Maïga *et al.* 2007), le fleuve Niger est le troisième fleuve d'Afrique par sa longueur (4200 km). Son bassin occupe une surface très importante d'environ 1,2 million de km² et est partagé par neuf Etats (Bénin, Burkina Faso, Cameroun, Côte d'Ivoire, Guinée, Mali, Niger, Nigéria et Tchad). La gestion de ses ressources en eau est confiée à un organisme inter-état : l'Autorité du Bassin du Niger (ABN), basée à Niamey. C'est un fleuve très important pour un grand nombre d'activités économiques et agricoles, pour l'alimentation en eau potable et la production d'hydro-électricité (Mahé *et al.* 2011). Il est de ce fait très surveillé et fait l'objet de très nombreuses études. Dans le domaine de l'hydrologie, les auteurs ont travaillé tant sur l'évaluation de la ressource en eau que sur des projets d'aménagements potentiels dans les domaines hydro-agricole et hydroélectrique ou encore sur la propagation des crues (Brunet-Moret *et al.* 1986; Bricquet *et al.* 1996; Sangaré *et al.* 2002; Kuper *et al.* 2003; Paturel *et al.* 2007; Conway et Mahé, 2009; Mahé *et al.* 2009; Liénou *et al.* 2010; Ogilvie *et al.* 2010; Mulligan *et al.* 2011).

Le fleuve Niger est en fait constitué de deux grandes rivières, le fleuve Niger proprement dit, provenant de la Guinée et du Mali et traversant l'Afrique de l'Ouest, et la Bénoué, provenant du Tchad et du Cameroun et rejoignant le fleuve au Nigéria, peu avant le delta maritime (Mahé *et al.* 2011).

Le bassin béninois du fleuve Niger se situe à l'extrême nord du Bénin (Figure 1). Il couvre une superficie d'environ 48 000 km², soit 42 % de la superficie totale du Bénin (114 763 km²). Situé entre les latitudes 10° et 12°30' nord et les longitudes 1°32' et 3°50' est, il regroupe les sous bassins de la Mékrou, de l'Alibori et de la Sota (Figure 1), et est orienté en général SSW-NNE (Vissin, 2007). Il est partagé entre 17 communes du Bénin que sont : Banikoara, Bembèrèkè,

Gogounou, Kalalé, Kandi, Karimama, Kérou, Kouandé, Malaville, Natitingou, Nikki, Pehounko, Pèrèrè, Ségbana, Sinendé, Tanguiéta et Toukountouna (Figure 1).

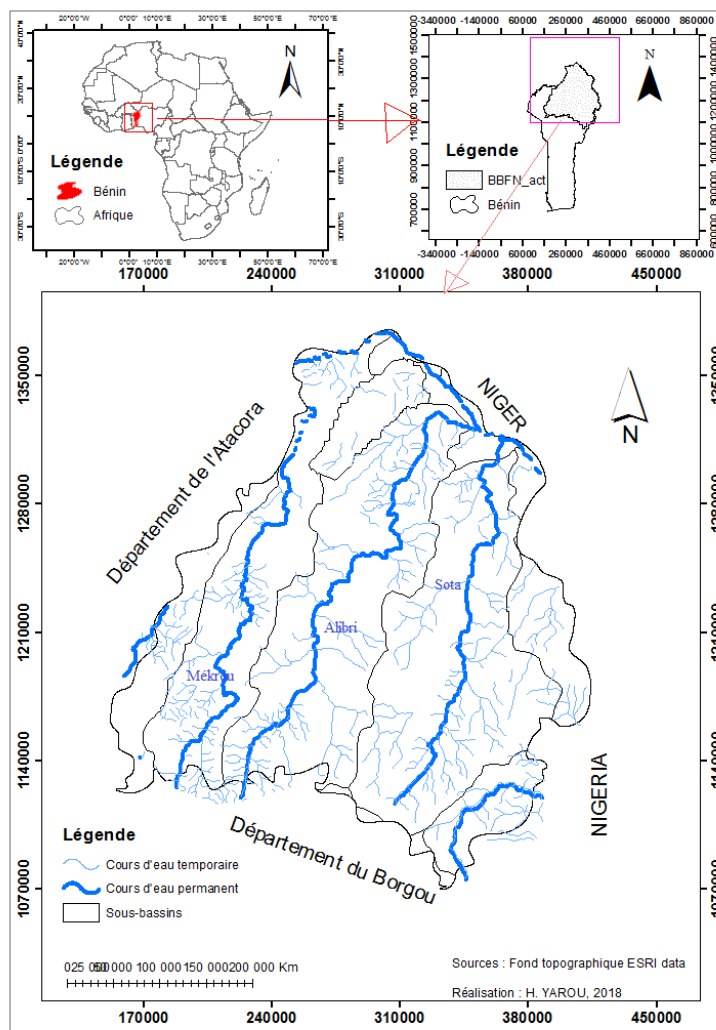


Figure 1 : Localisation du bassin béninois du fleuve Niger

1.1.2. Relief et réseau hydrographique

Séparé des bassins de l'Ouémé et du Mono (situés plus au Sud) par une ligne de crête, ou ligne de partage des eaux, d'axe est-ouest au niveau de la latitude 10° nord, due à l'érosion différentielle (Adam et Boko, 1993 ; Le Barbe et *al.* 1993), le bassin béninois du fleuve Niger est constitué de deux unités topographiques : la pénéplaine cristalline et le plateau de grès de Kandi.

La pénéplaine granito-gneissique située dans la partie sud du bassin et constituée de roches cristallines, elle est caractérisée par un modelé en croupes, modestes. Sa topographie vallonnée et monotone s'incline progressivement du sud vers le nord depuis la ligne de crête où son altitude moyenne atteint 400 m jusqu'au contact du plateau de Kandi (Le Barbe et *al.* 1993). Elle est parsemée au sud d'une multitude de collines isolées (collines de Bembéréké, de

Sinendé, de Nikki et Kalalé). La pénéplaine est raccordée à l'ouest au massif de l'Atacora dont les sommets dépassent 600 m et au plateau de Kandi au nord et au nord-est. Ces collines, quoique peu élevées, constituent le trait majeur de la topographie des sous bassins de la Mékrou, de l'Alibori et de la Sota à Gbassè (Le Barbe et *al.* 1993).

Le plateau de Kandi constitue la partie septentrionale du bassin béninois du fleuve Niger (sous bassin de la Sota à Couberi). D'une grande platitude, son altitude moyenne est de 250 mètres. Légèrement incliné vers la plaine alluviale du bassin du Niger à laquelle il se raccorde dans l'extrême nord, il est parsemé d'une multitude de petites buttes de cuirasses ferrugineuses à très faible dénivellation (Adam et Boko, 1993 ; Le Barbe et *al.* 1993).

Malgré leur altitude modeste, elles influencent les flux atmosphériques et elles constituent aussi les lignes de crête où naissent la plupart des rivières (Mékrou, Alibori et Sota) qui drainent la région. Ces reliefs accroissent, en effet, l'échauffement diurne, perturbent les courants, aggravent la turbulence et favorisent l'ascendance des masses d'air. Leur présence explique l'importance accrue des manifestations orageuses dans cette région (Agli, 1995).

Le plateau de Kandi et la pénéplaine sont parcourus par des vallées plus ou moins encaissées dans lesquelles coulent des rivières (Mékrou, Alibori et Sota) au réseau d'affluents relativement dense. L'écoulement de toutes ces rivières se fait dans le sens sud-nord conforme à l'orientation NNE-SSW des formations géologiques (Vissin, 2007).

Le fleuve Niger constitue la frontière entre le Bénin et le Niger sur 135 km. Son bassin versant couvre, dans cette région, environ 1 000 000 km². Sur ce court parcours, le Niger a un tracé rectiligne orienté NW-SE et reçoit en rive droite trois importants affluents béninois qui sont, d'ouest en est : la Mékrou, l'Alibori et la Sota (Figure 1) (Vissin, 2007).

Sur le plan hydrologique, en dehors du Niger lui-même, tous les cours d'eau étudiés connaissent leur crue en période de pluies et leurs basses eaux en saison sèche. Hormis la Sota qui est le seul des principaux affluents béninois du fleuve Niger à avoir un régime d'écoulement permanent avec un débit d'étiage évalué à 3,6 m³/s (Le Barbe et *al.* 1993), tous les autres affluents se caractérisent par des régimes d'écoulement saisonniers (Vissin, 2007).

Les observations montrent que les trois cours d'eau connaissent le maximum de débit en septembre, les hautes eaux durent trois mois (août, septembre et octobre) qui, à eux seuls, représentent 80 à 90 % de l'écoulement annuel (Le Barbe et *al.* 1993). Si l'on ajoute les écoulements des mois de juillet et novembre, on obtient un total de 97 % pour la Mékrou et

l'Alibori. La Sota qui a un régime un peu plus régulier se caractérise par un écoulement pérenne, mais les hautes eaux de septembre sont tout aussi manifestes (Vissin, 2007).

1.1.3. Formations pédologiques et géologiques

Le bassin s'étend sur deux formations géologiques : les formations du socle à l'ouest et au sud et les grès de Kandi au nord-est (Le Barbe et *al.* 1993 ; Adam et Boko, 1993 ; Lessard, 1964).

La majeure partie du bassin de la Mékrou s'étend sur des terrains primaires (gneiss et orthogneiss), ainsi que des formations de micaschistes et de quartzites de l'Atacora. Dans le bassin inférieur de la Mékrou apparaissent des schistes primaires (Vissin, 2007).

Le sous-bassin de l'Alibori est essentiellement constitué de terrains primaires gneissiques avec des granites qui affleurent dans le haut bassin. Entre les séries de fractures orientées nord-sud apparaissent aussi des migmatites. Ces deux sous-bassins sur socle cristallin constitués de roches magmatiques et métamorphiques sont imperméables (Vissin, 2007).

Au niveau du sous-bassin de la Sota, au sud de Gbassè, s'étendent des formations du socle granito-gneissique précambrien comprenant essentiellement : gneiss, migmatites, micaschistes, diorites et quelques quartzites accompagnés localement de granites. Ce socle s'abaisse graduellement vers le nord-est et est surmonté en discordance par 20 % d'un ensemble gréseux appelé grès de Kandi (Le Barbe et *al.* 1993 ; Vissin, 2001).

Les bassins inférieur et moyen de la Sota, au nord de Gbassè sont constitués d'un mélange de conglomérats de diorite, de gneiss et de migmatite (Lessard, 1964), surmonté d'une variété de grès qui couvre plus de 93 % de la superficie du sous-bassin de la Sota à Couberi (Vissin, 1998). A ces formations s'ajoutent les grès sableux, fins à moyens, très tendres, légèrement arkosiques (grès feldspathiques résultant de la cimentation d'une roche granitique ou gneissique) vers la base ; les grès grossiers et des silts (sédiments meubles très fins, plus ou moins consolidés) et le continental terminal (conglomérats et brèches, grès, silts) (Vissin, 2007).

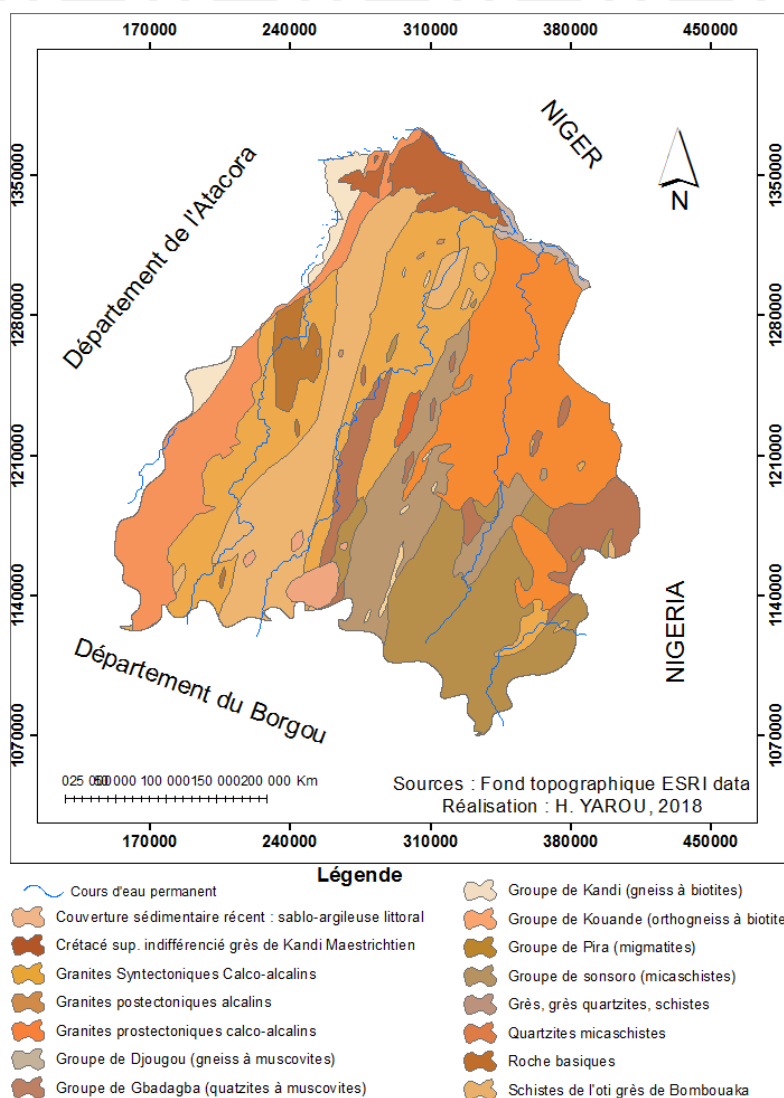


Figure 2 : Formations géologiques du bassin béninois du fleuve Niger.

1.1.4. Végétation et couverture du sol

La végétation du bassin d'étude devient progressivement plus clairsemée du sud vers le nord en relation avec la diminution des précipitations vers le nord (Vissin, 2007). Une savane arborée qui comprend, en général, un ensemble assez dense d'arbres pouvant atteindre 10 m de haut, avec une importante strate d'arbustes et un tapis de graminées (Bio Bigou, 1987, Le Barbe et al. 1993) freinent le ruissellement.

La taille et la densité des arbres décroissent en direction du nord. Sur le plateau couvert de cuirasses latéritiques poussent de petites forêts sèches à *Isobertinia doka*. Les pentes sont dissimulées par une végétation de savanes boisées à *Hymenocardia acida*, *Entada abyssinica*, *Cochlospermum trinctorium* (*Cochlospermum* à teinture) et *Cochlospermum planchonii* (De Souza, 1988, Bio Bigou, 1987, Le Barbe et al. 1993).

On rencontre également vers le nord, des forêts à *Diospiros mespiliformis* (Goyavier de singe), *Ficus spp* (Figuiers), *Khaya senegalensis* (Caïllédrat) et des formations saxicoles : *Butyrospermum paradoxum* (Karité), *Combretum spp*. Sur les lithosols des quartzites de Badagba ou sur les grès de Kandi se développent des savanes arborées et des savanes arbustives à *Adansonia digitata* (Baobab) et à *Combretum spp* (De Souza, 1988 ; Centre National de la Recherche Scientifique du Sénégal, 1973). Le long des cours principaux des vallées se trouve une galerie forestière à *Anogeisus léiocarpus* (Bouleau d'Afrique), *Khaya senegalensis* et *Ficus spp*. (Le Barbe et al. 1993 ; Gbatcho, 1992 ; Brunet-Moret et al. 1986).

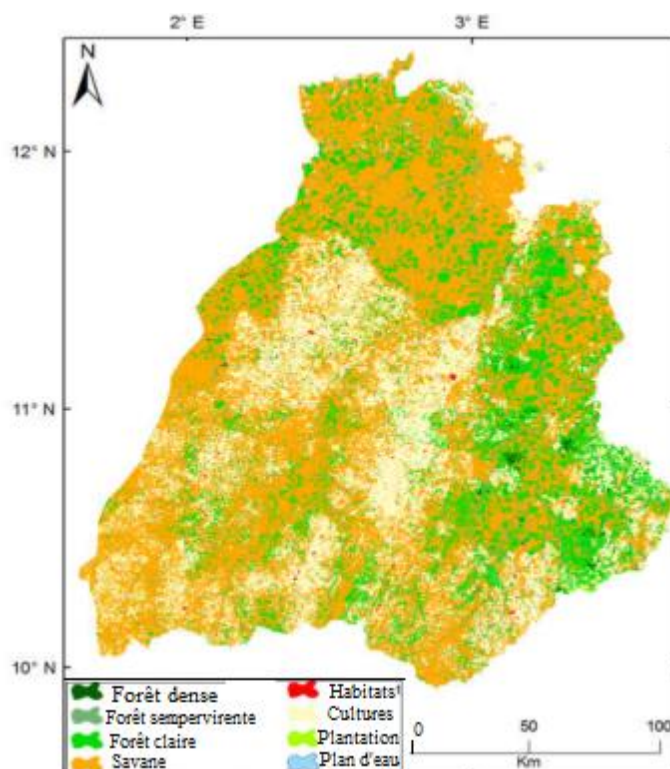


Figure 3 : Occupation des sols dans le bassin béninois du fleuve Niger (Badou, 2016).

La forêt classée de l'Alibori supérieur couvre près de la moitié du bassin supérieur de l'Alibori, tandis que le parc "W" occupe les bassins inférieurs de la Mékrou et de l'Alibori. D'autres forêts classées (de Goungoun, de la Sota, des Trois Rivières) s'étendent sur 30 % de la surface totale du sous-bassin de la Sota (Figure 3). Celle dite « des Trois Rivières », dans le bassin supérieur, est la plus dense et la plus grande, avec 2 400 km². Les forêts subissent la pression humaine et sont particulièrement vulnérables du fait des conditions climatiques.

1.1.5. Pluviométrie du bassin béninois du fleuve Niger

Dans l'ensemble, les stations du bassin béninois du fleuve Niger ont des pluviométries qui varient entre 800 et 1250 mm au cours de la sous-période 1976-2021. Cette valeur de la pluviométrie baisse avec l'augmentation de la latitude (Figure 4).

D'après la figure 4, nous notons une très grande dépendance entre la latitude des stations et la précipitation ($R^2 = 0,83$). Les apports en précipitation sont donc caractérisés par un gradient latitudinal inverse. Ce phénomène peut-être nettement remarqué sur les courbes iso valeurs (isohyètes) de la figure 4.

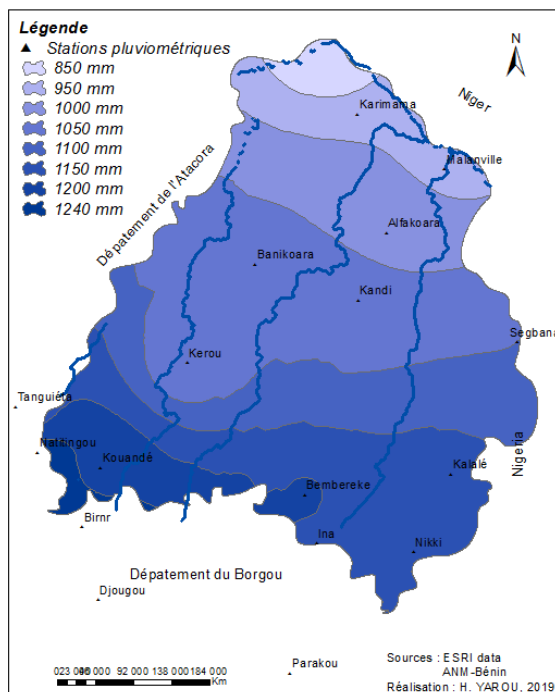


Figure 4 : Spatialisation de la précipitation sur le bassin béninois du fleuve Niger (1976-2019).

Sur le bassin béninois du fleuve Niger, la saison des pluies s'étend d'avril-mai à septembre-octobre (Vissin, 2007). Pendant cette période, la lame d'eau recueillie est partout supérieure à 90 % du total annuel : 90 % à Ina, 91 % à Nikki et Kalalé, 92 % à Bembéréké, 95 % à Kandi et Banikoara et 97 % à Malanville (Vissin, 2001) (Figure 5). Le bassin est caractérisé par trois zones climatiques : la première, située au sud entre les isohyètes 1240 et 1050 mm, correspondant au climat de type soudanien humide (les stations de l'extrême sud du bassin sont regroupées dans cette zone) ; la deuxième zone, localisée au nord du bassin, s'étend entre les isohyètes 1050 et 950 mm et correspondant au climat de type soudanien sec ; enfin, la troisième classe est située à l'extrême nord à partie des isohyètes 850 mm et au-delà, et correspond au climat de type soudano-sahélien.

On remarque un caractère unimodal du régime pluviométrique sur le bassin béninois du fleuve Niger. Le maximum est atteint en août tandis que les minima sont enregistrés en novembre, décembre et janvier. Les plus importantes quantités pluviométriques sont réparties entre les mois de juillet, août et septembre. Au cours de la période pluvieuse (avril-octobre) sur

l'ensemble du bassin, on enregistre environ 96% de la précipitation annuelle au niveau de ces stations (Figure 5).

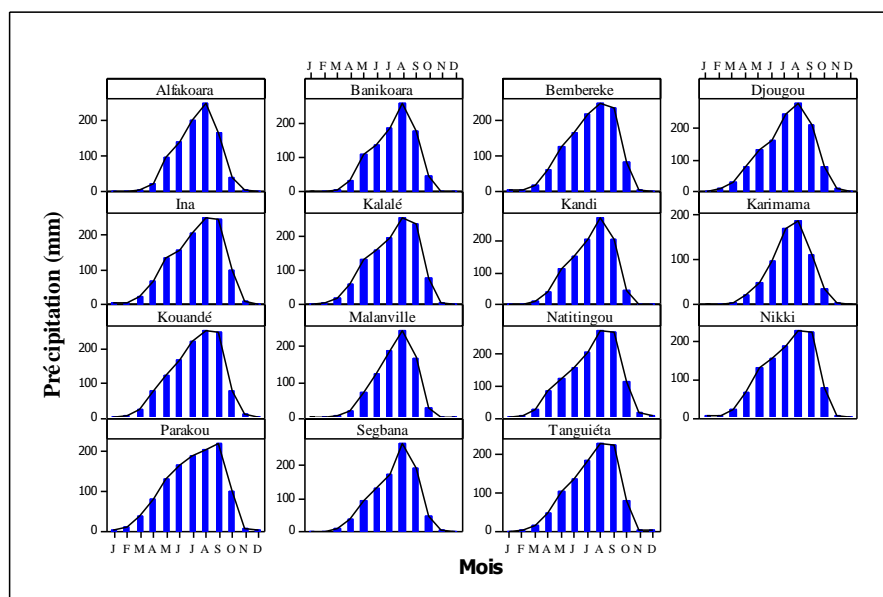


Figure 5 : Régime pluviométrique des stations du bassin béninois du fleuve Niger.
Source des données : ANM, 2017.

1.1.6. Température du bassin béninois du fleuve Niger

Dans le bassin béninois du fleuve Niger, la température maximale moyenne mensuelle pour la période 1976-2021 est de 33,8°C. Cette valeur monte parfois jusqu'aux environs de 40°C (Figure 6). Par contre sur le bassin, la moyenne de la température est de 27,7°C. Elle est de 27,4°C à Natitingou et Parakou et 28,4°C à Kandi (Figure 6). En revanche, sur l'ensemble du bassin, les minima des températures s'échelonnent entre 15°C et 26°C (Figure 6). Ces valeurs moyennes présentent beaucoup de disparité quel que soit le point où l'on se trouve sur le bassin d'étude.

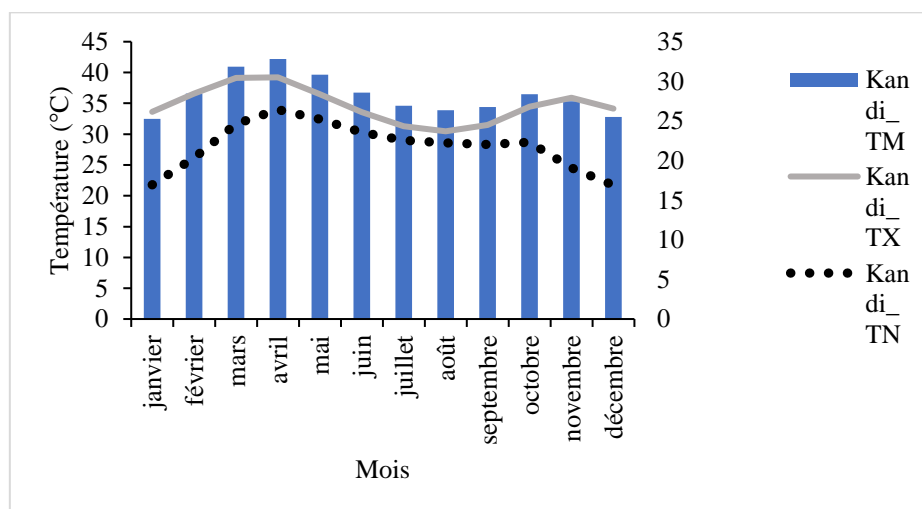


Figure 6 : Variation des paramètres moyens mensuels de température (Moyenne, Maximale et minimale (1976-2019))

Source des données : ANM, 2017.

TM= Température Moyenne, TX= Température Maximale, TN= Température Minimale

1.2. Milieu socio-économique

1.2.1. Découpage administratif

Sur le plan administratif, le territoire du bassin béninois du fleuve Niger s'étend sur trois départements qui sont l'Alibori, l'Atacora et le Borgou (Figure 7). Le bassin s'étend sur toutes les six communes de l'Alibori, six communes de l'Atacora et cinq communes du Borgou (Bembèrèkè, Kalalé, Nikki, Pèrèrè et Sinendé).

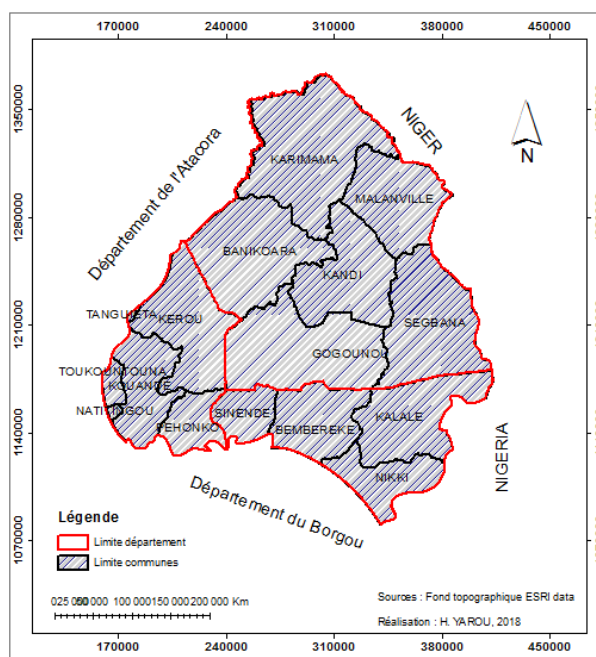


Figure 7 : Carte administratif du bassin béninois du fleuve Niger.

1.2.2. Démographie

Sur le plan démographique, le bassin reçoit la pression d'une population d'environ 1 997 743 habitants selon le recensement général de la population et de l'habitat de 2013 (RGPH 4) (INSAE, 2016). Cette portion représente environ 19,96% de la population totale du Bénin. Cette population du bassin était de 1 451 646 habitants en 2002 (INSAE, 2002). En 11 ans, la population autour du bassin a connu une augmentation de 546 097 habitants (soit une augmentation d'environ 37,62%). Les communes du bassin béninois du fleuve Niger sont caractérisées par une faible densité de population mais avec un taux d'accroissement élevé. Cela peut s'expliquer, entre autres, par une importante immigration des ménages agricoles à la recherche de terres arables ou par l'exode rural.

1.2.3. Groupes socio-culturels

Attirées par les ressources naturelles du bassin, les populations qui occupent le territoire du bassin béninois du fleuve Niger sont de plusieurs groupes ethniques (Agli, 1995). Ce sont les Baatombu (49%), les Fulbé et les Gando (33%), les Boko, les Dendi (10%), les Gulmancé (2,5

%), les Mokolé (2,2 %), les Yowa (0,4 %), et les Tchenga (0,9 %). Ces divers groupes seraient venus à des époques différentes de divers empires africains du Moyen Âge (Adam et Boko, 1993).

Tous ces peuples regroupés en communautés rurales pratiquent en majorité la religion musulmane (72,6 % de musulmans contre moins de 9 % de catholiques) et ont développé des civilisations agraires différentes en rapport avec l'évolution de l'histoire agricole du bassin et le contexte économique national (Vissin, 2007).

1.2.4. Activités économiques

L'agriculture apparaît comme le poumon de l'économie du bassin (Vissin, 2007). Mais elle reste traditionnelle et pluviale. Les populations y cultivent les produits vivriers (tels que l'igname, le manioc, le maïs, le mil...) comme les produits de rente (tels que le coton, l'arachide...).



Figure 8 : Culture de coton sur le bassin béninois du fleuve Niger (Kouandé) (cliché Yarou, 2015).

L'élevage, elle est après l'agriculture, la plus importante activité de la zone nord du Bénin mais il ne couvre qu'environ 6 % des besoins annuels en protéines de la population. Les communes de Banikoara, de Kandi, de Kalalé, de Nikki et de Bembéréké constituent en particulier de grands centres d'élevage de bovins, caprins et ovins. Les communes de Banikoara, de Kandi et de Kalalé abritent à elles seules 26 % du cheptel bovin du Bénin et les deux départements (Alibori et Borgou) rassemblent 69 % des bovins du pays (Adjinacou et Onibon, 2004). A côté de ces activités, on peut citer d'autres qui sont d'une faible importance. Il s'agit de la pêche pratiquée sur le fleuve Niger et ses affluents, les activités de commerce et les activités touristiques.



Figure 9 : Cheptel de bovin dans le bassin béninois du fleuve Niger (Kandi) (cliché Yarou, 2021).

1. 2.5. Accès à l'eau des populations du bassin béninois du fleuve Niger

Essentielle au maintien de la vie, l'eau fait partie des principales ressources naturelles qui favorisent l'installation des populations. Etant donné que tous les affluents du fleuve Niger situés sur le bassin béninois du fleuve Niger sont temporaires à l'exception de la Sota, les eaux souterraines constituent la principale source d'approvisionnement permanente en eau potable sur le bassin.

Dans la plupart des localités du bassin béninois du fleuve Niger, il existe des puits forés par le programme d'hydraulique villageoise de la Direction Générale de l'Eau (DG-Eau) qui a initié un important projet de forage et d'adduction d'eau (bornes fontaines) dans les localités pour l'approvisionnement en eau des populations du bassin. A côté de ces points d'eau, il existe d'autres sources d'approvisionnement telles que : les barrages, les surcreusements, les puits modernes (puits à grands diamètres) et les sources aménagées (tableau 1). Ces derniers jouent un grand rôle dans la résolution d'accès à l'eau des populations même si de nos jours elles sont qualifiées de sources impropres.

Tableau 1 : Sources d'approvisionnement en eau des communes du bassin béninois du fleuve Niger

Commune	PMH	PM/Autres	Retenue/SA	BF	Total
Banikoara	528	143	0	84	755
Bembèrèkè	387	156	11	29	583

Gogounou	327	79	0	32	438
Kalalé	304	262	10	4	580
Kandi	304	94	8	51	457
Karimama	82	16	0	22	120
Kérou	194	40	9	8	251
Kouandé	184	135	6	6	331
Malanville	160	18	3	26	207
Natitingou	253	107	8	17	385
Nikki	343	121	0	12	476
Péhunco	225	80	9	7	321
Pèrèrè	213	75	0	2	290
Ségbana	266	39	11	19	335
Sinendé	185	93	10	21	309
Tanguiéta	165	67	3	5	240
Toukountouna	129	36	1	3	169
TOTAL	4249	1561	89	348	6247

PMH : forage équipé de Pompe à Motricité Humaine

PM : Puit moderne

SA : Source Aménagée

BF : Borne-Fontaine

A partir des résultats du recensement général de la population et de l'habitat de 2016, nous avons estimé la population de 2019 des communes du bassin béninois du fleuve Niger (tableau 2). Et en considérant un point d'eau pour 250 habitants (norme du Bénin), nous avons évalué si toutes les populations sont desservies. Il en ressort qu'aucune commune du bassin béninois du fleuve Niger n'est entièrement desservie (tableau 2). A ceci s'ajoute le nombre important d'ouvrages en panne.

Tableau 2 : Taux de desserte des communes du bassin béninois du fleuve Niger.

Commune	Population 2013	Ouvrages disponibles	Population 2019	Besoin réel	Manques	Populations desservies	Taux desserte
Banikoara	246 575	755	279321	1117	362	188750	67,57
Bembèrèkè	131 255	572	148686	595	23	143000	96,18
Gogounou	117 523	438	133130	533	95	109500	82,25

Kalalé	168 882	570	191310	765	195	142500	74,49
Kandi	179 290	449	203100	812	363	112250	55,27
Karimama	66 353	120	75165	301	181	30000	39,91
Kérou	100 197	242	113503	454	212	60500	53,30
Kouandé	111 540	325	126353	505	180	81250	64,30
Malanville	168 641	204	191037	764	560	51000	26,70
Natitingou	103 843	377	117634	471	94	94250	80,12
Nikki	151 232	476	171316	685	209	119000	69,46
Péhunco	78 217	312	88604	354	42	78000	88,03
Pèrèrè	78 988	290	89478	358	68	72500	81,03
Ségbana	89 081	324	100911	404	80	81000	80,27
Sinendé	91 672	299	103846	415	116	74750	71,98
Tanguiéta	74 675	237	84592	338	101	59250	70,04
Toukountouna	39 779	168	45062	180	12	42000	93,21
Total	1 997 743	6 158	2 263 050	9 052	2 894	1 539 500	70,24

Conclusion

De ce chapitre, on retient que la zone d'étude a un relief à deux grandes unités topographiques qui sont : la pénélaine cristalline et le plateau de grès de Kandi avec du grès et du socle. Il nous renseigne également que le bassin béninois du fleuve Niger a un régime pluviométrique unimodal qui décroît du sud du bassin vers le nord, et ce régime est en relation avec sa végétation qui devient progressivement clairsemée suivant le même sens. La température quant à elle augmente quand on quitte le sud pour nord. Le bassin a une population qui a un taux d'accroissement très élevé. Cette population qui développe plusieurs activités économiques présente des besoins en eau très diversifiés.

CHAPITRE 2 : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Ce chapitre présente au prime abord une brève revue bibliographique sur les extrêmes hydrométéorologiques. Il montre les causes des extrêmes climatiques récents, les différents moyens qui sont développés par les experts pour les comprendre, réduire leurs intensités, atténuer leurs impacts et s'y adapter. Ensuite, il fait cas des sécheresses et finit par la modélisation pluie-débit.

2. 1. Extrêmes hydrométéorologiques

2.1. 1. Extrêmes de précipitation

Le changement climatique est maintenant largement reconnu par la communauté scientifique (IPCC, 2013). Le climat se caractérise par un état moyen, mais aussi par des variations autour de cet état moyen. L'étude des changements climatiques passe à la fois par celle de l'évolution des paramètres moyens et par celle des extrêmes (Moisselin et Dubuisson, 2006). Ces indices sont souvent utilisés pour étudier les extrêmes de pluies. Les indices pluviométriques fournissent un bon mélange de mesures d'intensité (R95p, RX5day, SDII), de fréquence (CWD, CDD) et de proportion du total (R90T) (Haylock, 2004).

Haylock et *al.* 2006 ont étudié l'évolution des pluies extrêmes en Amérique du Sud et ont conclu que la plupart des indices de pluies extrêmes ont la même tendance que les précipitations annuelles soit une tendance à la baisse dans la grande partie de la région. L'Afrique de l'Ouest est la région du monde qui connaît le déficit pluviométrique le plus important (Ozer et *al.* 2017). Selon de nombreux modèles, la dégradation pluviométrique pourrait s'amplifier dans les décennies à venir (Ozer et *al.*, 2014). Pour Sarr et Camara (2017), les différences importantes sont observées sur l'évolution des précipitations en Afrique de l'Ouest. En effet, de 1982 à 2016, les auteurs ont constaté une augmentation de trois à quatre fois du nombre de systèmes convectifs méso-échelles intenses au Sahel.

Selon Taylor et *al.* (2017), cette dégradation des précipitations annuelles se serait néanmoins accompagnée d'une augmentation considérable des phénomènes météorologiques violents au cours des 35 dernières années dans le Sahel. Certaines études montrent également que ce changement se traduit par une intensification des pluies et une récurrence des événements extrêmes (plus perceptible sur les dernières décennies 1991- 2010) (OMM, 2013, New et *al.* 2001 ; Christensen et *al.* 2007). Cet accroissement de l'aléa pluviométrique excédentaire extrême étant lié au changement climatique, cela pourrait donc se renforcer dans les décennies à venir et finalement engendrer de sérieuses répercussions sur l'agriculture et les infrastructures de la région dans les prochaines décennies (Ozer et *al.* 2017). Par exemple au Niger, les jours

secs consécutifs ont considérablement augmenté et les jours humides consécutifs se sont réduits (Ozer *et al.*, 2017). En Mauritanie, les résultats montrent que les indices PTOT, JP, P10 et P20 présentent une tendance à la baisse significative sur la période 1933-2010. Dans le même temps, la fréquence des précipitations intenses et extrêmes évolue peu (Ozer *et al.*, 2014).

Pour la période future, une variation probable des précipitations est attendue. Le modèle CCLM4 prévoit un déficit de précipitation sur presque toute l'Afrique de l'Ouest excepté la partie Ouest de la zone guinéenne. Le modèle CanRCM4 prévoit une diminution de la pluie sur tout le Sahel Ouest et au Sud de 5°N. Quant à RCA4, une faible diminution de la pluie est notée sur une bonne partie de l'Afrique de l'Ouest. Quand nous considérons le modèle RACMO22T et la moyenne des modèles, ils prévoient une diminution du cumul pluviométrique sur le Sahel Ouest (Sarr et Camara 2017).

2.1.2. Extrêmes de température

Plus un événement est extrême, plus il est susceptible de causer des dommages à la société ou à l'environnement. Comme de nombreux aspects du climat sont représentés par les moyennes mensuelles, la plupart des indices dérivés des données quotidiennes se concentrent généralement sur les extrêmes (Zhang *et al.* 2011).

La figure 10 montre une représentation des extrêmes. Les deux principales différences entre les divers indices des extrêmes sont (1) la façon dont la distribution a été définie et (2) la distance entre les extrémités de la distribution où se situe le seuil de l'indice. De façon générale, les indices qui caractérisent certains aspects des extrémités de la distribution ont tendance à être plus pertinents pour la société et les systèmes naturels que les indices qui caractérisent les aspects de la distribution qui se produisent plus fréquemment (Zhang *et al.* 2011). Fait intéressant, comme le montre la figure 11, les indices qui tiennent compte de différents points de la queue de la distribution révèlent parfois des signaux climatiques très semblables. Toutefois, même pour la température, on peut observer des changements qui ne sont pas cohérents entre les moyennes et les extrêmes, entre le minimum et le maximum, et entre la queue supérieure et la queue inférieure.

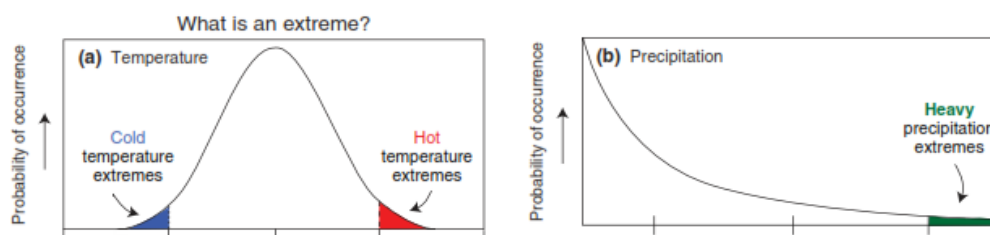


Figure 10 : Représentation stylée des extrêmes (Zhang *et al.* 2011)

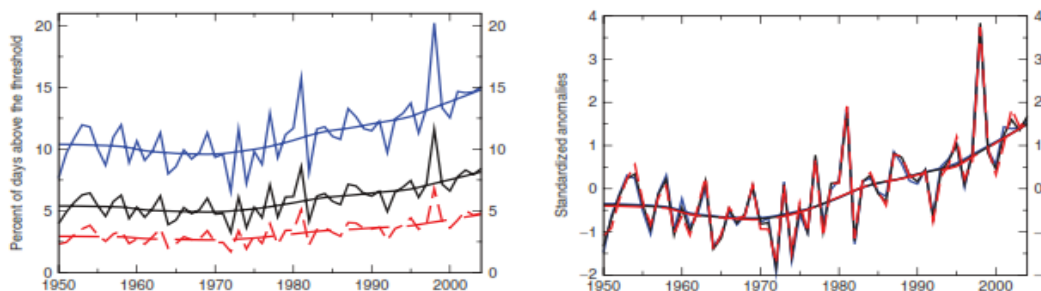


Figure 11 : Exemple des indices qui tiennent compte des différents points de la distribution (Zhang *et al.* 2011).

La plupart des travaux qui utilisent ces deux styles de représentation des indices (Figures 10 et 11) ont pour objectif de caractériser l'évolution du climat au cours des années, en particulier la variabilité et les extrêmes de température et de précipitations. Ces genres d'analyses ont ainsi permis de remarquer une augmentation de température d'environ $0,7^{\circ}\text{C}$ durant le 20^e siècle (IPCC, 2007), ce qui a été une période de grande chaleur pour l'hémisphère nord durant le dernier millénaire (Osborn and Briffa, 2006) augmentant alors l'intérêt scientifique sur le climat dans le monde.

Dans d'autres régions telle que le golfe du fleuve saint Laurent, on observe des tendances systématiques à la diminution pour les indices de températures (Tramblay, 2005). En Tunisie, Haythem (2015) montre que les températures ont subi une augmentation significative aux échelles annuelle et saisonnière au cours de la période 1951-2010. Les extrêmes chauds ont augmenté et les extrêmes froids ont diminué. Pour la Turquie, Serhat *et al.* (2013), ont montré qu'au cours de la période 1960-2010, la plupart des indices de températures ont connu une augmentation. On remarque également une augmentation significative de tous les indices liés à la température à Djibouti pendant la période 1966-2011 (Mahamoud *et al.* 2013). Au Bénin, les résultats obtenus par Gnanglè *et al.* (2011) indiquent une augmentation significative de la température moyenne (plus de 1°C) dans les trois zones climatiques (soudanienne, soudano-guinéenne et guinéenne). A l'échelle continentale, l'Europe a l'expérience d'une chaleur inhabituelle durant l'an 2003 au cours des vagues de chaleurs (Luterbacher *et al.* 2004). Ce phénomène de variabilité de températures semble être planétaire.

Dans l'avenir, il est décrit une augmentation de $0,25^{\circ}\text{C}$ par décennie jusqu'à 2050 environ, et ensuite une augmentation de $0,36^{\circ}\text{C}$ par décennie lors de la deuxième moitié du 21^e siècle pour la Suisse (Davide, 2016). Pour Heythem, (2015), les moyennes de température à l'horizon 2050 vont augmenter entre $1,4$ et $2,1^{\circ}\text{C}$ sur l'ensemble du pays par rapport à la moyenne calculée sur la période 1961-1990 selon la moyenne d'ensemble des modèles. Cette hausse est plus

importante sur l'extrême sud de la Tunisie. Au Bénin, Badou (2016) montre que les températures moyennes connaîtront également une hausse (-0,1 à 0,48°C) pour les modèles HIRHAM5 et RCSM.

Face à cette situation qui semble être globale, la caractérisation des adaptations des populations locales dans un contexte de changements climatiques permettra de mieux analyser, comprendre et vulgariser les meilleures adaptations, tenant compte des spécificités climatiques régionales pour le futur.

Dans ce travail, l'analyse de la variabilité climatique dans le bassin d'étude passe par l'analyse des extrêmes climatiques. Pour analyser les extrêmes, les études climatiques recourent très souvent aux « indicateurs des extrêmes » ou indices.

Etant donné que les indices climatiques sont dérivés de la distribution empirique annuelle ou saisonnière des variables climatiques considérées, leurs définitions et formules mathématiques ont été proposées par plusieurs groupes de recherche (STARDEX, <http://www.cru.uea.ac.uk/projects/stardex/> ; ECA&D, <http://eca.knmi.nl/> ; CLIVAR/ETCCDMI, <http://www.clivar.org/organization/etccdi/etccdi.php>) mais également utilisés par plusieurs auteurs (Jones et al. 1999 ; Frich et al. 2002 ; Klein Tank and Können, 2003 ; Kiktev et al. 2003 ; Alexander et al. 2006).

2.2. Sécheresses

La sécheresse est un phénomène normal qui peut survenir sous n'importe quel climat n'importe où dans le monde, même dans les déserts et les forêts tropicales. Les sécheresses se classent parmi les dangers naturels les plus coûteux d'une année sur l'autre; elles ont des conséquences considérables et étendues, qui touchent en même temps une multitude de secteurs économiques et une large population (OMM et GWP, 2016). La sécheresse sous quelque forme que ce soit induit forcément un déficit dans les apports en eau. Elle est provoquée par divers processus hydrométéorologiques qui inhibent les précipitations ou limitent le volume des eaux superficielles et souterraines disponibles, créant des conditions beaucoup plus sèches que la normale ou réduisant autrement l'humidité disponible dans des proportions potentiellement dommageables (OMM et GWP, 2016). En Afrique de l'Ouest elle se manifeste souvent par le raccourcissement des saisons de pluies (Faye, 2013). Au Sénégal, avec les travaux de Sarr (2009), il est projeté une augmentation (respectivement une diminution) de la durée maximale des séquences sèches (respectivement de la durée maximale des séquences humides) sur l'ensemble du Sénégal à l'horizon 2100.

La sécheresse peut être caractérisée par son intensité, son emplacement, sa durée et son moment d'apparition. Pour étudier la sécheresse les experts font recours souvent aux 1) indicateurs qui sont des variables ou des paramètres qui servent à décrire les conditions de sécheresse (les précipitations, la température, l'écoulement fluvial, le niveau des nappes et des réservoirs, l'humidité du sol et le manteau neigeux) ou 2) indices qui sont le plus souvent des représentations numériques de l'intensité des sécheresses, que l'on calcule à partir de valeurs climatiques ou hydrométéorologiques, dont les indicateurs précités (OMM et GWP, 2016).

En effet, il existe une multitude d'indices avec des caractéristiques et interprétations très variables et diversifiées selon les zones et les objectifs poursuivis par l'étude. Tout comme il n'existe pas de définition unique de la sécheresse, il n'existe pas d'indicateur ou d'indice qui correspondrait et conviendrait à tous les types de sécheresse. Mais néanmoins, les sécheresses peuvent être classées selon les types d'indices par lesquels elles se manifestent. Ainsi, on a les sécheresses hydrologiques, météorologiques voire agricoles (Mohammed, 2008).

Pour caractériser la sécheresse météorologique, on peut par exemple employer 1) l'Indice d'Aridité Anormale (AAI), élaboré en Inde par le service météorologique national, il est un indice en temps réel fondé sur le bilan hydrique (OMM et GWP, 2016). 2) le KBDI ou Indice de sécheresse de Keetch-Byram (1960). Il est mis au point pour déceler les stades précoces de la sécheresse par une méthode uniforme adaptée au climat de la région. Il indique l'effet net de l'évapotranspiration et des précipitations sur le déficit d'humidité dans les couches superficielles du sol et donne une idée du volume de précipitations nécessaire pour saturer le sol et éliminer le stress hydrique. 3) l'Indice de Précipitations Normalisé (SPI) qui est le fruit des recherches et des travaux conduits en 1992 par McKee et ses collaborateurs à l'Université d'État du Colorado (États-Unis). L'indice repose sur les rapports de la fréquence et de la durée des sécheresses avec les échelles temporelles. En 2009, l'OMM a recommandé d'utiliser principalement le SPI pour surveiller l'évolution des conditions de sécheresse météorologique (Hayes, 2011).

La sécheresse hydrologique, par contre, est évaluée par les indices tels que : 1) le PHDI (Indice de Sécheresse Hydrologique de Palmer) qui fait partir des éléments de la série d'indices élaborés par Palmer dans les années 1960 au bureau météorologique des États-Unis. Cet indice a été adapté pour étudier les sécheresses d'une certaine durée qui influent sur le stockage de l'eau, l'écoulement fluvial et les réserves souterraines (Palmer, 1960). 2) l'Indice de Sécheresse fondé sur l'Écoulement fluvial (SDI), élaboré en s'appuyant sur la méthode et les calculs du SPI en remplacement des précipitations par les écoulements des cours d'eau. 3) le SSFI (Indice

d'Écoulement Fluvial Normalisé) décrit par Modarres en 2007 et approfondi par Telesca et ses collaborateurs en 2012. Dans ses travaux, Modarres explique que la démarche s'apparente à celle du SPI dans la mesure où l'indice SSFI pour une période donnée est défini comme la différence de l'écoulement entre la moyenne et l'écart type (OMM et GWP, 2016).

Pour les indices de sécheresse agricole on peut citer : 1) VegDRI (Indice de Réaction de la Végétation à la Sécheresse), élaboré par une équipe de chercheurs rattachés au NDMC. Cet indice vise à suivre le stress de la végétation sous l'effet de la sécheresse à partir de données de télédétection, d'indicateurs climatiques et d'autres informations biophysiques et données sur l'occupation des sols (Brown et *al*, 2008). 2) Indice de Santé de la Végétation (VHI), c'est l'une des premières tentatives pour déceler et surveiller les impacts de la sécheresse sur l'agriculture à partir de données de télédétection. Il émane des travaux de Kogan (1990, 1997 et 2001).

Employés dans différentes zones de la planète, ces indices ont permis de caractériser les sécheresses. On a en exemple Ghenim et Megnounif (2011) qui ont caractérisé la sécheresse du nord-ouest de l'Algérie à travers les indices SPI et SSFI. Les résultats montrent que les bassins versant du nord-ouest de l'Algérie ont connu globalement des périodes d'humidité et de sécheresse légères avec une tendance à la sécheresse. Au Sénégal, les travaux de Cheikh et *al* (2015) qui ont porté sur les indices SPI, CMI, la segmentation d'Hubert et la corrélation des rangs de Spearman ont permis de montrer que le haut bassin du fleuve Sénégal est caractérisé par une sécheresse pluviométrique qui a entraîné dans le bassin une sécheresse hydrologique marquée par une baisse des crues, une sévérité des étiages et une précocité des tarissements. L'application de l'indice SPI sur le bassin versant de Tarim en Chine (Qiang et *al*, 2014) a montré qu'aux échelles de 3 et 6 mois, la sécheresse est plus sentie au nord et à l'est du bassin, alors qu'elle est accentuée au centre et au nord-ouest à pas de temps de 12 mois. De même à travers les indices SDI (Streamflow Drought Index) et RDI (Reconnaissance Drought Index), Somsbhra et *al* (2017) ont montré qu'il est espéré pour le bassin versant de Kentucky dans les années à venir (2036–2065, 2070–2099) une augmentation de la durée maximale des sécheresses hydrologiques mais avec une baisse de leur intensité.

2.3. Modélisation pluie-débit

L'étude des échanges d'eau entre l'atmosphère, la surface terrestre et son sous-sol est assurée par les sciences hydrologiques. Ces échanges sont reliés à l'échelle du globe par le cycle de l'eau. Celui-ci se décline à différentes échelles spatiales et en particulier à celle de l'objet d'étude des hydrologues : le bassin versant (Poncelet, 2016). En considérant que les échanges interbassins sont considérés comme faibles au regard des apports des précipitations : on

approxime donc les lignes de partage des eaux par les lignes de crêtes topographiques. Dans ces conditions, le cycle de l'eau peut s'écrire à l'échelle du bassin versant sous la forme du bilan climatique interannuel :

$$Q = P - ETR \quad (3.1)$$

Avec Q [mm/an] le débit spécifique observé à l'exutoire du bassin (i.e. la quantité d'eau qui rejoint les cours d'eau), P [mm/an] les précipitations (i.e. la quantité d'eau disponible pour l'ensemble des processus utilisateurs d'eau) et ETR [mm/an] l'évapotranspiration réelle, qui recouvre l'ensemble des processus par lesquels l'eau sous forme liquide est transférée vers l'atmosphère sous forme de vapeur (Dingman, 1992).

La réponse hydrologique d'un bassin (et donc son bilan) dépend des conditions climatiques auxquelles il est soumis mais aussi de caractéristiques physiques qui lui sont propres : géologie, morphologie, couverture végétale... (Poncelet, 2016). La modélisation hydrologique a commencé avec les travaux de Linsley & Crawford (1960). Leur motivation pour l'étude était de choisir d'agrandir ou non une retenue en eau servant à l'alimentation en eau potable. Les auteurs mentionnent que la manière la plus efficace d'étudier quantitativement les régimes hydrologiques est d'établir des relations continues dans l'espace et dans le temps entre les éléments du cycle de l'eau. Etant donné que nous ne sommes pas capables de mesurer l'ensemble des variables d'intérêt en hydrologie, la modélisation est alors un moyen d'extrapolation des mesures et d'estimation des variables que nous ne savons pas mesurer.

Cette complexité de la situation a fait naître plusieurs revues dans le domaine de l'hydrologie. Ce qui amène Ambroise (1999) à affirmer qu'il y a presque autant de modèles que d'hydrologues. Deux approches se distinguent en ce qui concerne la représentation des processus hydrologiques : les approches ascendantes et descendantes. Les approches ascendantes s'attachent à une analyse de la réponse hydrologique basée sur des équations de bilan et qui se veut physiquement complète (Roche, 1971). On a comme exemple le modèle mHM (Samaniego et al. 2010; Kumar et al. 2013). À l'inverse, les approches descendantes conceptualisent les processus hydrologiques directement à l'échelle du bassin versant en se basant sur les observations de débit et des principes simples concernant le rendement des forçages climatiques (précipitation et évaporation). Ces approches survolent donc davantage l'aspect purement physique et se concentrent sur la représentation directe de la variable d'intérêt, le débit (Poncelet, 2016). Le modèle GR4J (Perrin et al. 2003) est un exemple.

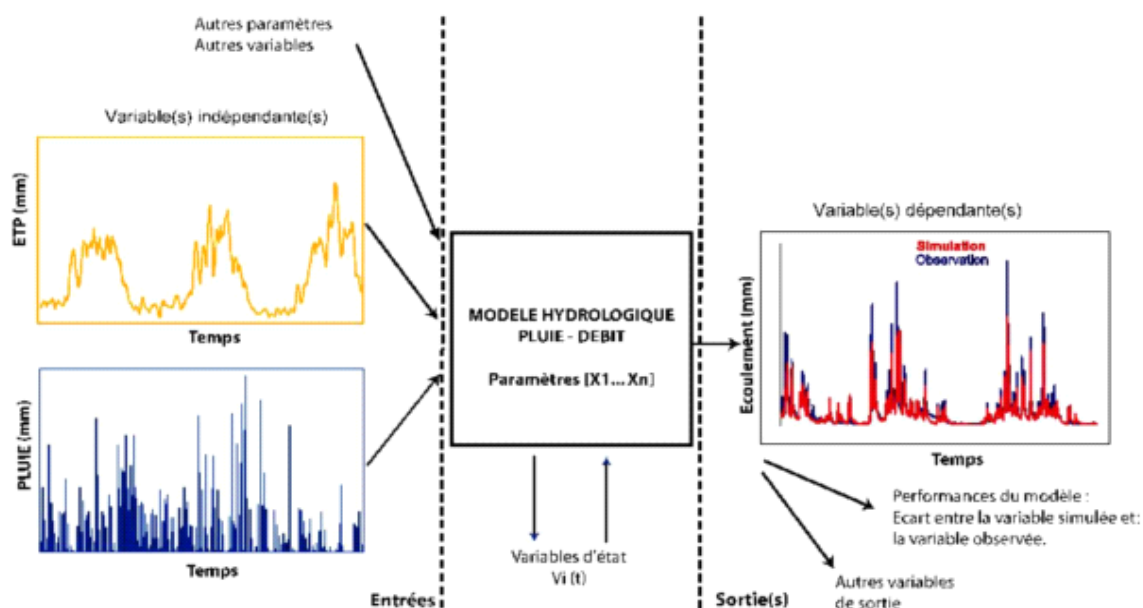


Figure 12 : Représentation du fonctionnement d'un modèle hydrologique (Toudja, 2017)

Conclusion :

En somme, de cette partie du travail, nous retiendrons que l'évolution de la pluviométrie mondiale est beaucoup plus contrastée, puisqu'elle est soumise à une forte variabilité spatio-temporelle. La température quant à elle, a augmentée d'environ $0,7^{\circ}\text{C}$ durant le 20^e siècle ce qui a été une grande chaleur pour l'hémisphère nord durant le dernier millénaire. Il faut noter que plus un événement est extrême, plus il est susceptible de causer des dommages à la société ou à l'environnement. En effet, le chapitre nous informe également que les recherches en hydrologie se sont tournées vers des méthodes par simulation, notamment par l'utilisation de générateurs stochastiques de pluie basés sur des processus d'agrégation et par la combinaison de différentes variables aléatoires (durée, intensité, volume des averses). Par ailleurs, la revue sommaire des modèles hydrologiques pluie-débit utilisée dans cette étude montre que de considérables efforts sont également faits dans le but de la connaissance des régimes hydrologiques des bassins versants.

DEUXIEME PARTIE : MATERIEL ET METHODES

CHAPITRE 3 : MATERIEL

Pour atteindre les objectifs fixés pour ces travaux de recherche, les données au pas de temps journalier de plusieurs stations de mesures des variables météorologiques (pluie, température, humidité relative, radiation et vent) et hydrologiques (débit) sont utilisées. Ces données sont classées en deux catégories que sont : les observations et les données des modèles climatiques régionaux.

3.1. Données observées

3.1.1. Données de précipitations

Les précipitations journalières observées sont obtenues à l'Agence Nationale de la Météorologie (Météo-Bénin). Ces données regroupent les pluies journalières de la sous période 1976-2019 de quinze (15) stations pluviométriques (Figure 13). Il est à noter que 3 de ces stations sont synoptiques. Toutes les stations pluviométriques sont fonctionnelles avec quelques périodes de lacunes pour quelques-unes d'entre elles (surtout les stations non synoptiques).

3.1.2. Données de températures

Les observations journalières de températures (minimale et maximale) de trois (03) stations synoptiques (Figure 13) ont été considérées. Ces données couvrent la période de 1976 à 2019 et sont sans lacune. Ces données sont complétées par les observations journalières de radiation, de vitesse du vent et d'humidité pour le calcul des ETP journalières.

3.1.3. Données de débits

Les données débits utilisées sont extraites de la base de données du Service de l'Hydrologie de la DGEau et concernent les stations de Couberi et Gbassè sur la Sota, Kompongou sur la Mékrou et Yakin sur l'Alibori. Ces données couvrent la période de 1953-2017 (Coubéri et Yakin), de 1953-2014 (Kompongou) et de 1953-2006 (Gbassè).

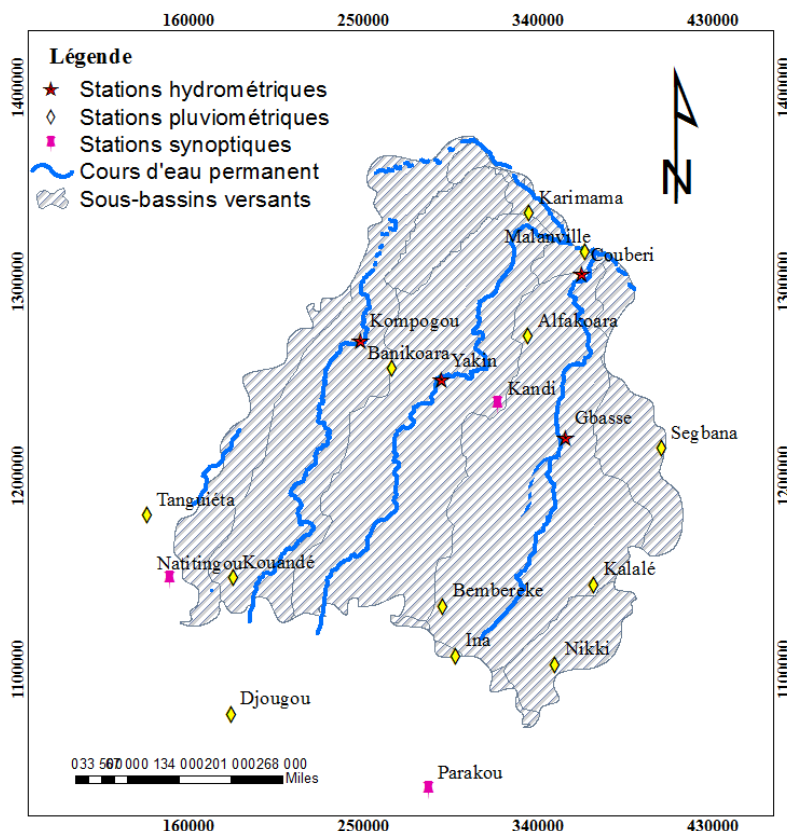


Figure 13 : Localisation des stations de mesures considérées pour l'étude.

3.2. Données des modèles climatiques

Les sorties de simulations des MCRs (HIRHAM5 et REMO) de la période historique couvrant 1960 à 2005 et des sorties des différents scénarios de changement climatique de 2006 à 2080 (RCP4.5 et RCP8.5) complètent les observations. Les données sont obtenues de la base du projet CORDEX.

Les Modèles Climatiques Régionaux sont des outils de désagrégation dynamique dont le but est de résoudre régionalement la thermodynamique de l'atmosphère en étant alimenté aux bornes par un modèle forceur (un MCG par exemple) (Obada, 2017). Les MCR sont essentiellement des MCG mais sur des domaines limités. Autrement dit, ils intègrent les mêmes processus physiques, variables pronostiques et les types de paramétrisations. Ces modèles sont utilisés pour réduire l'échelle horizontale mondiale des MCG en échelle régionale (Obada, 2017).

En Afrique de l'Ouest, les MCRs sont de plus en plus utilisés pour désagréger dynamiquement les MCGs pour produire des scénarios de changement climatique à haute résolution. Les projets comme PRUDENCE, ENSEMBLE-AMMA et CORDEX ont ainsi vu le jour pour assurer et produire des scénarios de changement climatique dans le cadre d'expériences coordonnées utilisant plusieurs MCRs. Le programme CORDEX a été mis en place afin de produire des

scénarios de changement climatique fiables par le biais de MCRs de dernière génération et aussi de comprendre et analyser les incertitudes associées aux modèles (Obada, 2017).

Les MCRs du projet CORDEX-Africa sont nombreux, mais deux sont utilisés dans cette recherche à cause des résultats satisfaisants qu'ils produisent sur le bassin versant du fleuve Niger. Il s'agit de DMI-HIRHAM5 (Danemark) et MPI-REMO (Allemagne) (Badou, 2016). Ces MCRs ont une résolution de 50km chacun et ont été forcés par des sorties des MCGs (ECHAM5 pour DMI-HIRHAM5 et MPI pour MPI-REMO). Ces modèles disposent, à l'échelle journalière, des simulations historiques sur la période de 1960-2005 et des simulations des scénarios RCP4.5 et 8.5 sur la période de 2006- 2080 ; pour les précipitations, les températures et tous les paramètres permettant d'estimer les ETP journalières par la formule de Penman-Monteith.

Tableau 3 : Caractéristiques des MCRs utilisés.

Modèle	Institution	MCG de forçage	Résolution horizontale	Niveau vertical	Simulations	Référence
HIRHAM5	DMI	EC-EARTH	50km	31	1951-2100	Christensen et al. (2006)
REMO	CSC	MPI-ESM-LR	50km	27	1951-2100	Jacob et al. (2007)

CHAPITRE 4 : METHODES

Cette section du document présente les différentes méthodes employées pour atteindre les objectifs de la recherche.

4.1. Détermination de la variabilité climatique du bassin béninois du fleuve Niger

Pour déterminer la variabilité des paramètres climatiques du bassin béninois du fleuve Niger, les paramètres climatiques annuels de chaque station ont été globalisés à l'échelle du bassin sur la base de l'indice standardisé d'anomalie pluviométrique de Lamb (1982). Cet indice est donné par l'équation suivante :

$$X_j = \frac{1}{N_j} \sum_{i=1}^{N_j} \frac{r_{ij} - \bar{r}_i}{\sigma_i} \quad (4.1)$$

Où r_{ij} est le paramètre mesuré en une année j à une station i , \bar{r}_i et σ_i sont les moyennes et écarts-types du paramètre enregistrés à la station i et N_j est le nombre de stations présentant des valeurs pour l'année j .

Cet indice est ensuite converti dans l'unité spécifique du paramètre selon la méthode de Jones et Hulme (1992). Ainsi l'équation (4.1) donne l'équation (4.2) suivante :

$$P_j = X_j \bar{\sigma} + \bar{P} \quad (4.2)$$

Où P_j est le paramètre régional exprimé en son unité en une année j , $\bar{\sigma}$ est l'écart-type moyen des séries et \bar{P} est la moyenne du paramètre régionale.

L'analyse des tendances linéaires (exprimées en % par année) a été réalisée de 1976 à 2019 par régression linéaire entre les différents paramètres climatiques et le temps (en années). Les pentes ainsi estimées ont été regroupées en deux classes indiquant des tendances significatives et non significatives. La limite des deux classes considérées est définie à partir de la statistique t de Student utilisée pour tester l'hypothèse d'une pente égale à 0. La tendance est dès lors qualifiée comme étant significative si la probabilité p du test t appliquée à la pente de régression est inférieure à 0,05, alors qu'elle ne l'est pas lorsqu'elle dépasse le seuil de 0,05.

Par ailleurs, le test non-paramétrique de Pettitt (1979), capable d'estimer la position d'un changement de moyenne (point de rupture) dans une série, a été appliqué aux séries. Ce test est suivi de la méthode bayésienne de Lee et Heghinian et la méthode de la segmentation de Hubert (1985) aux seuils de confiance de 99%, 95% et 90% avec un niveau de signification du test de Scheffé (1%).

4.2. Caractérisation des variabilités climatiques extrêmes du bassin béninois du fleuve Niger

Pour l'atteinte de cet objectif, six indices de précipitation, sept indices de température et les SPI 12 et 36 mois ont été caractérisés.

4.2.1. Indice de température

Pour caractériser les événements de températures extrêmes sur le bassin béninois du fleuve Niger les sept (07) indices de températures ci-dessous ont été calculés et analysés :

- ✓ maximum des températures Maximales annuelles (TXx)

Soit Tx_{kj} la température maximale journalière du mois k , de la période j . Le maximum journalier des températures maximales dans chaque mois est donc :

$$TXx_{kj} = \max(Tx_{kj}) \quad (4.3)$$

- ✓ valeur minimale mensuelle des températures minimales journalières (TNn)

Soit Tn_{kj} la température minimale journalière du mois k , de la période j . Le minimum journalier des températures minimales dans chaque mois est donc :

$$TNn_{kj} = \min(Tn_{kj}) \quad (4.4)$$

- ✓ nuits chaudes (TN90p)

Soit Tn_{ij} la température minimale journalière du jour i , de la période j et soit Tn_{in90} le 90^{ème} percentile des jours calendaires centré sur un intervalle de 5 jours (calculer selon la méthode de la section 4.2.2.). Le nombre de nuits chaudes est :

$$Tn_{ij} > Tn_{in90} \quad (4.5)$$

- ✓ jours chauds (TX90p)

Soit Tx_{ij} la température maximale journalière du jour i , de la période j et soit Tx_{in90} le 90^{ème} percentile des jours calendaires centré sur un intervalle de 5 jours (calculer selon la méthode de la section 4.2.2.). Le nombre de jours chauds est :

$$Tx_{ij} > Tx_{in90} \quad (4.6)$$

- ✓ indicateur de séquences chaudes (WSDI)

Soit Tx_{ij} la température maximale journalière du jour i , de la période j et soit Tx_{in90} le 90^{ème} percentile des jours calendaires centré sur un intervalle de 5 jours (calculer selon la méthode de la section 4.2.2.). Ainsi, la somme de nombre de jours par période est faite dans les intervalles avec au moins 6 jours consécutifs.

$$Tx_{ij} > Tx_{in90} \quad (4.7)$$

- ✓ indicateur de séquences froides (CSDI)

Soit Tn_{ij} la température minimale journalière du jour i , de la période j et soit $Tn_{in}10$ le 10^{ème} percentile des jours calendaires centré sur un intervalle de 5 jours (calculer selon la méthode de la section 4.2.2.). Ainsi, la somme de nombre de jours par période est faite dans les intervalles avec au moins 6 jours consécutifs.

$$Tn_{ij} < Tn_{in}10 \quad (4.8)$$

✓ Amplitude thermique (DTR)

Soient Tx_{ij} et Tn_{ij} respectivement les maximums et minimums des températures journalières du jour i de la période j . Si I représente le nombre de jours de j , on a :

$$DTR_j = \frac{\sum_{i=1}^I (Tx_{ij} - Tn_{ij})}{I} \quad (4.9)$$

4.2.2. Estimation des seuils et période de base pour le calcul des indices de températures

✓ Estimation empirique des quantiles

Le quantile de la distribution est défini comme (Zhang et al. 2005) :

$$Q(p) = F^{-1}(p) = \inf\{x : F(x) \geq p\} \quad (4.10)$$

Où $F(x)$ est la fonction de distribution.

Soient $\{X_{(a)}, \dots, X_{(n)}\}$ une série ordonnée de la série $\{X_1, \dots, X_n\}$ (c'est-à-dire les valeurs croissantes de $\{X\}$), et notons $\hat{Q}_i(p)$ la i -ème quantile de l'échantillon. Les quantiles des échantillons peuvent généralement être écrits comme suit :

$$\hat{Q}_i(p) = (1 - \gamma)X_{(j)} + \gamma X_{(j+1)} \quad (4.11)$$

Hyndman et Fan (1996) suggèrent une formule pour obtenir une estimation moyenne non biaisée du quantile en posant $j = \text{int}(p * n + \frac{1+p}{3})$ et $\gamma = p * n + \frac{1+p}{3} - j$, où $\text{int}(u)$ est le plus grand entier non supérieur à u . Le quantile empirique est défini respectivement comme la plus petite ou la plus grande valeur de l'échantillon lorsque $j < 1$ ou $j > n$ c'est-à-dire des estimations des quantiles correspondant à $p < 1 / (n + 1)$ sont associées à la plus petite valeur de l'échantillon, et ceux correspondant à $p > n / (n + 1)$ sont associées à la plus grande valeur de l'échantillon.

✓ Procédure pour l'estimation du taux de dépassement de la période de base

Il n'est pas possible de faire une estimation exacte des seuils en raison de l'incertitude des échantillonnages. Afin de fournir une estimation cohérente dans le temps du taux de dépassement tout au long de la période de base et hors de la période de base, nous adaptons la procédure suivante (Zhang et al. 2005) :

- La période de base de 30 ans est divisée en une année « hors de la base », année pour laquelle le dépassement doit être estimé, et une "période de base" comprenant les 29 ans restants à partir desquels les seuils seraient estimés.
- Un bloc de données de 30 ans est construit en utilisant le jeu de données «période de base» de 29 ans et en ajoutant une année supplémentaire de données de la "période de base" (c'est-à-dire une des années dans la "période de base" est répétée). Ce bloc construit de 30 ans est utilisé pour estimer les seuils.
- L'année «hors de base» est ensuite comparée à ces seuils et au taux dépassement pour l'année «hors de la base» obtenue.
- Les étapes (b) et (c) sont répétées 28 fois supplémentaires, en répétant chacune des 28 années de référence restantes à tour de rôle pour construire le bloc de 30 ans.
- L'indice final de l'année «hors de la base» est obtenu en faisant la moyenne des 29 estimations obtenues à partir des étapes (b), (c) et (d).

4.2.3. Indice de précipitation extrême

L'analyse des événements pluviométriques extrêmes sur le bassin béninois du fleuve Niger s'est fait à travers le calcul et la caractérisation des six (06) indices suivants :

- précipitations totales annuelles (PRCPTOT)

Soit RR_{ij} la précipitation journalière du jour i de la période j . Si I représente le nombre de jours dans j , alors :

$$PRCPTOT = \sum_{i=1}^I RR_{ij} \quad (4.12)$$

- nombre de jours pluvieux (R1mm)

Soit RR_{ij} la précipitation journalière du jour i de la période j . On compte le nombre de jours où :

$$RR_{ij} \geq 1mm \quad (4.13)$$

- plus grande séquence sèche (CDD)

Soit RR_{ij} la précipitation journalière du jour i de la période j . On détermine le plus grand nombre de jours consécutifs où :

$$RR_{ij} < 1mm \quad (4.14)$$

- précipitation maximale journalière (RX1day)

Soit RR_{ij} la précipitation journalière du jour i de la période j . la pluie maximale journalières au cours de la période j est :

$$RX1day_i = \max(RR_{ij}) \quad (4.15)$$

- précipitation maximale de 5 jours consécutifs (RX5day)

Soit RR_{kj} la précipitation d'un intervalle de 5 jours qui finit par k , de la période j . Le maximum des valeurs de 5 jours au cours de la période j est :

$$RX5day_i = \max(RR_{kj}) \quad (4.16)$$

□ précipitations intenses (P95p)

Soit RR_{wj} la précipitation journalière d'un jour humide w ($RR \geq 1mm$) de la période j et soit RR_{wn95} le 95^{ème} percentile des précipitations des jours humides de la période 1961-1990. Si W représente le nombre de jours humide de la période, donc :

$$R95p_j = \sum_{w=1}^W RR_{wj} \quad \text{où } RR_{wj} > RR_{wn95} \quad (4.17)$$

4.2.4. Indice de Précipitation Normalisé (SPI)

Pour évaluer la sécheresse sur le bassin versant du fleuve Niger, l'Indice Standardisé des Précipitations (SPI) a été employé. Cet indice créé par McKee et al. (1993) où la répartition des précipitations est généralement positivement asymétrique, On applique une transformation aux données afin de rendre leur distribution normale ou gaussienne (Sharma, 1997). Dans la présente recherche, le SPI est transformé selon la distribution de Gamma. Le calcul du SPI implique donc l'ajustement d'une fonction de densité de probabilité Gamma à une série temporelle donnée des précipitations, dont la fonction de densité de probabilité est définie comme suit (Angelidis et al, 2011)

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} \quad (4.18)$$

Où : $\alpha > 0$ est un paramètre de forme ; $\beta > 0$ est un paramètre d'échelle et $x > 0$ est la quantité des précipitations.

$\Gamma(\alpha)$: est la fonction gamma, définie par:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty y^{\alpha-1} e^{-y} dy \quad (4.19)$$

L'ajustement de la distribution aux données nécessite l'estimation de α et β . En utilisant l'approximation de Thom (1958), ces paramètres peuvent être estimés comme suit :

$$\alpha = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right) \quad (4.20)$$

$$\text{avec } A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x)}{n} \quad (4.21)$$

$$\text{et } \beta = \frac{\bar{x}}{\alpha} \quad (4.22)$$

Où : \bar{x} est la valeur moyenne de la quantité des précipitations ; n le numéro de mesure des précipitations et x la quantité de précipitations dans une séquence de données.

L'intégration de la fonction de densité de probabilité par rapport à x donne l'expression G (x) pour la probabilité cumulée donnée ci-après :

$$G(x) = \int_0^x g(x)dx = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_0^x x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} dx \quad (4.23)$$

En substituant $t= x / \beta$, la dernière équation est réduite à :

$$G(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^x t^{\alpha-1} e^{-t} dt \quad (4.24)$$

Il est possible d'avoir plusieurs valeurs zéro dans un échantillon. Afin de prendre en compte la probabilité de valeur zéro, étant donné que la distribution Gamma n'est pas définie pour x=0, la fonction de probabilité cumulée pour la distribution Gamma est modifiée comme suit :

$$H(x) = q + (1 - q)G(x) \quad (4.25)$$

Où q est la probabilité d'une précipitation nulle, calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$q = \frac{m}{n} \quad (4.26)$$

Avec m : nombre indiquant combien de fois la précipitation a été nulle dans une séquence temporelle de données ; n : nombre d'observations des précipitations dans une séquence de données.

Enfin, la distribution de probabilité cumulée est transformée en distribution normale pour donner le SPI. Après la conversion approximative fournie par Abramowitz et Stegun (1965), il en résulte que :

$$z = SPI = - \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \quad (4.27)$$

$$\text{et } t = \sqrt{\ln \left(\frac{1}{(H(x))^2} \right)} \quad (4.28)$$

Pour : $0 < H(x) < 0.5$

$$z = SPI = + \left(- \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \quad (4.29)$$

$$ET \quad t = \sqrt{\ln \left(\frac{1}{(1-H(x))^2} \right)} \quad (4.30)$$

Pour : $0,5 < H(x) < 1$

$$\text{Et : } c_0 = 2,515517 \quad c_1 = 0,802853 \quad c_2 = 0,010328$$

$$d_1 = 1,432788 \quad d_2 = 0,189269 \quad d_3 = 0,001308$$

Pour calculer l'indice SPI, il faut disposer idéalement de relevés journaliers, hebdomadaires ou mensuels s'étalant sur au moins 20 à 30 ans, mais de préférence sur 50 à 60 ans, voire plus, ce qui constitue la période optimale (Guttman, 1994).

Cet indice définit la sévérité de la sécheresse en différentes classes. Le SPI prend en compte la variabilité de la pluie pour des périodes définies, de préférence les plus longues possibles. Il est calculé grâce à l'ajustement des séries pluviométriques recueillies à une courbe de probabilité (McKee et al. 1993). Pour une série distribuée suivant une loi normale, le SPI est équivalent à l'Indice Centré Réduit (ICR). Le plus souvent, le choix de la transformation porte sur la loi de probabilité Gamma. Bien que l'ajustement à cette loi puisse être réalisé par des méthodes analytiques, une méthode statistique selon Edwards et McKee (1997) est utilisée. La modélisation est basée sur les paramètres de forme et d'échelle. Une technique de transformation d'équiprobabilité proposée par Abramowitz et Stegun (1965) est appliquée aux données de précipitations. En général, sept (7) classes sont introduites pour délimiter différents seuils de sécheresse et d'humidité. Dans la présente étude 4 de ces classes ont été retenues (tableau 4).

L'indice SPI d'un lieu donné se calcule, pour la période choisie, à partir des relevés à long terme des précipitations. La série des données de longue durée est ajustée à une distribution de probabilité que l'on transforme ensuite en une distribution normale pour que l'indice SPI moyen, du lieu considéré et pour le laps de temps étudié, soit égal à zéro (Edwards et McKee, 1997). Les valeurs positives de l'indice SPI indiquent des précipitations supérieures à la médiane et les valeurs négatives, des précipitations inférieures à la médiane. L'indice SPI indique qu'une sécheresse débute quand sa valeur est inférieure ou égale à -1,0 et qu'une sécheresse se termine quand sa valeur devient positive.

Tableau 4 : Catégories de sécheresses définies par les valeurs du SPI (McKee et al. 1993).

Valeurs de SPI	Degré d'humidité ou de sécheresse
-0,99 à 0,99	Proche de la normale
-1,49 à -1,0	Sécheresse modérée

-1,99 à -1,5	Sécheresse sévère
≤ -2	Sécheresse extrême

Le fait que l'indice soit normalisé permet de déterminer le caractère peu fréquent d'un épisode de sécheresse en cours, ainsi que la probabilité d'une précipitation suffisante pour y mettre fin (McKee *et al.* 1993). Cela nous a permis d'évaluer selon quelle fréquence un épisode de sécheresse donné se produit.

En se basant sur les probabilités d'occurrence et les rangs des événements de sécheresse, les risques de sécheresse ont été calculés et spatialisés pour chaque fenêtre de SPI (12 et 36 mois).

4.2.5. Evaluation de la tendance

Sur le bassin béninois du fleuve Niger, l'analyse des tendances et leur significativité sont déterminées à partir du test de Mann-Kendall. La méthode de Mann-Kendall permet de tester s'il existe une tendance monotone dans une série de données chronologiques. Ce test est non paramétrique et ne demande donc pas de vérification de la distribution des données. Le principe du test est le remplacement des n valeurs de la série temporelle ($X_1, X_2, X_3, \dots, X_{n-1}, X_n$) par leur rang relatif ($R_1, R_2, R_3, \dots, R_{n-1}, R_n$). Le test statistique S est alors le suivant :

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \left[\sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(R_j - R_i) \right] \quad (4.31)$$

$$\text{Où } \begin{cases} \text{sgn}(x) = 1 \text{ pour } x > 0 \\ \text{sgn}(x) = 0 \text{ pour } x = 0 \\ \text{sgn}(x) = -1 \text{ pour } x < 0 \end{cases}$$

Si l'hypothèse nulle H_0 est vraie, S s'approche d'une distribution normale avec les valeurs de moyenne μ et de variance σ^2 respectivement :

$$\mu = 0 \quad (4.32)$$

$$\sigma^2 = n \cdot (n - 1) \cdot (2n + 5) / 18 \quad (4.33)$$

La statistique z est alors de la forme (les valeurs critiques du test statistique pour différents niveaux de confiance sont reportées dans les tables de probabilités de distribution normale) :

$$z = |S| / \sigma^{0.5} \quad (4.34)$$

S'il y a des valeurs égales dans la série, la variance σ^2 doit être calculée comme suit :

$$\sigma^2 = \frac{1}{18} \left[n(n - 1)(2n + 5) - \sum_{p=1}^q E_p(E_p - 1)(2E_p + 5) \right] \quad (4.35)$$

Où E_p désigne le nombre d'égalités identifiées dans la série impliquant p valeurs. Si le nombre n de valeurs de la série est supérieur à 10, la mise en œuvre du test fait intervenir la variable aléatoire Z définie par :

$$Z = \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} \quad S > 0 \quad (4.36)$$

$$Z = \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} \quad S < 0 \quad (4.37)$$

$$Z = 0 \quad \text{si } S = 0 \quad (4.38)$$

Cette variable suit (approximativement) une loi normale centrée réduite. La probabilité d'observer une tendance pour laquelle la valeur de Z est au moins égale en valeur absolue à z_{obs} est alors :

$$P(|Z| \geq |z_{obs}|) = 2(1 - \Phi(|z_{obs}|)) \quad (4.39)$$

Une valeur positive de S indique une tendance à l'augmentation et vice versa.

4.2.6. Evaluation des changements

Quantifier les effets des changements futurs des extrêmes des variables climatiques journalières est une grande nécessité pour permettre d'évaluer la vulnérabilité des systèmes hydrologiques vis-à-vis des changements climatiques.

Dans le cadre de cette étude, les changements futurs par rapport à la période de référence sont évalués à partir de l'équation 4.40. Deux (02) sous-périodes de projection ont été retenues 2021-2050 ; 2051-2080 pour évaluer les changements dans les séries hydroclimatiques selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 des modèles climatiques REMO et HIRHAM qui répondent le mieux sur le bassin béninois du fleuve Niger (Badou, 2016). Une sous-période (1990-2019) a été choisie comme période de référence pour évaluer les changements. Ceci pour avoir les mêmes longueurs de séries.

$$\text{Changement} = \frac{\bar{x}_p - \bar{x}_r}{\bar{x}_r} \quad (4.40)$$

Où \bar{x}_p est la moyenne du paramètre hydroclimatique sur la période de projection considérée et \bar{x}_r sa moyenne sur la période de référence.

Au cas où la moyenne du paramètre donne la valeur zéro (0), le changement donne un résultat infini. Ce résultat infini est remplacé par zéro (0) avant les représentations graphiques.

Le test t de student a été appliqué sur les paramètres hydrométéorologiques pour évaluer la significativité des changements quantifiés.

4.3. Analyse de l'évolution des extrêmes hydrologiques du bassin béninois du fleuve Niger

4.3.1. Analyse fréquentielle hydropluviométrique

Pour atteindre cet objectif, des précipitations et écoulements (débits) qui ont pour période de retour 5, 10 et 50 ans ont été considérés. Deux lois ont été utilisées. Il s'agit de la loi GEV et Gumbel selon la qualité de l'ajustement avec les séries de la station considérée.

4.3.1.1. Loi GEV (Generalized Extremes Values)

Supposons (X_1, \dots, X_n) des variables aléatoires indépendantes et identiquement distribuées (i.i.d) avec fonction de répartition commune $F(x) = P[X_i \leq x]$. Soit $M_n = \max(X_1, \dots, X_n)$ le maximum des n premières variables aléatoires de notre échantillon. La fonction de répartition de la variable aléatoire M_n est donnée par la relation suivante :

$$FM_n(x) = p[M_n \leq x] = F(x)^n \quad (4.41)$$

et donc $FM_n(x)$ converge vers 0 ou 1 selon la valeur de $F(x) \in [0, 1]$. La loi limite de M_n est donc dégénérée et on autorise une renormalisation linéaire de M_n pour contourner le problème. Plus précisément, on s'intéresse au comportement limite de

$$M_n^* = \frac{M_n - b_n}{a_n} \quad (4.42)$$

avec a_n et b_n des suites (déterministes) bien choisies pour éviter la dégénérescence de la loi limite. Il existe une analogie avec le théorème central-limite qui s'intéresse au comportement de $\frac{S_n - b_n}{a_n}$ avec S_n définie par $S_n = X_1 + \dots + X_n$, $b_n = n \in E[X_1]$ et $a_n = n \text{Var}(X_1)$; sous certaines conditions, la loi limite de $\frac{S_n - b_n}{a_n}$ est une loi $N(0, 1)$

4.3.1.2. Loi Gumbel

La fonction de répartition de la loi de Gumbel $F(x)$ s'exprime de la manière suivante :

$$F(x) = \exp \left[- \exp \left(\frac{-x-a}{b} \right) \right] \quad (4.42)$$

Avec la variable réduite $u = (x-a)/b$ où a et b sont les paramètres du modèle de Gumbel.

La distribution s'écrit alors :

$$F(x) = \exp[-\exp(-u)] \quad (4.43)$$

Et

$$u = -\ln[-\ln(F(x))] \quad (4.44)$$

Il s'agit à cet effet d'estimer la probabilité au non dépassement $F(x)$ qu'il convient d'attribuer à chaque valeur x_i des séries pluviométriques et hydrologiques. Pour ce fait, la fréquence empirique de Hazen est utilisée :

$$F(x_{[r]}) = \frac{r-0,5}{n} \quad (4.45)$$

Où r est le rang dans la série des données classées par valeurs croissantes, n la taille de l'échantillon et $x_{[r]}$ la valeur de rang r .

Le temps de retour T d'un évènement pluvieux ou hydrologique est défini comme l'inverse de la fréquence d'apparition de l'évènement. Soit :

$$T = \left[\frac{1}{1-F(x_i)} \right] \quad (4.46)$$

La méthode d'estimation des paramètres de lois statistiques utilisée pour estimer les paramètres des différentes lois de probabilité est la méthode des moments. Une fois les ajustements effectués, les courbes d'ajustement obtenues des deux lois sont comparées par une superposition. Ainsi, on identifie celle des deux lois qui s'ajustent mieux.

4.3.2. Analyse de la sécheresse hydrologique (Sécheresse d'Écoulement Normalisé (SDI))

Le SDI (Streamflow Drought Index) est un indice de Sécheresse fondé sur l'écoulement fluvial (SDI). Il est élaboré par Nalbantis et Tsakiris (2008) en s'appuyant sur la méthode et les calculs du SPI en remplacement des précipitations par les écoulements des cours d'eau.

Si l'on dispose des débits d'écoulement mensuels $Q_{i,j}$ d'une série chronologique dans laquelle i désigne l'année hydrologique et j un mois de cette année hydrologique ($j=1$ pour Octobre et $j=12$ pour Septembre), $V_{i,k}$ peut-être obtenu en se basant sur l'équation :

$$V_{i,k} = \sum_{j=1}^{3k} Q_{i,j} \quad i = 1,2, \dots, j = 1,2, \dots, 12 \quad k = 1,2,3,4 \quad (4.47)$$

Où $V_{i,k}$ est le cumul des débits d'écoulement pour le $i^{ème}$ année hydrologique et $k^{ème}$ période de référence, $k=1$ pour octobre-décembre, $k=2$ pour octobre-mars, $k=3$ pour octobre-juin et $k=4$ pour octobre-septembre.

Basé sur le cumul des débits d'écoulement, $V_{i,k}$, l'indice de sécheresse d'écoulement est donné pour chaque période de référence k de l'année hydrologique i comme suit :

$$SDI_{i,k} = \frac{V_{i,k} - \bar{V}_k}{S_k} \quad i = 1,2, \dots, \quad k = 1,2,3,4 \quad (4.48)$$

Avec V_k et S_k la moyenne et l'écart-type du cumul des débits d'écoulement de la période de référence k comme ceci est déterminé pour une longue série.

Comme au niveau des SPI, ici également il existe des classes pour les SDI. Quatre (4) classes sont considérées selon les valeurs des SDI. Les valeurs varient de 0 (pas de sécheresse) à 4 (sécheresse extrême) et sont définies à travers les critères du tableau 5.

Tableau 5 : Classes de l'indice SDI (Nalbantis and Tsakiris 2008).

Classes	Description	Intervalles
1	Proche de la normale	$-0,99 \leq \text{SDI} < 0,99$
2	Sécheresse modérée	$-1,49 \leq \text{SDI} < -1,0$
3	Sécheresse sévère	$-1,99 \leq \text{SDI} < -1,5$
4	Sécheresse extrême	$\text{SDI} < -2,0$

4.4. Traitement et analyse des données

4.4.1. Qualité des données observées

Les indices climatiques de valeurs extrêmes sont souvent définis à partir de données quotidiennes. Il est donc important de procéder à une bonne constitution des séries quotidiennes exploitables sur une longue période. Dans le cadre de cette étude, la sélection est effectuée pour les séries quotidiennes de précipitations et de températures minimale et maximale. Un contrôle préalable des données brutes est nécessaire avant leur utilisation pour des études sur les changements climatiques. Ceci a pour principal but de rechercher d'éventuelles données erronées et des lacunes. Ainsi, les stations qui possèdent des lacunes supérieures à 10% au cours de la période d'étude ne sont pas prises en compte.

Pour le reste des stations pluviométriques avec lacune, deux méthodes de comblements sont utilisées. Les indices ont été calculés dans un premier temps et les lacunes dans les indices calculés sont comblées par krigeage. Tandis que la méthode utilisant l'inverse de la distance à la puissance 2 a été employée pour combler les précipitations journalières avant le calcul des SPI. Cette démarche a été employée pour minimiser les erreurs.

Pour ce qui est des lacunes de données de débits, une fois le modèle hydrologique calé et validé, grâce aux moyennes des précipitations journalières interpolées pour chaque sous-bassin, les écoulements ont été comblés et rallongés jusqu'en 2019 pour toutes les stations hydrologiques.

Pour calculer les indices, les données sont ensuite soumises au test de contrôle de qualité appelé « Data QC » (Zhang and Yang, 2004). Ce test de performance suit au total deux procédures : 1) remplacer toutes les valeurs manquantes (par le code -99,9) selon le format international ; 2)

remplacer toutes les valeurs non raisonnables par NA. Ces valeurs regroupent a) les précipitations journalières inférieures à zéro et b) les températures maximales journalières inférieures aux températures minimales journalières (Zhang and Yang, 2004).

4.4.2. Correction des biais des paramètres climatiques utilisés

Une correction de biais est généralement effectuée sur les sorties des modèles climatiques pour la majorité des études d'impacts du changement climatique. Cette correction est généralement univariée et corrige chaque variable d'intérêt indépendamment des autres. Il existe un nombre important de méthodes de correction des biais. La méthode de correction de biais qui est utilisée dans cette recherche est dite 'Delta change' (DC).

La méthode DC est la plus simple et la plus utilisée des méthodes de correction des biais (Graham *et al.* 2007 ; Moore *et al.* 2008 ; Sperna Weiland *et al.* 2010) et consiste à la mise à l'échelle des observations pour obtenir les simulations corrigées. C'est une méthode modeste dans laquelle les paramètres sont généralement corrigés avec un facteur multiplicateur ou additif. Dans cette méthode, le facteur à l'échelle d'une période est appliqué à chaque observation journalière non correcte de la même période pour générer les séries chronologiques journalières corrigées (Lafon *et al.* 2013). L'équation 4.41 est utilisée pour corriger les températures et l'équation 4.42 pour la correction des précipitations.

$$x_{cor,i} = x_{o,i} + \mu_p - \mu_b \quad (4.41)$$

$$x_{cor,i} = x_{o,i} \times \frac{\mu_p}{\mu_b} \quad (4.42)$$

Où $x_{cor,i}$ représente les paramètres corrigés ; $x_{o,i}$ les paramètres observées. μ_b et μ_p sont respectivement la moyenne des données simulées de la période de base et la moyenne des données de la période de projection.

4.4.3. Calcul de l'ETP

L'évaporation est une perte en eau subie par les surfaces d'eau libres, tandis que l'évapotranspiration est la somme de toutes les pertes par retour à l'atmosphère sous forme de vapeur d'eau. Elle résulte de deux phénomènes l'un est physique (évaporation) l'autre biologique (transpiration). Etant donné que sa valeur réelle est difficilement mesurable, de nombreuses formules ont été mises au point pour l'estimer à partir de différentes mesures climatologiques. Dans la présente étude, l'ETP est calculée par la formule FAO Penman-Monteith (1998). Cette formule a pour hypothèse : la végétation est un gazon bien irrigué et couvrant à une hauteur de 0,12 m, de résistance extérieure de 70 s.m^{-1} et un albédo de 0,23 ; le flux de la chaleur quotidien

dans le sol est considéré comme négligeable devant le rayonnement net à ce pas de temps ($G \approx 0$) ; les paramètres climatiques exigés : les températures journalières moyenne, maximale et minimale ; la vitesse journalière moyenne de l'air à 2 m ; le rayonnement net total journalier. (Allen *et al.* 1998). La formule est donnée par l'équation 4.43.

$$ETP = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot R_n \cdot d + \gamma \left(\frac{900}{t+273} \right) v (e_w - e)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34v)} \quad (4.43)$$

ETP : évapotranspiration potentielle ($\text{mm} \cdot \text{j}^{-1}$),

R_n : rayonnement net ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$),

d : longueur du pas de temps en k secondes ($d=0.0864$ ks)

t : température moyenne quotidienne de l'air à 2m ($^{\circ}\text{C}$),

Δ : pente de la courbe de la tension de vapeur saturante ($\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$),

γ : Constante psychrométrique ($\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$),

e : tension de vapeur (kPa),

e_w : tension de vapeur saturante (kPa),

v : vitesse du vent à 2m ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).

Les paramètres intervenant dans le calcul de l'ETP journalier de Penman–Monteith proviennent : i) de mesures directes sur le terrain pour t_{moy} , R_n et v ; ii) de mesures indirectes pour e_w et e et iii) de constantes physiques : γ , Δ

L'utilisation de température moyenne sous-estime e_w , on lui préfère l'expression suivante :

$$e_w = \frac{e_w(t_{\text{max}}) + e_w(t_{\text{min}})}{2} \quad (4.44)$$

e_w : tension de vapeur saturante de la journée (kPa) ;

t_{max} : température maximale au cours de la journée ($^{\circ}\text{C}$) ;

t_{min} : température minimale au cours de la journée ($^{\circ}\text{C}$)

$$e = \frac{e_w(t_{\text{min}}) \cdot \frac{Hr_{\text{max}}}{100} + e_w(t_{\text{max}}) \cdot \frac{Hr_{\text{min}}}{100}}{2} \quad (4.45)$$

e : tension de vapeur réelle de la journée (kPa) ;

$e_w(t_{\text{max}})$: tension de vapeur saturante à la température journalière maximale (kPa) ;

$e_w(t_{\text{min}})$: tension de vapeur saturante à la température journalière minimale (kPa) ;

Hr_{max} : humidité relative maximale (%) ;

Hr_{min} : humidité relative minimale (%)

$$\gamma \text{ en kPa.}^\circ\text{C}^{-1} \quad \gamma = 0,665.10^{-3}.P \quad (4.46)$$

$$P = 101,3. \left(\frac{293 - 0,0065.z}{293} \right)^{5,26} \quad (4.47)$$

Avec P en kPa, z l'altitude en m

$$\Delta = \frac{4098. \left[0,6108. \exp\left(\frac{17,27.t}{t+237,3}\right) \right]}{(t+237,3)^2} \quad (4.48)$$

Δ en kPa.°C⁻¹, t en °C

4.4.4. Description du modèle choisi pour l'estimation des débits (*ModHyPMA*)

Pour modéliser les débits des cours d'eau du bassin béninois du fleuve Niger, le modèle hydrologique ModHyPMA a été utilisé. C'est un modèle simple et moins contraignant en matière de données d'entrées et qui donne de bons résultats. Il n'utilise pas des données de l'occupation des sols d'où la possibilité de faire des projections en long terme. En plus ce modèle produit de bons résultats utilisé sur le bassin béninois du fleuve Niger par Gaba et *al.* 2015 et sur le bassin de la Mékrou utilisé par Obada en 2017. Conçu à partir du Principe de Moindre Action, ModHyPMA (Modèle Hydrologique basé sur le Principe de Moindre Action) utilise le principe de la dépense minimum d'énergie. Ce principe peut être énoncé comme suit : "La nature suit toujours les voies les plus simples . . . et les voies les plus simples sont celles qui minimisent la dépense de la nature en énergie (Afouda et *al.* 2004, Alamou 2011). C'est un modèle hydrologique global à basé sur la physique et à deux paramètres.

Le modèle ModHyPMA comprend une fonction de production et une fonction de transfert qui sont décrites respectivement par les équations 4.49 et 4.50 (Alamou, 2011).

$$\frac{dZ(q,t)}{dt} = \Psi(q, t) \quad (4.49)$$

$$\frac{d(\lambda Q)}{dt} + vQ^{2v-1} = \Psi(q, t) \quad (4.50)$$

Les équations (4.49) et (4.50) constituent une représentation globale du processus de transformation pluie-débit. Q est le débit à l'exutoire du bassin versant, v est un paramètre de non-linéarité, λ est le coefficient de tarissement du bassin, q est égale à la différence entre la pluie et l'ETP tous mesurés pendant un temps t et Ψ est une fonction. Le schéma et les principales équations du ModHyPMA sont illustrés dans la figure 14.

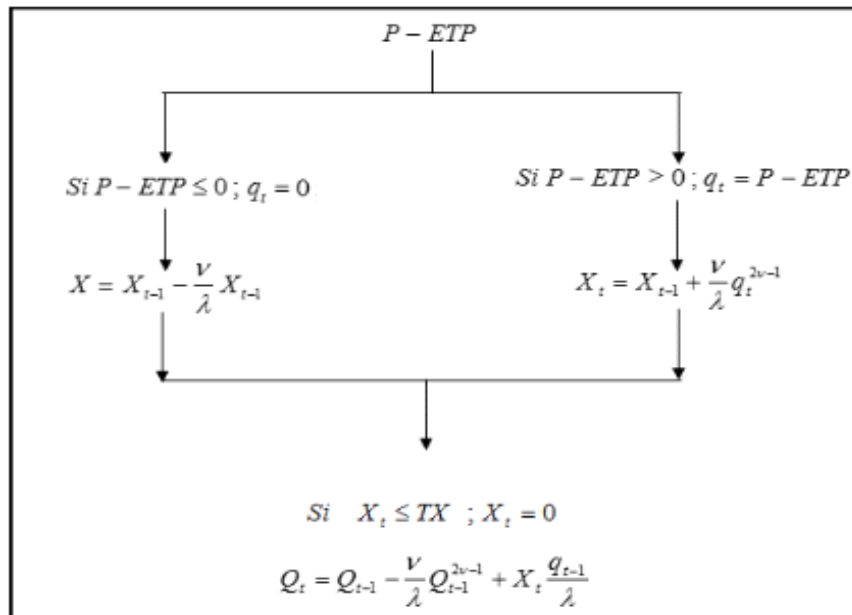


Figure 14 : Schéma du modèle ModHyPMA et principales équations du modèle (Afouda et Alamou, 2010 ; Gaba et al. 2015 ; Obada, 2017).

- Etape 1 : le modèle hydrologique ModHyPMA est calé pour chaque bassin versant en utilisant les séries hydrologiques et climatiques observées.
- Etape 2 : les séries climatiques futures (périodes 2021–2050, 2051-2080) sont construites à partir des séries observées sur une période de référence des scénarii climatiques exprimant un changement dans les paramètres climatiques.
- Etape 3 : le modèle hydrologique avec les paramètres calés à l'étape 1 simulent les écoulements en utilisant les séries chronologiques construites à l'étape 2.

Conclusion

En somme, on note que plusieurs méthodes ont été employées pour atteindre les objectifs spécifiques de la recherche. Ces différentes méthodes ont nécessitées la collecte et le traitement de plusieurs types de données couvrant les périodes futures comme historiques.

TROISIEME PARTIE: RESULTATS ET DISCUSSION

CHAPITRE 5 : ANALYSE DE LA VARIABILITE HYDROCLIMATIQUE

Introduction

Cette section du travail est consacrée à l'analyse de la variabilité des paramètres hydrométéorologiques sur le bassin béninois du fleuve Niger. Les données de précipitations, d'écoulement, d'évapotranspiration potentielle et de températures maximales et minimales observées au cours de la période 1976-2019 ont été mises en évidence. Ce qui a permis d'isoler pour cette période d'étude des anomalies (périodes fortement pluvieuses ou de sécheresse, par exemple) des variables hydroclimatiques.

5.1. Variabilité de la température

Dans cette section, nous recherchons les probables points de ruptures ou de stationnarités dans les séries des maxima et minima annuels des températures dans le bassin béninois du fleuve Niger. L'application du test de Pettit, de la méthode bayésienne et de la méthode de segmentation de Hubert aux maxima et minima annuels des températures du bassin béninois du fleuve Niger révèlent une inexistence de points de rupture (Figure 15 A). Par ailleurs, les deux variables de températures augmentent chronologiquement sur la période 1976-2019 sur le bassin béninois du fleuve Niger (Figure 15 A). Cette augmentation est en moyenne de 0,01 °C par année. Ce résultat est confirmé par les études de Padgham *et al.* (2015) dont les conclusions donnent une augmentation de 0,3°C à 1°C de température par décennie en Afrique de l'Ouest et par Obada (2017) sur le bassin de la Mékrou.

L'analyse des indices des maxima et minima annuels des températures au cours de la période d'étude (1976-2019) montre des anomalies négatives et positives qui s'alternent faisant de la sous période d'étude une grande période caractérisée par une très grande variabilité de ces variables (Figure 15 B). Ces anomalies diminuent d'amplitude au fur et à mesure que les années croissent.

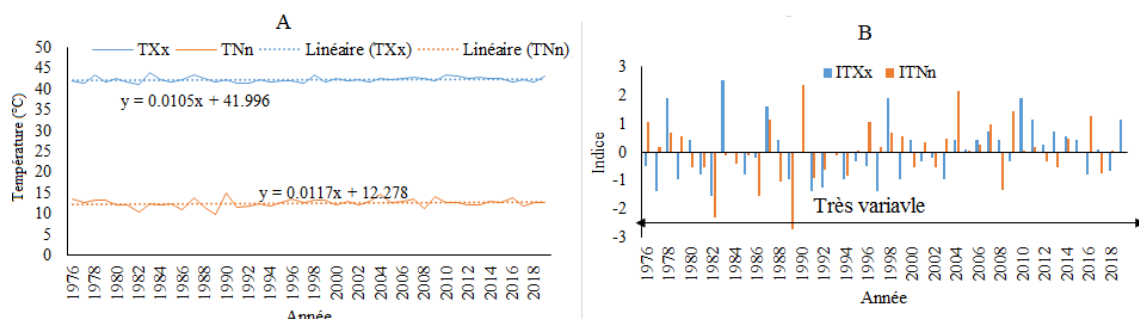


Figure 15 : Variabilités et indices d'anomalie des variables de la température sur la période 1976-2019.

5.2. Variabilité de la pluviométrie

Un point de rupture ou de stationnarité dans les séries de hauteurs annuelles des précipitations dans le bassin béninois du fleuve Niger est mis en évidence. En effet, les tests non paramétriques de détection de rupture, appliqués aux hauteurs annuelles de pluie aux seuils de confiance de 99%, 95% et 90%, détectent l'année 1990 comme point de rupture. Ainsi, deux sous périodes (1976-1990 et 1991-2019) de moyennes respectives de 970,23 et 1069,91 mm se forment de ce point (Figure 16 A). Une tendance à la hausse non significative de 2,8 mm/an est notée pour la précipitation (Figure 16 A). La figure 16 B renseigne sur l'indice pluviométrique du bassin béninois du fleuve Niger. Il ressort de cette figure que la zone d'étude présente deux périodes de variabilité interannuelle des indices pluviométriques sur la période d'étude (1976-2019). Une période (la première) déficitaire est décelée entre 1976 et 1990. Et une deuxième période (1991-2019) caractérisée par l'alternance des anomalies positives et négatives faisant de cette sous période une grande période de variabilité pluviométrique.

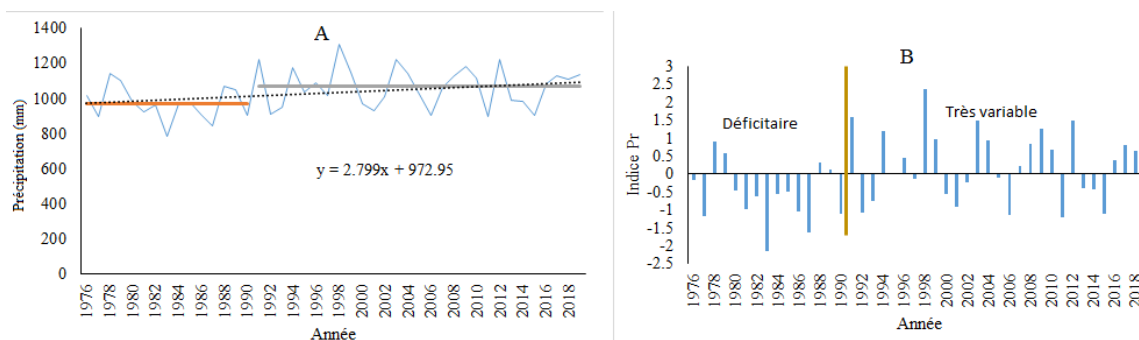


Figure 16 : Variabilité et indice d'anomalie de la précipitation sur la période 1976-2019.

5.3. Stationnarité des variables d'ETP

L'évapotranspiration potentielle de la zone d'étude présente une tendance chronologique à la baisse de 0,8 mm/an (Figure 17 A). L'analyse des ruptures de stationnarité dans les séries de cumuls annuels d'ETP avec les différents tests précédemment utilisés aux seuils de 99%, 95% et 90% nous révèle deux points de rupture décomposant la période d'étude en trois sous-périodes (Figure 17 A). Le premier point est détecté en 1980 et le second en 2012 donnant respectivement trois sous-périodes composées comme suit : 1976-1980, 1981-2011 et 2012-2019 avec des moyennes respectives de 1565,74 ; 1332,48 et 1572,76 mm (Figure 17 A). L'analyse de l'indice d'anomalie des ETP révèle que la première et la troisième sous-périodes sont excédentaires alors que la deuxième est déficitaire (Figure 17 B).

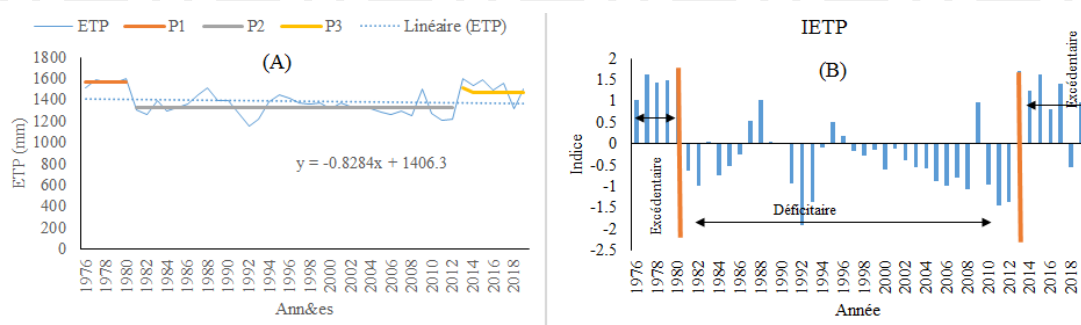


Figure 17 : Variabilité et indice d'anomalie de l'évapotranspiration potentielle

5.4. Stationnarité des variables de débits

Les données hydrologiques utilisées dans cette section proviennent de quatre (4) stations hydrologiques (Gbassè, Couberi, Kompongou et Yakin) situées sur le bassin béninois du fleuve Niger. La figure 18 A montre une tendance non significative à la hausse de $0,13 \text{ m}^3/\text{s}/\text{an}$ pour les débits moyens annuels sur la période de 1976-2019. Les plus forts débits sont observés entre 1990 et 1994. Par ailleurs, les tests de stationnarité ne détectent aucun point de rupture au cours de la période d'étude pour cette station. La figure 18 E nous renseigne que les débits au cours de la période d'étude à cette station ont beaucoup variés. Des tendances non significatives à la baisse de $0,13 \text{ m}^3/\text{s}/\text{an}$ sont notées à la station de Gbassè (Figure 18 B). Ici également, aucun point de rupture n'a été identifié avec les différents tests non paramétriques utilisés. Les indices d'anomalie (Figure 18 F) montrent que cette station est caractérisée par des débits très variables. A travers la figure 18 C, on observe que les années 1982 et 1999 sont identifiées comme des points de rupture des débits moyens à la station de Kompongou. Ainsi se forment trois sous périodes 1976-1982, 1983-1999 et 2000-2019 avec des moyennes respectives de 8,9, 28,9 et $19,5 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figure 18 C). A cette station, une tendance chronologique non significative à la hausse de $0,4 \text{ m}^3/\text{s}$ est observée. La figure 18 G pour sa part nous fait remarquer que la période 1976-1982 est déficitaire en écoulement, la période 1983-1999 est excédentaire en écoulement et la période 2000-2019 est déficitaire en écoulement. Un seul point (2002) de non stationnarité est détecté à la station de Yakin (18 D). Les débits moyens à cette station présentent une tendance chronologique non significative à la hausse de $0,3 \text{ m}^3/\text{s}/\text{an}$ (Figure 18 D). Ainsi on obtient les sous période 1976-2002 et 2003-2019 avec des moyennes respectives de 13,6 et $22 \text{ m}^3/\text{s}$. L'analyse des indices d'anomalies nous révèle que la première période (1976-2002) présente des déficits d'écoulement alors que la deuxième période (2003-2019) est caractérisée d'excédent d'écoulement (Figure 18 H).

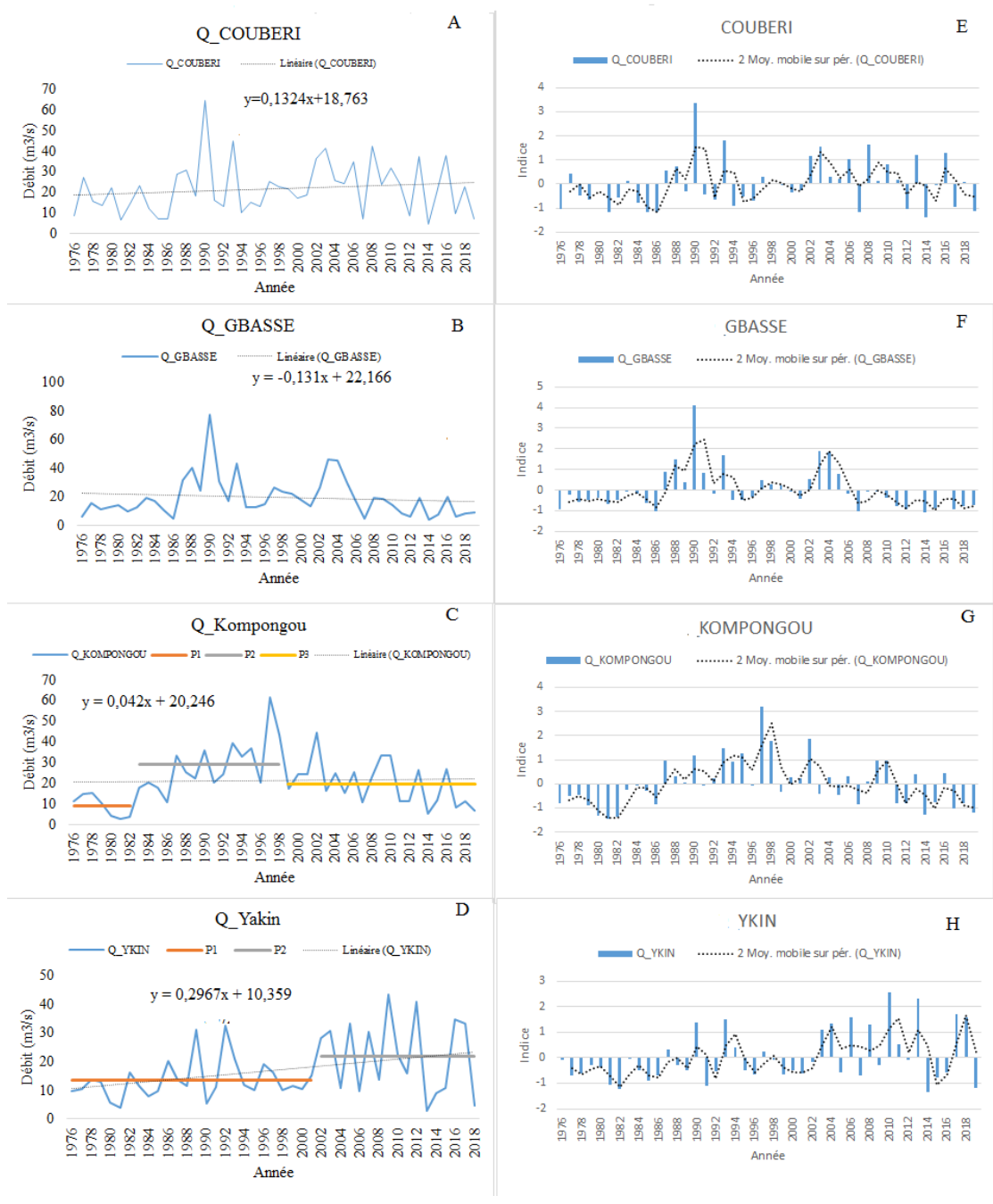


Figure 18 : Variabilité et indice d'anomalie de l'écoulement (débits) sur la période 1976-2019.

5.5. Analyses et traitements des données issues des modèles climatiques

5.5.1. Analyse des performances des corrections des biais à l'échelle annuelle

Les figures 19, 20 et 21 et le tableau 6 présentent les performances des différents résultats obtenus de la méthode des corrections appliquées en considérant les moyennes annuelles des températures et des précipitations. D'une part, il ressort de ces résultats que la méthode (Delta) utilisée pour corriger les données a été performante. Car à travers le tableau on note une grande différence de l'erreur moyenne absolue (MAE) entre les données brutes et celles corrigées.

Celles corrigées tendent vers Zéro. D'autre part on note que la méthode est plus performante avec les paramètres de température qu'avec la précipitation.

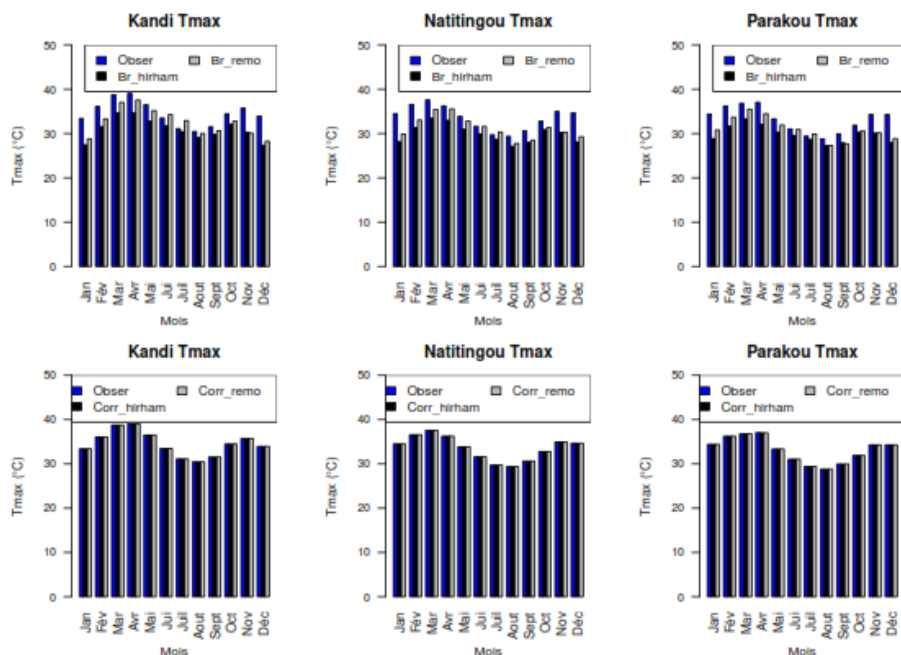


Figure 19 : Performance de la méthode de correction sur les maxima annuels de températures (ligne1= données brutes, ligne 2=données corrigées).

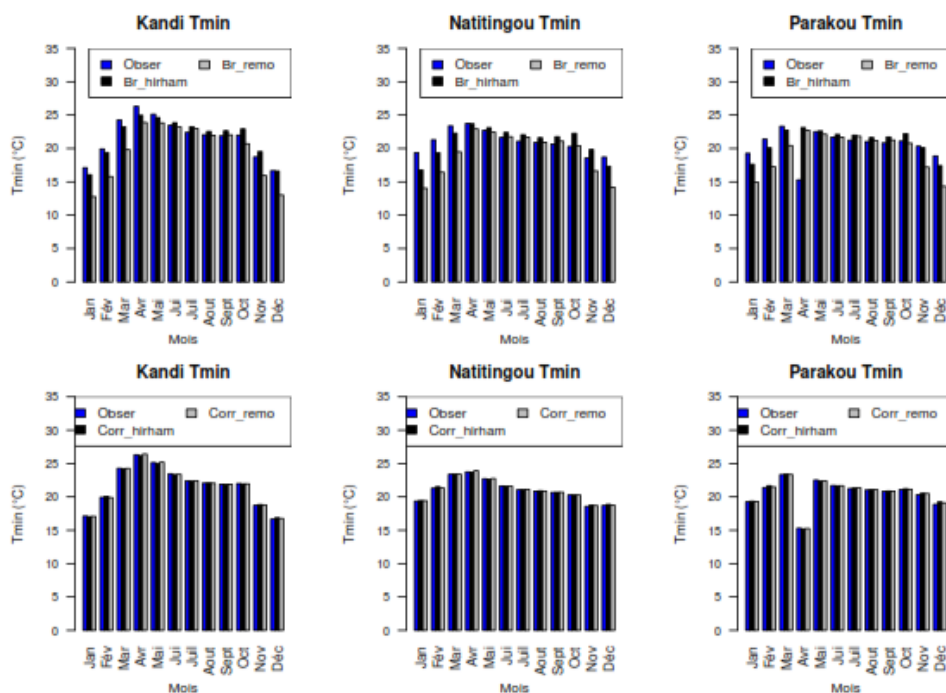


Figure 20 : Performance de la méthode de correction sur les minima annuels de températures (ligne1= données brutes, ligne 2=données corrigées).

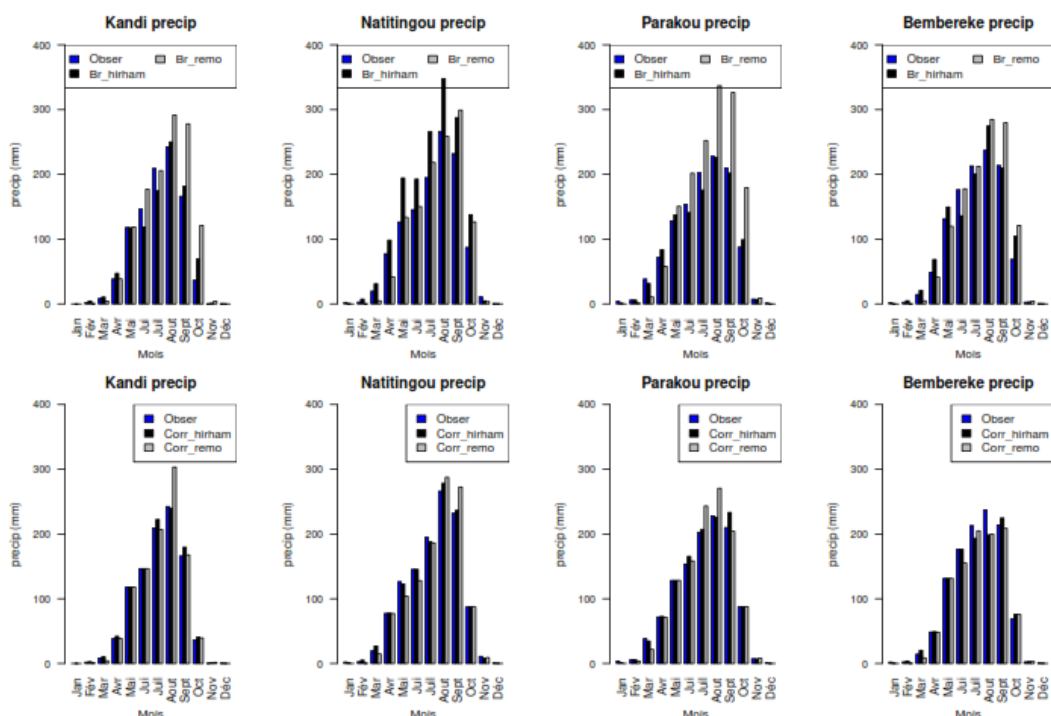


Figure 21 : Performance de la méthode de correction sur les pluies annuelles (ligne1= données brutes, ligne 2=données corrigées).

Tableau 6 : Performance de la méthode de correction sur les variables climatiques

Variables	Paramètres	Station	Observation	Brute hirham	Corrigée hirham	Brute remo	Corrigée remo	
TXx	ECART	Kandi	2,81	2,41	2,81	3,08	2,81	
		Natitingou	2,74	2,04	2,74	2,50	2,74	
		Parakou	2,88	1,85	2,87	2,56	2,87	
	MAE	Kandi			3,55	0,00	2,41	0,00
		Natitingou			3,55	0,00	2,32	0,00
		Parakou			3,29	0,01	2,24	0,01
TNn	ECART	Kandi	3,05	3,01	2,96	4,17	3,04	
		Natitingou	1,68	2,22	1,63	3,17	1,68	
		Parakou	2,06	1,91	2,07	2,92	2,05	
	MAE	Kandi			0,73	0,09	2,12	0,05
		Natitingou			1,19	0,08	1,91	0,05
		Parakou			1,41	0,13	2,36	0,08
Précipitation	ECART	Kandi	90,62	86,34	92,62	112,13	101,57	
		Natitingou	95,70	125,82	97,24	110,68	104,12	
		Parakou	87,15	83,50	91,74	131,00	99,75	
		Bembèrèkè	95,44	96,38	89,26	111,79	88,15	
	MAE	Kandi			11,06	3,37	24,19	6,26
		Natitingou			34,96	3,54	17,71	10,20
		Parakou			7,79	4,28	40,87	9,88
		Bembèrèkè			14,92	7,19	16,91	7,49

5.5.2. Simulation des débits futurs.

Les performances du modèle ModHyPMA en calage et en validation au niveau de chaque station hydrométrique sont résumées dans le tableau 7. La figure 22 présente les valeurs des critères de Nash et les coefficients de détermination (R^2) en calage et en validation pour les stations hydrologiques utilisées. Il ressort de l'analyse du tableau et de la figure qu'au cours du calage, le modèle a bien répondu au niveau de toutes les stations hydrologiques. En effet, les résultats présentent des valeurs de critères de Nash et des coefficients de détermination supérieures à 50% en calage comme en validation. Les hydrogrammes des débits observés et simulés du modèle ModHyPMA au niveau de chaque station sont illustrés dans la figure 23.

Tableau 7 : Performances du modèle ModHyPMA au niveau de chaque station.

		Gbassè	Couberi	Kompongou	Yakin
Calage	Année	1986-1990	1986-1989	1971-1974	1984-1987
	X1	1,142	1,0785	1,0114	1,24
	X2	46,313	68,923	35,322	67,883
	R ²	0,775	0,701	0,871	0,571
	Nash	0,639	0,684	0,767	0,594
Validation	Année	2003-2006	2003-2007	2007-2010	2005-2008
	X1	1,142	1,0785	1,0114	1,24
	X2	46,313	68,923	35,322	67,883
	R ²	0,635	0,678	0,621	0,557
	Nash	0,59	0,738	0,551	0,534

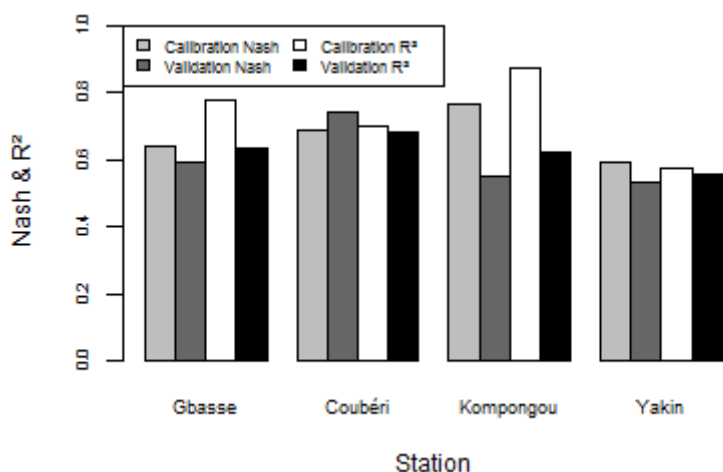


Figure 22 : Valeurs de critère de NASH et coefficient de détermination par station hydrologique.

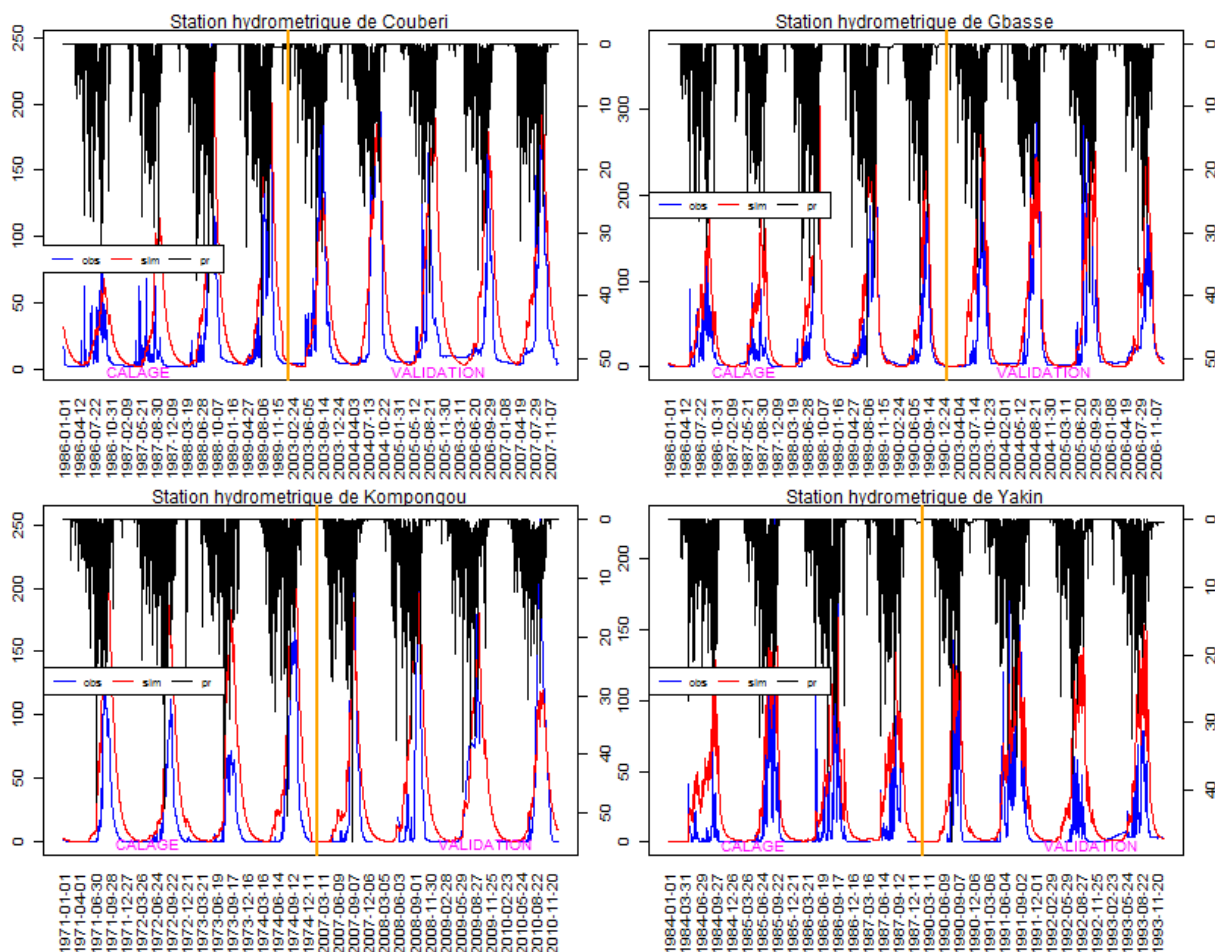


Figure 23 : Résultats du modèle ModHyPMA en calage et validation par station hydrologique.

Conclusion

Au terme de ce chapitre consacré à la détermination de la variabilité hydrométéorologique du bassin béninois du fleuve Niger nous retenons qu’à l’image de ce qui est observé sur toute l’Afrique de l’Ouest par plusieurs études, les paramètres hydrométéorologiques ont connu de grandes variations au cours des décennies passées. Les pluies et les débits ont connu une phase déficitaire localisée dans les années 70 et 80 qui est suivie d’une période excédentaire. Alors que le contraire est observé avec les températures et évapotranspirations potentielles. Par ailleurs, les températures observées ont connues un accroissement continu depuis 1976 jusqu’à ce jour. Ce qui témoigne un réchauffement.

CHAPITRE 6 : ANALYSE DES EXTREMES DE TEMPERATURE

Dans cette section du document sont présentés les résultats des analyses sur la variabilité des indices de température et leur tendance durant la période historique (1976-2019) et deux périodes de projection future (2021-2050 et 2051-2080). Elle présente aussi les changements futurs de ces indices comparativement aux moyennes de la période de référence (1990-2019) prise dans la période historique.

6.1. Tendance historique des indices de température extrême

6.1.1. Indices d'intensité de température extrême (TXx, TNn et DTR)

D'après la figure 24, l'indice TXx, sur le bassin béninois du fleuve Niger de 1976 à 2019 a varié entre 41,2 et 43,9°C à Kandi avec une moyenne de 42,23°C. A Natitingou, il varie entre 39 et 48,3°C et sa moyenne est de 40,94°C. A Parakou la variation a été observée entre 38 et 41,6°C avec une moyenne de 39,74. Pour toutes les stations, l'indice présente une tendance à la hausse (Figure 24). On note des augmentations respectives de 0,1, 0,2 et 0,3 °C par décennie. Cette tendance est statistiquement significative à Kandi et Parakou ($p\text{-Value}<0,05$) et non significative statistiquement à Natitingou ($p\text{-Value}>0,05$).

L'indice TNn, pour sa part a varié sur le bassin béninois du fleuve Niger au cours de la période historique entre 9,8 et 14,9°C à Kandi, entre 8,8 et 16,9°C à Natitingou et entre 12,6 et 18,2°C à Parakou avec des moyennes respectives de 12,54 ; 13,33 et 15,6°C. Cet indice présente une tendance significative à la hausse à Parakou (augmente de 0,6 °C par décennie), une tendance à la baisse significative à Natitingou (baisse de 0,7 °C par décennie), et une tendance à la hausse non significative à Kandi (augmente de 0,1 °C par décennie) (Figure 24).

Les valeurs moyennes de l'amplitude thermique diurne (DTR) sur le bassin béninois du fleuve Niger sont de 12,8 ; 12,62 et 11,49°C respectivement à Kandi, Natitingou et Parakou. On note au cours de la sous-période d'étude des oscillations de 12,03 à 13,89°C à Kandi, de 11,72 à 13,94°C à Natitingou et enfin de 10,61 à 12,81°C à Parakou. Pour cet indice, nous remarquons une tendance à la baisse statistiquement non significative à Kandi (baisse de 0,07 °C décennie avec un $p\text{-Value}>0,05$), une baisse statistiquement significative à Parakou (baisse de 0,1 °C décennie avec un $p\text{-Value}<0,05$) et une augmentation statistiquement significative à Natitingou (augmente de 0,2 °C décennie avec un $p\text{-Value}<0,05$) (Figure 24).

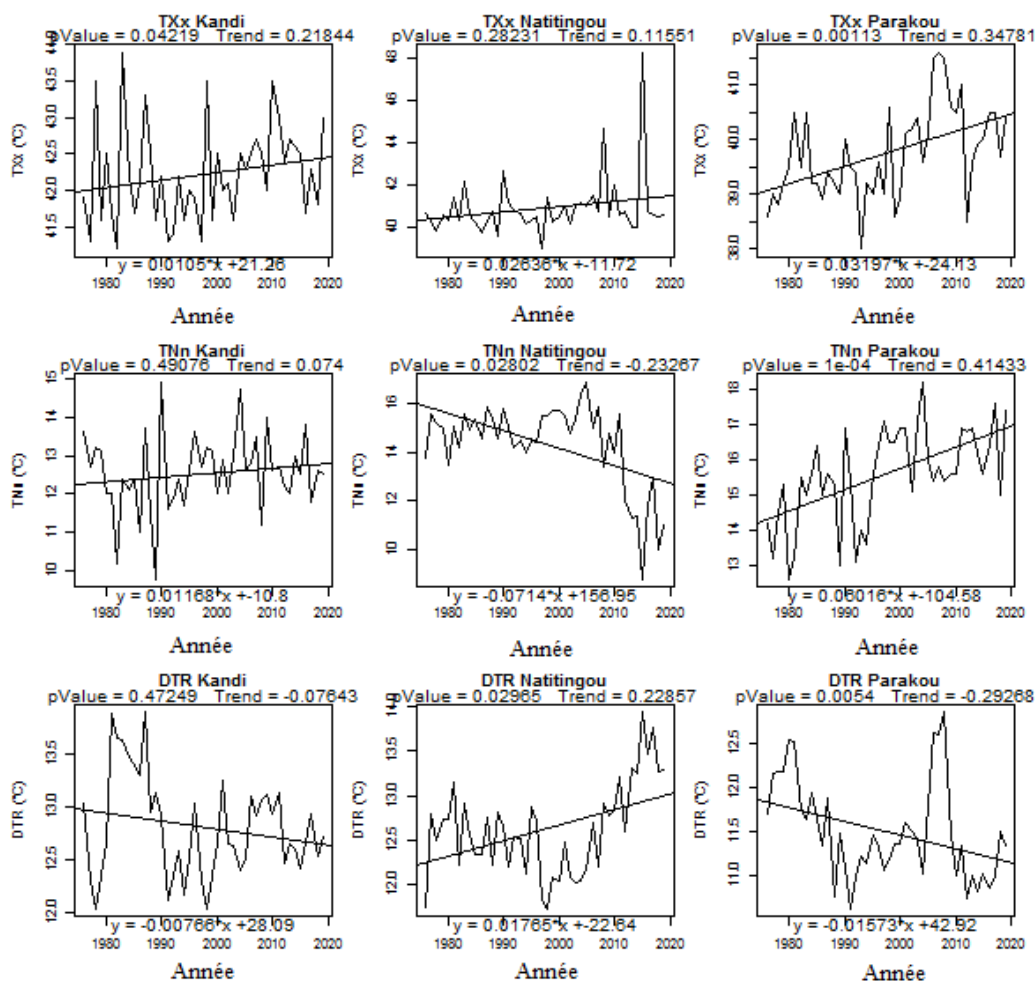


Figure 24 : Variation et significativité des indices d'intensité de température extrême aux stations de Kandi, Natitingou et Parakou sur la période 1976-2019.

6.1.2. Indices de fréquence de température extrême (CSDI, WSDI, TX90p et TN90p).

CSDI est resté nul au cours de 1976 à 2019 à Kandi et Parakou sauf l'année 1983 (CSDI = 6 jours) pour Kandi et les années 1976 et 1977 (CSDI = 20 et 7 jours) pour Parakou. Par contre à Natitingou, le CSDI varie entre 0 et 89 jours avec une tendance à la hausse non significative de 1 jour par an ($p\text{-Value} > 0,05$) (Figure 25).

WSDI (indicateur de durée de la période chaude) pour sa part a varié entre 0 et 32 jours à Kandi avec une moyenne de 5,14 jours ; à Natitingou il varie entre 0 et 30 jours avec une moyenne de 4,7 jours ; à Parakou il varie entre 0 et 120 jours avec une moyenne de 12,75 jours. A travers la figure 31 nous remarquons des tendances à la hausse significative pour WSDI à Kandi et à Parakou qui augmentent respectivement de 2 et 6 jours par décennie. A Natitingou, la tendance de WSDI est plutôt à la hausse non significative ($p\text{-Value} > 0,05$) de 1 jour par décennie (Figure 25).

TX90P varie entre 1,59 et 21,91 jours à Kandi ; 1,86 et 25,46 jours à Natitingou et 0,96 et 56,16 jours à Parakou avec des valeurs moyennes respectives de 7,96 ; 9,38 et 12,81 jours. TX90P

présente des tendances à la hausse significative de 2, 3 et 5 jours par décennie respectivement à Kandi, Natitingou et Parakou (Figure 25). TN90P varie entre 0,6 et 26,03 jours à Kandi ; 1,41 et 30,59 jours à Natitingou et 0,08 et 35,07 jours à Parakou avec des valeurs moyennes respectives de 12,65, 13,82 et 15,6 jours. TN90p présente des tendances à la hausse significatives de 4, 5 et 7 jours par décennie respectivement à Kandi, Natitingou et Parakou (Figure 25).

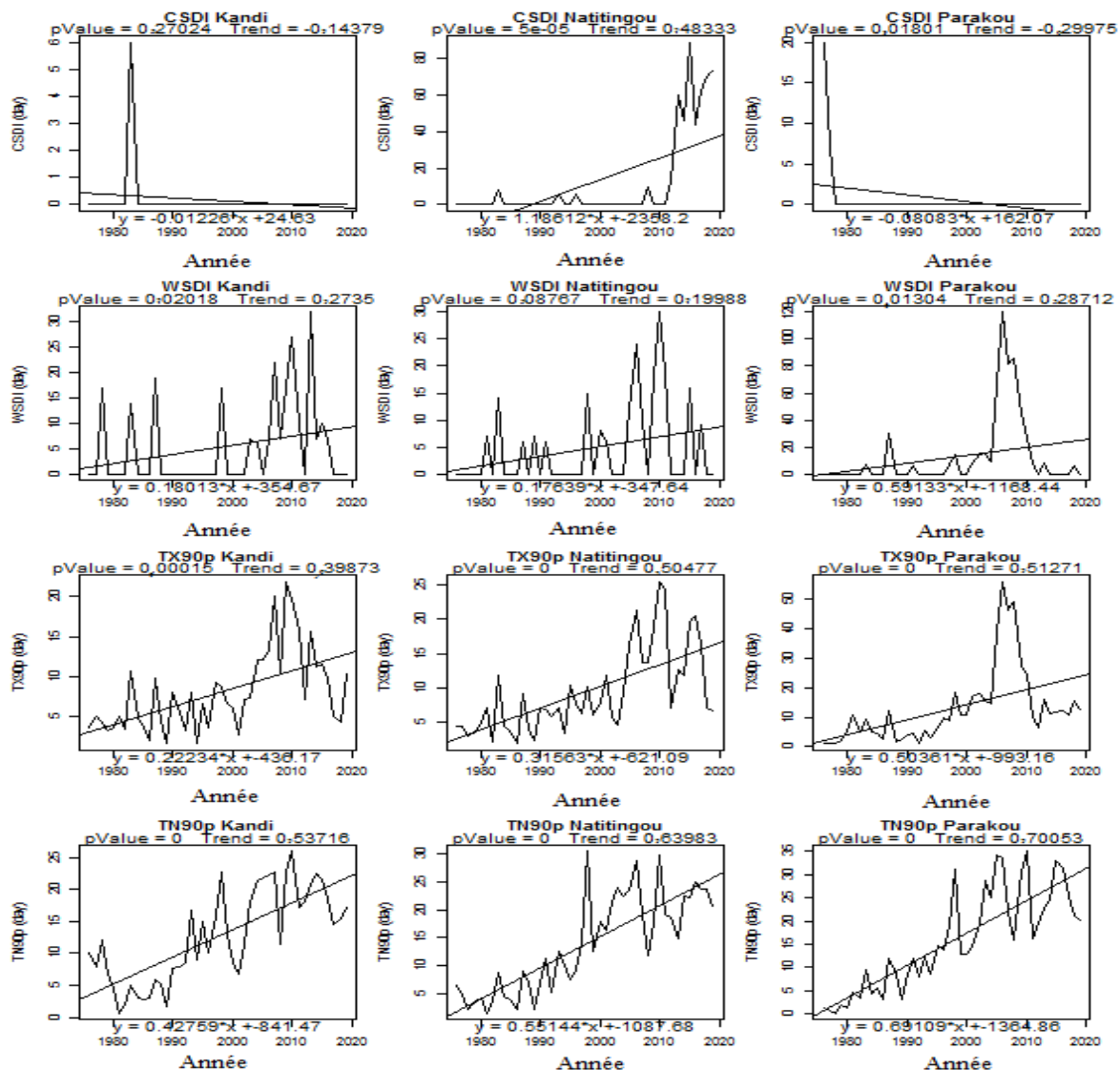


Figure 25 : Variation et significativité historique des indices de fréquence de température extrême aux stations de Kandi, Natitingou et Parakou sur la période 1976-2019.

6.2. Tendances projetées des indices de température extrême au cours 2021-2050

6.2.1. Indices d'intensité de température extrême (TXx, TNn et DTR)

Sur la figure 26 on observe pour TXx, des tendances à la hausse de 0,06, 0,3 et 0,4 °C par décennie respectivement à Kandi, Natitingou et Parakou (non significative à Kandi et Natitingou et significative à Parakou) avec le scénario RCP4.5 du modèle HIRHAM, contre des tendances à la hausse significatives respectives de 0,6, 0,6 et 0,5 °C par décennie pour ces

mêmes stations avec le RCP8.5 du même modèle. A travers le modèle REMO (annexe 6), on observe à Kandi pour TXx, des tendances à la hausse non significatives qui augmentent de 0,3 et 0,4 °C par décennie respectivement avec les scénarii RCP4.5 et RCP8.5. A Natitingou, les tendances à la hausse sont aussi notées. Avec RCP4.5 la tendance n'est pas significative et augmente de 0,3 par décennie. Pour le RCP8.5, la tendance est significative et augmente de 0,6 par décennie. Les tendances significatives à la hausse sont observées sous les deux scénarii à Parakou pour TXx. Des augmentations de 0,46 et 0,5 °C par décennie sont respectivement notées pour RCP4.5 et RCP8.5. Ces tendances étaient à la hausse respectivement de 0,1, 0,26 et 0,3 °C par décennie par le passé.

TNn présente des tendances à la hausse non significatives sous les scénarii RCP4.5 et RCP8.5 du modèle HIRHAM au niveau de toutes les stations sauf à Kandi où le RCP8.5 montre une tendance significative (Figure 26). Des augmentations respectives de 0,3, 0,3 et 0,1 °C par décennie à Kandi, Natitingou et Parakou sont notées avec le RCP4.5. Par contre, avec le RCP8.5 ces augmentations sont respectivement de 0,4, 0,2 et 0,2 °C par décennie. Avec le modèle REMO (annexe 6), TNn présente des tendances à la hausse significatives avec les deux scénarii (RCP4.5 et RCP8.5) au niveau de toutes les stations. Ces tendances augmenteront respectivement de 0,37, 0,30 et 0,37 °C par décennie à Kandi, Natitingou et Parakou. Alors que par le passé ces augmentations étaient de 0,1 °C par décennie à Kandi et 0,6 °C par décennie à Parakou, une baisse de 0,7 °C par décennie était notée à Natitingou.

Pour le RCP4.5 du modèle HIRHAM, on note des tendances à la hausse non significatives pour le DTR au cours de 2021-2050 (Figure 26). Ces augmentations sont de 0,05, 0,04 et 0,02 °C par décennie respectivement à Kandi, Natitingou et Parakou. Avec le RCP4.5 du même modèle, on note pour DTR des tendances à la baisse non significatives à Kandi et Natitingou et significative à Parakou (Figure 26). Ces baisses sont respectivement de 0,02, 0,01 et 0,1 °C par décennie à Kandi, Natitingou et Parakou (Figure 26). Pour le modèle REMO (annexe 6), à Natitingou, des baisses non significatives de 0,04 et 0,03 °C par décennie respectives avec le RCP4.5 et RCP8.5 sont notées pour DTR (annexe 6). Des hausses non significatives de 0,03 et 0,003 °C par décennie sont observées à Kandi et Parakou pour le DTR sous le RCP4.5. Par contre sous le RCP8.5, le DTR baisse non significativement de 0,1 et 0,03 °C par décennie à Kandi et Parakou (annexe 6). Au cours de la période de référence, on notait des baisses de 0,07 et 0,1 °C par décennie respectivement à Kandi et Parakou. Par contre, à Natitingou, on avait observé une augmentation de 0,17 °C par décennie.

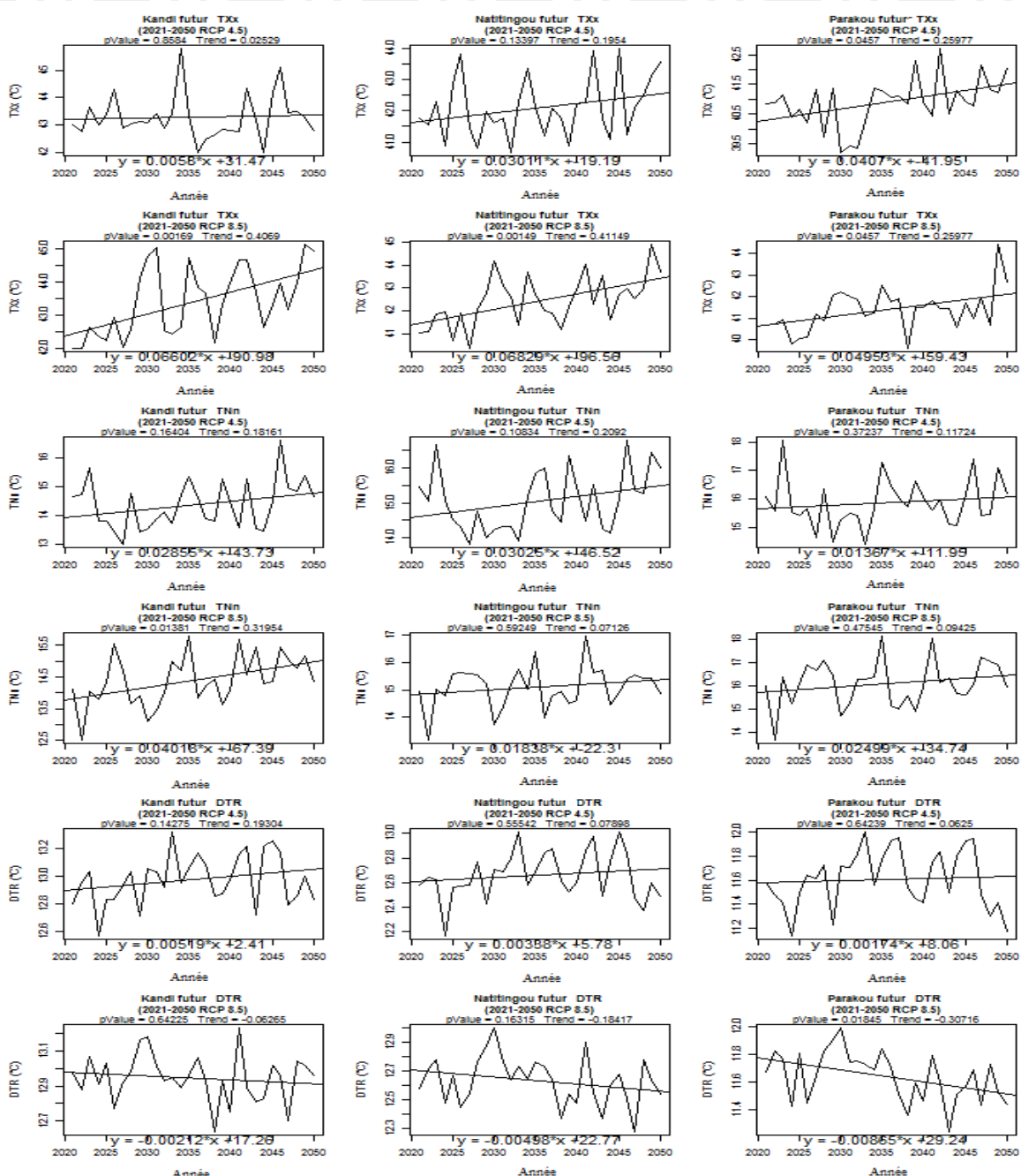


Figure 26 : Tendances et significativités des indices d'intensité de température (futur proche).

6.2.2. Indices de fréquence de température extrême (CSDI, WSDI, TX90p et TN90p).

A travers la figure 27, on remarque que CSDI baisse non significativement quel que soit la station et le scénario du modèle HIRHAM au cours du futur proche sauf à Kandi pour RCP4.5 où il est noté une hausse non significative (Figure 27). Avec le RCP8.5 on note respectivement des baisses de 3, 1 et 0,1 jours par décennie à Kandi, Natitingou et Parakou. Alors qu'avec le RCP4.5 on note des baisses de 0,07 et 0,5 jours par décennie respectivement à Natitingou et Parakou et une hausse de 0,4 jours par décennie à Kandi (Figure 27). Pour le modèle REMO, on remarque que CSDI baisse significativement quel que soit la station et le scénario considéré. Avec le RCP4.5 on note respectivement des baisses de 3, 4 et 6 jours par décennie à Kandi,

Natitingou et Parakou (annexe 6). Alors qu'avec le RCP8.5 on note des baisses de 3, 4 et 5 jours par décennie respectivement à Kandi, Natitingou et Parakou (annexe 6). Par contre au cours de la période historique ces valeurs étaient près que nulles à Kandi et Parakou et en hausse de 1 jour par décennie à Natitingou.

Avec le modèle HIRHAM, le WSDI présente des tendances à la hausse significatives avec les deux scénarii au niveau de toutes les stations. On note des augmentations de 10, 8 et 8 jours par décennie pour le RCP4.5 et 11, 10 et 7 jours par décennie avec le RCP8.5 respectivement à Kandi, Natitingou et Parakou (Figure 27). Par contre pour le modèle REMO, au cours du proche futur, le WSDI présente des tendances significatives à la hausse avec le RCP4.5 avec des augmentations respectives de 11, 5 et 4 jours par décennie à Kandi, Natitingou et Parakou (annexe 6). Avec le RCP8.5 la hausse est plutôt non significative pour toutes les stations. Ces hausses sont de 4, 5 et 3 jours par décennie respectivement à Kandi, Natitingou et Parakou (annexe 6). Par le passé ces augmentations étaient de 2, 2 et 6 jours par décennie.

Le modèle HIRHAM présente pour TN90p des tendances significatives à la hausse pour toutes les stations et pour tous les scénarii (Figure 27). On note des augmentations de 7, 7 et 9 jours par décennie respectivement à Kandi, Natitingou et Parakou avec le RCP4.5 (Figure 27). Pour le RCP8.5, ces augmentations sont respectivement de 10, 10 et 9 jours par décennie (Figure 27). Avec le modèle REMO, on fait les mêmes constats qu'au niveau du modèle HIRHAM. TN90p présente des tendances significatives à la hausse pour toutes les stations et pour tous les scénarii (annexe 6). On note des augmentations de 8, 6 et 7 jours par décennie respectivement à Kandi, Natitingou et Parakou avec le RCP4.5 (annexe 6). Pour le RCP8.5, ces augmentations sont respectivement de 8, 6 et 8 jours par décennie (annexe 6). Au cours de la période de référence, on a noté des augmentations de 4, 5 et 7 jours par décennie respectivement à Kandi, Natitingou et Parakou.

Comme TN90p, TX90p montre des tendances significatives à la hausse pour les deux scénarii du modèle HIRHAM (Figure 27). Pour le RCP4.5 on note des augmentations de 5 jours par décennie au niveau de chaque station. Pour le RCP8.5, des augmentations de 7, 6 et 4 jours par décennie sont respectivement notées à Kandi, Natitingou et Parakou (Figure 27). Avec le modèle REMO, TX90p montre des tendances significatives à la hausse de 3, 4 et 3 jours par décennie respectivement à Kandi, Natitingou et Parakou avec le RCP8.5 (annexe 6). Pour le RCP4.5 du même modèle, TX90p présente des augmentations significatives à Kandi et Parakou et non significatives à Natitingou. Ces augmentations sont de 5, 2 et 3 jours par décennie respectivement à Kandi, Natitingou et Parakou (annexe 6). Ces augmentations étaient de 2, 3 et 5 jours par décennie au cours de la période de référence.

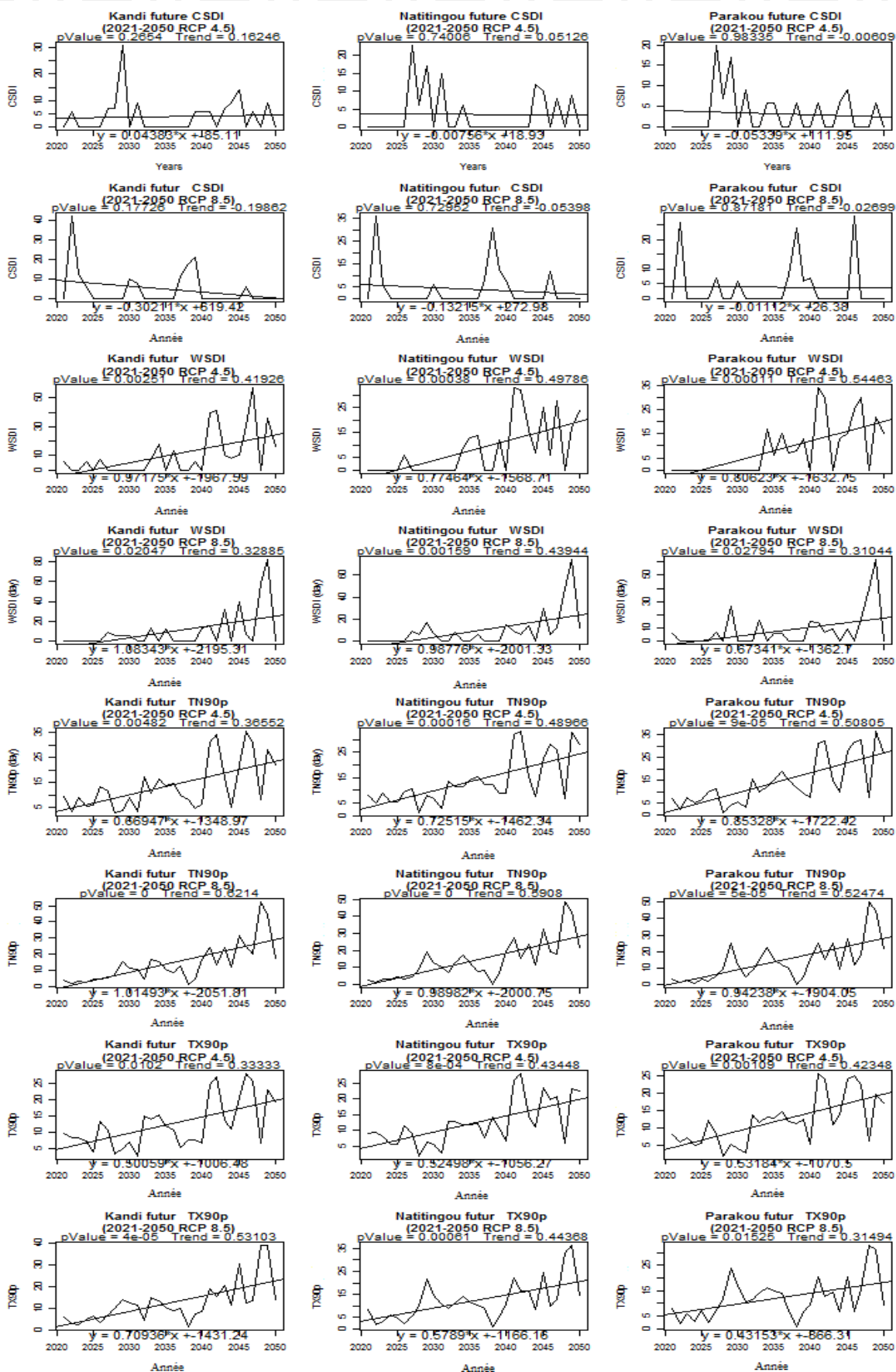


Figure 27 : Tendances et significativités des indices de fréquence de température (futur proche).

6.3. Tendances projetée des indices de température extrême au cours de la période 2051-2080

6.3.1. Indices d'intensité de température extrême (TXx, TNn et DTR)

Au cours du futur lointain, on remarque à travers la figure 28 des tendances à la hausse non significatives pour TXx, qui augmentent de 0,01, 0,2 et 0,1 °C par décennie respectivement à Kandi, Natitingou et Parakou avec le scénario RCP4.5 du modèle HIRHAM. Contre des tendances à la hausse significatives respectives de 0,8, 0,9 et 0,6 °C par décennie pour ces mêmes stations avec le RCP8.5 du même modèle. Avec le modèle REMO (annexe 7), on observe pour TXx, des tendances à la hausse non significatives de 0,3, 0,4 et 0,2 °C par décennie respectivement à Kandi, Natitingou et Parakou avec le scénario RCP4.5. Avec le RCP8.5, des tendances à la hausse significatives sont notées. Ces tendances augmentent de 0,7, 0,7 et 0,8 °C par décennie respectivement à Kandi, Natitingou et Parakou (annexe 7). Ces tendances étaient à la hausse respectivement de 0,1, 0,26 et 0,3 °C par décennie par le passé.

La figure 28 présente au cours du futur lointain, des tendances à la hausse significatives pour TNn avec le RCP4.5 de HIRHAM et des baisses non significatives avec RCP8.5 du même modèle HIRHAM au niveau de toutes les stations (Figure 28). Les baisses avec le RCP4.5 sont de 0,3, 0,2 et 0,04 °C par décennie alors que les augmentations avec le RCP8.5 sont de 0,49, 0,49 et 0,42 °C par décennie respectivement à Kandi, Natitingou et Parakou (Figure 28). Avec le modèle REMO (annexe 7), TNn présente des tendances à la hausse significatives avec les deux scénarii (RCP4.5 et RCP8.5) au niveau de toutes les stations. Ces tendances augmentent respectivement de 0,4, 0,3 et 0,4 °C par décennie à Kandi, Natitingou et Parakou. Alors que par le passé ces augmentations étaient de 0,1 °C par décennie à Kandi et 0,6 °C par décennie à Parakou puis une baisse de 0,7 °C par décennie était notée à Natitingou.

Avec les scénarii du modèle HIRHAM, on note au cours de la période 2051-2080, des tendances à la baisse non significatives pour le DTR et pour toutes les stations sauf à Natitingou avec le RCP8.5 où l'on constate une hausse non significative (Figure 28). Ces variations sont de l'ordre 1/1000 °C par décennie au niveau de toutes les stations (Figure 28). Pour le modèle REMO (annexe 7), des baisses significatives de 0,6, 0,4 et 0,5 °C par décennie sont respectivement notées à Kandi, Natitingou et Parakou avec le RCP4.5 (annexe 7). Avec le RCP8.5 du même modèle, des hausses non significatives respectives de 0,1 et 0,09 °C par décennie sont observées pour le DTR à Kandi et Natitingou et une baisse de 0,04 °C par décennie à Parakou (annexe 7). Au cours de la période historique, on a assisté à des baisses de 0,07 et 0,1 °C par décennie respectivement à Kandi et Parakou contre une augmentation de 0,17 °C par décennie à Natitingou.

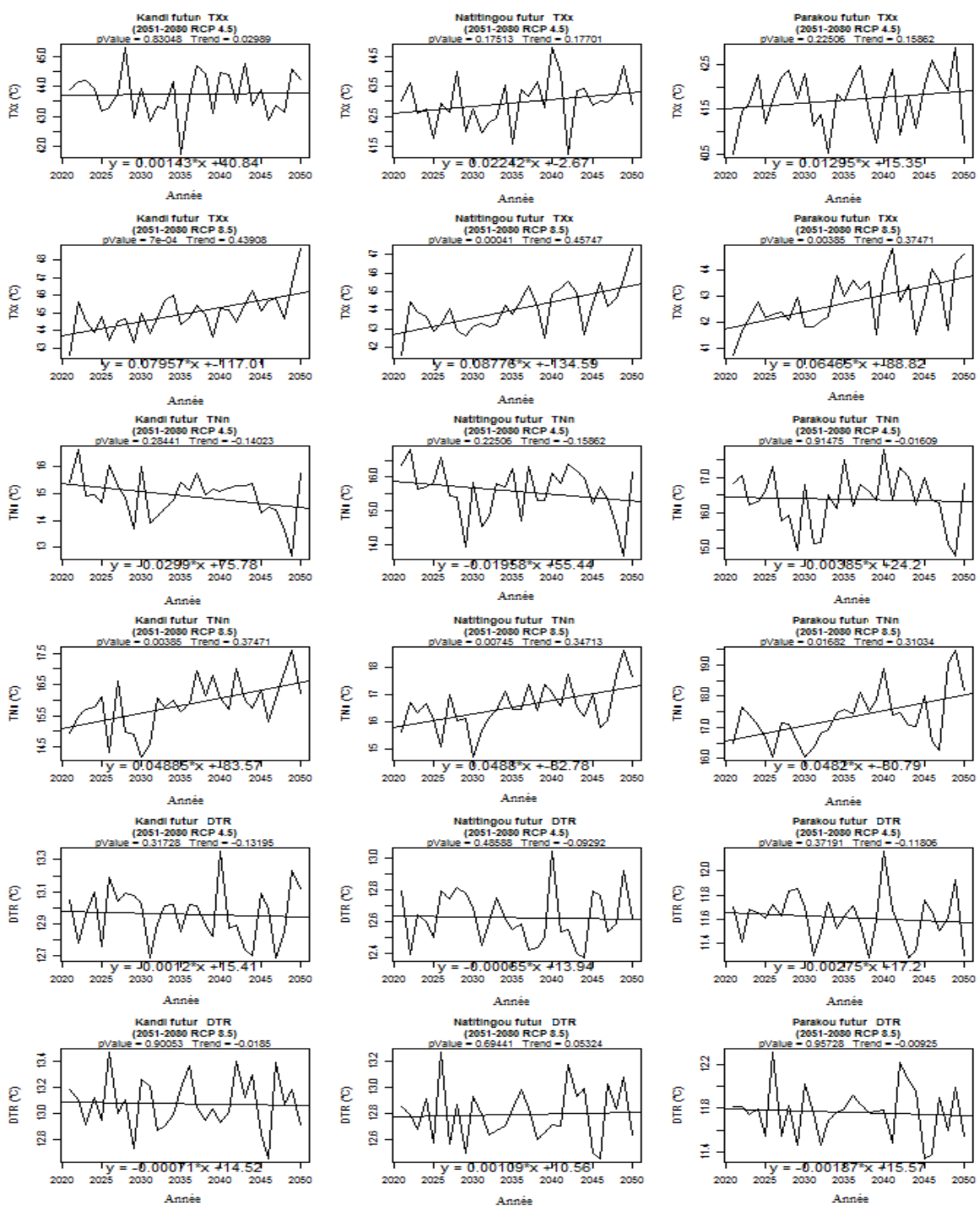


Figure 28 : Tendances et significativités des indices d'intensité de température (futur lointain).

6.3.2. Indices de fréquence de température extrême (CSDI, WSDI, TN90p et TX90p).

De la figure 29, il ressort que CSDI baisse non significativement de 5 et 4 jours par centenaire respectivement à Natitingou et Parakou au cours de la période 2051-2080 avec le scénario RCP4.5 du modèle HIRHAM contre une augmentation de 2 jours par décennie à Kandi avec le même scénario. Avec le RCP8.5 du même modèle, on note respectivement des baisses de 9, 9 et 10 jours par décennie à Kandi, Natitingou et Parakou au cours de la même période (Figure 29). Pour le modèle REMO, on remarque que CSDI baisse significativement quel que soit la

station et le scénario considéré (annexe 7). Ces baisses sont de l'ordre de 1 jour par année (annexe 7). Par contre au cours de la période historique ces valeurs étaient près que nulles à Kandi et Parakou et en hausse de 1 jour par décennie à Natitingou.

Avec le modèle HIRHAM, le WSDI présente des tendances à la baisse non significatives de 2, 2 et 0,002 jours par décennie respectivement à Kandi, Natitingou et Parakou avec le scénario RCP4.5 (Figure 29). On note avec le RCP8.5 des tendances vers une augmentation de 2, 5 et 3 jours par décennie respectivement à Kandi, Natitingou et Parakou (Figure 29). Par contre pour le modèle REMO, dans un futur lointain, le WSDI présente des tendances à la baisse non significatives de 3 et 2 jours par décennie respectivement à Kandi et Parakou avec le RCP4.5 et une tendance à une augmentation de 0,0 5 jours par décennie à Natitingou (annexe 7). Avec le RCP8.5, des tendances à la hausse significatives sont détectées pour toutes les stations (annexe 7). Ces hausses sont de 6, 4 et 4 jours par décennie respectivement à Kandi, Natitingou et Parakou (annexe 7). Par le passé ces augmentations étaient de 2, 2 et 6 jours par décennie.

Le modèle HIRHAM présente pour le TN90p des tendances significatives à la hausse de 9, 9 et 8 jours par décennie respectivement à Kandi, Natitingou et Parakou avec le scénario RCP8.5 (Figure 29). Avec le RCP4.5 du même modèle, des tendances à une augmentation de 1,51 et 1,52 jours par décennie sont respectivement notées à Natitingou et Parakou et une baisse non significative de 1,17 jours par décennie à Kandi (Figure 29). Pour le modèle REMO, au cours de 2051-2080, des tendances significatives à la hausse pour toutes les stations et pour tous les scénarii sont notées (annexe 7). On note des augmentations de 7, 5 et 5 jours par décennie respectivement à Kandi, Natitingou et Parakou avec le RCP4.5 (annexe 7). Pour le RCP8.5, ces augmentations sont respectivement de 8, 7 et 7 jours par décennie (annexe 7). Au cours de la période de référence, on a noté des augmentations de 4, 5 et 7 jours par décennie respectivement à Kandi, Natitingou et Parakou.

TX90p montre des tendances à la baisse non significatives de 0,8, 0,2 et 0,4 jours par décennie respectivement à Kandi, Natitingou et Parakou avec le scénario RCP4.5 du modèle HIRHAM (Figure 29). Pour le RCP8.5 on note des augmentations significatives de 8, 9 et 8 jours par décennie respectivement à Kandi, Natitingou et Parakou (Figure 29). En considérant le modèle REMO, TX90p montre des tendances à la hausse non significatives avec le RCP4.5 et des tendances à la hausse significatives avec le RCP8.5 au niveau de toutes les stations (annexe 7). Des augmentations sont de 1, 3 et 1 jours par décennie respectivement à Kandi, Natitingou et Parakou avec le RCP4.5 (annexe 6). Pour le RCP8.5 du même modèle, TX90p présente des augmentations de 8, 6 et 7 jours par décennie à Kandi, Natitingou et Parakou (annexe 7). Ces augmentations étaient de 2, 3 et 5 jours par décennie au cours de la période de référence.

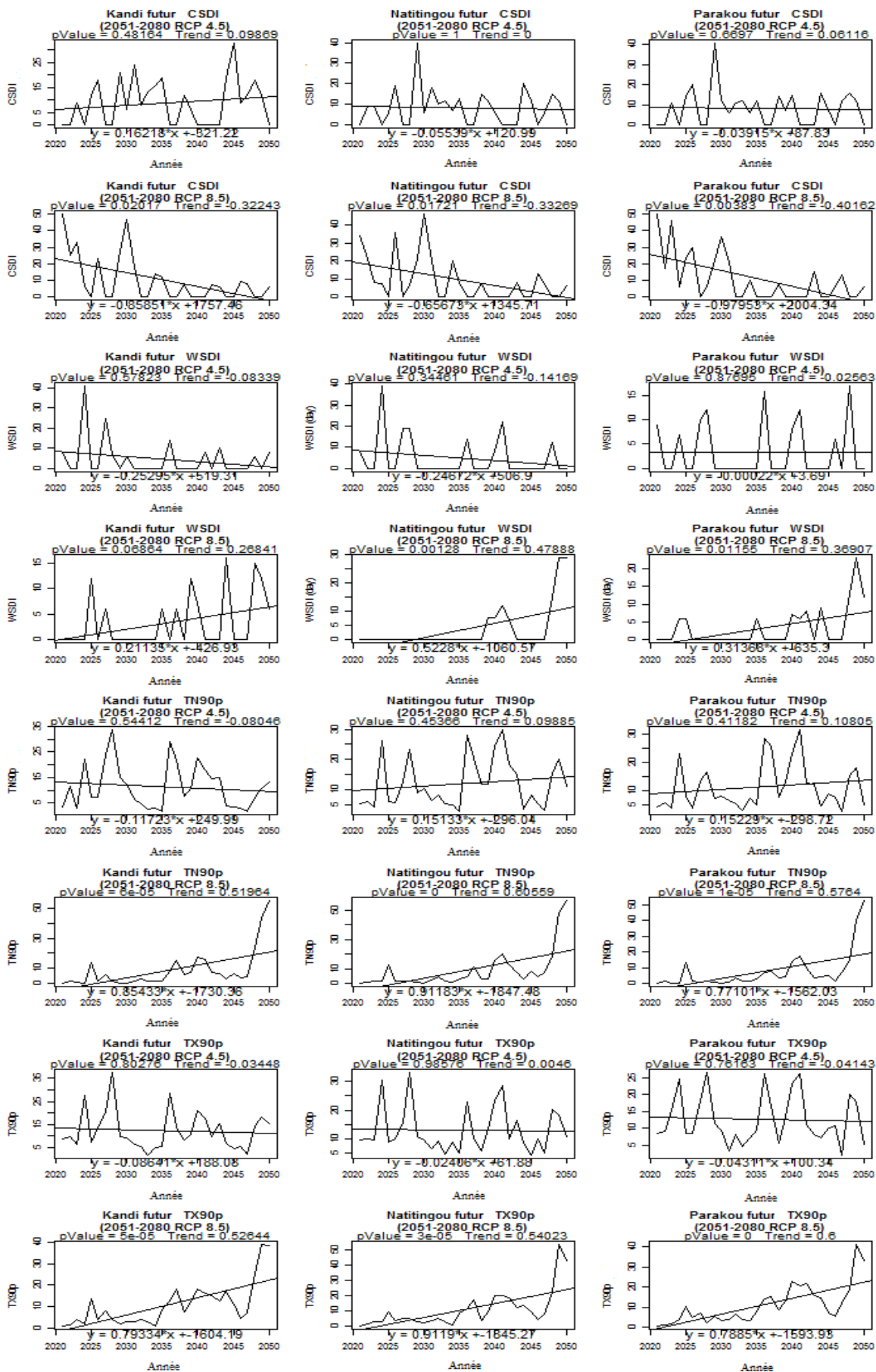


Figure 29 : Tendances et significativités des indices d'intensité de température (futur lointain).

6.4. Quantification des changements et leur significativité pour les indices de température

La figure 30 présente les changements des indices de températures extrêmes sous les scénarii d'émission RCP4.5 et RCP8.5 des modèles HIRHAM et REMO (2021-2050 et 2051-2080) par rapport à la période de référence (1990-2019). De cette figure, il ressort que pour les deux sous-périodes d'étude, les maxima des températures (TXx) augmenteront au niveau de toutes les stations et pour tous les scénarii des deux MCR. On note avec le modèle HIRHAM dans le futur proche des écarts moyens à la hausse de 1,12 et 1,43 °C respectivement avec le RCP4.5 et le RCP8.5 contre respectivement 1,83 et 2,96 °C dans le futur lointain par rapport à la période de référence (Figure 30). Avec le modèle REMO, on note pour le futur proche, avec les RCP4.5 et RCP8.5, des écarts moyens d'augmentation respectifs de 2,3 et 2,52°C par rapport à la période de base. Tandis que pour le futur lointain ces écarts sont en augmentation respective de 3,48 et 4,74 °C avec les mêmes scénarii par rapport à la période de référence.

Les minima des températures minimales (TNn), indiquent par rapport à la période de référence des écarts moyens à la hausse de 0,94 et 1,05 °C pour le futur proche et de 1,46 et 2,42 °C pour le futur lointain respectivement avec les scénarii RCP4.5 et RCP8.5 du modèle HIRHAM (Figure 30). Pour les scénarii RCP4.5 et RCP8.5 du modèle REMO, on note des écarts moyens à l'augmentation de 1 et 2,17 °C respectivement pour le futur proche et lointain par rapport à la période de référence (Figure 30). DTR montre des écarts moyens d'augmentation de 0,11 et 0,10 °C pour le futur proche et de 0,09 et 0,23 °C pour le futur lointain respectivement avec les RCP4.5 et RCP8.5 du modèle HIRHAM par rapport à la période de référence (Figure 30). Sous le modèle REMO, le RCP4.5 présente des baisses d'écarts moyens de 0,29 et 0,8 °C respectivement pour le futur proche et lointain par rapport à la période de référence. Par contre le RCP8.5 présente une baisse d'écart de 0,06 °C pour le futur proche et une augmentation de 0,17 °C pour le futur lointain par rapport à la période de base (Figure 30). En général, tous les indices d'intensité de température extrême projetés augmentent par rapport à la période de référence. Il est à noter que les changements pour ces indices sont plus élevés avec le RCP8.5 qu'avec le RCP4.5 (Figure 30).

Le modèle climatique HIRHAM présente pour TX90p à travers ces scénarii RCP4.5 et RCP8.5 respectivement des écarts moyens de 2,24 et 2,25 jours pour le futur proche contre des écarts moyens de 2,5 et 0,8 jours pour le futur lointain (Figure 30). Avec le modèle REMO, le TX90p connaîtra au cours de la période 2021-2050 une augmentation de 1,54 et 2 jours respectivement avec le RCP4.5 et le RCP8.5 par rapport à la période de base (Figure 30). Alors qu'au cours de la période 2051-2080, une augmentation de 7,14 jours est notée pour le RCP4.5 et une baisse

de 1,38 jours pour le RCP8.5 par rapport à la période de référence (Figure 30). On note pour le TN90p avec le RCP4.5 de HIRHAM des baisses moyennes de 0,07 et 2,47 jours respectivement pour le futur proche et lointain par rapport à la période de référence (Figure 30). Par contre avec le RCP8.5 du même modèle, cet écart du TN90p est à la hausse de 0,07 jour au cours de 2021-2050 et à la baisse de 5,84 jours au cours de 2051-2080 par rapport à la période de référence (Figure 30). Pour le modèle REMO, le TN90p baissera pour toutes les périodes par rapport à la période de référence (Figure 30). On note au cours de 2021-2050 des baisses de 0,52 (RCP4.5) et 0,16 (RCP8.5) jours et au de 8,8 (RCP4.5) et 6,7 (RCP8.5) au cours de 2051-2080.

On note une baisse de 0,31 jours de CSDI au cours du futur proche par rapport à la période de référence avec le RCP4.5 de HIRHAM (Figure 30). Au cours de la même période, CSDI augmentera de 0,13 jours avec le RCP8.5 du même modèle par rapport à la période de référence (Figure 30). Au cours du futur lointain (2051-2080) cet indice est prévu à la hausse par rapport à la période de base. On note des augmentations de 4,48 et 5,86 jours respectivement avec les RCP4.5 et RCP8.5 du modèle HIRHAMA (Figure 30). Avec le modèle REMO, quel que soit la période et le scénario, le CSDI augmentera par rapport à la période de référence (Figure 36). Au cours de 2021-2050, les RCP4.5 et RCP8.5 montrent des augmentations respectives de 1,7 et 1,22 jours contre 11,48 et 7,98 jours au cours de 2051-2080 (Figure 30). L'indice WSDI augmentera de 1,40 et 1,57 jours respectivement selon RCP4.5 et RCP8.5 du modèle HIRHAM au cours du futur proche par rapport à la période de référence (Figure 30). Au cours du futur lointain, ces scénarii prévoient pour cet indice des baisses respectives de 3,41 et 4,17 jours par rapport à la période de référence (Figure 30). Les RCP4.5 et RCP8.5 de REMO prévoient au cours du futur proche des augmentations respectives de 3,4 et 1,55 jours par rapport à la période de référence (Figure 30). Au cours du futur lointain, le RCP4.5 présente pour WSDI une hausse de 2,41 jours contre une baisse de 2,53 jours pour le RCP8.5 par rapport à la période de référence (Figure 30). Pour ce groupe d'indice également il est indiqué un réchauffement du bassin pour les années à venir car les séquences chaudes augmentent plus que les séquences froides.

Le tableau 8 présente la significativité des changements des indices de température observés au cours des périodes de projections par rapport à la période de référence. De ce tableau, on constate qu'au cours des périodes de projection, seul l'indice TXx présente des changements significatifs au niveau de toutes les stations et avec tous les scénarii des deux modèles utilisés. Le CSDI pour sa part, présente des changements significatifs pour toutes les stations et avec

n’importe quel scénario des deux modèles au cours du futur proche (tableau 8). Au cours du futur lointain, le CSDI change significativement seulement au niveau des stations de Kandi et Parakou pour tous les RCP des deux MCR (tableau 8). Le DTR montre des changements significatifs pour toutes les stations juste avec les RCP4.5 et RCP8.5 du modèle HIRAHM et le RCP8.5 du modèle REMO au cours des deux périodes de projection (tableau 8).

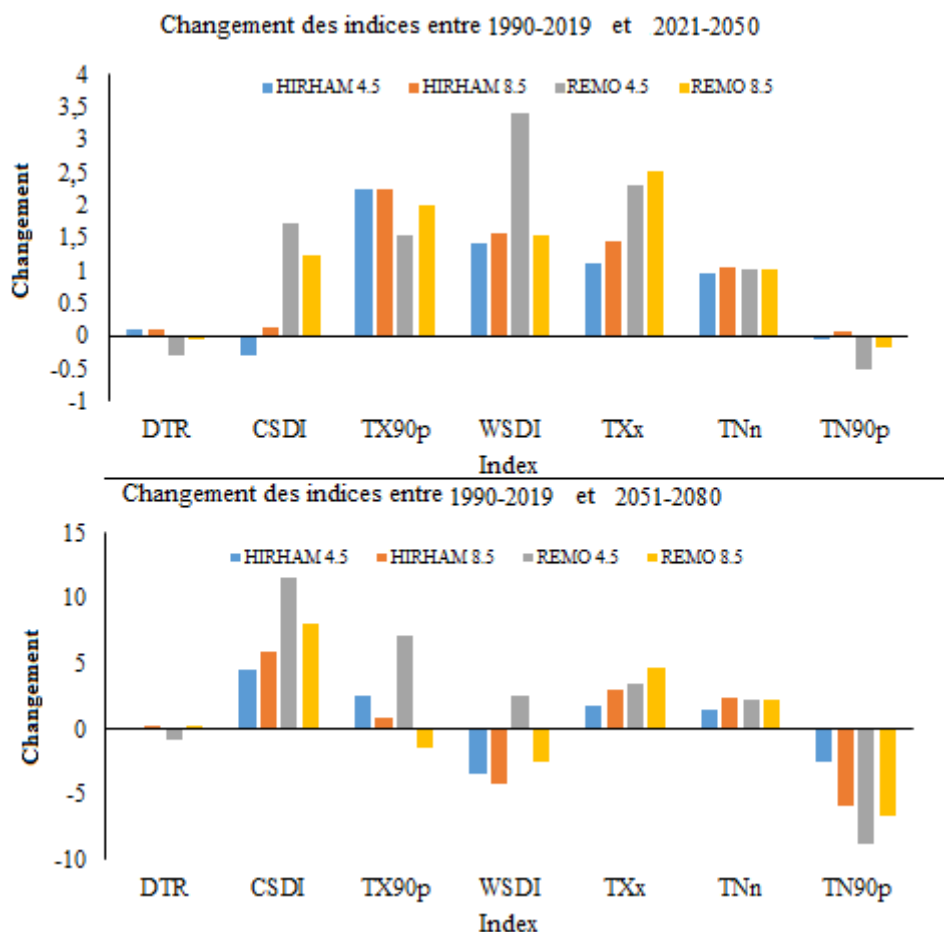


Figure 30 : Changement des indices entres les projections et la période de référence.

Tableau 8 : Significativités des changements des indices de température extrême.

MC R	Scénario	Période Station Indice	2021-2050			2051-2080		
			Kandi	Natitingou	Parakou	Kandi	Natitingou	Parakou
HIRHAM	RCP4.5	DTR	<i>0,000</i>	<i>0,005</i>	<i>0,000</i>	<i>0,000</i>	<i>0,007</i>	<i>0,000</i>
		CSDI	<i>0,001</i>	<i>0,026</i>	<i>0,001</i>	<i>0,000</i>	0,190	<i>0,000</i>
		TX90p	0,076	0,589	0,154	0,139	0,726	0,139
		WSDI	0,165	0,152	0,265	0,535	0,557	<i>0,030</i>
		TXx	<i>0,000</i>	<i>0,000</i>	<i>0,000</i>	<i>0,000</i>	<i>0,000</i>	<i>0,000</i>
		TNn	<i>0,000</i>	0,434	<i>0,000</i>	<i>0,000</i>	<i>0,037</i>	<i>0,000</i>
		TN90p	0,238	0,052	<i>0,004</i>	<i>0,013</i>	<i>0,002</i>	<i>0,000</i>
RCP	DTR	<i>0,000</i>	<i>0,009</i>	<i>0,000</i>	<i>0,000</i>	<i>0,000</i>	<i>0,000</i>	

REMO		CSDI	0,010	0,035	0,010	0,000	0,296	0,000
		TX90p	0,112	0,582	0,199	0,577	0,684	0,060
		WSDI	0,288	0,273	0,264	0,170	0,176	0,016
		TXx	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
		TNn	0,000	0,399	0,000	0,000	0,000	0,440
		TN90p	0,389	0,122	0,015	0,004	0,001	0,000
		DTR	0,881	0,888	0,000	0,015	0,027	0,000
	RCP4.5	CSDI	0,000	0,033	0,000	0,000	0,908	0,000
		TX90p	0,202	0,881	0,108	0,000	0,010	0,988
		WSDI	0,011	0,010	0,842	0,050	0,044	0,347
		TXx	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
		TNn	0,000	0,197	0,000	0,000	0,000	0,338
		TN90p	0,421	0,109	0,009	0,000	0,000	0,000
		DTR	0,001	0,010	0,000	0,000	0,000	0,000
RCP8.5	CSDI	0,000	0,033	0,000	0,000	0,410	0,000	
	TX90p	0,279	0,901	0,069	0,914	0,462	0,041	
	WSDI	0,134	0,123	0,284	0,708	0,683	0,106	
	TXx	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
	TNn	0,000	0,197	0,000	0,000	0,000	0,338	
	TN90p	0,400	0,101	0,008	0,000	0,000	0,000	
	DTR	0,001	0,010	0,000	0,000	0,000	0,000	

6.5. Synthèse sur les indices de température

Des augmentations pour l'indice TX90p (nombre de jour chaud) sont prévues par les modèles climatiques utilisés. Ces variations sont en moyenne de l'ordre de 2 jours par décennie. L'indice WSDI (indice de durée des séquences chaudes) présente les mêmes tendances que le TX90p c'est-à-dire, il augmente chronologiquement en moyenne de 3 jours par décennie pour l'ensemble des scénarii et pour les deux périodes de projection. Sur le bassin béninois du fleuve Niger, au cours de la période 2021-2050, les indices TXx (maxima des températures maximales), TNn (minima des températures minimales), et DTR (l'écart des températures) augmenteront en moyenne d'environ 0,6°C/décennie quel que soit le scénario et le modèle climatique. Cette augmentation était d'environ 0,7°C par décennie pour la période historique (1976-2019). On en déduit que le réchauffement débuté dans le passé récent sur le bassin continuera pour les périodes futures (2021-2050 et 2051-2080). Telle était la conclusion de Badou (2016) pour le bassin en se basant sur les températures moyennes. Ces résultats confirment ceux de Obada (2017) pour le Bénin toujours avec les moyennes de température. Les mêmes résultats corroborent ceux de GIEC (2013) pour toute l'Afrique de l'ouest. On retrouve également les mêmes conclusions avec New et al (2006) pour les mêmes indices et pour le sud et l'ouest de l'Afrique. Cette situation semble être planétaire car confirmée sur d'autres régions telles que la Seine (GICC – RexHySS, 2011) où il est prévu des augmentations des températures moyennes de 1,5 à 3 °C à l'horizon 2050 et de 2 à 4,5°C à l'horizon 2100. Il

est donc important que les communautés scientifiques, les décideurs locaux, nationaux et internationaux à divers niveaux prennent des résolutions optimales et collégiales pour contrer les conséquences néfastes de ce phénomène.

Conclusion

En somme, les indices de températures extrêmes sur le bassin béninois du fleuve Niger, confirment les mêmes changements climatiques observés dans les travaux précédents. Presque tous les indices calculés présentent des situations inquiétantes pour le bassin. En effet, les indices d'intensité de températures extrêmes (TNn, TXx, et DTR), et ceux de la fréquence de chaleurs extrêmes (TX90p et WSDI) augmentent. Il est également important de noter que les indices TXx, DTR, et CSDI présentent des changements significatifs par rapport à la période de référence.

CHAPITRE 7 : ANALYSE DES EXTREMES DE PRECIPITATION

Cette partie du document montre les résultats des analyses sur l'évolution des six (06) indices pluviométriques étudiés et des indices de sécheresse météorologiques (SPI). Il s'agit de l'évolution spatiale et tendancielle de ces indices durant la période historique d'une part et des périodes de projection d'autre part. Elle présente également, les changements à l'état moyen de ces indices sur les périodes de projection en comparaison à celle de la période de référence tirée de la période historique. La significativité des changements quantifiés est également évaluée.

7.1. Analyse de l'évolution des indices de précipitation extrêmes

7.1.1. Variabilité spatiale et tendances dans la période historique

7.1.1.1. Indices d'intensité (PRCPTOT, R95p, RX1day et RX5day)

La figure 31 présente dans sa première colonne la répartition spatiale des moyennes respectives de PRCPTOT, de R95p, de RX1day et de RX5day, dans sa deuxième colonne sont illustrées la spatialisation des tendances et leur significativité (points noirs) et dans sa troisième colonne les tendances chronologiques des indices. De cette figure, on remarque un gradient latitudinal pour l'indice PRCPTOT. Ce gradient est inversement proportionnel aux valeurs moyennes des indices, c'est-à-dire les valeurs moyennes des indices décroissent avec l'augmentation de la latitude. Sur le bassin d'étude, le PRCPTOT varie entre 829 et 1213 mm avec une moyenne de 1064 ± 117 mm. Cet indice présente une tendance à la hausse de 2,6 mm/an qui est significative au nord du bassin (Figure 31). L'indice R95p pour sa part présente une moyenne de 230 ± 38 mm avec une variation entre 168 et 301 mm. Il présente une tendance chronologique à la hausse de 0,99 mm/an significative à l'extrême nord et sud du bassin. Comme le PRCPTOT, il présente également un gradient latitudinal qui est inverse à l'augmentation de la latitude (Figure 31). L'indice RX1day augmente chronologiquement de 0,04 mm/an et est significatif au nord-est. Il montre une moyenne de $76 \pm 5,3$ mm et varie entre 66 et 86 mm. Le RX5day est caractérisé sur le bassin d'étude par une tendance chronologique de 0,3 mm/an significative au sud et au nord. Sur le bassin, il varie entre 109 et 141 mm avec une moyenne de $125,3 \pm 8,2$ mm.

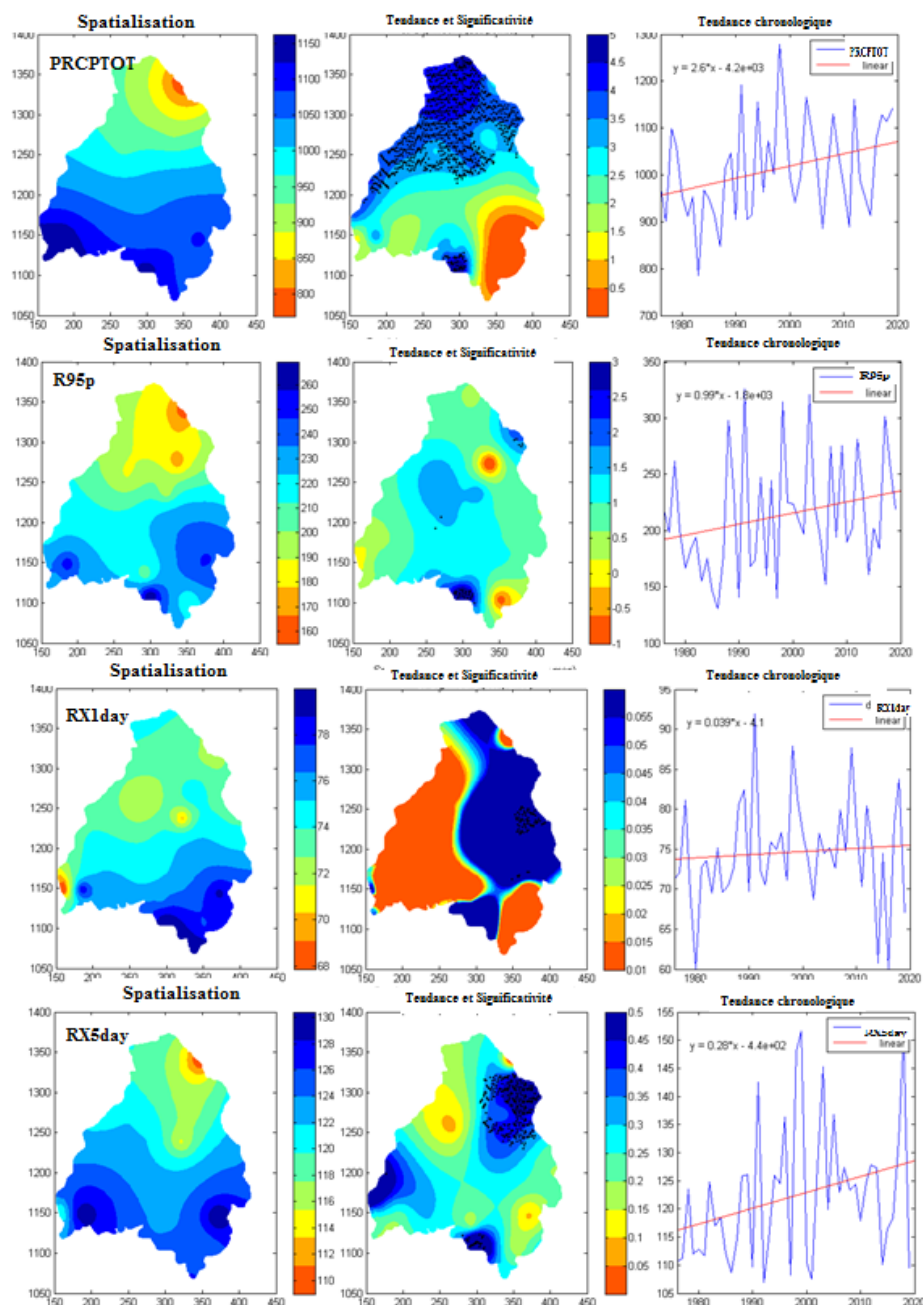


Figure 31 : Spatialisations, tendances et significativités des indices d'intensité.

7.1.1.2. Indices de fréquence (R1mm et CDD)

La figure 32 présente la répartition spatiale des moyennes des indices de fréquence, leur tendance et significativité ainsi que leur évolution chronologique au cours de la période historique. Tel l'indice PRCPTOT, l'indice R1mm présente un gradient latitudinal qui diminue avec l'augmentation de la latitude (Figure 32). Il est également caractérisé par une tendance chronologique à la hausse de 0,07 jours/an qui reste significative au nord du bassin (Figure 32). Cet indice montre une moyenne de $35,3 \pm 3,6$ jours. Il a varié entre 28 et 41 jours sur le bassin béninois du fleuve Niger (Figure 32). Le nombre moyen de jour consécutivement sec (CDD) sur le bassin béninois du fleuve Niger au cours de 1976 à 2019 a varié entre 103,1 et 177,3

jours (Figure 32). Cet indice augmente avec la latitude des stations avec une moyenne de 141,26 \pm 23,4 jours. Il présente une tendance chronologique à la hausse de 0,1 jours/an qui est statistiquement significative au nord-est.

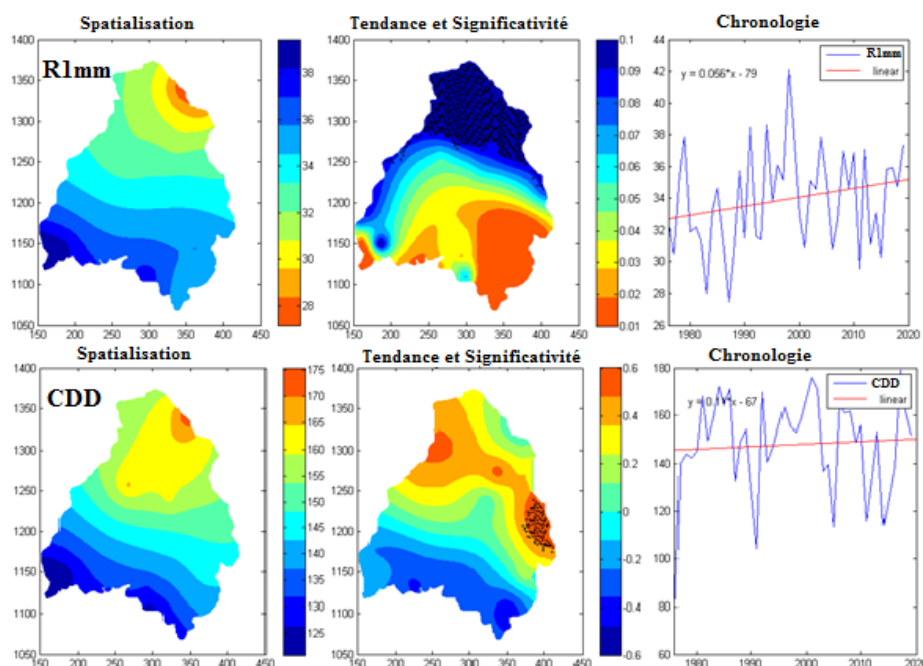


Figure 32 : Spatialisations, tendances et significativités des indices de fréquence

7.1.2. Variabilité spatiale et tendances dans les périodes futures

7.1.2.1. Variabilité spatiale et tendances dans le futur proche (2021-2050)

7.1.2.1.1. Indices d'intensité (PRCPTOT, R95p, RX1day et RX5day)

La figure 33 présente la spatialisation des moyennes et des tendances de l'indice PRCPTOT ainsi que son évolution chronologique en utilisant les scénarii RCP4.5 (ligne 1 et 3) et RCP8.5 (ligne 2 et 4) des modèles climatiques régionaux HIRHAM (ligne 1 et 2) et REMO (ligne 2 et 4). Il ressort de cette figure qu'au cours d'un futur proche, l'indice présentera en général les mêmes spatialisations que celles obtenues au niveau de la période historique pour l'ensemble des scénarii des modèles climatiques utilisés. C'est-à-dire les valeurs moyennes de l'indice diminueront avec l'augmentation de la latitude. Selon le RCP4.5 du HIRHAM, l'indice montrera une moyenne de $1058,14 \pm 115,17$ mm et oscillera entre 846 et 1242 mm. Pour ce scénario, le PRCPTOT présentera une tendance non significative à la hausse de 3,1 mm/an. Par contre, avec le RCP8.5 du HIRHAM, le PRCPTOT variera entre 885 et 1282 mm (Figure 33). Pour ce scénario, la moyenne de PRCPTOT est de 1100 ± 110 mm avec une tendance à la hausse de 4,7 mm/an significative au sud du bassin (Figure 33). Le modèle REMO présente à travers son RCP4.5 une moyenne de $1061,23 \pm 106,4$ mm pour le PRCPTOT. Pour ce scénario, le PRCPTOT variera entre 845 et 1196 mm avec une tendance chronologique à la hausse de 4,97 mm/an (Figure 33). Pour le RCP8.5 du même modèle, le PRCPTOT variera entre 913 et 1540

mm. Pour ce scénario, la moyenne de PRCPTOT sera de $1178,3 \pm 148,7$ mm. L'indice présentera une tendance à la hausse de $4,7$ mm/an. Par le passé, le PRCPTOT a varié entre 829 et 1213 mm avec une moyenne de 1064 ± 117 mm.

L'indice R95p au cours de la période 2021-2050 présente également un gradient latitudinal qui diminue avec l'augmentation de la latitude pour l'ensemble des scénarii des deux modèles (annexe 1). Selon le RCP4.5 du HIRHAM, l'indice sera caractérisé par une moyenne de $283,63 \pm 37,1$ mm avec des valeurs qui oscilleront entre 214 et 351 mm. Pour ce scénario, le R95p présentera une tendance non significative à la hausse de $1,6$ mm/an. Par contre, avec le RCP8.5 du HIRHAM, le R95p variera entre 233 et 350 mm (annexe 1). Pour ce scénario, la moyenne de R95p est de $303,2 \pm 33,02$ mm avec une tendance à la hausse de $4,5$ mm/an significative au sud du bassin (annexe 1). Le modèle REMO présente avec son scénario RCP4.5, une moyenne de $333,21 \pm 37,96$ mm pour le R95p. Pour ce scénario, le R95P variera entre 261 et 400 mm avec une tendance chronologique à la hausse de $4,03$ mm/an (annexe 1). Pour le RCP8.5 du même modèle, le R95p variera entre 296 et 495 mm. Pour ce scénario, la moyenne de R95p sera de $386 \pm 47,5$ mm. L'indice sera caractérisé par une tendance à la hausse de $3,6$ mm/an. Au cours de la période de référence, l'indice R95p présentait une moyenne de 230 ± 38 mm avec une variation entre 168 et 301 mm.

Un gradient latitudinal inversement proportionnel à la latitude caractérise l'indice RX1day (annexe 1). L'indice montrera une moyenne de $63,66 \pm 7,7$ mm et oscillera entre 50 et 80 mm avec le RCP4.5 du HIRHAM. Pour ce scénario, le RX1day présentera une tendance à la baisse de $0,4$ mm/an significative au sud du bassin. Par contre, avec le RCP8.5 du HIRHAM, le RX1day variera entre 52 et 81 mm (annexe 1). Pour ce scénario, la moyenne de RX1day est de $67,6 \pm 8,2$ mm avec une tendance non significative à la baisse de $0,1$ mm/an (annexe 1). Le modèle REMO présente à travers son RCP4.5 une moyenne de $111,6 \pm 16,1$ mm pour le RX1day. Pour ce scénario, le RX1day variera entre 90 et 142 mm avec une tendance chronologique non significative à la hausse de $1,2$ mm/an (annexe 1). Pour le RCP8.5 du même modèle, le RX1day variera entre 100 et 140 mm. Pour ce scénario, la moyenne de RX1day sera de $123 \pm 11,3$ mm. L'indice montrera une tendance à la hausse non significative de $0,2$ mm/an. Pendant la période historique, il montrait une moyenne de $76 \pm 5,3$ mm et a varié entre 66 et 86 mm.

L'indice RX5day pour sa part, au cours du futur proche présentera également un gradient latitudinal qui diminuera avec l'augmentation de la latitude pour l'ensemble des scénarii utilisés (annexe 1). Selon le RCP4.5 du HIRHAM, l'indice sera caractérisé par une moyenne de $91,5$

$\pm 10,7$ mm avec des valeurs qui oscilleront entre 73 et 114 mm. Pour ce scénario, le RX5day présentera une tendance non significative à la hausse de 0,4 mm/an. Par contre, avec le RCP8.5 du HIRHAM, le RX5day variera entre 78 et 115 mm (annexe 1). Pour ce scénario, la moyenne de RX5day est de $98 \pm 10,8$ mm avec une tendance à la baisse non significative de 0,05 mm/an (annexe 1). Le modèle REMO présente avec son scénario RCP4.5, une moyenne de $165,76 \pm 21,01$ mm pour le RX5day. Pour ce scénario, le RX5day variera entre 131 et 206 mm avec une tendance chronologique à la hausse de 1,02 mm/an (annexe 1). Pour le RCP8.5 du même modèle, le RX5day variera entre 145 et 207 mm. Pour ce scénario, la moyenne de RX5day sera de $178,6 \pm 16,11$ mm. L'indice sera caractérisé par une tendance non significative à la hausse de 0,1 mm/an. Cet indice a varié entre 109 et 141 mm avec une moyenne de $125,3 \pm 8,2$ mm lors de période historique.

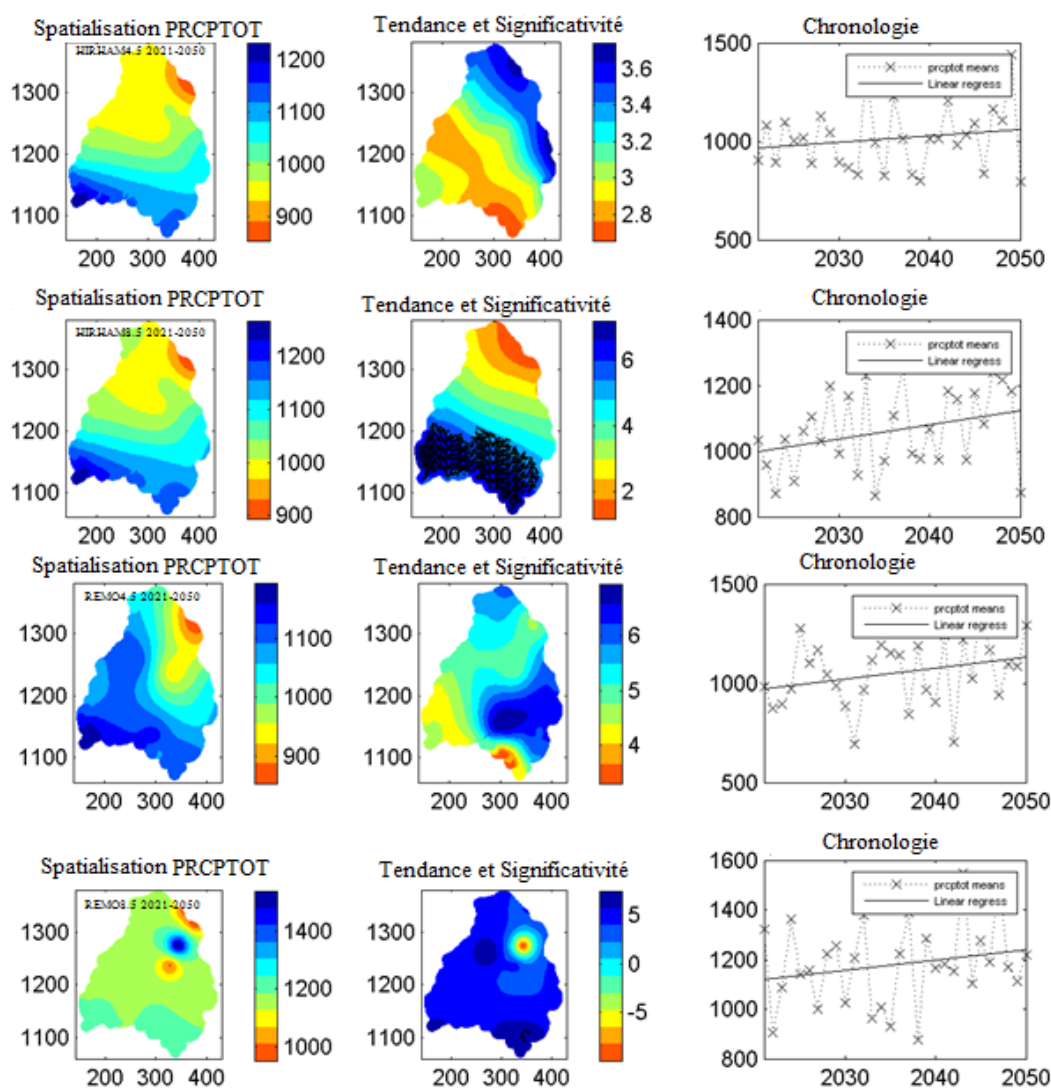


Figure 33 : Spatialisations, tendances et significativités futures (2021-2050) de l'indice PRCPTOT.

7.1.2.1.2. Indices de fréquence (R1mm et CDD)

La figure 34 présente la spatialisation des moyennes et des tendances de l'indice R1mm ainsi que son évolution chronologique en utilisant les scénarii RCP4.5 et RCP8.5 des modèles climatiques régionaux HIRHAM et REMO. De cette figure on remarque pour le proche futur, la baisse des valeurs moyennes de l'indice avec l'augmentation de la latitude selon les RCP4.5 et RCP8.5 de HIRHAM. Pour le RCP4.5 du HIRHAM, l'indice montrera une moyenne de $129,93 \pm 5,5$ jours et oscillera entre 121 et 137 jours. Pour ce scénario, le R1mm présentera une tendance non significative à la hausse de 0,18 jours/an. Par contre, avec le RCP8.5 du HIRHAM, le R1mm variera entre 122 et 138 jours (Figure 34). Pour ce scénario, la moyenne de R1mm est de $131 \pm 5,8$ jours avec une tendance à la hausse de 0,2 jours/an non significative (Figure 34). Le modèle REMO présente à travers ses RCP4.5 et RCP8.5 les valeurs faibles de l'indice R1mm au centre et au sud-ouest du bassin (Figure 34). Avec le RCP4.5 on notera une moyenne de $114,2 \pm 4,6$ jours pour le R1mm. Pour ce scénario, le R1mm variera entre 107 et 123 jours avec une tendance chronologique à la hausse non significative de 0,2 jours/an (Figure 34). Pour le RCP8.5, le R1mm variera entre 109 et 125 jours. Pour ce scénario, la moyenne de R1mm sera de $116,5 \pm 4,98$ jours. L'indice présentera une tendance non significative à la hausse de 0,13 jours/an (Figure 34). Par le passé, cet indice montrait une moyenne de $35,3 \pm 3,6$ jours et il a varié entre 28 et 41 jours.

Pour le CDD, les valeurs moyennes décroissent du nord du bassin vers le sud du bassin avec le RCP4.5 du modèle HIRHAM et le RCP8.5 du modèle REMO. Alors que le contraire est constaté avec le RCP4.5 du modèle REMO et le RCP8.5 du modèle HIRHAM (annexe 2). L'indice montrera une moyenne de $12,3 \pm 0,5$ jours et oscillera entre 11 et 14 jours avec le RCP4.5 du HIRHAM. Pour ce scénario, le CDD présentera une tendance non significative à la hausse de 0,01 jours/an. Par contre, avec le RCP8.5 du HIRHAM, le CDD variera entre 12 et 15 jours (annexe 2). Pour ce scénario, la moyenne de CDD est de $13,6 \pm 0,8$ jours avec une tendance non significative à la hausse de 0,007 jours/an (annexe 2). Le modèle REMO présente à travers son RCP4.5 une moyenne de $154,54 \pm 3,68$ jours pour le CDD. Pour ce scénario, le CDD variera entre 144 et 158 jours avec une tendance chronologique non significative à la baisse de 0,29 jours/an (annexe 2). Pour le RCP8.5 du même modèle, le CDD variera entre 104 et 156 jours. Pour ce scénario, la moyenne de CDD sera de $149,74 \pm 12,9$ jours. L'indice montrera une tendance à la hausse non significative de 0,1 jours/an. Au cours de la période de référence, le CDD a varié entre 103,1 et 177,3 jours avec une moyenne de $141,26 \pm 23,4$ jours.

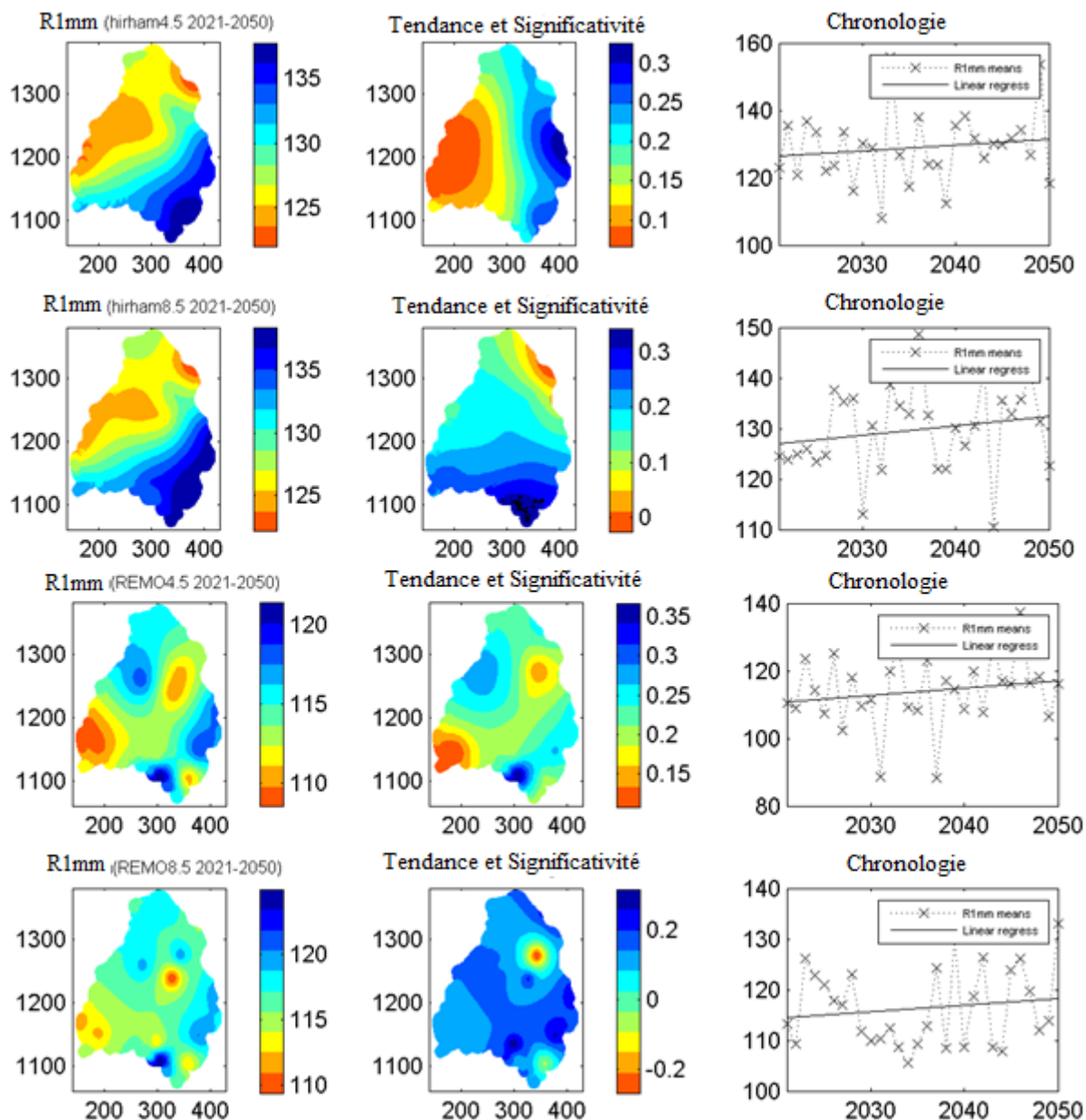


Figure 34 : Spatialisations, tendances et significativités futures (2021-2050) de l'indice R1mm.

7.1.2.2. Variabilité spatiale et tendance dans le futur lointain (2051-2080)

7.1.2.2.1. Indices d'intensité (PRCPTOT, R95p, RX1day et RX5day)

La figure 35 montre la spatialisation des moyennes et des tendances de l'indice PRCPTOT ainsi que son évolution chronologique en utilisant les scénarii RCP4.5 et RCP8.5 des modèles climatiques régionaux HIRHAM et REMO au cours de 2051-2080. De cette figure on retient que dans un futur lointain, l'indice présentera en général les mêmes spatialisations qu'au cours du futur proche. C'est-à-dire les valeurs moyennes de l'indice diminueront avec l'augmentation de la latitude. Selon le RCP4.5 du HIRHAM, l'indice montrera une moyenne de $1161,14 \pm 134,7$ mm et oscillera entre 919 et 1420 mm. Pour ce scénario, le PRCPTOT présentera une tendance non significative à la baisse de 0,78 mm/an. Par contre, avec le RCP8.5 du HIRHAM, le

PRCPTOT variera entre 891 et 1420 mm (Figure 35). Pour ce scénario, la moyenne de PRCPTOT est de $1141,6 \pm 138,8$ mm avec une tendance non significative à la baisse de 2,07 mm/an (Figure 35). Le modèle REMO présente à travers son RCP4.5 une moyenne de $1038,36 \pm 102,98$ mm pour le PRCPTOT. Pour ce scénario, le PRCPTOT variera entre 825 et 1173 mm avec une tendance chronologique non significative à la hausse de 1,07 mm/an (Figure 35). Pour le RCP8.5 du même modèle, le PRCPTOT variera entre 821 et 1515 mm. Pour ce scénario, la moyenne de PRCPTOT sera de $1066,11 \pm 155,69$ mm. L'indice présentera une tendance à la baisse non significative de 1,17 mm/an. Par le passé, le PRCPTOT a varié entre 829 et 1213 mm avec une moyenne de 1064 ± 117 mm.

L'indice R95p au cours de la période 2051-2080 présente également un gradient latitudinal qui diminue avec l'augmentation de la latitude pour l'ensemble des scénarii des deux modèles (annexe 3). Selon le RCP4.5 du HIRHAM, l'indice sera caractérisé par une moyenne de $302,38 \pm 42,51$ mm avec des valeurs qui oscilleront entre 224 et 381 mm. Pour ce scénario, le R95p présentera une tendance non significative à la baisse de 0,87 mm/an. Par contre, avec le RCP8.5 du HIRHAM, le R95p variera entre 198 et 381 mm (annexe 3). Pour ce scénario, la moyenne de R95p est de $285,76 \pm 48,1$ mm avec une tendance non significative à la baisse de 1,73 mm/an (annexe 3). Le modèle REMO présente avec son scénario RCP4.5, une moyenne de $325,02 \pm 36,61$ mm pour le R95p. Pour ce scénario, le R95P variera entre 256 et 389 mm avec une tendance chronologique non significative à la baisse de 0,08 mm/an (annexe 3). Pour le RCP8.5 du même modèle, le R95p variera entre 251 et 510 mm. Pour ce scénario, la moyenne de R95p sera de $344,9 \pm 57,69$ mm. L'indice sera caractérisé par une tendance non significative à la hausse de 0,73 mm/an. Au cours de la période de référence, l'indice R95p présentait une moyenne de 230 ± 38 mm avec une variation entre 168 et 301 mm.

On note un gradient latitudinal inversement proportionnel à la latitude pour l'indice RX1day (annexe 3). L'indice montrera une moyenne de $65,65 \pm 8,8$ mm et oscillera entre 51 et 84 mm avec le RCP4.5 du HIRHAM. Pour ce scénario, le RX1day présentera une tendance non significative à la baisse de 0,87 mm/an. Par contre, avec le RCP8.5 du HIRHAM, le RX1day variera entre 53 et 84 mm (annexe 3). Pour ce scénario, la moyenne de RX1day est de $69,9 \pm 7,8$ mm avec une tendance non significative à la hausse de 0,49 mm/an (annexe 3). Le modèle REMO présente à travers son RCP4.5 une moyenne de $104,4 \pm 12,2$ mm pour le RX1day. Pour ce scénario, le RX1day variera entre 80 et 122 mm avec une tendance chronologique non significative à la hausse de 0,23 mm/an (annexe 3). Pour le RCP8.5 du même modèle, le RX1day variera entre 76 et 144 mm. Pour ce scénario, la moyenne de RX1day sera de 107,5

$\pm 18,19$ mm. L'indice montrera une tendance non significative à la hausse de $0,87$ mm/an. Pendant la période historique, il montrait une moyenne de $76 \pm 5,3$ mm et a varié entre 66 et 86 mm.

L'indice RX5day pour sa part, dans un futur lointain présentera également un gradient latitudinal qui diminuera avec l'augmentation de la latitude pour l'ensemble des scénarii utilisés (annexe 3). Selon le RCP4.5 du HIRHAM, l'indice sera caractérisé par une moyenne de $99,95 \pm 14,35$ mm avec des valeurs qui oscilleront entre 74 et 128 mm. Pour ce scénario, le RX5day présentera une tendance non significative à la hausse de $0,13$ mm/an. Par contre, avec le RCP8.5 du HIRHAM, le RX5day variera entre 70 et 128 mm (annexe 3). Pour ce scénario, la moyenne de RX5day est de $97,73 \pm 14,25$ mm avec une tendance non significative à la hausse de $0,24$ mm/an (annexe 3). Le modèle REMO présente avec son scénario RCP4.5, une moyenne de $150,67 \pm 15,56$ mm pour le RX5day. Pour ce scénario, le RX5day variera entre 119 et 174 mm avec une tendance chronologique non significative à la hausse de $0,26$ mm/an (annexe 3). Pour le RCP8.5 du même modèle, le RX5day variera entre 115 et 218 mm. Pour ce scénario, la moyenne de RX5day sera de $151,51 \pm 24,46$ mm. L'indice sera caractérisé par une tendance non significative à la hausse de $1,03$ mm/an. Cet indice a varié entre 109 et 141mm avec une moyenne de $125,3 \pm 8,2$ mm lors de période historique.

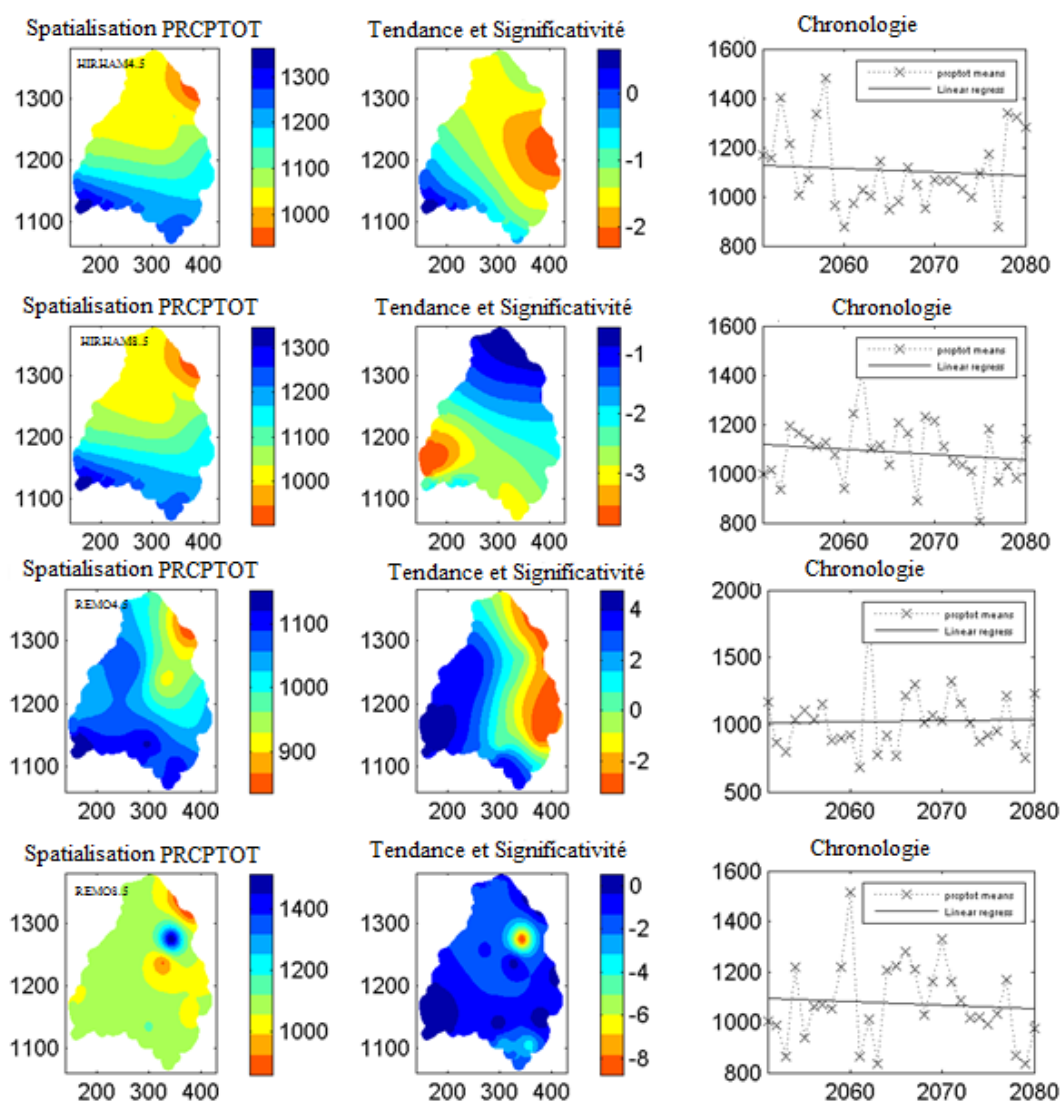


Figure 35 : Spatialisations, tendances et significativités futures (2051-2080) de l'indice PRCPTOT.

7.1.2.2.2. Indices de fréquence (R1mm et CDD)

Pour le futur lointain, le R1mm présente avec les deux scénarii du modèle HIRHAM, des valeurs élevées au sud-est et des valeurs faibles au nord-ouest. Par contre avec les deux scénarii du modèle REMO, les valeurs faibles sont observées au centre et à l'ouest du bassin (Figure 36). On remarque pour le futur lointain avec le RCP4.5 du HIRHAM, que l'indice montrera une moyenne de $133,67 \pm 5,86$ jours et oscillera entre 124 et 141 jours. Pour ce scénario, le R1mm présentera une tendance non significative à la hausse de 0,07 jours/an. Par contre, avec le RCP8.5 du HIRHAM, le R1mm variera entre 123 et 140 jours (Figure 36). Pour ce scénario, la moyenne de R1mm est de $133,4 \pm 5,9$ jours avec une tendance non significative à la baisse de 0,005 jours/an (Figure 36). Pour le modèle REMO, avec RCP4.5 on notera une moyenne de $111,88 \pm 4,78$ jours pour le R1mm. Pour ce scénario, le R1mm variera entre 106 et 121 jours

avec une tendance chronologique non significative à la hausse de 0,11 jours/an (Figure 36). Pour le RCP8.5, le R1mm variera entre 107 et 120 jours. Pour ce scénario, la moyenne de R1mm sera de $112,96 \pm 4,01$ jours. L'indice présentera une tendance non significative à la baisse de 0,25 jours/an (Figure 36). Par le passé, cet indice montrait une moyenne de $35,3 \pm 3,6$ jours et il a varié entre 28 et 41 jours.

La spatialisation des valeurs moyennes de l'indice CDD pour le futur lointain montre un gradient latitudinal qui augmente du sud vers le nord du bassin avec les deux scénarii du modèle HIRHAM et le RCP4.5 du modèle REMO (annexe 4). Pour le RCP8.5 du modèle REMO, les valeurs faibles sont localisées au nord-est (annexe 4). L'indice montrera une moyenne de $12,8 \pm 0,8$ jours et oscillera entre 11 et 15 jours avec le RCP4.5 du HIRHAM. Pour ce scénario, le CDD présentera une tendance non significative à la hausse de 0,01 jours/an. Par contre, avec le RCP8.5 du HIRHAM, le CDD variera entre 12 et 14 jours (annexe 4). Pour ce scénario, la moyenne de CDD est de $12,9 \pm 0,6$ jours avec une tendance non significative à la hausse de 0,016 jours/an (annexe 4). Le modèle REMO présente à travers son RCP4.5 une moyenne de $150,75 \pm 3,1$ jours pour le CDD. Pour ce scénario, le CDD variera entre 143 et 154 jours avec une tendance chronologique non significative à la hausse de 0,12 jours/an (annexe 4). Pour le RCP8.5 du même modèle, le CDD variera entre 105 et 155 jours. Pour ce scénario, la moyenne de CDD sera de $149,11 \pm 12,59$ jours. L'indice montrera une tendance à la hausse non significative de 0,61 jours/an. Au cours de la période de référence, le CDD a varié entre 103,1 et 177,3 jours avec une moyenne de $141,26 \pm 23,4$ jours.

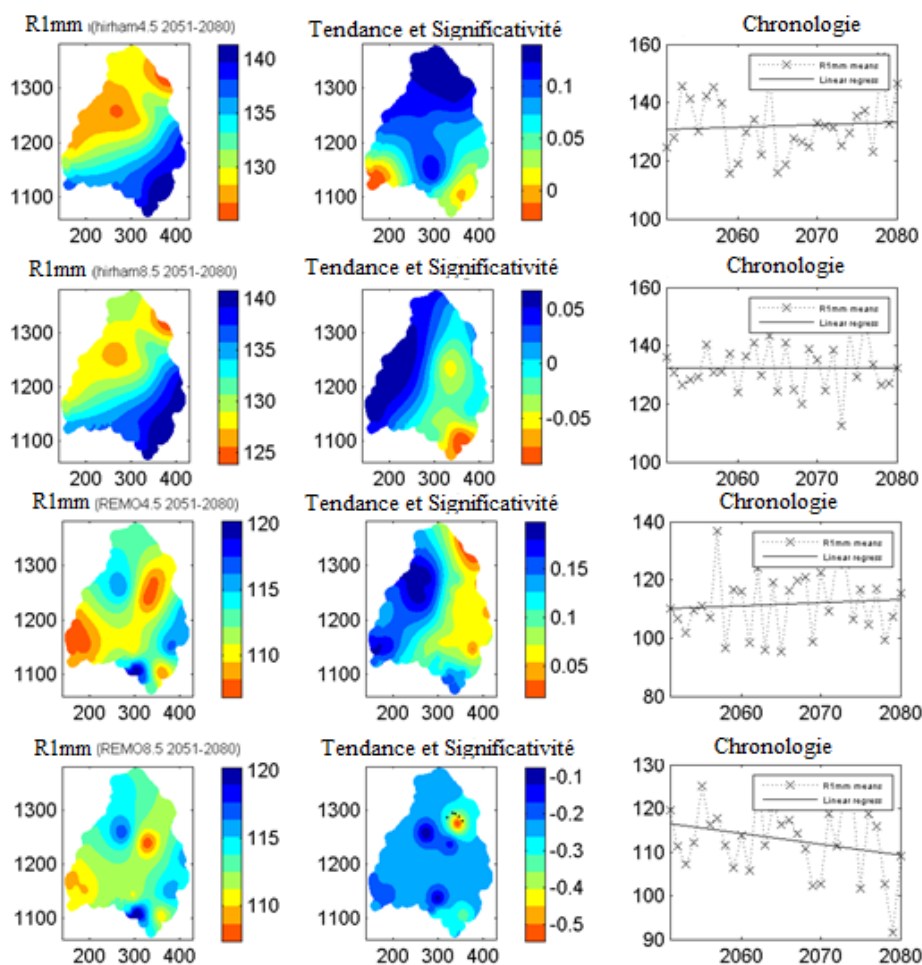


Figure 36 : Spatialisations, tendances et significativités futures (2051-2080) de l'indice R1mm.

7.1.3. Quantification des changements et leur significativité pour les indices de pluie

Beaucoup de changements sont notés pour les indices de précipitation au cours des périodes futures par rapport à la période de référence choisie de la période historique. Ces variations au niveau des indices de précipitation sont dues au fait que beaucoup de modèles de prévision climatiques ont de difficultés pour simuler les périodes humides. Ceci a été remarqué par Camara *et al.* (2013) pour la côte guinéenne et le Sahel. Par exemple Brown et Crawford (2008), affirment qu'il y a peu de consensus entre les modèles climatiques régionaux sur ce qu'il adviendra des précipitations en Afrique de l'Ouest. Mais il y a un large consensus voulant que la température de cette région augmente (Brown et Crawford, 2008).

La figure 37 nous renseigne sur les taux de changement moyen qu'on pourrait observer sur les indices d'intensité de précipitation au cours de la période future, ainsi que les significativités (en pointillé noire) de ces changements. De cette figure, il résulte que les PRCPTOT vont accroître au cours de 2021-2050. Cet accroissement sera significatif pour le RCP8.5 du modèle REMO sur tout le bassin avec un taux moyen de 0,11. Pour les trois autres scénarii (RCP4.5 et

RCP8.5 de HIRHAM et RCP4.5 de REMO), les significativités sont notées par endroit au sud du bassin (Figure 37). On enregistre des taux moyens de -0,004, 0,036 et -0,0003 respectivement avec RCP4.5 et RCP8.5 de HIRHAM et RCP4.5 de REMO. La tendance à la hausse des PRCPTOT observée pour la période historique va donc se poursuivre jusqu'en 2050 selon RCP8.5 des deux modèles. La même spatialisation est constatée pour la période 2051-2080 (annexe 5). Mais cette fois, les taux de changement sont de 0,09 (RCP4.5 de HIRHAM), 0,07 (RCP8.5 de HIRHAM), -0,02 (RCP4.5 de REMO) et 0,01 (RCP8.5 de REMO) (annexe 5). Les pluies intenses (R95p) augmenteront pour l'ensemble des scénarii de tous les modèles et pour toutes les périodes futures (Figure 37). Mais ces changements sont statistiquement significatifs au nord du bassin au cours du futur proche pour les RCP4.5 et RCP8.5 du modèle HIRHAM avec des taux moyens respectifs de 0,25 et 0,34. Dans un futur lointain, ces taux moyens augmenteront non significativement respectivement de 0,33 et 0,26. La significativité est notée sur tout le bassin pour le RCP8.5 de REMO (Figure 37 et annexe 5) au cours des deux périodes futures. On enregistrera des taux moyens de 0,72 et 0,55 respectivement au cours du futur proche et lointain. Avec le RCP4.5 de REMO, des taux de changement à la hausse non significatifs de 0,48 et 0,44 sont détectés respectivement pour le futur proche et lointain.

Le RCP4.5 du modèle HIRHAM prévoit des baisses significatives de l'indice RX1day au nord du bassin et des augmentations non significatives au sud. Les mêmes résultats sont obtenus avec le RCP8.5 de HIRHAM à la différence qu'il n'y a pas de significativité pour le futur lointain (Figure 37). On enregistre des taux moyens de -0,16 (RCP4.5) et -0,11 (RCP8.5) pour le futur proche et -0,14 (RCP4.5) et -0,08 (RCP8.5) pour le futur lointain. Le scénario RCP8.5 du modèle REMO prédit des augmentations significatives de l'indice RX1day pour le futur proche et lointain avec des taux moyens respectifs de 0,62 et 0,42 (Figure 37 et annexe 5). Avec le RCP4.5 de REMO, le RX1day présente au cours du proche futur des augmentations significatives avec un taux moyen de 0,47. Par contre, au cours du futur lointain, le RX1day présente des augmentations non significatives avec une moyenne de 0,37 (Figure 37 et annexe 5). Les deux scénarii de HIRHAM prévoient des baisses statistiquement significatives pour le RX5day pour toutes les périodes futures par rapport à la période de référence. On note des taux moyens de -0,27 (RCP4.5) et -0,22 (RCP8.5) au cours du proche futur et de -0,20 (RCP4.5) et -0,22 (RCP8.5) pour le futur lointain. Par contre, le scénario RCP8.5 du modèle REMO prévoit pour cet indice une augmentation significative par rapport à la période de référence sur tout le bassin (Figure 37 et annexe 5). Avec ce scénario, on note un taux moyen de 0,43 pour le futur proche et un taux de 0,27 pour le futur lointain. Pour le RCP4.5 du REMO, au cours du proche

futur, on assistera à une augmentation de RX5day par rapport à la période de référence qui sera significative au nord et au sud-est du bassin d'étude (Figure 37). Alors qu'au cours du futur lointain, ce scénario prévoit une augmentation non significative pour cet indice par rapport à la période de référence (annexe 5). On enregistre respectivement pour le proche futur et le futur lointain des taux moyens de 0,31 et 0,2.

Pour ce qui est des indices de fréquence, avec les scénarii du modèle HIRHAM, les séquences sèches (CDD) sont prévues à la baisse statistiquement significative et celle-ci pour toutes les périodes futures (Figure 38). On note des taux respectifs de -0,90 et -0,91 pour le RCP4.5 et RCP8.5 au cours du proche futur alors qu'au cours du futur lointain ces taux sont respectivement de -0,9 et -0,9. Pour le modèle REMO, les RCP4.5 et RCP8.5 prévoient cet indice à la hausse. Cette augmentation est non significative pour le RCP4.5 et significative pour le RCP8.5 (Figure 38 et annexe 5). Au cours du proche futur, les taux d'augmentation sont respectivement de 0,12 et 0,1 pour le RCP4.5 et le RCP8.5. Par contre au cours du futur lointain, on note respectivement pour ces scénarii des taux de 0,09 et 0,08. Pour tous les modèles et pour tous les scénarii, l'indice R1mm est prévu à la hausse statistiquement significative pour toutes les périodes futures par rapport à la période de référence (Figure 38 et annexe 5). Au cours du futur proche, on note des taux de 2,71, 2,73, 2,27 et 2,33 respectivement pour les RCP4.5-HIRHAM, RCP8.5-HIRHAM, RCP4.5-REMO, RCP8.5-REMO contre des taux respectifs de 2,82, 2,81, 2,2 et 2,23.

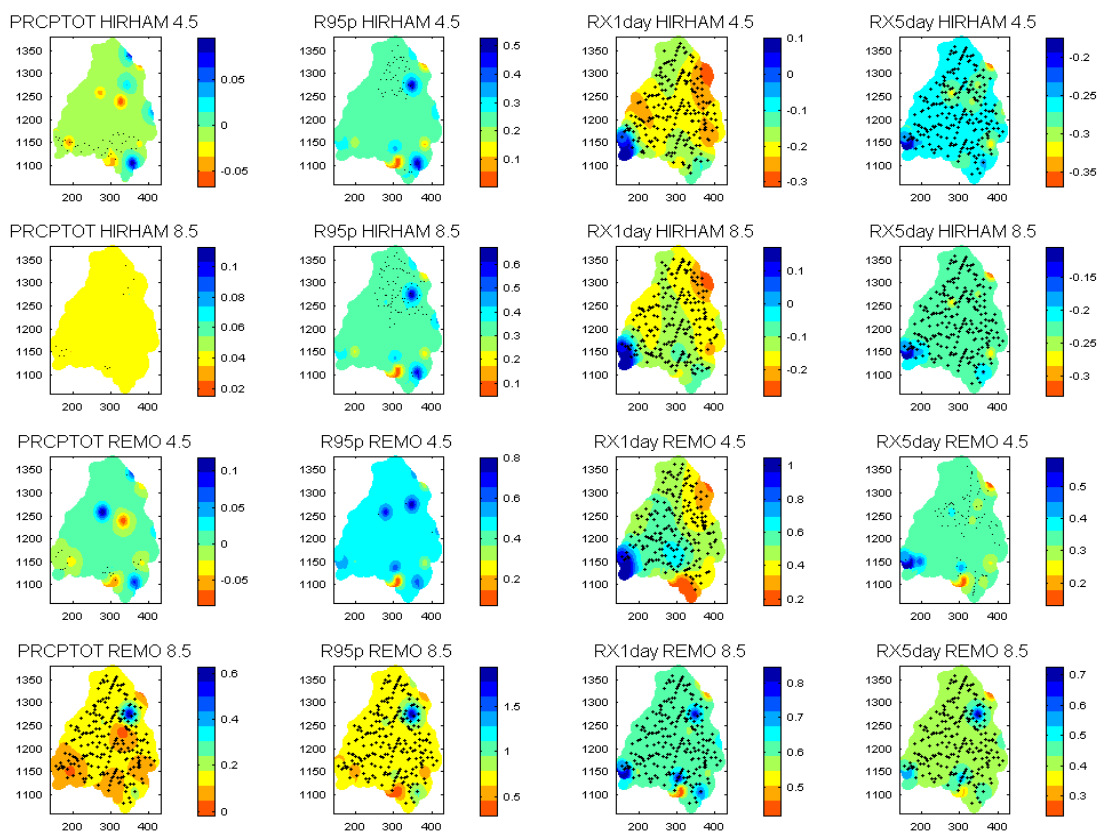


Figure 37 : Changements et leur significativité pour les indices d'intensité (2021-2050).

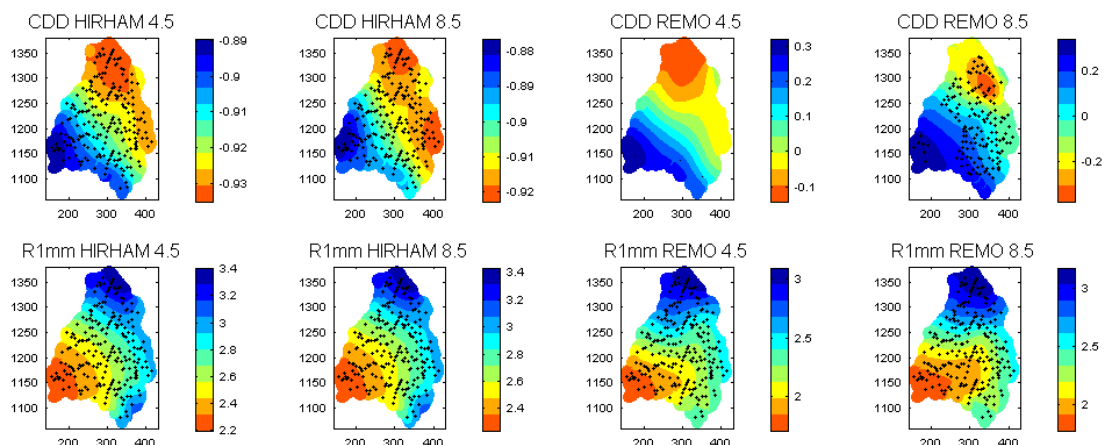


Figure 38 : Changements et leur significativité pour les indices de fréquence (2021-2050).

7.1.4. Synthèses sur les indices de précipitation

En considérant les deux scénarii (RCP4.5 et RCP8.5) des deux modèles (HIRHAM et REMO), les précipitations totales (PRCPTOT) augmentent d'environ 1mm/décennie au cours des deux périodes d'étude (2021-2050 et 2051-2080) par rapport la période de référence. Ces résultats confirment ceux de Obada (2017) pour le bassin de Mékrou qui est un sous-bassin du bassin béninois du fleuve Niger. Les mêmes résultats sont obtenus par Badou (2016) avec le modèle climatique HIRHAM pour tout le bassin béninois du fleuve Niger.

Les moyennes des jours humides (R1mm) augmentent en moyenne d'environ 3 jours/décennie pour l'ensemble des scénarii des deux modèles pour le moyen et le long terme. Ces résultats confirment ceux obtenus pour l'Afrique de l'Ouest et le Sénégal (Sarr et Camara, 2017).

Pour le modèle HIRHAM, le CDD est prévu à une augmentation chronologique sur le bassin d'étude pour toutes les périodes de projection. Quel que soit le scénario, le modèle climatique REMO prévoit des tendances à la hausse d'environ 0,7 jours/décennie pour le nombre maximal de jours consécutifs secs (CDD) pour les deux périodes de projection considérées dans le bassin béninois du fleuve Niger. Des résultats similaires ont été obtenus pour le Sahel de l'ouest par Sarr et Camara (2017) et Ly *et al.* (2013).

Au cours des deux périodes de projection, les deux scénarii du modèle REMO et le scénario RCP4.5 du modèle HIRHAM prédisent des tendances à la hausse des précipitations maximales journalières (RX1day) et des précipitations maximales sur 5 jours consécutifs (RX5day). Il faut donc s'attendre aux risques d'inondation. Cette remarque est appuyée par l'augmentation des tendances des pluies intenses (R95p) quel que soit le scénario et le modèle. Ces résultats sont en accord avec ceux de Obada (2017) pour le bassin de Mékrou, de Sarr et Camara (2016) pour le Sénégal, de Diallo *et al.* (2016) et de Sylla *et al.* (2012) pour l'Ouest du Sahel.

7.2. Analyse des extrêmes de sécheresses (indices SPI) sur le bassin béninois du fleuve Niger

Cette section du travail s'est penchée sur l'analyse de l'Indice Standardisé des Précipitations (SPI) à l'échelle 12 mois et 36 mois pour caractériser la sécheresse météorologique sur le bassin béninois du fleuve Niger.

7.2.1. Analyse historique des indices SPI

La figure 39 présente l'occurrence moyenne des différents types de sécheresse dans le bassin béninois du fleuve Niger au cours de la période 1976-2019. A l'échelle 12 mois, l'indice SPI sur le bassin béninois du fleuve Niger est caractérisé par 91% des conditions de sécheresse proche de la normale, 7% de sécheresse modérée, 1% de sécheresse sévère et 1% de sécheresse extrême (Figure 39). Par contre, à l'échelle 36 mois, on note 92%, 6%, 1% et 1% respectivement pour les sécheresses proches de la normale, modérées, sévères et extrêmes (Figure 39). L'étendue de la sécheresse est en moyenne de 17 mois pour le SPI-12 mois et 32 mois pour le SPI-36 mois dans le bassin d'étude (Figure 40). On note une décroissance des durées du SPI-12 mois avec l'augmentation de la latitude alors que le contraire est observé avec le SPI-36 mois (Figure 40). Tandis que l'intensité moyenne du SPI-12 mois est de -1,52 celle du SPI-36 mois est de -1,12 (Figure 40). Les deux fenêtres du SPI présentent des intensités qui décroissent

avec l'augmentation de la latitude (Figure 40). Par ailleurs, les SPI-12 et 36 mois sur le bassin présentent des tendances à la hausse chronologique très faibles (Figure 41 et annexe 9).

A l'échelle 12 mois du SPI, des sécheresses sévères et extrêmes se sont plus manifestées au centre du bassin que sur les autres parties (Figure 42). Par contre, le sud a plus connu de sécheresses modérées et l'est du bassin les sécheresses proches de la normale (Figure 42). A l'échelle 36 mois du SPI, le même constat qu'au niveau du SPI-12 mois est fait pour les sécheresses extrêmes, sévères et proches de la normale (annexe 9). La sécheresse modérée présente ses valeurs élevées à l'ouest du bassin avec le SPI-36 mois (annexe 9).

Les risques de sécheresse basés sur les fréquences d'occurrence et les rangs des évènements de sécheresse et pour les fenêtres du SPI 12 et 36 mois sont illustrés sur la figure 43. A l'échelle 12 mois du SPI, le risque de sécheresse augmente avec l'augmentation de la latitude. Par contre à 36 mois du SPI le risque de sécheresse est plus élevé au sud-ouest et faible au sud-est (Figure 43).

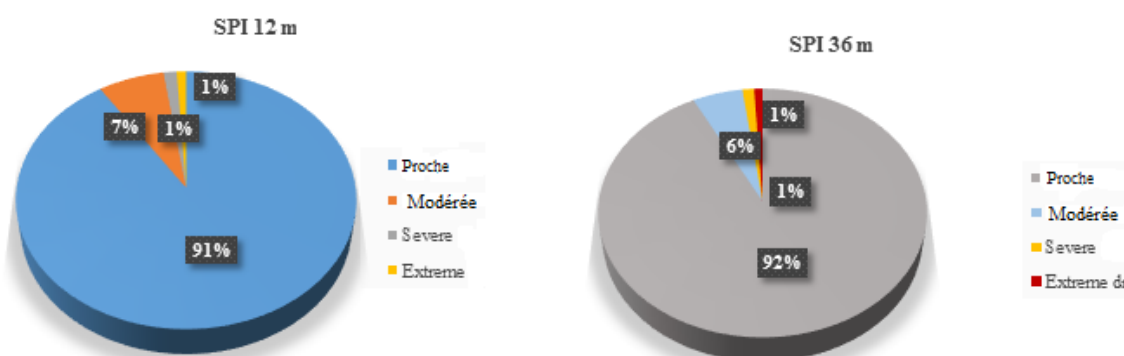


Figure 39 : Occurrence moyenne des types de sécheresse.

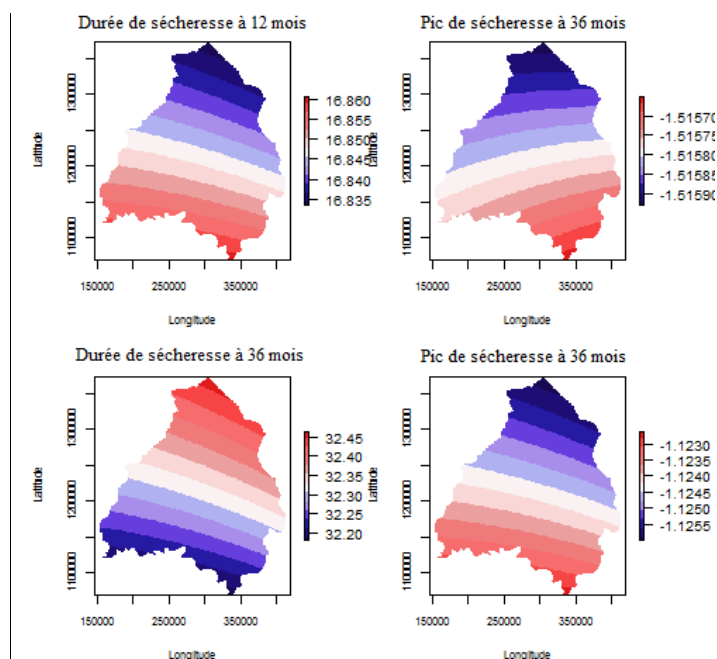


Figure 40 : Spatialisation des durées et intensité de sécheresse.

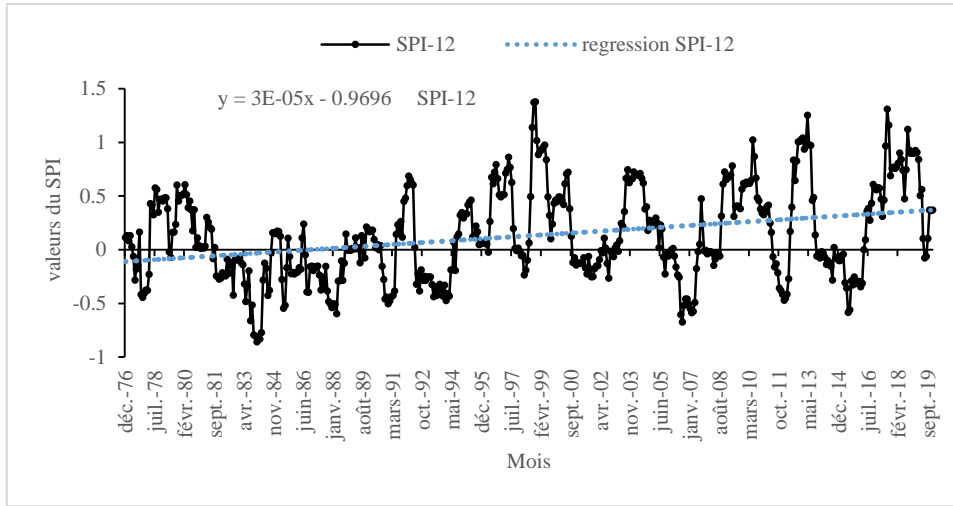


Figure 41 : Evolution chronologique du SPI-12 mois.

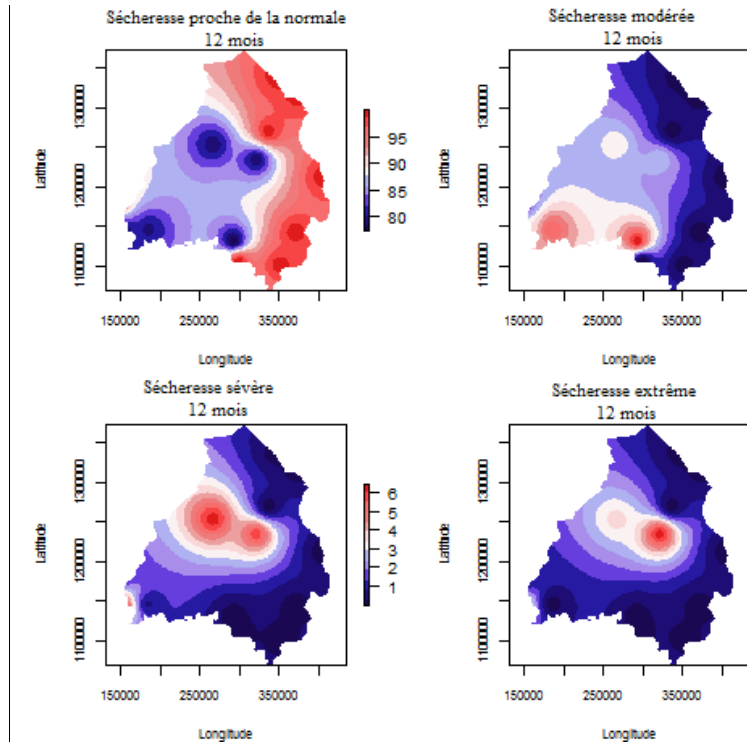


Figure 42 : Spatialisation de l'occurrence des types de sécheresse.

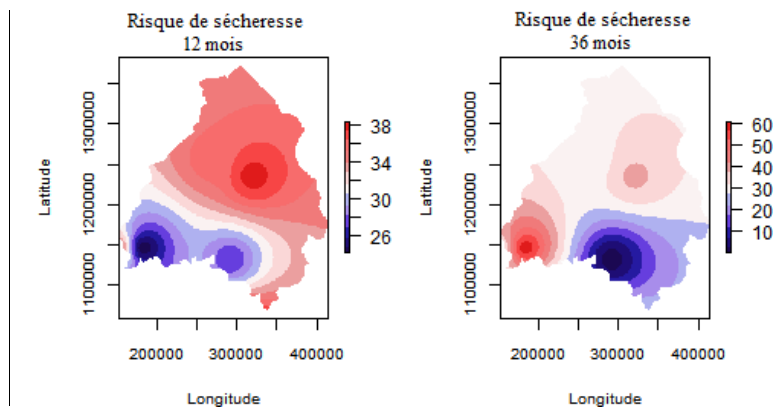


Figure 43 : Spatialisation des risques de sécheresse.

7.2.2. Analyse future des indices SPI

7.2.2.1. Analyse des indices SPI au cours du proche futur (2021-2050)

Les occurrences moyennes des différents types de sécheresse pour chaque fenêtre du SPI et pour chaque scénario de chaque modèle pour le futur proche (2021-2050) sur le bassin béninois du fleuve Niger sont présentées à la figure 44. A l'échelle 12 mois, l'indice SPI est caractérisé par 78 à 80% des conditions de sécheresse proche de la normale pour l'ensemble des deux modèles (Figure 44) ; les sécheresses modérées varient entre 10 et 18% ; les sécheresses sévères varient entre 5 et 10% et les sécheresses extrêmes varient entre 2 et 5% (Figure 44). Il faut noter qu'avec les scénarii du modèles HIRHAM les sécheresses modérées sont plus prononcées qu'au niveau des scénarii du modèle REMO alors qu'au niveau des sécheresses proches de la normale c'est le contraire qui est observé (Figure 44). Par contre, à l'échelle 36 mois du SPI, on note des variations entre 78 et 82%, entre 20 et 17%, entre 5 et 10% et entre 1 et 4% respectivement pour les sécheresses proches de la normale, modérées, sévères et extrêmes (Figure 44).

Les étendues et les intensités des sécheresses sont présentées sur la figure 45. En moyenne, les durées de sécheresses à l'échelle 12 mois du SPI dans l'avenir proche (2021-2050) vont décroître du sud du bassin vers le nord pour les deux scénarii du modèle HIRHAM (Figure 45). Par contre, le RCP4.5 du modèle REMO, présente les faibles valeurs des durées de sécheresse à l'ouest et au sud du bassin (Figure 45). Le RCP8.5 du même modèle, présentera les faibles valeurs de durée de sécheresse au centre du bassin (Figure 45). Le RCP4.5 du modèle HIRHAM présente la même variation pour les durées de sécheresse et les intensités. Pour le RCP8.5 du même modèle, les faibles valeurs d'intensité seront localisées à l'est du bassin (Figure 45). Au moment où le RCP4.5 du modèle REMO présente les faibles valeurs de pic de sécheresse au centre du bassin, le RCP8.5 de ce modèle y présente les valeurs fortes de pic (Figure 45). A l'échelle 36 mois du SPI, les scénarii présentent les mêmes variations pour les pics et les durées de sécheresse (annexe 9). Pour le SPI-12 mois, on note des durées moyennes de 15, 16, 19 et 18 mois avec des intensités de 1,6, 1,65, 1,7 et 1,75 respectivement pour RCP 4.5 et RCP8.5 de HIRHAM et RCP 4.5 et RCP8.5 de REMO (Figure 45). Tandis que pour le SPI-36 mois ces durées sont de 26, 45, 30 et 45 avec des intensités de 1,9, 1,75, 1,7 et 1,8. Par le passé, l'étendue de la sécheresse est en moyenne de 17 mois pour le SPI-12 mois et 32 mois pour le SPI-36 mois sur le bassin d'étude au cours de la période de référence. Tandis que l'intensité moyenne du SPI-12 mois est de -1,52 et celle du SPI-36 mois est de -1,12.

Sur le bassin béninois du fleuve Niger, les deux modèles climatiques utilisés prévoient à travers les scénarii RCP4.5 et RCP8.5 des tendances très faibles chronologiquement à la hausse pour les SPI 12 et 36 mois (Figure 46). Cette augmentation était également très faible par le passé.

A l'échelle 12 mois du SPI, les sécheresses modérées et sévères vont plus se manifester au nord du bassin avec le RCP4.5 du modèle HIRHAM alors que les sécheresses proches de la normale et extrêmes se manifesteront plus au sud du bassin (Figure 47). Pour le RCP8.5 du même modèle, les sécheresses proches de la normale et modérées seront élevées au sud et les sécheresses sévères et extrêmes seront fortes au nord du bassin (Figure 47). Le modèle REMO présente à travers son RCP4.5 pour le futur proche, les sécheresses proches de la normale à l'est du bassin, les sécheresses modérées à l'ouest du bassin, les sécheresses sévères au sud et les sécheresses extrêmes au nord du bassin (Figure 47). Avec le RCP8.5 du même modèle, on remarque que les sécheresses proches de la normale occupent tout le bassin sauf une portion du sud, les sécheresses modérées ne se manifestent que sur une petite portion du sud, les sécheresses sévères se manifestent à l'ouest du bassin et les sécheresses extrêmes au centre et au sud du bassin (Figure 47). Par contre, à 36 mois du SPI, le RCP4.5 du modèle HIRHAM montre les sécheresses modérées et extrêmes à l'est du bassin et les sécheresses proches de la normale et sévères à l'ouest du bassin (annexe 9). Avec le RCP8.5 du même modèle, on constate les sécheresses proches de la normale et extrêmes au sud du bassin, les sécheresses modérées au centre et les sécheresses sévères au nord du bassin (annexe 9). Pour le modèle REMO, le RCP4.5 présente les sécheresses proches de la normale au nord et à l'est du bassin, les sécheresses modérées sont présentées sur tout le bassin sauf une petite portion de l'ouest. Les sécheresses sévères sont localisées à l'ouest et les extrêmes à l'est (annexe 9). Pour le RCP8.5 du modèle REMO, il est détecté sur tout le bassin des sécheresses proches de la normale et extrêmes sauf une portion du nord-ouest pour l'extrême sécheresse. Les sécheresses modérées sont faibles au nord et à l'est alors que les sécheresses sévères occupent ces parties du bassin (annexe 9).

Les risques de sécheresse sont faibles au nord du bassin à 12 mois du SPI alors qu'à 36 mois ils sont élevés dans cette partie du bassin avec le RCP4.5 du modèle HIRHAM. Pour le RCP8.5 du même modèle, on remarque l'effet contraire que celui observé avec le RCP4.5 (Figure 48). Avec le RCP4.5 de REMO et pour le SPI 12 mois, le risque est partout élevé sauf une petite portion du sud du bassin (Figure 48). Pour le SPI 36 mois, ce scénario présente le risque de sécheresse au nord et à l'est du bassin (Figure 46). Pour le RCP8.5 du même modèle, le risque de sécheresse est localisé au nord-est à 12 mois du SPI alors qu'à 36 mois seul le centre du bassin est épargné (Figure 48).

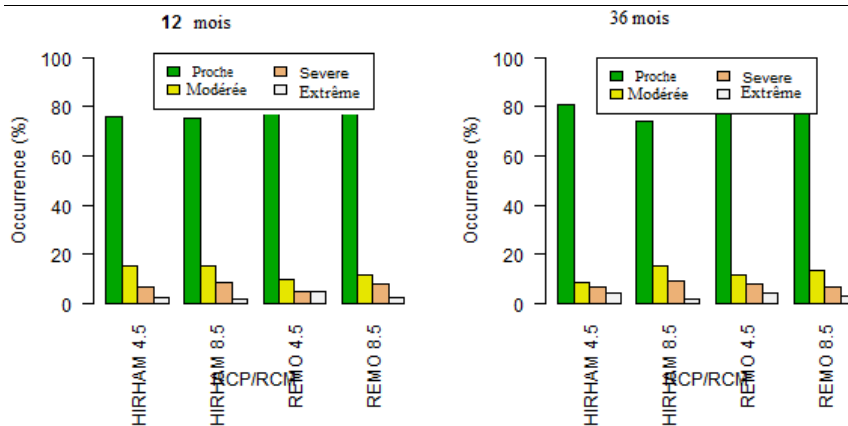


Figure 44 : Occurrence moyenne des sécheresses pour le futur proche.

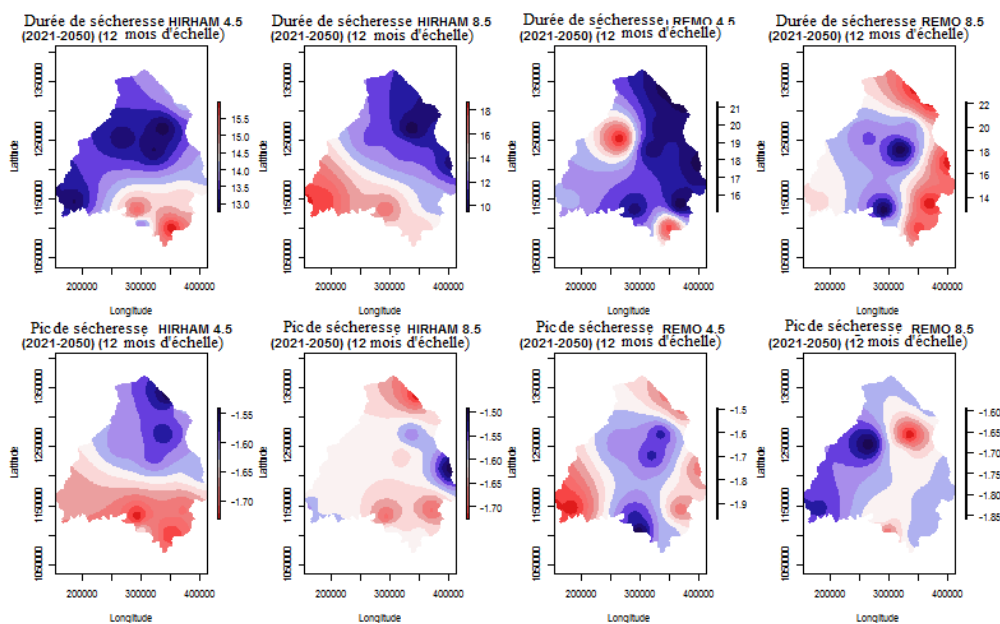


Figure 45 : Spatialisation des durées des sécheresses et pics pour le futur proche.

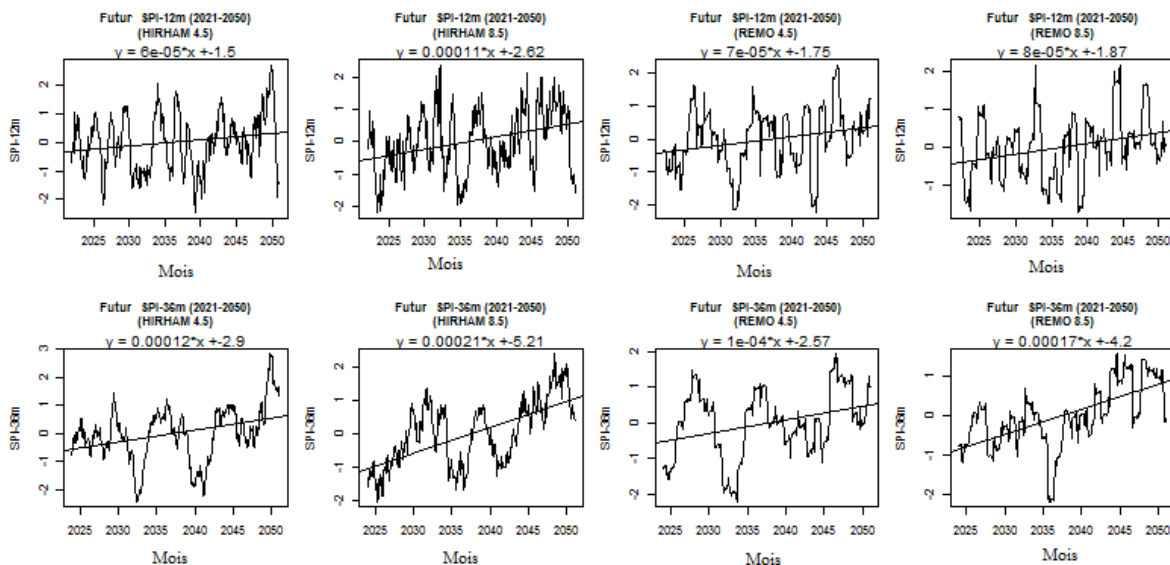


Figure 46 : Evolution chronologique des SPI pour le futur proche

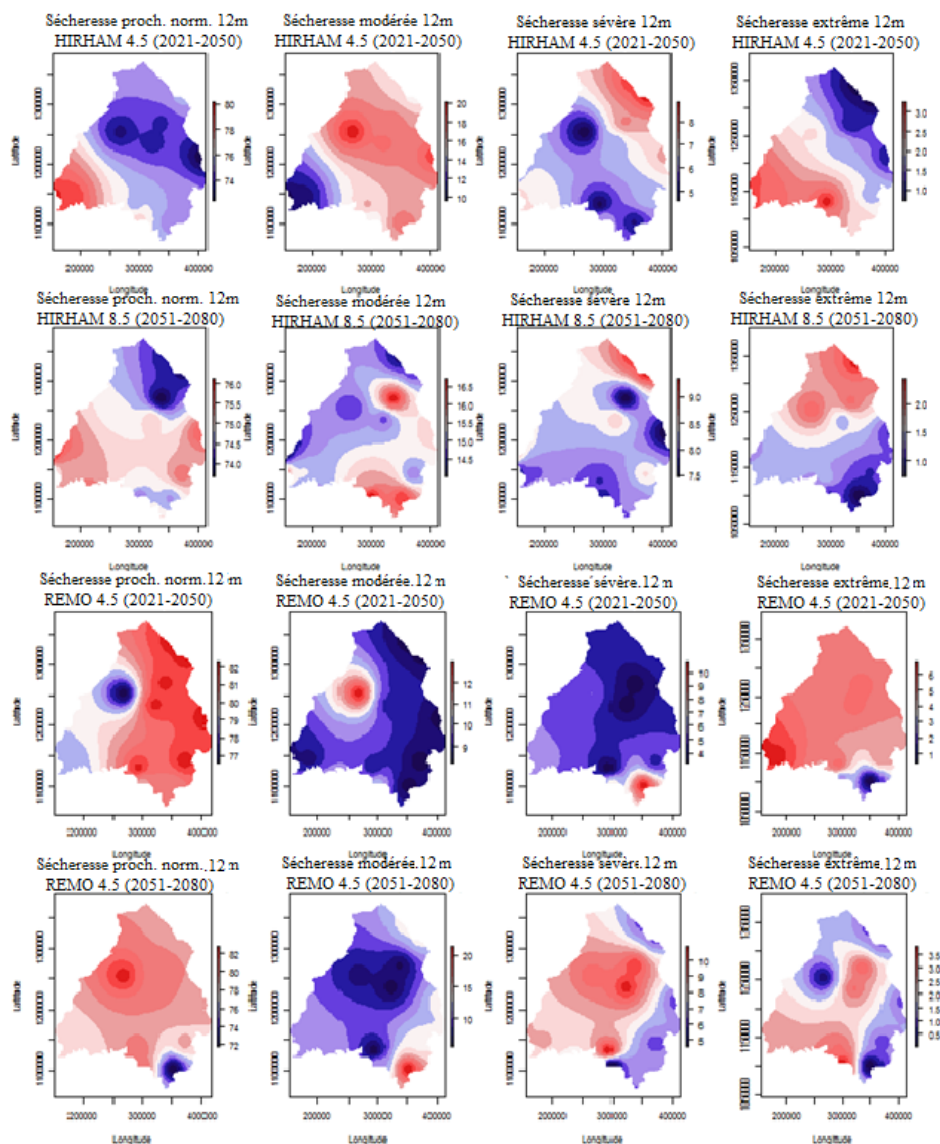


Figure 47 : Spatialisation des types de sécheresses pour le futur proche.

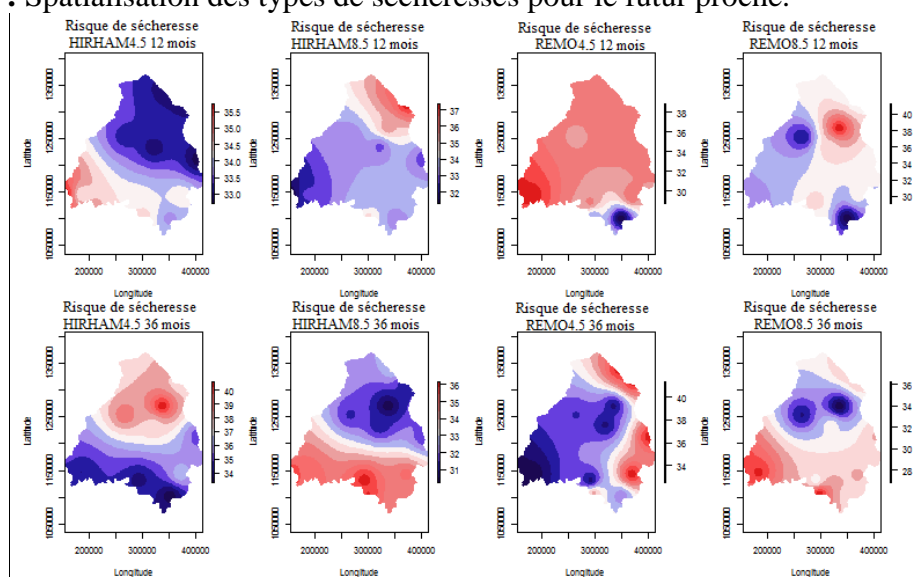


Figure 48 : Spatialisation des risques de sécheresse pour le futur proche.

7.2.2.2. Analyse des indices SPI au cours du futur lointain (2051-2080)

Les occurrences moyennes des différents types de sécheresse pour chaque fenêtre du SPI et pour chaque scénario de chaque modèle (2051-2080) sur le bassin béninois du fleuve Niger sont illustrées à la figure 49. A l'échelle 12 mois, l'indice SPI est caractérisé par 76 à 82% des conditions de sécheresse proche de la normale pour l'ensemble des deux modèles (Figure 49) ; les sécheresses modérées varient entre 9 et 16%, les sécheresses sévères pour cette fenêtre varient entre 4 et 6% et les sécheresses extrêmes varient entre 1 et 4% (Figure 49). Pour le futur lointain, les RCP4.5 et RCP8.5 de REMO et RCP4.5 de HIRHAM présentent des sécheresses plus élevées que le RCP8.5 de HIRHAM (Figure 49). Par contre au niveau des sécheresses extrêmes il est plus élevé que les autres (Figure 49). A l'échelle 36 mois du SPI, on note des variations entre 78 et 84%, entre 10 et 14%, entre 5 et 7% et entre 0,5 et 2% respectivement pour les sécheresses proches de la normale, modérées, sévères et extrêmes (Figure 49). A cette fenêtre du SPI, les sécheresses modérées sont prévues à la hausse par les RCP4.5 et RCP8.5 de REMO et le RCP8.5 de HIRHAM (Figure 49). Ces mêmes modèles prévoient une hausse des sécheresses extrêmes que le RCP4.5 de HIRHAM (Figure 49). Par le passé on a observé 91, 7, 1 et 1% respectivement des conditions de sécheresse proche de la normale, de sécheresse modérée, sévère et extrême avec le PSI-12 mois contre 92, 6, 1 et 1% avec le SPI-36 mois.

La figure 50 présente les étendues des sécheresses et leur intensité prévues par les MCR pour le SPI-12 mois. En moyenne, les durées de sécheresses à l'échelle 12 mois du SPI dans le futur lointain (2051-2080) seront faibles au nord-ouest et l'est du bassin selon respectivement les RCP4.5 et RCP8.5 du modèle HIRHAM (Figure 50). Pour le RCP4.5 du modèle REMO, les fortes valeurs des durées de sécheresse seront localisées à l'ouest et au centre pour le RCP8.5 (Figure 50). Le RCP4.5 du modèle HIRHAM présente ses fortes valeurs d'intensités au sud du bassin alors que le RCP8.5 du même modèle présente ses faibles valeurs d'intensité au sud du bassin (Figure 50). Le modèle REMO présente les mêmes variations des pics que pour les durées de sécheresses avec les RCP4.5 et RCP8.5 (Figure 50). A l'échelle 36 mois du SPI, les scénarii RCP4.5 et RCP8.5 de HIRHAM et RCP4.5 de REMO présentent les mêmes variations pour les pics et les durées de sécheresse (annexe 9). Par contre avec le RCP8.5 les pics sont faibles là où nous avons des durées de sécheresses élevées (annexe 9). Les RCP4.5 et RCP8.5 de HIRHAM et les RCP4.5 et RCP8.5 de REMO présentent respectivement pour le futur lointain des durées de 14,5, 13, 18 et 17 mois avec des pics respectifs de 1,68, 1,8, 1,55 et 1,5 pour le SPI-12 mois (Figure 50) contre 47, 18, 24 et 35 mois de durées de sécheresses avec des pics de 1,6, 1,8, 1,9 et 1,8 pour le SPI-36 mois (annexe 9). Pour la période de référence on notait des étendues moyennes de 17 mois pour le SPI-12 mois et 32 mois pour le SPI-36 mois sur le

bassin d'étude au cours de la période de référence. Tandis que l'intensité moyenne du SPI-12 mois est de -1,52 et celle du SPI-36 mois est de -1,12.

Sur le bassin béninois du fleuve Niger, les deux modèles climatiques utilisés prévoient à travers les scénarii RCP4.5 et RCP8.5 des tendances chronologiques très faibles à la baisse pour les SPI 12 et 36 mois (Figure 51). Une augmentation très faible était remarquée par le passé.

Pour ce qui est de la fréquence des événements, à l'échelle 12 mois du SPI avec le RCP4.5 de HIRHAM, les sécheresses proches de la normale sont faibles au centre du bassin alors que les modérées sont fortes au centre (Figure 52). Pour le même scénario du même modèle, les sécheresses sévères seront plus manifestées au sud du bassin et les sécheresses extrêmes au nord du bassin (Figure 52). Pour le RCP8.5 du modèle HIRHAM et à 12 mois du SPI, les sécheresses proches de la normale et les sécheresses modérées seront fortes au sud alors que les sécheresses sévères et extrêmes se manifesteront plus au nord du bassin (Figure 52). Pour la même fenêtre du SPI et pour le modèle REMO on remarque des sécheresses proches de la normale faibles à l'ouest et des sécheresses modérées faibles à l'est avec le RCP4.5 et le contraire avec le RCP8.5 (Figure 52). Les sécheresses sévères sont élevées à l'ouest et les sécheresses extrêmes seront fortes au sud du bassin avec les RCP4.5 et RCP8.5 (Figure 52).

Par contre, avec le SPI 36 mois, le RCP4.5 et le RCP8.5 du modèle HIRHAM montrent des sécheresses proches de la normale faibles au nord et des sécheresses modérées faibles respectivement à l'ouest et à l'est du bassin (annexe 9). Les sécheresses sévères et extrêmes sont respectivement faibles au nord et au sud du bassin (annexe 9). Avec le RCP4.5 du modèle REMO, on constate des sécheresses proches de la normale et sévères au nord et à l'est du bassin (annexe 9). Les sécheresses modérées sont observées au sud-ouest et les sécheresses extrêmes au sud et au centre du bassin (annexe 9). Pour le RCP8.5 du modèle REMO, les sécheresses proches de la normale et extrêmes sont localisées à l'ouest du bassin pour le futur lointain. Par contre les sécheresses modérées sont observées au nord et à l'est du bassin et les sécheresses sévères au sud du bassin (annexe 9).

Pour le futur lointain et à 12 mois du SPI, les risques de sécheresses sont forts sur tout le bassin, au nord, à l'est et à l'ouest du bassin selon respectivement les RCP4.5 et RCP8.5 de HIRHAM et les RCP4.5 et RCP8.5 de REMO (Figure 53). A 36 mois du SPI au cours de la même période, les risques de sécheresse sont élevés au nord du bassin avec les scénarii du modèle HIRHAM alors qu'avec le RCP4.5 de REMO ils sont élevés au sud et à l'ouest avec le RCP8.5 de REMO (Figure 53).

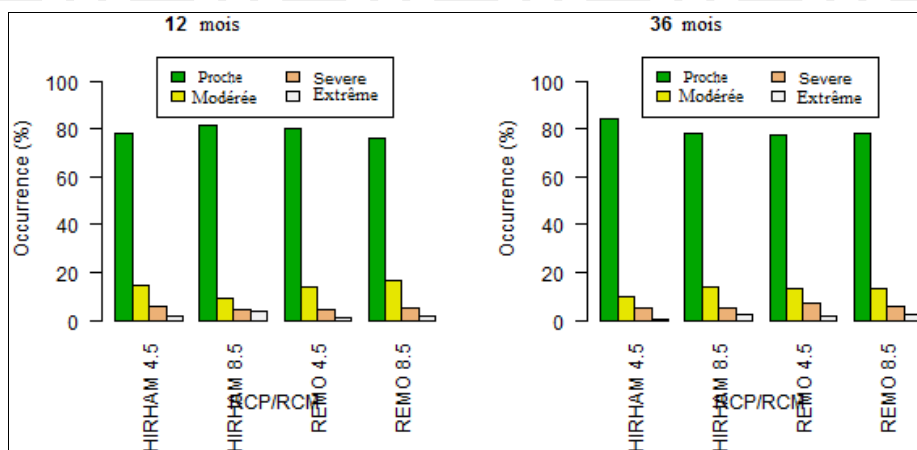


Figure 49 : Occurrence moyenne des sécheresses pour le futur lointain.

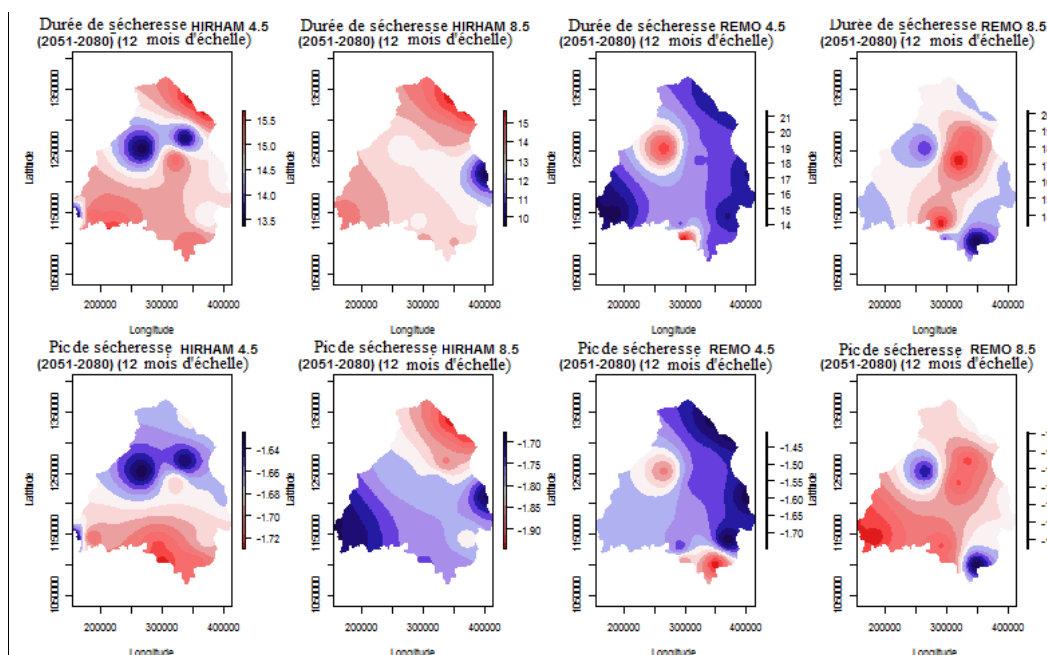


Figure 50 : Spatialisation des durées des sécheresses et pics pour le futur lointain.

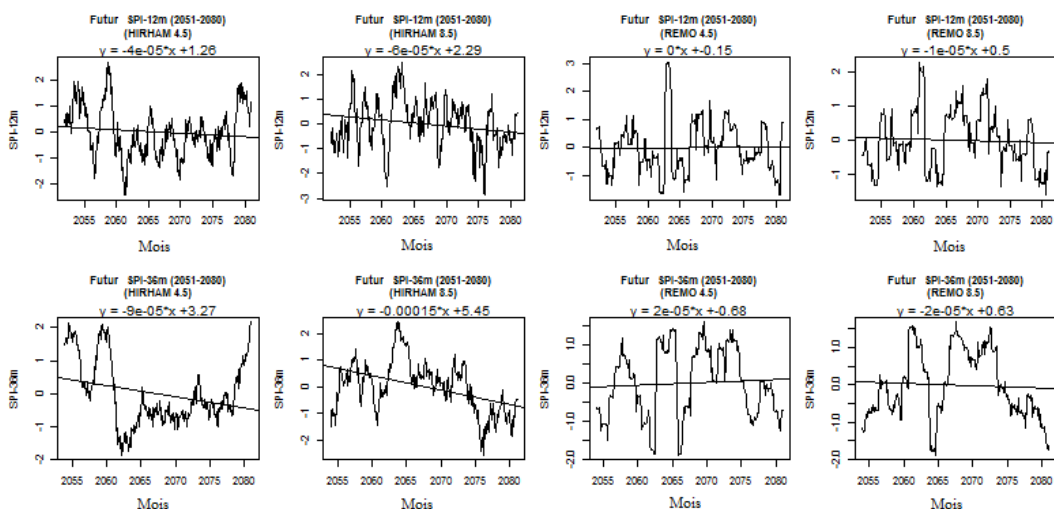


Figure 51 : Evolution chronologique des SPI pour le futur lointain.

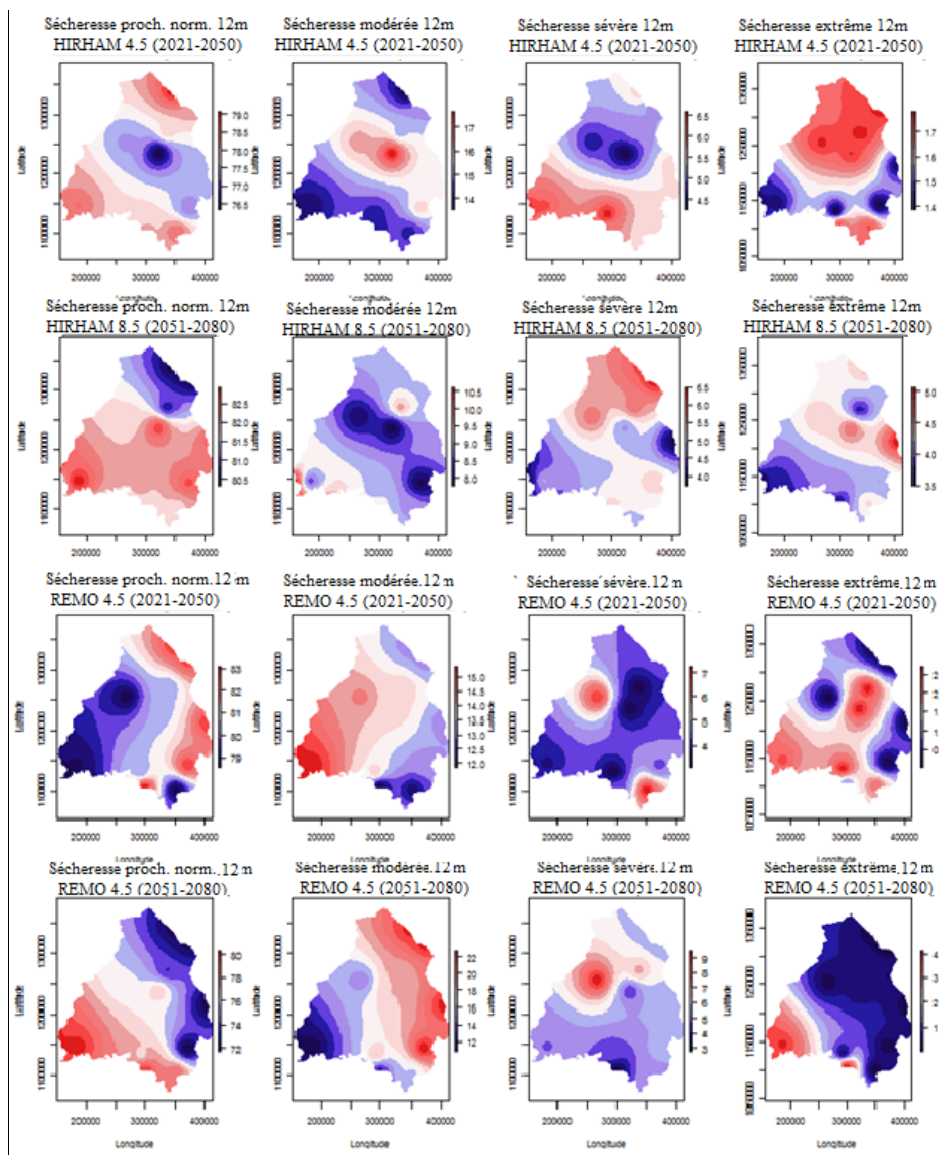


Figure 52 : Spatialisation des types de sécheresses pour le futur lointain.

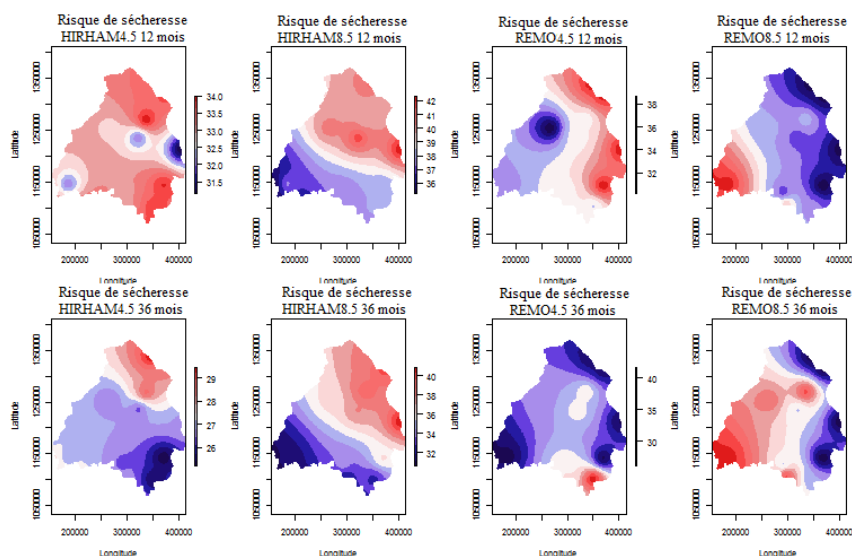


Figure 53 : Spatialisation des risques de sécheresse pour le futur lointain.

7.2.3. Quantification des changements et leur significativité pour les SPI

Au cours du futur proche, les RCP4.5 et RCP8.5 de HIRHAM et RCP8.5 de REMO présentent pour le SPI 12 mois respectivement des baisses moyennes de 4, 5 et 1,5% de sécheresses proches de la normale par rapport à la période de référence alors que pour le RCP4.5 de REMO ces sécheresses sont à la hausse de 0,5% (Figure 54). Les sécheresses modérées sont à la hausse moyenne de 3,1 et 3,2% respectivement avec les RCP4.5 et RCP8.5 de HIRHAM par rapport à la période de base alors qu'elles baissent respectivement de 2,4 et 0,2% avec les RCP4.5 et RCP8.5 de REMO (Figure 54). Les sécheresses sévères pour le SPI 12 mois au cours de 2021-2050 sont prévues à la hausse de 1,2, 2,7 et 2% respectivement par les RCP4.5 et RCP8.5 de HIRHAM et RCP8.5 de REMO par rapport à la période de référence. Pendant ce temps, le RCP4.5 de REMO prévoit les sécheresses sévères à la baisse de 0,5% par rapport à la période de base (Figure 54). Au cours de cette période, les sécheresses extrêmes baisseront respectivement de 0,4, 1 et 0,4% par rapport à la période de référence avec les RCP4.5 et RCP8.5 de HIRHAM et RCP8.5 de REMO et augmenteront de 2,5% avec le RCP4.5 de REMO (Figure 54).

Au cours du futur lointain le SPI-12 mois prévoit des baisses des sécheresses proches de la normale de 2,2 et 3,6% respectivement pour RCP4.5-HIRHAM et RCP8.5-REMO puis des hausses de 1,7 et 0,16% respectivement pour RCP4.5-REMO, RCP8.5-HIRHAM par rapport à la période de référence (Figure 54). Les sécheresses modérées seront à la hausse moyenne de 3,1, 2,2 et 4,6% respectivement avec les RCP4.5 et RCP8.5 de REMO et RCP4.5 de HIRHAM par rapport à la période de base alors qu'elles baissent de 2,6% avec le RCP8.5 de REMO (Figure 54). Les changements des sécheresses sévères pour le SPI 12 mois au cours de 2051-2080 seront presque nuls avec les RCP4.5-HIRHAM et RCP8.5-REMO alors qu'ils baisseront respectivement de 0,8, et 1% respectivement avec les RCP8.5 de HIRHAM et RCP4.5-REMO par rapport à la période de référence (Figure 54). Au cours de cette même période, les sécheresses extrêmes baisseront respectivement de 0,9, 1,3 et 0,9% par rapport à la période de référence avec les RCP4.5 de HIRHAM et RCP4.5 et RCP8.5 de REMO et augmenteront de 1,6% avec RCP8.5 de HIRHAM (Figure 54).

Dans un futur proche et pour le SPI-36 mois, les RCP4.5 et RCP8.5 de REMO et RCP8.5 de HIRHAM présenteront respectivement des baisses moyennes de 4,1, 1,4 et 1,3% de sécheresses proches de la normale par rapport à la période de référence alors que pour le RCP4.5 de HIRHAM ces sécheresses sont prévues à la hausse de 2,5% (Figure 54). Les sécheresses modérées baisseront respectivement de 3,4 et 0,7% avec les RCP4.5 des deux modèles par rapport à la période de base alors qu'elles augmenteront respectivement de 3,3 et 1,2% avec les

RCP8.5 des deux modèles (Figure 54). Les sécheresses sévères pour le SPI 36 mois au cours de 2051-2080 sont prévues à la hausse de 0,03, 2,02 et 0,7% respectivement par les RCP4.5 et RCP8.5 de HIRHAM et le RCP4.5 de REMO par rapport à la période de référence tandis que le RCP8.5 de REMO les prévoit à la baisse de 0,32% par rapport à la période de base (Figure 54). Au cours de cette période, les sécheresses extrêmes pour le SPI-36 mois seront à la hausse respectivement de 1,4, 1,4 et 0,4% par rapport à la période de référence avec les RCP4.5 de HIRHAM et les RCP4.5 et RCP8.5 de REMO et baisseront de 1,2% avec le RCP8.5 de HIRHAM (Figure 54).

Pour le futur lointain le SPI-36 mois présentera les baisses respectives de 2,2, 1,3 et 2,2% des sécheresses modérées, sévères et extrêmes avec le RCP4.5 de HIRHAM et une hausse de 5,7% des sécheresses proches de la normale avec le même modèle (Figure 54). Les sécheresses modérées augmenteront de 2, 1,2 et 1,3% alors que les sécheresses proches de la normale ainsi que les sécheresses extrêmes baisseront respectivement de 1,12, 0,82 et 0,21 et 0,43, 0,63 et 0,48% par rapport à la période de base respectivement avec le RCP8.5-HIRHAM, et les RCP4.5 et RCP8.5 de REMO (Figure 54). Les sécheresses sévères au cours de 2051-2080 du SPI-36 mois baisseront avec le RCP8.5 des deux modèles respectivement de 1,5 et 0,6% par rapport à la période de base et augmenteront de 0,22% avec le RCP4.5 de REMO (Figure 54). Les spatialisations des changements pour chaque fenêtre du SPI et pour chaque type de sécheresse sont illustrées à l'annexe 9.

Quel que soit la période et le scénario, on note à travers la figure 55 des variations qui tournent au tour de -0,2 et 0,2 par rapport à la période de référence. Au cours du futur proche et pour le SPI-12 mois, les risques de sécheresses baisseront de 1, 1,3 et 0,5 respectivement avec le RCP4.5 de HIRHAM et les RCP4.5 et RCP8.5 de REMO alors qu'ils augmentent de 1,5 avec le RCP8.5 de HIRHAM (Figure 55). Au cours de la même période et pour la même fenêtre du SPI, les durées de sécheresse augmentent de 0,4 et 1,7 mois respectivement avec les RCP4.5 et RCP8.5 de REMO et baissent respectivement de 2,3 et 2,5 mois avec les RCP4.5 et RCP8.5 de HIRHAM (Figure 55). A 36 mois du SPI les durées baisseront au cours de 2021-2050 de 16 et 11,1 mois respectivement avec le RCP4.5-HIRHAM et le RCP4.5-REMO alors qu'on observe des hausses de 5,6 et 0,5 mois avec le RCP8.5-HIRHAM et le RCP8.5-REMO (Figure 55). Pour cette même période et le même pas du SPI, les risques de sécheresses augmentent en moyenne de 1,96 pour l'ensemble des modèles (Figure 55).

Au cours du futur lointain, le SPI 12 mois présente les risques de sécheresse à la baisse de 1,7, 0,2 et 2,8 mois respectivement avec les RCP4.5-HIRHAM, RCP4.5 et RCP8.5 de REMO alors que le RCP8.5-HIRHAM prévoit leur hausse de 3 mois par rapport à la période de base (Figure

55). Pour cette même période, les durées de sécheresse du SPI-12 mois baissent de 1,1, 2,8 et 0,5 mois par rapport à la période de référence respectivement avec les RCP4.5 et RCP8.5 de HIRHAM et le RCP4.5 de REMO alors que le RCP8.5 de REMO les prévoit à la hausse de 0,7 mois (Figure 55). Pour le SPI-36 mois au cours de la même période de projection, les durées de sécheresse augmenteront de 4,5 mois avec le RCP4.5 de HIRHAM par rapport à la période de base alors qu'elles baissent respectivement de 25, 16 et 10 mois avec le RCP8.5 de HIRHAM et les RCP4.5 et RCP8.5 de REMO par rapport à la période de référence (Figure 55). Pour ce cas, on note la baisse des risques de sécheresse de 5,3, 1,8 et 1,7 respectivement avec RCP4.5 de HIRHAM et les RCP4.5 et RCP8.5 de REMO par rapport à la période de référence alors que le RCP8.5 de HIRHAM prévoit son augmentation de 1,9 par rapport à la période de référence (Figure 55). Les spatialisations des risques de sécheresse, des durées de sécheresse et des pics de sécheresse sont illustrées à l'annexe 9.

D'après la figure 56 on remarque qu'aucun des changements observés au niveau des indices SPI n'est significatifs selon le test de Student ($p\text{-Value} > 0,05$) appliqué à l'intervalle de confiance de 95%.

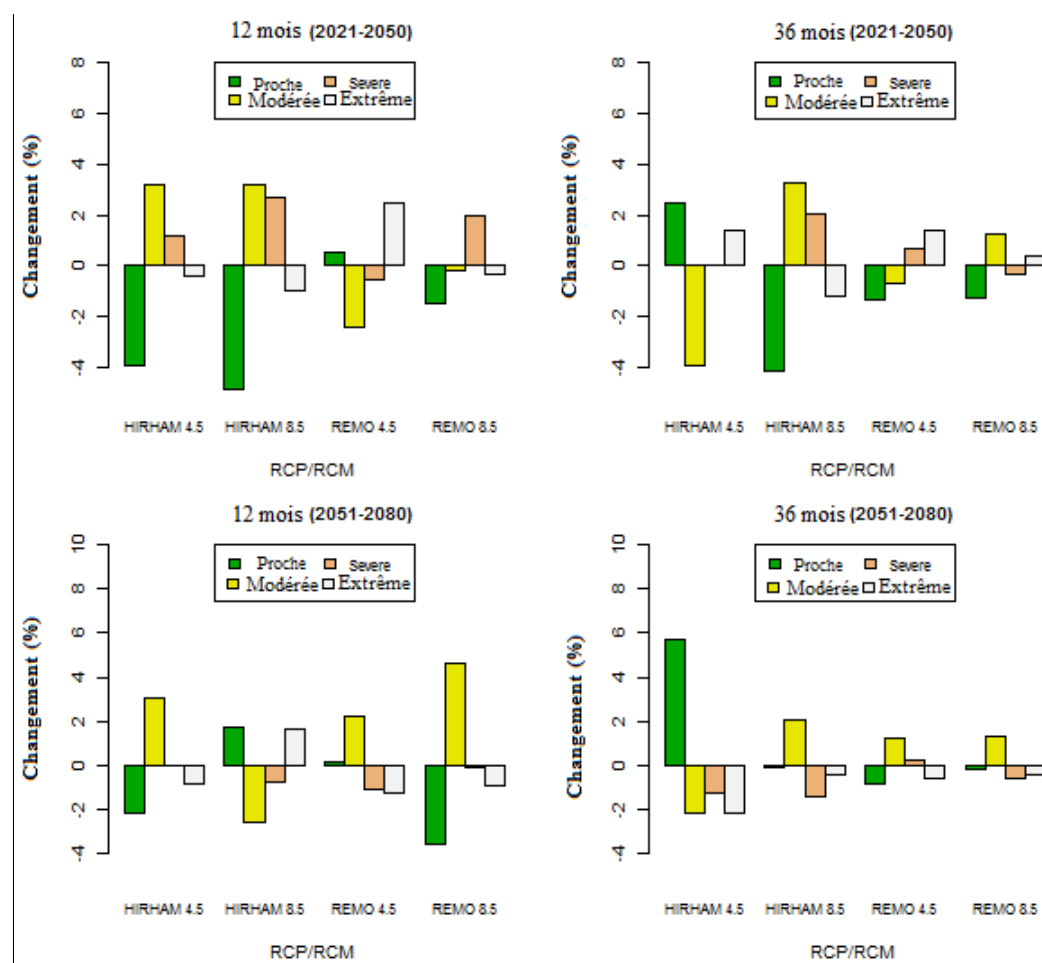


Figure 54 : Changement des types de sécheresse projetés par rapport à la période référence.

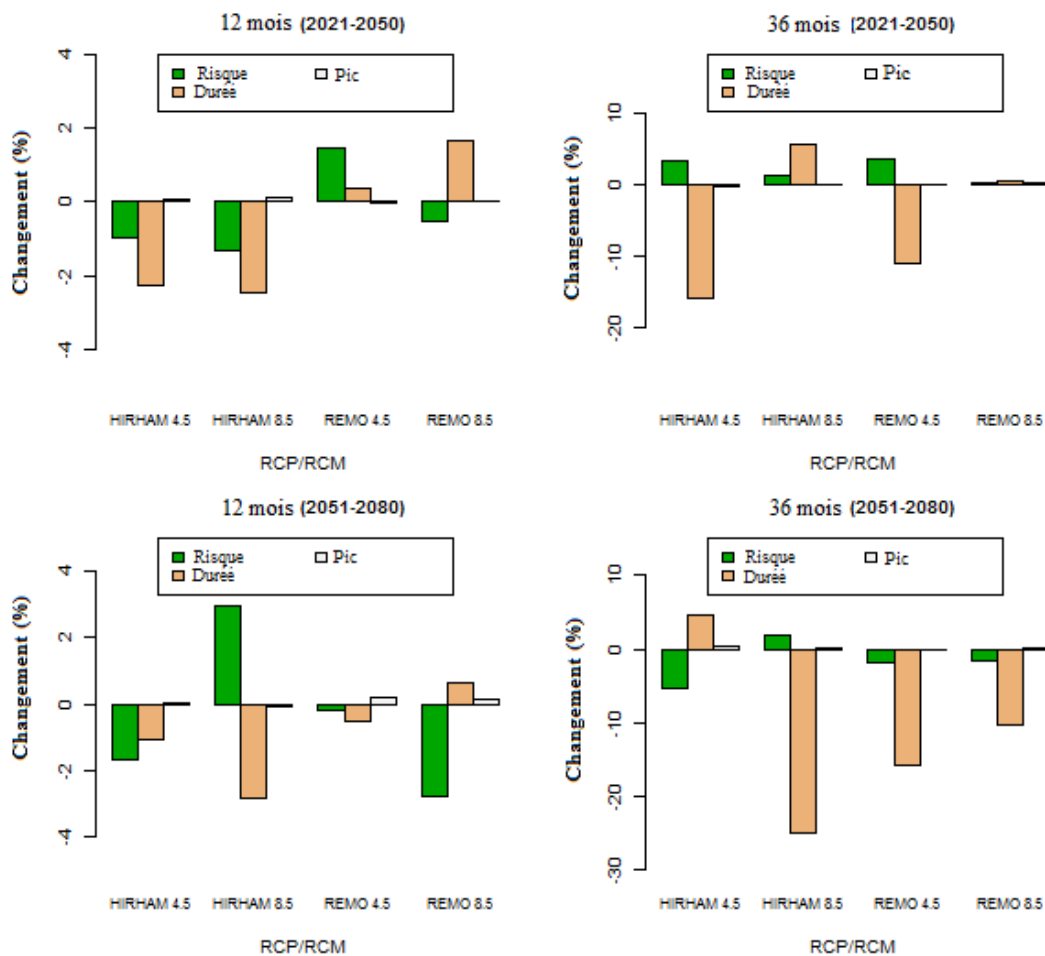


Figure 55 : Changement des risques, durées et pics de sécheresse projetés par rapport à la période de référence.

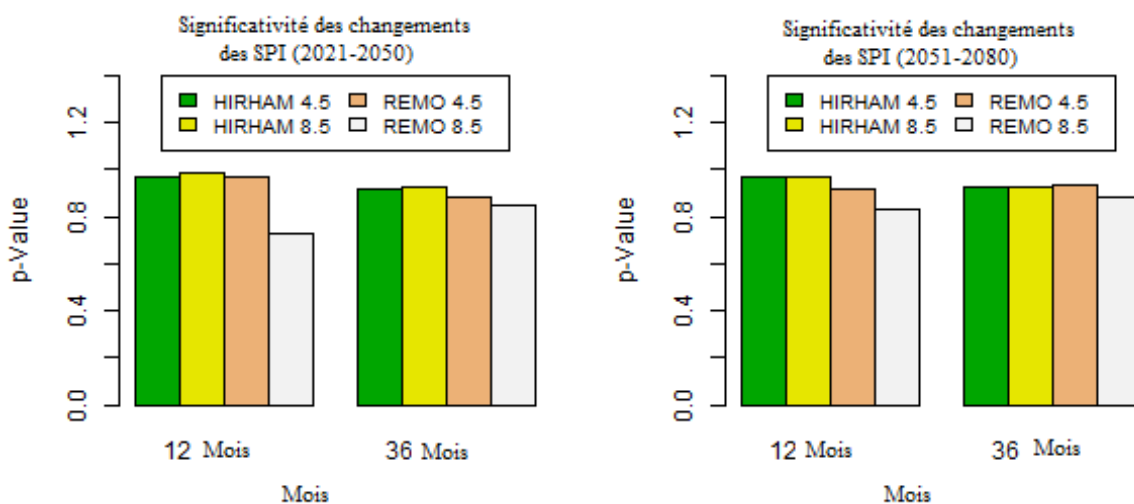


Figure 56 : Significativité des changements prévus par les scénarii.

7.2.4. Synthèse sur les SPI

En somme, il est prévu une augmentation chronologique non significative des SPI au cours de la période 2021-2050 comme au cours de la période de référence. Ce qui traduit que les conditions humides observées au cours de la période de référence vont se poursuivre pour les

30 prochaines années. Cette conclusion est également en accord avec celle obtenue au chapitre 5 avec les PRCPTOT. Ensuite, on observera une baisse chronologique significative des SPI au cours de la période 2051-2080. Pour le futur lointain, le bassin doit donc s'attendre aux baisses des précipitations par rapport à la période de base et la période 2021-2050.

Par ailleurs, dans le passé, les sécheresses observées sur le bassin sont à 80% des sécheresses proches des conditions normales. Pour les projections, quel que soit la période, les sécheresses proches de la normale apparaissent à environ 78% des cas, ce qui implique l'augmentation des autres classes de sécheresse (modérée, sévère et extrême). Si nous considérons la moyenne des deux scénarii des deux modèles climatiques utilisés, les sécheresses basées sur les indices SPI 12 et 36 mois, pour la période 2021-2080 augmenteront ainsi que les longueurs de sécheresse et quelques pics de sécheresses. Cette situation expose le bassin à la sécheresse. Par ailleurs, il faut signaler que ces variations prévues sur les sécheresses par l'ensemble des modèles impacteront les activités primaires du bassin et bien d'autres secteurs économiques. Ces résultats sur les sécheresses futures semblent être planétaires. Par exemple, Zhao et al. (2020) prédisent des augmentations pour les sécheresses extrêmes pour plusieurs régions du monde avec des régions où le risque est triplé parfois. Chez Zhao et al. (2019), le nord de l'Amérique doit s'attendre aux sécheresses sévères pour les 100 prochaines années. Spinoni et al. (2020) parviennent aussi à cette dernière conclusion mais ajoutent que si seules les précipitations sont considérées pour prédire les sécheresses, ces dernières baisseront en Amérique du Nord, Amazonie, Europe centrale et Asie, Corne d'Afrique, Inde et le centre de l'Australie. Par contre si les températures sont prises en compte, elles (sécheresses) augmenteront.

Les durées de sécheresse par contre vont beaucoup varier par rapport à la période de référence. Ces variations atteindront 25 mois de baisse pour certains modèles au cours du futur lointain. Mais il faut noter que ces durées de sécheresse seront accompagnées par de faibles intensités de sécheresses pour la plupart. Pour Somsubhra et al. (2017), les durées (longueurs) des sécheresses météorologiques seront légèrement moins ou égales à celles de la période historique en Kentucky au moment où les intensités de sécheresses baisseront dans la même localité.

Conclusion

Au terme de ce chapitre, nous pouvons dire que l'évolution des indices pluviométriques du bassin béninois du fleuve Niger au cours de la période 1976-2019 indique une augmentation des indices calculés. Les scénarii RCP4.5 et RCP 8.5 des modèles HIRHAM et REMO indiquent également des tendances à l'augmentation de la plupart de ces indices. Cette situation prédispose le bassin aux risques d'inondation, donc à la dégradation de l'environnement et une diminution de rendement agricole sans oublier la dégradation des infrastructures de transport.

Par ailleurs, les deux scénarii des deux modèles climatiques montrent des tendances à la hausse des indices standardisés de précipitation calculés au pas de temps 12 et 36 mois pour les deux sous-périodes (2021-2050 et 2051-2080). Ces variations sont très faibles (non significatives) et oscillent autour de 1 par millénaire c'est-à-dire très proche de zéro (0). Puisque l'indice SPI est très lié à la précipitation, cette solution paraît donc évidente du moment où les précipitations pour ces mêmes périodes présenteront des tendances à la hausse. Comme au cours de la période historique, les deux périodes futures choisies verront ces indices à une hausse très légère. Néanmoins, il est à noter que les longueurs de sécheresse pour ces périodes se verront augmenter comme c'est le cas avec plusieurs modèles du programme CORDEX utilisés pour de nombreuses régions d'Arctique, d'Antarctique et du Sahara par Spinoni et *al.* (2020).

CHAPITRE 8 : ANALYSE DE L'EVOLUTION DES EXTRÊMES HYDROLOGIQUES DU BASSIN BENINOIS DU FLEUVE NIGER

Cette partie du document qui caractérise les extrêmes hydrologique du bassin béninois du fleuve Niger, emploie l'analyse fréquentielle et l'Indices de Sécheresse d'écoulement Normalisé (SDI) à l'échelle 12 mois et 36 mois pour la cause.

8.1. Analyse fréquentielle des écoulements et pluie de pointe sur le bassin béninois du fleuve Niger.

Pour atteindre cet objectif, nous avons extrait des données chronologiques hydropluviométriques, les maxima journaliers des deux variables RX1day (pour les pluies) et Qmax (pour les débits) de chaque année de la période d'étude. Chaque station dispose donc d'une série chronologique annuelle ne comportant que les maxima. Le tableau 9 résume les statistiques descriptives de ces séries.

Tableau 9 : Statistiques descriptives des séries

Station	MIN	MAX	MOY	ECART	MEDIANN	Cv
Stations pluviométriques						
Alfakoara	46,1	126	75,5	18,2	70,3	0,242
Banikoara	46,2	105	72,2	16,1	69,9	0,223
Bembèrèkè	49,7	141	75,8	17,7	14,1	0,234
Djougou	46,6	147	76,8	19,1	73,3	0,249
Ina	41,5	177	78,4	26,4	75,1	0,336
Kalalé	42,2	162	79,2	23,4	76,3	0,296
Kandi	35,9	134	70,2	20,6	67	0,293
Karimama	38	131	73,1	20,3	71,1	0,278
Kouandé	48,3	132	79,5	20,3	75,2	0,256
Malanville	39,5	160	72,3	20,9	70	0,29
Natitingou	42,2	107	64,1	14,8	61,7	0,23
Nikki	44,3	125	74,7	18,5	71	0,248
Parakou	46	176	89,7	28,9	84,8	0,322
Ségbana	43	93,5	73,2	12,1	70,6	0,165
Tanguiéta	42,8	120	74,3	18,8	73,4	0,253
Stations hydrométriques						
Couberi	12,2	423	139	92,9	120	0,667
Gbassè	20,6	377	128	94	105	0,732
Kompongou	17,8	258	122	64,1	107	0,526
Yakin	12,1	502	162	118	115	0,728

Trois tests ont permis de déterminer le caractère stationnaire desdites séries. Les tests de stationnarité de Kendall d'indépendance de Wald-Wolfowitz et d'homogénéité de Wilcoxon ont été appliqués. Les résultats de ces tests consignés dans le tableau 10 montrent que les différentes séries constituées sont indépendantes, homogènes et stationnaires.

Tableau 10 : Paramètres statistiques

Stations	Indépendance		Stationnarité		Homogénéité	
	U	P	K	P	W	P
Stations pluviométriques						
Alfakoara	1,37	0,172	0,091	0,927	0,88	0,379
Banikoara	0,245	0,807	0	1	0,505	0,614
Bembèrèkè	2,18	0,0289	0,425	0,671	0,352	0,725
Djougou	0,401	0,689	0,101	0,919	0,293	0,769
Ina	1,41	0,157	1,71	0,0874	1,14	0,255
Kalalé	1,45	0,146	0,0405	0,968	0,481	0,63
Kandi	1,07	0,283	1,08	0,279	1,73	0,0845
Karimama	1,81	0,0699	0,334	0,739	0,317	0,751
Kouandé	1,62	0,105	0,769	0,442	0,34	0,734
Malanville	0,388	0,698	0,556	0,578	0,962	0,336
Natitingou	0,103	0,918	1,57	0,117	1,64	0,1
Nikki	1,11	0,265	0,516	0,606	0,305	0,76
Parakou	0,892	0,373	0,131	0,895	0,599	0,549
Ségbana	0,201	0,84	1	0,317	0,88	0,379
Tanguiéta	0,748	0,454	0,839	0,401	151	0,13
Stations hydrométriques						
Couberi	0,843	0,399	0,496	0,62	0,0117	0,991
Gbassè	3,28	0,00105	1,45	0,148	0,692	0,489
Kompongou	0,553	0,58	0,86	0,39	0,669	0,504
Yakin	0,591	0,555	0,0405	0,968	0,153	0,879

Les séries ont été ensuite ajustées aux lois de probabilité (GEV et Gumbel) choisies. La comparaison des courbes d'ajustement a permis de valider pour chaque série d'une station une loi de probabilité (exemple figure 57, 58 et 59).

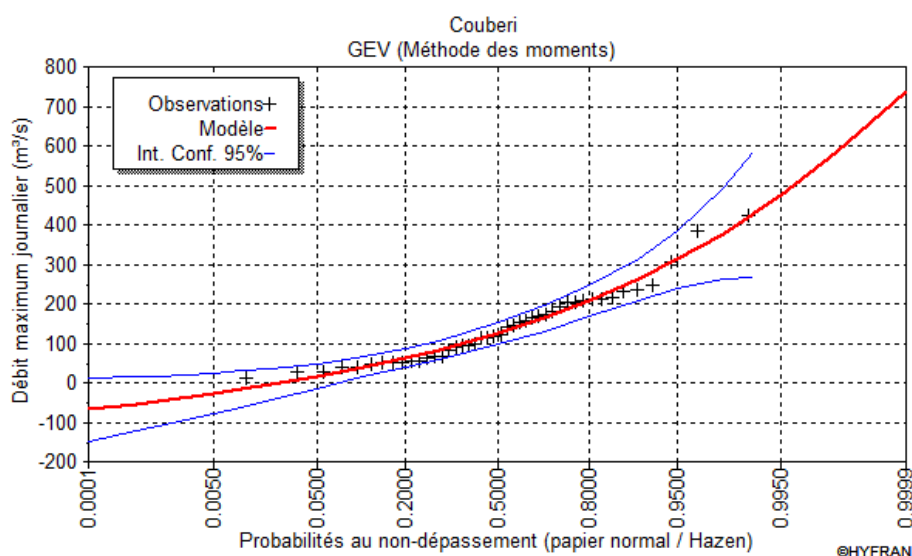


Figure 57 : Ajustement de la loi GEV aux Qmax de la station de Couberi.

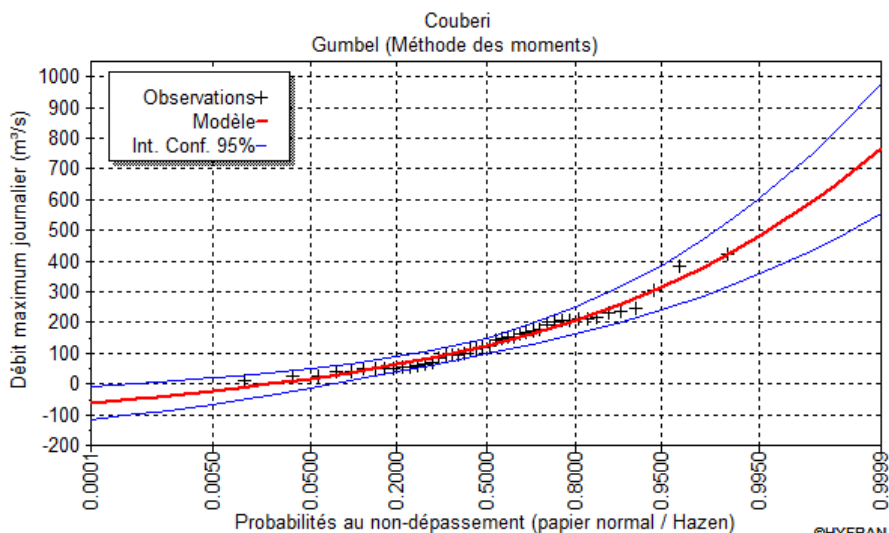


Figure 58 : Ajustement de la loi Gumbel aux Qmax de la station de Couberi.

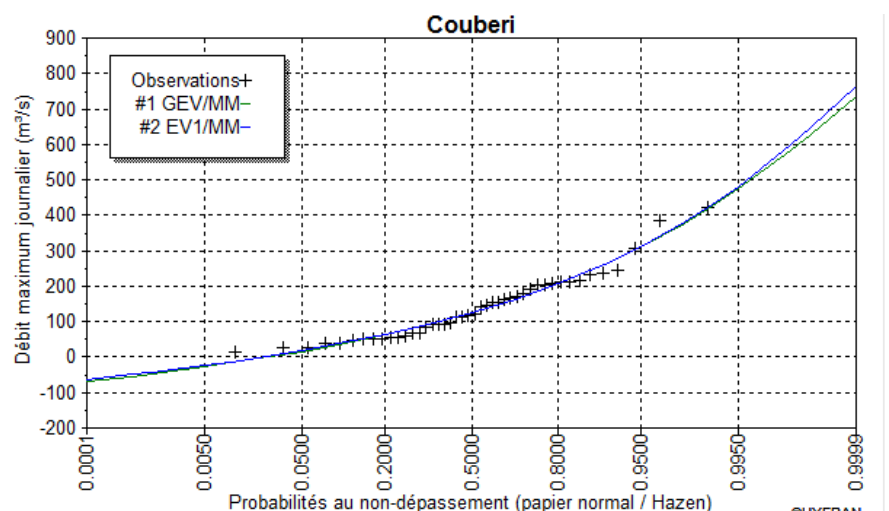


Figure 59 : Comparaison des ajustements GEV et Gumbel à la station de Couberi.

A partir de la loi de probabilité validée, les valeurs des quantiles correspondant à chaque série ont été calculées. Les résultats sont illustrés dans le tableau 11. Pour la plupart des séries pluviométriques, les périodes de retour maximales encore significatives sont environ égales à 2 voire 4 fois le nombre d’observations (qui est 44 ici). Étant donné que pour les différentes stations hydrométriques et postes pluviométriques, une série temporelle de 44 valeurs annuelles a été établie, les périodes de retour associées aux différentes lois seront donc 5, 10 et 50, 50 ans étant la limite de représentativité.

Tableau 11 : Quantiles de précipitations maximales et de débits de pointe observés

Stations	Loi de probabilité	P5	P10	P50
Stations pluviométriques				
Alfakoara	GEV	88,8	99,4	122

Banikoara	GEV	85,6	93,7	108
Bembèrèkè	Gumbel	88,5	98,9	122
Djougou	Gumbel	85	97,7	130
Ina	GEV	90,6	102	126
Kalalé	Gumbel	94,3	110	151
Kandi	Gumbel	85	97	124
Karimama	Gumbel	87,7	99,6	126
Kouandé	Gumbel	84	88,7	95,2
Malanville	GEV	94,1	106	132
Natitingou	Gumbel	87,8	98,8	123
Nikki	Gumbel	96,1	110	140
Parakou	Gumbel	88,1	98,9	123
Ségbana	GEV	74,8	83,4	102
Tanguiéta	Gumbel	110	127	165
Stations hydrométriques				
Couberi	GEV	207	261	378
Gbassè	GUMBEL	196	251	372
Kompongou	GEV	174	207	272
Yakin	GUMBEL	247	316	468

De l'analyse des quantiles, on note une faible variation des valeurs observées de précipitations maximales. Les hauteurs moyennes de précipitations maximales de 89,36 ; 100,74 et 125,95; ont une période de retour respective de 5, 10 et 50 ans. Quant aux quantiles de débits de pointe, ils sont fonction de l'aire drainée par le cours d'eau à l'échelle du sous-bassin. Mais, néanmoins on note des débits moyens de pointe de 206, 258,75 et 372,5 qui ont respectivement des périodes de retour de 5, 10 et 50ans.

Par ailleurs, la spatialisation des périodes de retour nous montre que le sud et l'est du bassin ont plus connu des pluies exceptionnelles (Figure 60). Quelle que soit la période de retour considérée, la station pluviométrique de Tanguiéta et la station hydrométrique de Yakin présentent les maxima de ces variables. En considérant les présentes séries hydrologiques on note qu'à Couberi 7 évènements ont une période de retour de 5 ans, 2 ont une période de retour de 50 ans. A Gbassè, les évènements qui ont une période de retour de 5 et 10 ans sont subvenus 2 fois chacun (ce qui fait 4 pour P5) et un évènement de période de retour de 50 est enregistré. 5 évènements qui ont une période de retour de 5 ans et un de 10 ans ont été observés à Kompongou. A Yakin, on a noté 2, 3 et 1 évènements respectifs aux périodes de retour de 5, 10 et 50 ans. Tous ces évènements d'écoulement exceptionnels sont intervenus entre les années 1987 et 2016. Cette période a vraiment été une période de débordement des cours d'eau dans la zone d'étude, ce qui a fragilisé le système agricole dans le bassin et qui a causé beaucoup de victime dans le rang des populations.

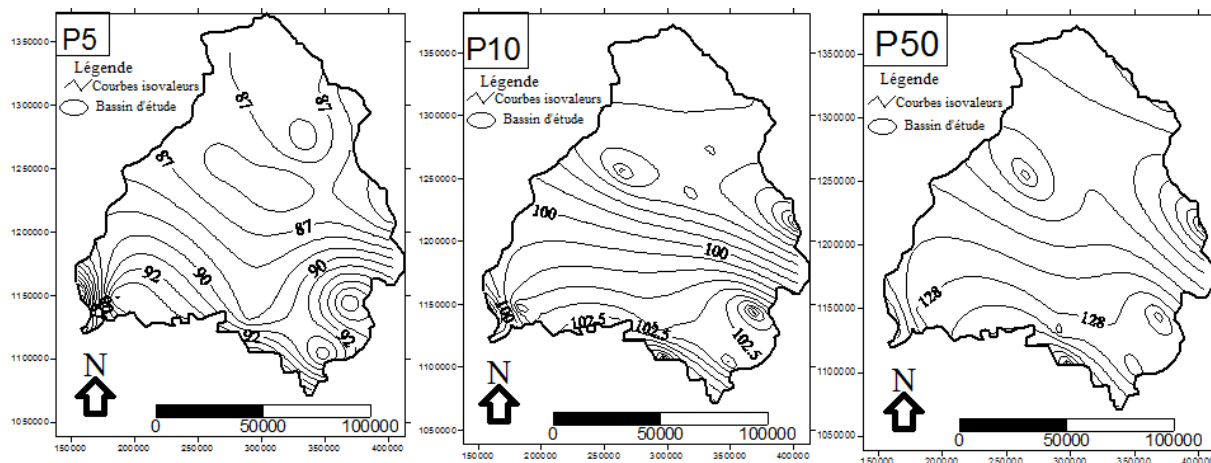


Figure 60 : Spatialisation des quantiles de précipitations de période de retour 5, 10 et 50 ans

8.2. Analyse des sécheresses hydrologiques (indices SDI)

8.2.1. Analyse historique des SDI

La figure 61 présente l'évolution chronologique des indices SDI au niveau de chaque station hydrologique au cours de la période 1976-2019. De cette figure, il ressort qu'à la station hydrométrique de Couberi, l'indice présente une tendance à la hausse moyenne de 0,0001 par an pour les SDI-12 et 36 mois. On note également que les grandes périodes sèches sont localisées entre les années 1978-1988. A cette station, à l'échelle 12 mois du SDI, l'extrême sécheresse s'est manifestée dans 1,4% des cas, la sécheresse sévère dans 12,83% des cas, la sécheresse modérée dans 8,72% des cas et les conditions proches de la normale 77% des cas (Figure 62). Pour le SDI 36 mois, nous avons observé respectivement 73,87, 18,67, 5,07 et 1,4% de conditions proches de la normale, modérées, sévères et extrêmes (Figure 62). A travers la figure 62 on remarque que la durée moyenne de sécheresse à cette station est 21 mois avec un pic de -1,68 pour le SDI-12 mois contre 85 mois de durée et -2,2 de pic pour le SDI-36 mois. A Couberi, on constate également qu'à 12 mois du SDI, il y a plus de chance (36%) de sécheresse hydrologique qu'à 36 mois (30%) du SDI (Figure 63).

A Gbassè, à l'échelle 12 mois du SDI, on note au cours de la période de référence les fréquences respectives de 80,25, 13,13 et 6,22% pour les conditions proches de la normale, modérées et sévères (Figure 62). Les sécheresses extrêmes ne se sont pas manifestées. A 36 mois du SDI, à cette station, les conditions proches de la normale, modérées et sévères présentent respectivement 76,81, 17,71 et 5,49% avec une absence des sécheresses extrêmes (Figure 62). Les deux fenêtres du SDI calculées présentent des baisses chronologiques très faibles (en moyennes de 1/100000 par an) au cours de la période historique choisie (Figure 61). Les sécheresses sont localisées entre 1978-1988 et 2010-2019 (Figure 61). Par ailleurs, les durées de sécheresse vont jusqu'à 47 et 117 mois respectivement pour les SDI-12 et 36 mois avec des

pics respectifs de -1,6 et -1,8 (Figure 63). Comme à Couberi, ici aussi le risque de sécheresse est élevé à 12 mois du SDI qu'à 36 mois (Figure 64).

A l'échelle 12 et 36 mois du SDI, on identifie à la station de Kompongou respectivement 80,24 et 81,28% de sécheresses proches de la normale ; 5,23 et 9,25% de sécheresses modérées ; 9,03% et 5,1% de sécheresses sévères ; et 4,51% et 5,57% de sécheresses extrêmes (Figure 62). Ces fenêtres de SDI (12 et 36 mois) calculées à la station de Kompongou présentent toutes des tendances chronologiques non significatives à la hausse (Figure 61). Cette hausse est en moyenne de 5/100000 par an (Figure 61). Cette station présente ses périodes sèches entre 1978-1988 et 2010-2019 (Figure 61). En moyenne, on note respectivement 36 et 117 mois de durée de sécheresses avec les SDI- 12 et 36 mois associées aux pics de -2,12 et -2,75 (Figure 63). Contrairement aux stations précédentes, ici le risque de sécheresse est plus élevé avec SDI-36 (46,11%) mois qu'avec le SDI-12 mois (38,38%) mois (Figure 64).

A la station hydrométrique de Yakin la sécheresse extrême ne s'est pas manifestée pour tous les pas du SDI comme au niveau de Gbassè (Figure 62). Pour cette station on note pour le SDI-12 mois, 80,75% de conditions proches de la normale, 12,5% de sécheresse modérée et 6,25% de sécheresses sévères contre 79,33% de sécheresse proches de la normale, 12,927% de sécheresses modérées et 7,75% de sécheresses sévères pour le SDI-36mois (Figure 62). En moyenne les durées de sécheresse vont jusqu'à 24 mois pour le SDI-12 mois et 48 mois pour SDI-36 mois avec des pics respectifs de -1,64 et -1,6 (Figure 63). L'indice SDI-12 mois est à la hausse chronologique de 0,007 (très faible) par centenaire alors que le SDI-36 mois est à la hausse chronologique de 0,01 (très faible) par centenaire (Figure 61). Comme à Kompongou, à Yakin, on note qu'à 36 mois du SDI le risque de sécheresse (qui est 29%) est plus élevé qu'à 12 mois (où on a 28%) du SDI (Figure 64).

En somme, pour toutes les stations hydrométriques considérées pour le calcul du SDI, on remarque qu'aux échelles 12 et 36 mois du SDI les fréquences des conditions proches de la sécheresse normale prévalent sur les autres classes de sécheresses (Figure 62). A ces échelles du SDI, les extrêmes sécheresses viennent toujours en dernière position alors que les sécheresses modérées et sévères sont respectivement en deuxième et troisième position (62). Les risques de sécheresses hydrologiques calculés à chaque fenêtre du SDI (12 et 36 mois) nous font remarquer que la station de Kompongou est celle où les risques de sécheresses hydrologiques sont élevés pour toutes les fenêtres du SDI. Ensuite viennent respectivement les stations de Couberi, Yakin et Gbassè.

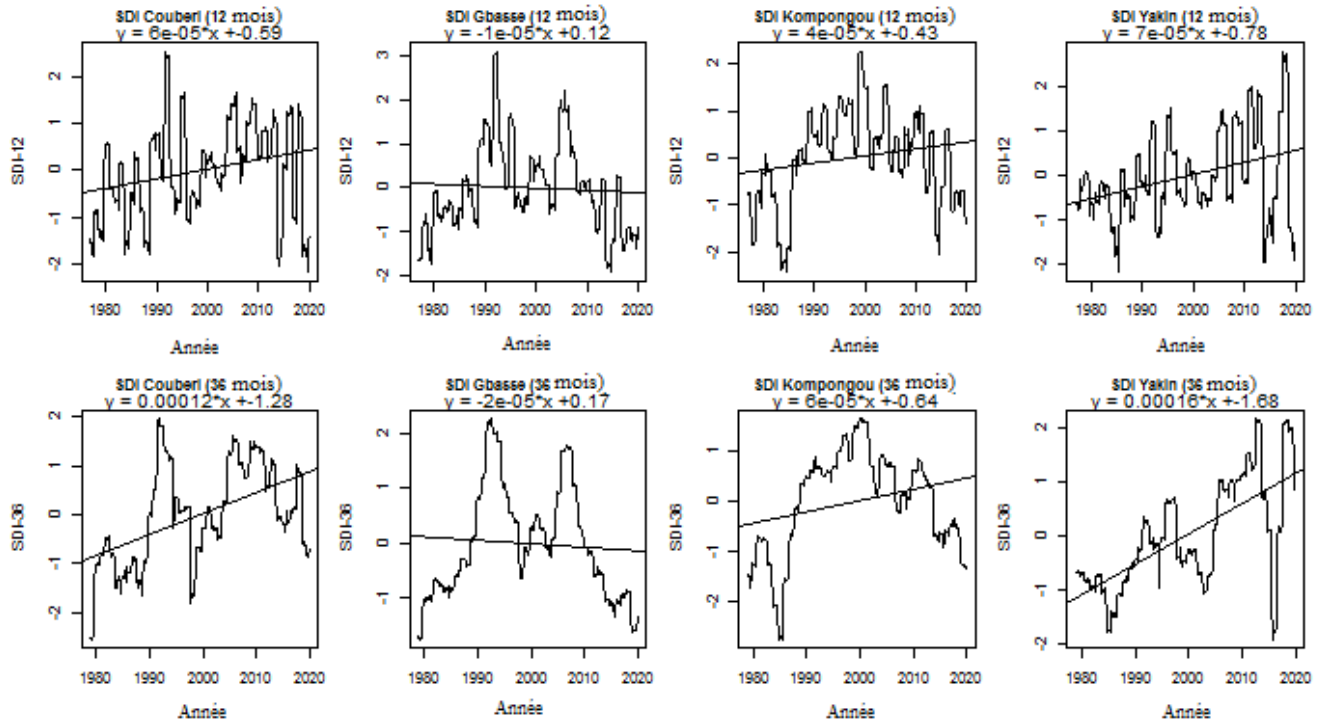


Figure 61 : Evolution chronologique des indices SDI par station hydrologique.

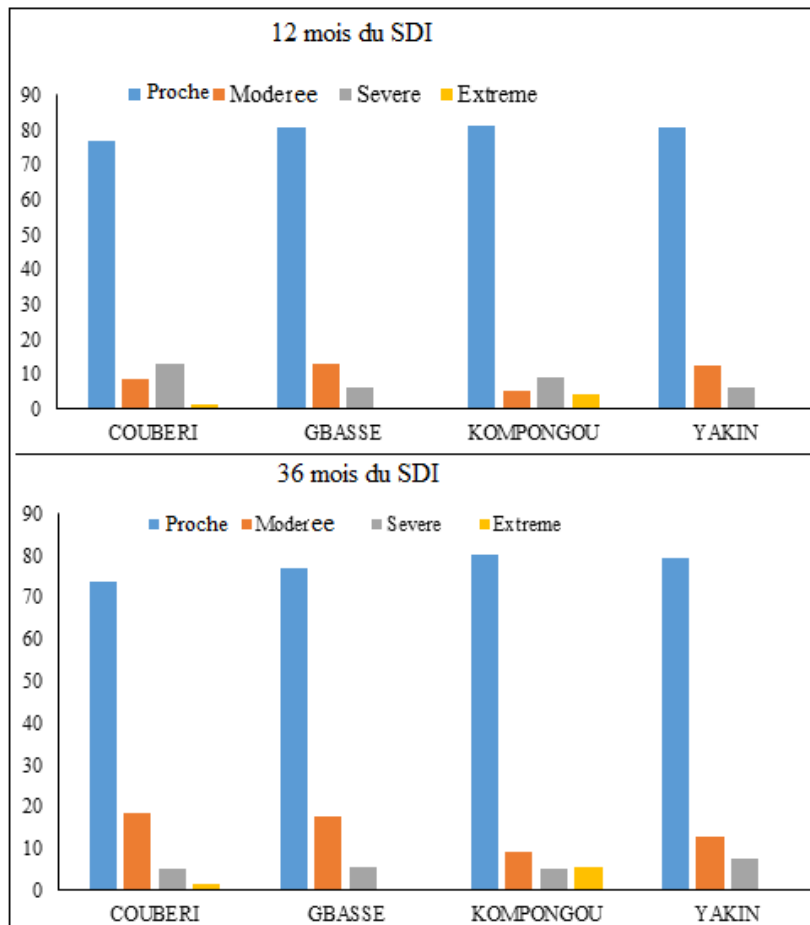


Figure 62 : Occurrence des classes de sécheresse au niveau de chaque station hydrologique.

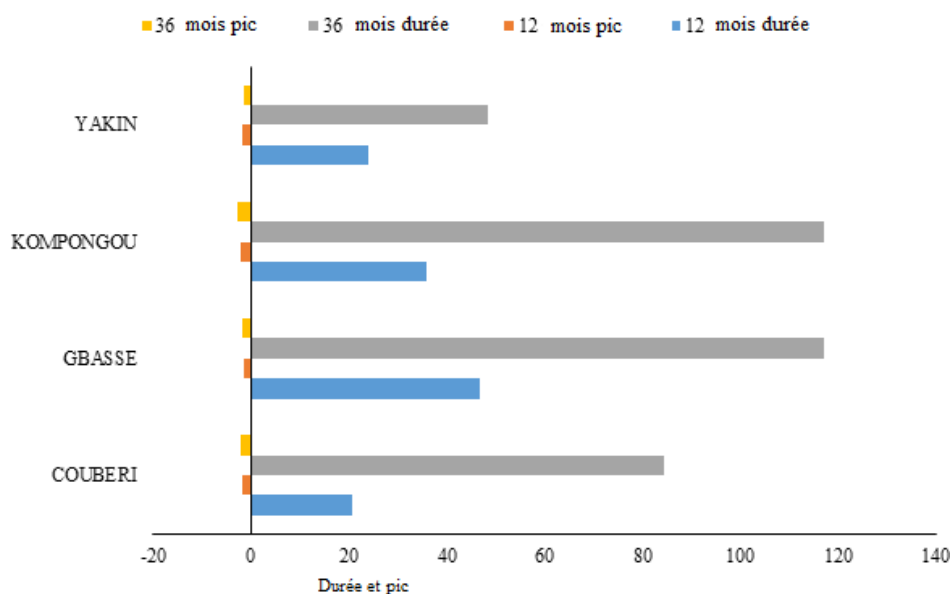


Figure 63 : Durées et pics de sécheresse par station hydrologique.

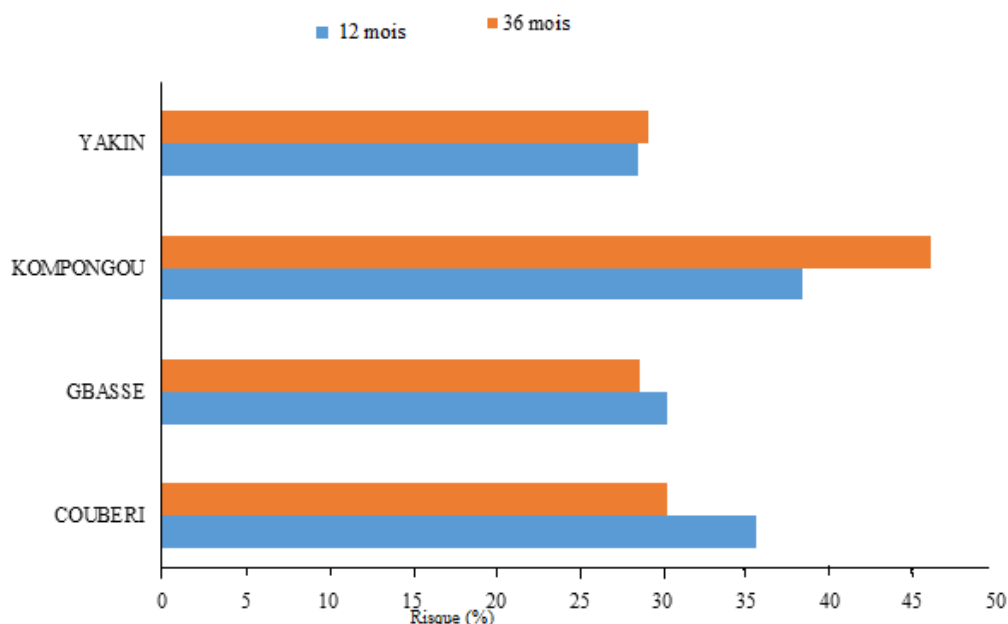


Figure 64 : Risques de sécheresse par station hydrologique.

8.2.2. Analyse future des indices SDI

8.2.2.1. Analyse des indices SDI au cours du futur proche (2021-2050)

Les deux scénarii (RCP4.5 et RCP8.5) des deux modèles (HIRAHM et REMO) présentent à Couberi pour le moyen terme, des tendances chronologiques à la hausse des indices d'écoulement normalisé excepté le RCP4.5 de HIRHAM pour le SDI-36mois (Figure 65 et annexe 10). Ces augmentations sont très faibles (1/100000 par an) (Figure 65 et annexe 10). A Gbassè, Kompongou et Yakin les scénarii présentent également pour le moyen terme des tendances à la hausse chronologique de l'indice sauf le RCP4.5 de HIRHAM qui montre des baisses pour les deux indices au niveau de ces stations (Figure 65 et annexe 10). Pour toutes ces

stations et pour les SDI-12 et 36 mois, les variations sont très faibles (1/100000 par an) (Figure 65 et annexe 10). Sauf à Gbassè où ces tendances étaient à la baisse par le passé, les autres stations présentaient des tendances à la hausse avec des variations qui sont dans le même ordre.

En moyenne pour toutes les stations hydrologiques au cours de la période 2021-2050 et pour le SDI-12 mois, on note pour le RCP4.5 du HIRHAM, 80, 11, 7 et 1% respectivement de sécheresses proches de la normale, modérées, sévères et extrêmes. Alors qu'avec le RCP8.5 du même modèle les valeurs sont respectivement 77, 14, 8 et 1%. Par contre avec le modèle REMO, le RCP4.5 donne 79, 14, 5 et 2% respectivement de sécheresses proches de la normale, modérées, sévères et extrêmes tandis que son RCP8.5 donne respectivement 74, 21, 4 et 1% (Figure 66). Au cours de la période de référence on a noté respectivement 78, 13, 6 et 3% de sécheresses proches de la normale, modérées, sévères et extrêmes pour le SDI-12 mois. A 36 mois du SDI et au cours du futur proche, le RCP4.5 de HIRHAM montre 77, 10, 9 et 4% respectivement de sécheresses proches de la normale, modérées, sévères et extrêmes contre respectivement 80, 11, 5 et 3 pour le RCP8.5 du même modèle. Le modèle REMO pour sa part présente à travers le RCP4.5 respectivement 78, 10, 7 et 5% de sécheresses proches de la normale, modérées, sévères et extrêmes alors qu'à travers son RCP8.5 on note respectivement 81, 11, 4 et 4% (annexe 10). Par le passé on notait 76, 16, 5 et 3% respectivement de sécheresses proches de la normale, modérées, sévères et extrêmes. Pour l'ensemble des modèles et les pas des SDI, la sécheresse proche de la normale prévaut sur environ 75% des cas de sécheresse (Figure 66 et annexe 10). Par le passé, on a observé respectivement 76, 16, 5 et 3% de sécheresses proches de la normale, modérées, sévères et extrêmes pour le SDI-36 mois

Pour les durées de sécheresse au cours du moyen terme (2021-2050), pour le SDI-12 mois, on enregistrera avec le RCP4.5 du modèle HIRHAM des durées moyennes de sécheresse de 24, 19, 21 et 22 mois avec les pics respectifs de -1,72, -1,65, -1,76 et -1,77 respectivement à Couberi, Gbassè, Kompongou et Yakin (Figure 67). Avec le RCP8.5 du même modèle ces durées sont respectivement de 18, 11, 12 et 10 mois associées aux pics de -1,67, -1,58, -1,57 et -1,64 (Figure 67). Par contre, avec le RCP4.5 de REMO on a pour le futur proche des durées de 31, 24, 24 et 23 mois avec des pics de -1,76, -1,61, -1,66 et -1,7 respectivement pour les stations de Couberi, Gbassè, Kompongou et Yakin contre les durées de 22, 23, 18 et 15 mois et des pics de -1,43, -1,41, -1,48 et -1,4 pour le RCP8.5 du même modèle (Figure 67). Au cours de la période de référence on a enregistré des durées de sécheresse de 21, 47, 36 et 24 mois respectivement à Couberi, Gbassè, Kompongou et Yakin avec des pics de -1,63, -1,57, -2,12 et -1,64. A 36 mois du SDI, le RCP4.5 du modèle HIRHAM présente pour le futur proche, des

durées de sécheresses de 45, 46, 56 et 45 mois respectivement à Couberi, Gbassè, Kompongou et Yakin avec des pics respectifs de -2,3, -2,2, -2,2 et -2,2 alors que son RCP8.5 montre des durées respectives de 33, 31, 42 et 33 mois avec les pics de -1,75, -1,71, -1,8 et -1,7 (annexe 10). Pour le RCP4.5 du modèle REMO, à 36 mois du SDI et au cours de futur proche, on a des durées de sécheresse de 46, 34, 42 et 31 mois avec des pics respectifs de -2, -1,6, -2 et -1,8 à Couberi, Gbassè, Kompongou et Yakin. Avec son RCP8.5, on obtient respectivement pour ces stations des durées de 37, 51, 26 et 21 mois avec des pics de -1,7, -1,8, -1,6 et -1,7 (annexe 10). Pendant la période historique, on a constaté des durées de sécheresse de 85, 117, 117 et 48 mois respectivement à Couberi, Gbassè, Kompongou et Yakin avec des pics de -2,17, -1,75, -2,75 et -1,59.

Les deux scénarii (RCP4.5 et RCP8.5) des deux modèles (HIRHAM et REMO) présentent en moyenne 34 et 36% de risque de sécheresse hydrologique pour le bassin d'étude respectivement avec les SDI-12 et 36 mois. Par le passé ces risques étaient évalués respectivement à 33 et 34% mois.

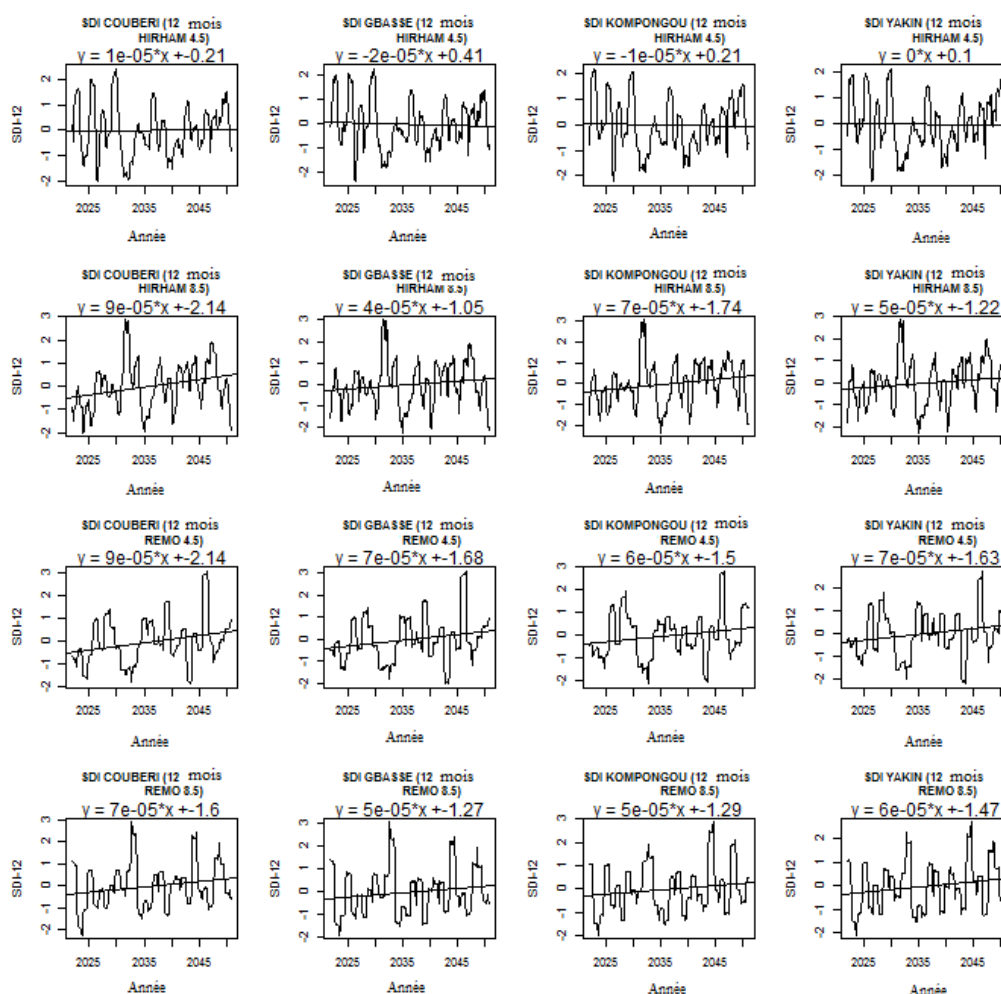


Figure 65 : Tendances projetées du SDI-12 mois par station hydrologique (2021-2050).

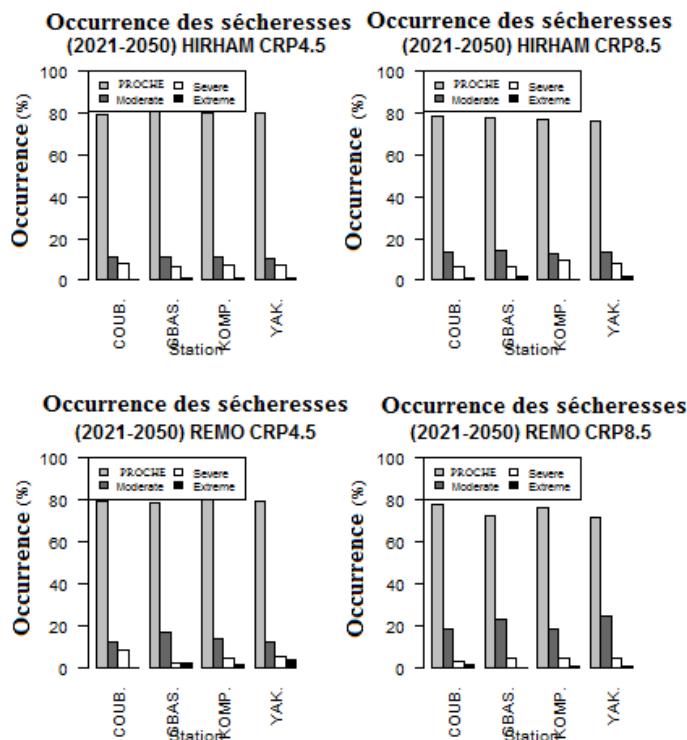


Figure 66 : Occurrences projetées des classes de sécheresse pour chaque station hydrologique pour le SDI-12 mois (2021-2050).

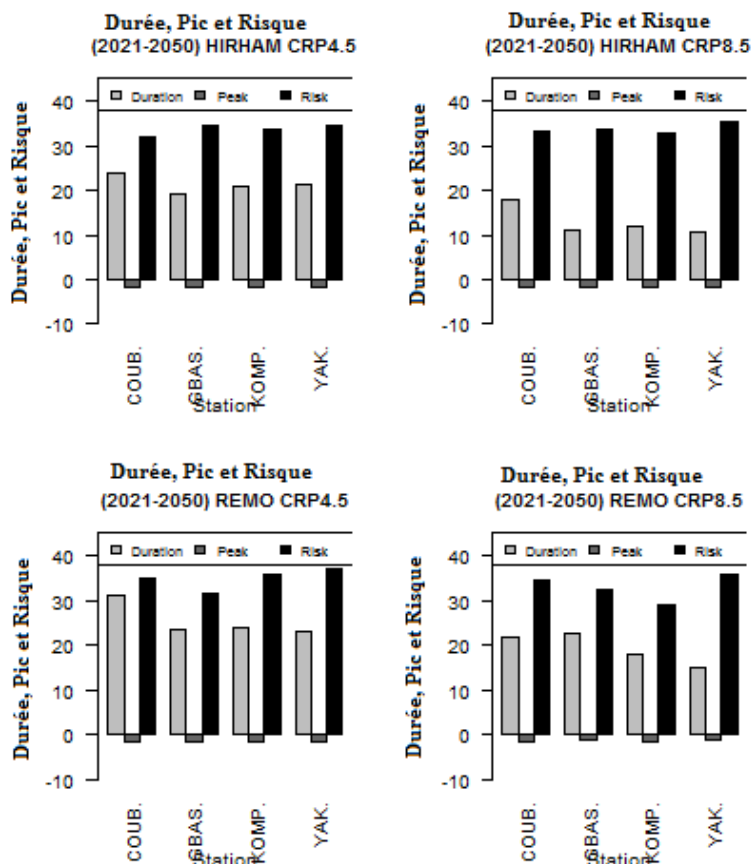


Figure 67 : Durées, pics et risques projetés pour toutes les stations hydrologiques à l'échelle 12 mois du SDI (2021-2050).

8.2.2.1. Analyse des indices SDI au cours du futur lointain (2051-2080)

Le scénario RCP4.5 du modèle HIRAHM présente pour la période 2051-2080, des tendances chronologiques à la baisse des indices SDI-12 et 36 mois excepté à Couberi (Figure 68 et annexe 10). Ces variations sont très faibles (1/100000 par an) pour toutes les stations (Figure 68 et annexe 10). Le RCP8.5 du même modèle présente ces tendances à la hausse chronologique pour toutes les stations avec une augmentation dans le même ordre (Figure 68 et annexe 10). Pour le RCP4.5 de REMO, les stations de Couberi et Gbassè montrent des tendances à la baisse chronologique des SDI-12 et 36 mois pour le futur lointain (Figure 68 et annexe 10). Avec ce scénario à 12 mois du SDI les stations de Kompongou et Yakin présentent des hausses chronologiques alors qu'à 36 mois du SDI seule Kompongou est à la hausse tendancielle (Figure 68 et annexe 10). Ces variations sont de l'ordre de 1/100000 par an. Le RCP8.5 du même modèle montre des tendances à la baisse chronologique de l'ordre de 1/10000 par an pour toutes les stations (Figure 68 et annexe 10). Sauf à Gbassè où ces tendances étaient à la baisse par le passé, les autres stations présentaient des tendances à la hausse avec des variations qui sont dans le même ordre.

Au cours du futur lointain, en moyenne pour toutes les stations hydrologiques et pour le SDI-12 mois, on note pour le RCP4.5 du HIRHAM, 79, 13, 7 et 1% respectivement de sécheresses proches de la normale, modérées, sévères et extrêmes alors qu'avec le RCP8.5 du même modèle les valeurs sont respectivement 81, 7, 7 et 5%. Par contre avec le modèle REMO le RCP4.5 donne 85, 13, 2 et 0% respectivement de sécheresses proches de la normale, modérées, sévères et extrêmes tandis que son RCP8.5 donne respectivement 82, 14, 4 et 0% (Figure 69). Au cours de la période de référence on a noté respectivement 78, 13, 6 et 3% de sécheresses proches de la normale, modérées, sévères et extrêmes pour le SDI-12 mois. A 36 mois du SDI et au cours du futur lointain, le RCP4.5 de HIRHAM montre 84, 7, 5 et 4% respectivement de sécheresses proches de la normale, modérées, sévères et extrêmes contre respectivement 78, 12, 8 et 2 pour le RCP8.5 du même modèle. Le modèle REMO pour sa part présente à travers le RCP4.5 respectivement 79, 11, 9 et 1% de sécheresses proches de la normale, modérées, sévères et extrêmes alors qu'à travers son RCP8.5 on obtient respectivement 81, 11, 4 et 4% (annexe 10). Par le passé on notait 77, 16, 6 et 1% respectivement de sécheresses proches de la normale, modérées, sévères et extrêmes. Pour l'ensemble des modèles et les pas des SDI, la sécheresse proche de la normale prévaut sur environ 79% des cas de sécheresse (Figure 69 et annexe 10). Pour la période de référence on a noté respectivement 76, 16, 5 et 3% de sécheresses proches de la normale, modérées, sévères et extrêmes pour le SDI-36 mois.

Les durées de sécheresse au cours du long terme pour le SDI-12 mois enregistrées avec le RCP4.5 du modèle HIRHAM sont de 20, 18, 17 et 18 mois avec les pics respectifs de -1,41, -1,33, -1,43 et -1,32 respectivement à Couberi, Gbassè, Kompongou et Yakin (Figure 70). Avec le RCP8.5 du même modèle ces durées sont respectivement de 23, 12, 13 et 12 mois associées aux pics de -2,2, -2, -1,7 et -2 (Figure 70). Par contre avec le RCP4.5 de REMO on a pour le futur lointain des durées de 22, 24, 24 et 25 mois avec des pics de -1,3, -1,4, -1,6 et -1,5 respectivement pour les stations de Couberi, Gbassè, Kompongou et Yakin contre des durées de 28, 27, 27 et 41 et des pics de -1,6, -1,4, -1,4 et -1,5 pour le RCP8.5 du même modèle (Figure 70). Au cours de la période de référence on a enregistré des durées de sécheresse de 21, 47, 36 et 24 mois respectivement à Couberi, Gbassè, Kompongou et Yakin avec des pics de -1,63, -1,57, -2,12 et -1,64. A 36 mois du SDI, le RCP4.5 du modèle HIRHAM présente pour le futur lointain, des durées de sécheresses de 38, 38, 38 et 37 mois respectivement à Couberi, Gbassè, Kompongou et Yakin avec des pics respectifs de -2,26, -2,26, -2,32 et -2,35 alors que son RCP8.5 montre des durées respectives de 23, 19, 35 et 30 mois avec les pics de -1,65, -1,85, -1,75 et -1,92 (annexe 10). Pour le RCP4.5 du modèle REMO, à 36 mois du SDI et au cours du futur lointain, on a des durées de sécheresse de 44, 44, 40 et 38 avec des pics respectifs de -1,5, -1,6, -1,8 et -1,8 à Couberi, Gbassè, Kompongou et Yakin tandis que son RCP8.5 présente respectivement pour ces stations des durées de 14, 23, 23 et 26 mois avec des pics de -1,18, -1,23, -1,58 et -1,48 (annexe 10). Au cours de la période historique, on a constaté des durées de sécheresse de 85, 117, 117 et 48 mois respectivement à Couberi, Gbassè, Kompongou et Yakin avec des pics de -2,17, -1,75, -2,75 et -1,59.

Les deux scénarii (RCP4.5 et RCP8.5) des deux modèles (HIRHAM et REMO) présentent en moyenne 34 et 32% de risque de sécheresse hydrologique pour le bassin d'étude respectivement avec les SDI-12 et 36 mois. Par le passé ces risques étaient évalués respectivement à 33 et 34% (Figure 70).

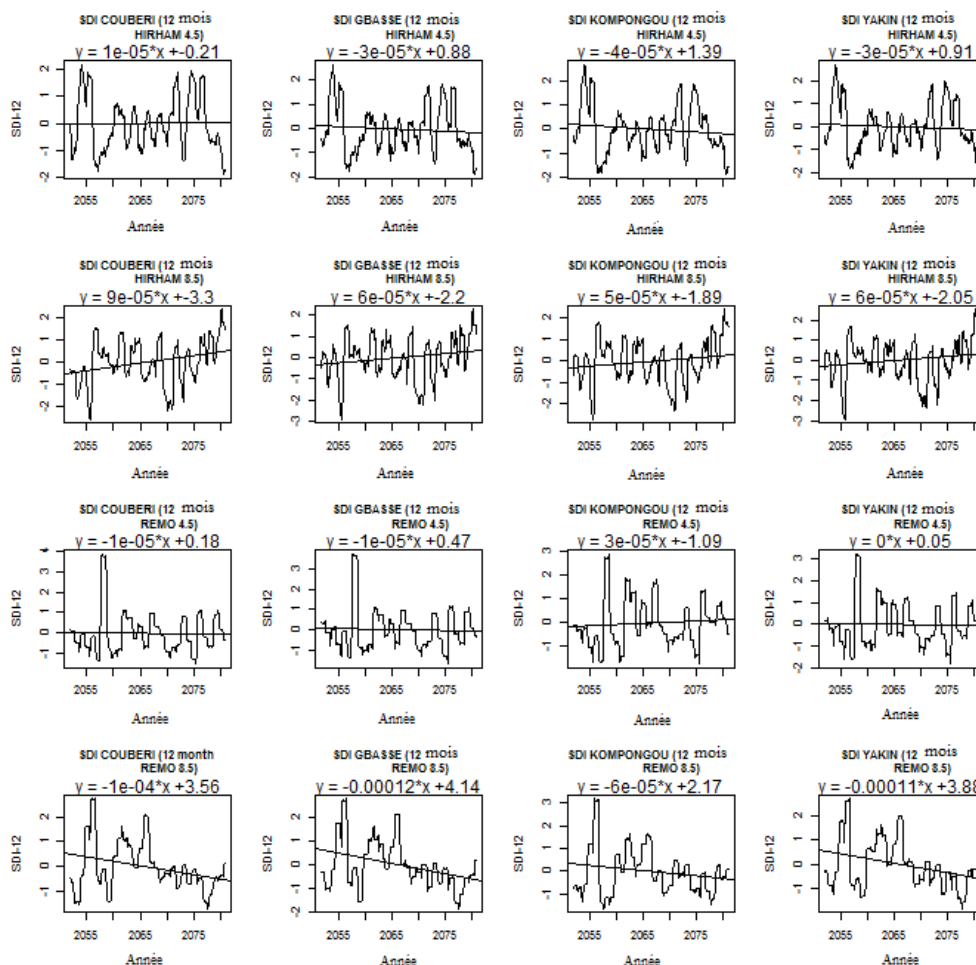


Figure 68 : Tendances projetées du SDI-12 mois par station hydrologique (2051-2080).

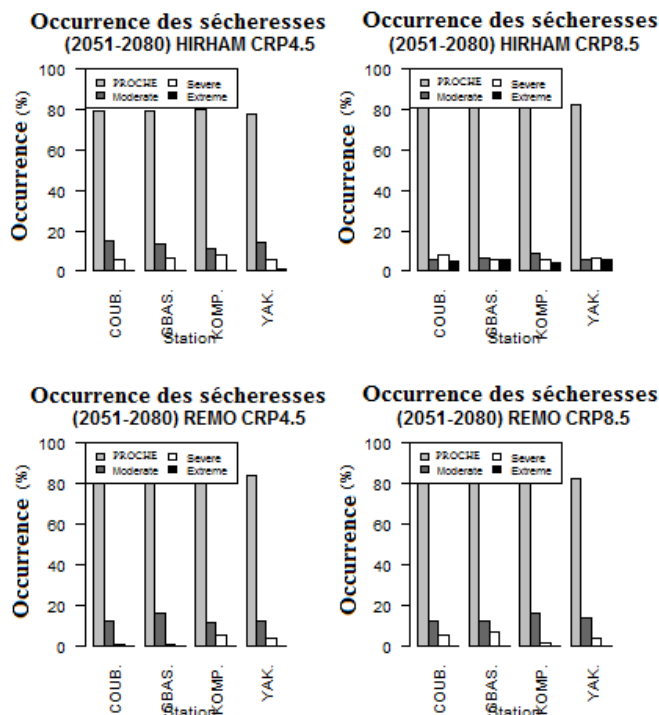


Figure 69 : Occurrences projetées des classes de sécheresse pour chaque station hydrologique pour le SDI-12 mois (2051-2080).

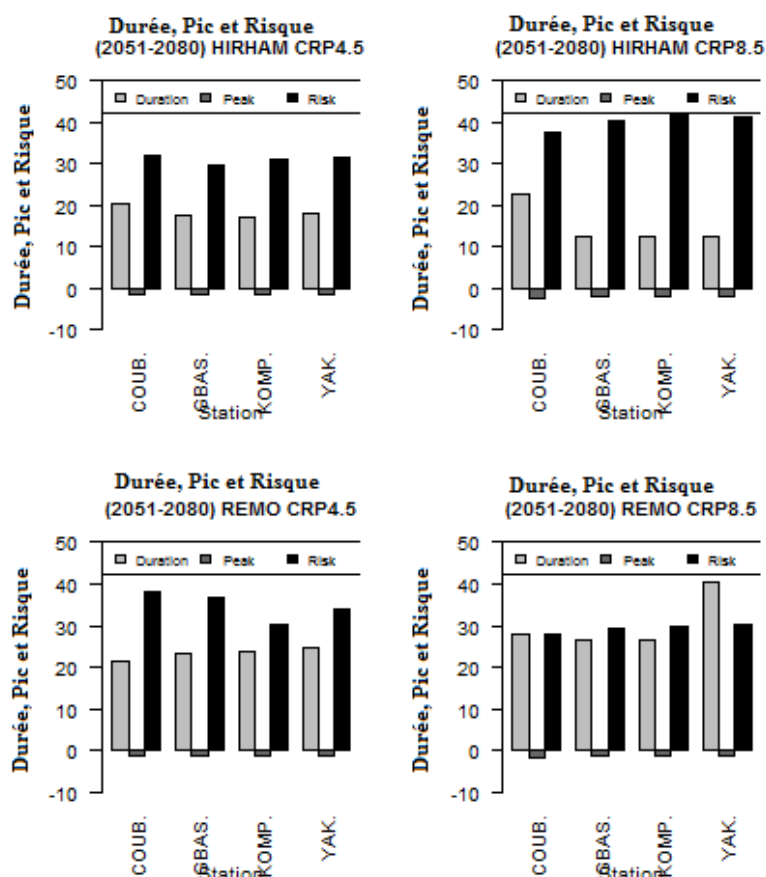


Figure 70 : Durées, pics et risques projetés pour toutes les stations hydrologiques à l'échelle 12 mois du SDI (2051-2080).

8.2.3. Quantification des changements et leur significativité pour les SDI

Sur le bassin d'étude, à moyen terme et pour le SDI-12 mois, on note en moyenne à travers la figure 71 la baisse des sécheresses modérées et extrêmes et la hausse des sécheresses proches de la normale et sévères par rapport à la période de référence selon le RCP4.5 de HIRHAM. En effet, on enregistre respectivement pour ces classes de sécheresse -1,8, -1,6, 2,1 et 1,3%. Avec le RCP8.5 de HIRHAM, on remarque la baisse des sécheresses proches de la normale et extrêmes et la hausse des sécheresses modérées et sévères par rapport à la période de référence (Figure 71). On note respectivement pour ces types de sécheresses les taux de -0,77, -1,45, 0,5 et 1,69%. Le RCP4.5 de REMO, à moyen terme et pour le SDI-12 mois, montre des écarts de 1,35, 0,64, -1,14 et -0,85 respectivement pour les sécheresses proches de la normale, modérées, sévère et extrême par rapport à la période de base (Figure 71). Au cours de la même période et pour le même pas du SDI, le RCP8.5 de REMO montre pour les sécheresses proches de la normale, modérées, sévères et extrêmes des écarts respectifs de -3,57, 7,95, -2,15 et -2,22% par rapport à la période de référence (Figure 71). Au cours du futur lointain, le RCP4.5 de HIRHAM présentera des écarts de 1,22, 0,58, 0,66 et -2,47 respectifs aux sécheresses proches de la normale, modérées, sévères et extrêmes par rapport à la période de base alors que le RCP8.5 du

même modèle montrera pour ces classes des écarts respectifs de 3,16, -6,16, 0,60 et 2,4% (Figure 71). Par contre le modèle REMO présente à travers le RCP4.5 pour ce futur lointain, des écarts de 6,4, -0,04, -3,63 et -2,74% respectifs aux sécheresses proches de la normale, modérées, sévères et extrêmes par rapport à la période de base contre des écarts respectifs de 4,21, 0,37, -1,85 et -2,74% pour le RCP8.5 du même modèle (Figure 71).

A moyen terme et pour le SDI-36 mois, on note en moyenne la baisse des sécheresses modérées et la hausse des sécheresses proches de la normale, sévères et extrêmes par rapport à la période de référence selon le RCP4.5 de HIRHAM (Figure 71). On note respectivement pour ces classes de sécheresse des écarts de -0,67, -5,79, 3,97 et 1,15%. Avec le RCP8.5 de HIRHAM, on observe la baisse des sécheresses modérées et sévères et la hausse des sécheresses proches de la normale et extrêmes par rapport à la période de référence (Figure 71). On note respectivement pour ces types de sécheresses des taux de -4,53, -0,07, 4,01 et 0,58%. Le RCP4.5 de REMO, A moyen terme et pour le SDI-36 mois présente des écart de 1,76, -5,19, 1,97 et 1,46% respectivement pour les sécheresses proches de la normale, modérées, sévère et extrême par rapport à la période de base (Figure 71). Au cours de la même période et pour le même pas du SDI, le RCP8.5 de REMO montre pour les sécheresses proches de la normale, modérées, sévères et extrêmes des écarts respectifs de 5,25, -4,96, -0,61 et 0,32% par rapport à la période de référence (Figure 71). Dans le futur lointain, le RCP4.5 de HIRHAM prévoit des écarts de 8,1, -9,12, 0,71 et 0,35 respectifs aux sécheresses proches de la normale, modérées, sévères et extrêmes par rapport à la période de base alors que le RCP8.5 du même modèle montrera pour ces classes des écarts respectifs de 1,49, -3,98, 3,08 et -0,58% (Figure 71). Par contre le modèle REMO présente à travers le RCP4.5 pour ce futur lointain, des écarts de 3,52, -4,77, 4,08 et -2,83% respectifs aux sécheresses proches de la normale, modérées, sévères et extrêmes par rapport à la période de référence contre des écarts respectifs de 1,22, 0,83, 1,08 et -3,13% pour le RCP8.5 du même modèle (Figure 71).

A moyen terme sur le pas de 12 mois du SDI, on note des baisses de durées de sécheresse avec le RCP8.5 de HIRHAM au niveau de toutes les stations alors que les pics augmentent à Kompongou et Yakin et baissent à Couberi et Gbassè (Figure 72). Ces baisses de durée sont respectivement de 1,95, 7,28, 6,25 et 19,06 mois à Couberi, Gbassè, Kompongou et Yakin par rapport à la période de base avec des écarts de pics respectifs de -0,08, -0,03, 0,49 et 0,9 par rapport à la période de référence (Figure 72). Pour le RCP4.5 du même modèle, on remarque des hausses de 4, 0,7 et 2,75 mois respectivement à Couberi, Gbassè et Kompongou avec des écarts de pics respectifs de -0,13, -0,1 et 0,3 et une baisse de 8 mois à Yakin avec un écart de

pic de -0,04 par rapport à la période de référence (Figure 72). Avec le RCP4.5 de REMO on constate des augmentations de 11,58, 5 et 6 mois respectivement à Couberi, Gbassè et Kompongou avec des différences de pics respectifs de -0,16, -0,06 et 0,39 par rapport à la période de référence et une baisse de 6,5 mois à Yakin avec un écart de pic de 0,04 (Figure 72). Par contre son RCP8.5 montre une baisse de 14,5 mois à Yakin avec un écart de pic de 0,31 et des hausses de 1,85, 4,1 et 0 mois respectivement à Couberi, Gbassè et Kompongou avec des différences de pics respectifs de 0,16, 0,14 et 0,57 par rapport à la période de référence (Figure 72).

Pour le long terme et au pas de 12 mois du SDI, on observera des baisses de durées de sécheresse de 0,9, 1 et 11,5 mois associées aux écarts de pics de 0,22, 0,62 et 0,41 respectivement à Gbassè, Kompongou et Yakin avec le RCP4.5 de HIRHAM alors qu'à Couberi la durée de sécheresse et le pic augmentent respectivement de 0,5 mois et 0,19 par rapport la période de référence (Figure 72). Pour le RCP8.5 du même modèle, on remarque des baisses de 6,1, 5,3 et 17,1 mois respectivement à Gbassè, Kompongou et Yakin avec des écarts de pics respectifs de -0,4, 0,4 et -0,3 et une hausse de 3 mois à Couberi avec un écart de pic de -0,6 par rapport à la période de référence (Figure 72). Avec le RCP4.5 de REMO on constate des augmentations de 1,75, 5 et 5,75 mois respectivement à Couberi, Gbassè et Kompongou avec des différences de pics respectifs de 0,25, 0,13 et 0,48 par rapport à la période de référence et une baisse de 5 mois à Yakin avec un écart de pic de 0,24 (Figure 72). Par contre le RCP8.5 du même modèle montre des hausses pour les durées et les pics de sécheresse. On note des écarts de durée de 8,25, 8,25, 8,75 et 11,16 mois associés aux écarts de pics de 0,013, 0,16, 0,68 et 0,27 respectivement à Couberi, Gbassè, Kompongou et Yakin par rapport à la période de référence (Figure 72).

A moyen terme et à 36 mois du SDI, on note des hausses de durées de sécheresse et la baisse des pics avec le RCP4.5 de HIRHAM à Gbassè, Kompongou et Yakin alors qu'à Couberi on note le contraire (annexe 10). Ces hausses de durée sont respectivement de 46, 56, et 4,8 mois associées aux baisses des écarts de 2,23, 2,2 et 0,43 respectivement à Gbassè, Kompongou et Yakin par rapport à la période de base contre un écart de durée de -38,5 mois et un écart de pic de 0,35 à Couberi (annexe 10). Pour le RCP8.5 du même modèle, on remarque des écarts de durées de sécheresses de -50,33, 31,25, 41,66 et -6,42 mois respectivement à Couberi, Gbassè, Kompongou et Yakin avec des écarts de pics respectifs de 0,85, -1,72, -1,8 et 0,07 par rapport à la période de référence (annexe 10). Avec le RCP4.5 de REMO on constate des différences de durées de sécheresse de -31, 34,33, 41,5 et 8,67 mois respectivement à Couberi, Gbassè, Kompongou et Yakin avec des différences de pics respectifs de 0,63, -1,57, -2,03 et -0,03 par

rapport à la période de référence (annexe 10). Par contre, son RCP8.5 montre des écarts de durées de sécheresse de -45,66, 52, 26 et -18,92 associées aux écarts de pic de 0,89, -1,84, -1,64 et 0,04 respectivement à Couberi, Gbassè, Kompongou et Yakin par rapport à la période de référence (annexe 10).

Au cours du futur lointain et à 36 mois du SDI, on observe des différences de durées de sécheresse de -45, 38, 38 et 2,67 mois associées aux écarts de pics de 0,34, -2,26, -2,32 et -0,57 respectivement à Couberi, Gbassè, Kompongou et Yakin avec le RCP4.5 de HIRHAM par rapport la période de référence (annexe 10). Pour le RCP8.5 du même modèle, on remarque des écarts de durées de sécheresse de -60,5, 18,75, 35,33 et -9,67 mois respectivement à Couberi, Gbassè, Kompongou et Yakin avec des écarts de pics respectifs de 0,95, -1,85 et -1,75 et -0,14 par rapport à la période de référence (annexe 10). Avec le RCP4.5 de REMO on constate des différences de durées de sécheresse de -39, 43,66, 40,33 et -1,67 mois respectivement à Couberi, Gbassè, Kompongou et Yakin avec des différences de pics respectifs de 1,11, -1,58, -1,8 et -0,02 par rapport à la période de référence (annexe 10). Par contre le RCP8.5 du même modèle montre des écarts de durées de sécheresse de -69, 23, 22,5, et -13,67 mois associés aux écarts de pics de 1,42, -1,23, -1,58 et 0,3 respectivement à Couberi, Gbassè, Kompongou et Yakin par rapport à la période de référence (annexe 10).

Les risques de sécheresse baissent d'environ 3,01 et 0,62% respectivement pour les SDI-12 et 36 mois selon la moyenne des deux scénarii des deux modèles au cours du moyen terme par rapport à la période de référence (Figure 72 et annexe 10). Au cours du long terme, on note par contre des baisses de 2,87 et 4,22% respectives aux SDI-12 et 36 mois par rapport à la période de base (Figure 72 et annexe 10). Il faut noter que ces changements obtenus ne sont pas significatifs comme ceci a été prouvé avec le test de Student ($p\text{-Value} > 0,05$) appliqué aux indices à un degré de confiance de 95%. Quel que soit le modèle et la station considérée, le $p\text{-Value}$ de Student est supérieur à 0,05 (Figure 73).

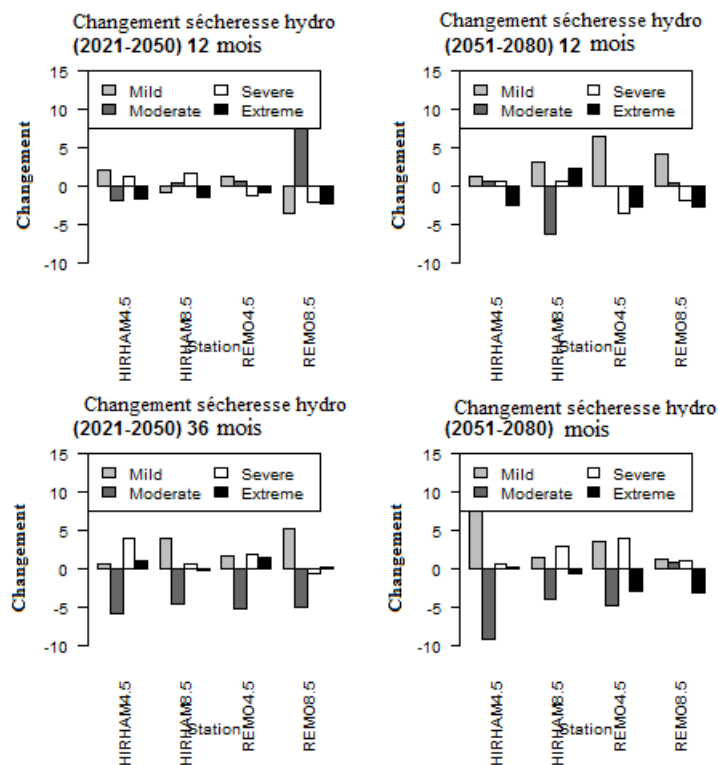


Figure 71 : Changement des types de sécheresses entre la période de base et les périodes de projection (échelle 12 mois du SDI).

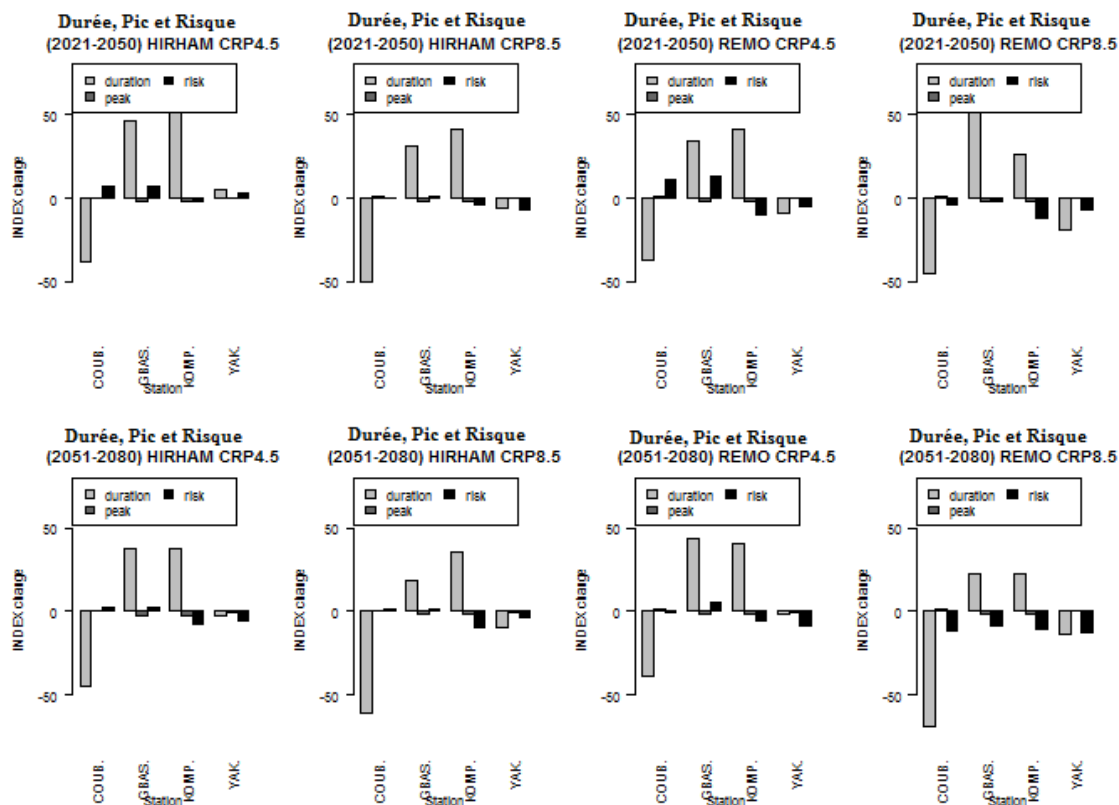


Figure 72 : Changement des durées, pics et risques de sécheresse (échelle de 12 mois).

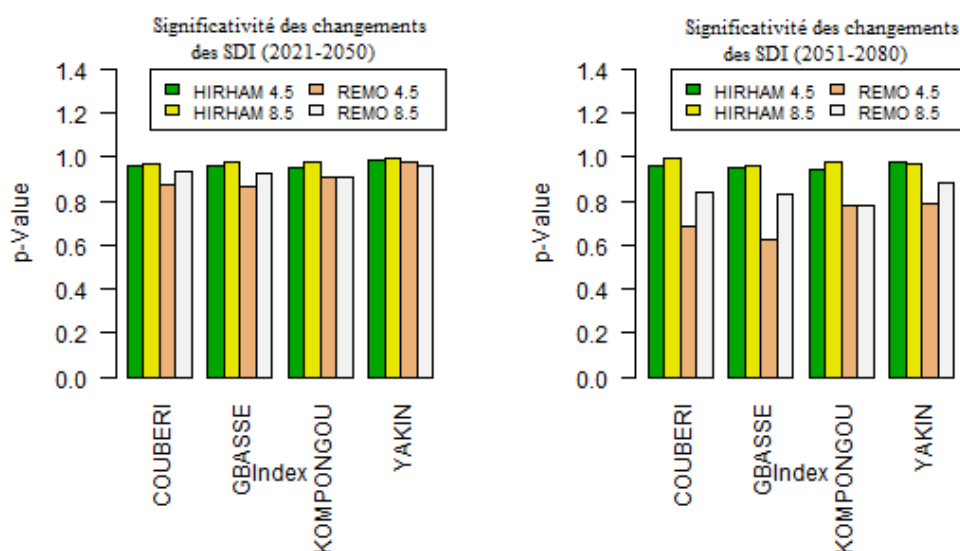


Figure 73 : Significativité des changements des SDI.

8.5. Synthèse sur les SDI

Les indices SDI calculés montrent en moyenne pour tous les scénarii des modèles utilisés des tendances à l'augmentation. Ces augmentations sont non significatives (sont de l'ordre de 0,00001 par an). Les tendances des écoulements sur le bassin seront donc à la hausse légère comme les précipitations. Badou (2016) et Obada (2017) ont décrit beaucoup de changements pour les cours d'eau du bassin béninois du fleuve Niger comme c'est également le cas avec Zhao et *al.* (2019) pour l'Amérique du Nord.

En moyenne, on note la hausse légère des classes de sécheresse. Ces hausses de sécheresse se suivront de l'augmentation des durées de sécheresse et des baisses des intensités (pic) de sécheresse. Ces résultats sont obtenus dans d'autres régions du monde comme le Sénégal où les écoulements sont espérés à la hausse au sud et à la baisse au nord selon Moustapha et *al.* (2017). Sur le bassin de Kentucky, Somsubhra et *al.* (2017) ont montrés des baisses pour les intensités de sécheresses hydrologiques et l'augmentation de leurs durées. Zhao et *al.* (2019), pour leur part prédisent des durées de sécheresse des périodes futures qui seront plus longues que la période historique. Pour Zhao et *al.* (2020), les changements futures des sécheresses hydrologiques extrêmes sont très dramatiques et seront plus sévères que les sécheresses météorologiques. Pour l'ensemble des indices SDI, on remarque que le nombre de mois sec augmente avec la fenêtre des indices, ces résultats affirment ceux de Ghenim et Megnounif (2011) pour le Nord-Ouest de l'Algérie à travers les indices SPI et SSFI.

Conclusion

Au terme de ce chapitre on retient que les extrêmes hydropluviométriques en l'occurrence les débits de pointe et les précipitations maximales journalières, sont étudiées à l'échelle du bassin béninois du fleuve Niger. L'analyse fréquentielle des variables montrent qu'aux différentes séries s'ajustent plusieurs lois de probabilité caractéristiques des valeurs extrêmes. Les quantiles hydrologiques obtenus montrent que les événements hydrologiques exceptionnels sont survenus sur la zone d'étude. La répartition des quantiles obtenus montre une faible variation des isohyètes.

Les indices SDI calculés présentent globalement des tendances à la hausse au cours de la période historique comme dans les projections. Ces hausses n'étant pas significatives et évoluant dans le même sens que les précipitations conduisent donc à une augmentation légère des écoulements sur le bassin. Les durées de sécheresses sont également attendues à la hausse suivies de la baisse de leur intensité (pic). Le bassin connaîtra donc plus de mois sec mais avec de faible incidence. Il est aussi important de noter que les changements obtenus sont non significatifs au test de Student au seuil de 95%.

CHAPITRE 9 : DISCUSSION GENERALE

9.1. Extrême de précipitation

Le bassin béninois du fleuve Niger est sujet de la péjoration des précipitations dicit Vissin (2007). En effet, les précipitations totales, les nombres de jours de pluies et les séquences humides ont connu des baisses chronologiques depuis les années 1970 alors que les séquences sèches pour leur part ont augmenté. Cette situation explique le raccourcissement de la saison des pluies et le prolongement des saisons sèches. Ces résultats confirment ceux de New et *al.* (2006) pour toute l'Afrique de l'Ouest ; de Halissou et *al.* (2019) pour le bassin béninois du fleuve Niger et de Obada (2017) pour le bassin de la Mékrou. Dans le présent travail on constate la reprise des tendances à la hausse des saisons de pluies et les nombres de jours pluvieux. L'intervention d'une séquence sèche au cours d'une période pluvieuse n'est pas sans conséquence sur le calendrier cultural. Si elle a lieu au début ou en pleine saison de croissance, elle peut être à l'origine d'un faux démarrage de saison ou encore hypothéquer toute une campagne agricole. Les jours intensément humides (R95p) constituent les apports journaliers en eau les plus importants par rapports à leurs seuils (au 95^e percentile). Ces indices qui contribuent aux phénomènes de géorisques naturels notamment les inondations, les glissements de terrains, l'érosion des sols etc. sont à la hausse sur le bassin béninois du fleuve Niger. Ces résultats confirment ceux de Yarou et *al.* (2019) pour ledit bassin ainsi que ceux de New et *al.* (2006) pour le sud et l'ouest de l'Afrique et ceux de Baliet et *al.* (2016) pour la région de Goh en Côte-d'Ivoire. Les résultats confirment également ceux obtenus en Mauritanie par Ozer et *al.* (2014), au Niger par Ozer et *al.* (2017). Au cours des période de projection (2021-2050 et 2051-2080), tous ces indices de précipitations sont prévus garder leurs tendance à la hausse respectivement à la baisse avec des taux de changement très variés selon le modèle climatique régional et le scénario d'émission considéré. Les précipitations moyennes et jours pluvieux sont ainsi prévus à la hausse dans le bassin jusqu'en 2050. Ensuite ces indices baisseront jusqu'en 2080 et ce jusqu'à la fin du 21^{ème} siècle. Ces résultats ont été obtenus par Obada (2017) pour le bassin de la Mékrou, par Badou (2016) pour le bassin béninois du fleuve Niger, par Sarr et Camara, (2017) pour le Sénégal, par Ly et *al.* (2013), Diallo et *al.* (2016) et de Sylla et *al.* (2012) pour le Sahel de l'Ouest. Il est aussi important de noter que tous les indices ne changent pas de façon significative. Les significativités importantes sont celles des indices RX1day et RX5day avec le REMO et CDD avec le modèle HIRHAM.

9.2. Extrême de température

Les maxima des températures maximales, les minima des températures minimales et l'écart de la durée diurne sont également à la hausse chronologique sur le bassin d'étude depuis les années

1976. Ce qui explique que le bassin connaît un réchauffement qui est en moyenne de $0,06^{\circ}\text{C}/\text{an}$. Ces résultats sont obtenus par Badou (2016) pour les températures moyennes pour le bassin, par Obada (2017) pour les températures moyennes pour le bassin de la Mékrou et par New et *al.* (2006) qui ont montré des augmentations de $0,179$ et $0,160^{\circ}\text{C}/\text{décade}$ respectivement pour les indices TXx et TXn pour l'Afrique de l'ouest et du sud. Les jours et nuits chauds ont augmenté au cours des dernières décennies. Tel a été le cas avec les résultats de Zhang et *al.* (2011) pour l'ensemble du globe terrestre. New et *al.* (2006) pour les mêmes indices et pour le sud et l'ouest de l'Afrique avaient trouvé les mêmes résultats. Les indices de durée de chaleur et ceux sur la durée de froids présentent respectivement des augmentations et des baisses sur le bassin béninois du fleuve Niger. Ces indices qui montrent que les chaleurs ont été dans la période 1976-2019 plus longues que les froids, viennent une fois appuyer les précédents résultats. Ces résultats ont été confirmés par Zhang et *al.* (2011) pour le globe en entier. La prévision de ces indices dans la période future sur le bassin d'étude ne donne pas une évolution contraire à celle de la précédente (historique 1976-2019). En effet, les extrêmes de températures sont prévus à une hausse qui doit inquiéter les responsables à tous les niveaux. La moyenne des scénarii d'émission des modèles climatiques HIRHAM et REMO donne un taux d'augmentation de 10% des indices d'intensité de température extrême (TXx, TNn et DTR). Donc le réchauffement débuté dans le passé récent sur le bassin continuera pour le futur. Ce réchauffement était prédit pour le bassin d'étude par Badou (2016) en se basant sur les températures moyennes ; pour le Benin par Obada (2017) toujours avec les moyenne de température et pour toute l'Afrique de l'ouest par IPCC (2007) et GIEC (2013). Cette situation semble planétaire car confirmée sur d'autres région telles que la Seine (GICC – RexHySS, 2011) où il est prévue des augmentations des températures moyennes de $1,5$ à 3°C à l'horizon 2050 et de 2 à $4,5^{\circ}\text{C}$ à l'horizon 2100. Il est donc important que les communautés scientifiques, les décideurs locaux, nationaux et internationaux etc. à divers niveau prennent des résolutions optimales et collégiales pour contrer les retombés de ce phénomène.

9.3. Extrême de sécheresse (SPI et SDI)

Il est prévu une augmentation chronologique non significative des SPI et SDI au cours de 2021-2050 comme au cours de la période de référence. Ce qui traduit que les conditions humides observées au cours de la période de référence vont se poursuivre pour les 30 prochaines années. Ensuite, on observera une baisse chronologique significative des SPI et SDI au cours de la période 2051-2080. Pour le futur lointain, le bassin doit donc s'attendre aux sécheresses plus longues que par rapport à la période de base et la période 2021-2050. Ces résultats étaient obtenus depuis 1995 pour les pays qui se partagent le Golf du Guinée par Paturel *al.* (1995).

Koudamiloro et *al.* (2015), montrent également que le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou au Bénin est caractérisé par des sécheresses à des degrés divers. En effet, les cas de sécheresses météorologiques sont prévus à la baisse d'environ 3% selon la moyenne des deux scénarii d'émission des deux modèles climatiques régionaux d'ici 2080 par rapport à la période de référence. Pour les sécheresses hydrologiques, les augmentations d'environ 0,0003% sont attendues. Ces variations des sécheresses seront accompagnées de l'augmentation de leurs durées et la baisse de leurs magnitudes (pics) comme cela a été montré par l'ensemble des modèles climatiques utilisés. Ces résultats corroborent ceux obtenus avec plusieurs modèles du programme CORDEX utilisés pour de nombreuses régions d'Arctique, d'Antarctique et du Sahara par Spinoni et *al.* (2020). Ainsi que ceux de Badou (2016) et Obada (2017) qui ont décrit beaucoup de changements pour les cours d'eau du bassin béninois du fleuve Niger sans oublier le cas de Zhao et *al.* (2019) pour l'Amérique du Nord.

CONCLUSION GENERALE

Dans ce contexte de climat changeant, le bassin béninois du fleuve Niger a été plusieurs fois zone d'étude de plusieurs recherches en vue de la quantification, la planification, et la modélisation des ressources en eau et des ressources connexes pour une utilisation durable. Cette recherche de thèse qui s'inscrit dans la même dynamique se fixe comme objectif principal l'étude de la variabilité climatique et dynamique des événements hydrométéorologiques dans le bassin. Pour atteindre cet objectif, dans un premier temps la variabilité climatique du bassin a été déterminée, ensuite les événements climatiques extrêmes du bassin ont été caractérisés et enfin l'évolution des extrêmes hydrologiques du bassin a été analysée.

Au terme de la recherche, il est constaté pour l'analyse de la variabilité des variables hydrométéorologiques du bassin béninois du fleuve Niger, qu'à l'image de ce qui est observé sur toute l'Afrique de l'Ouest par plusieurs études, les paramètres hydrométéorologiques ont connu de grandes variations au cours des décennies passées. Les pluies et les débits ont connu une phase déficitaire localisée dans les années 70 et 80 qui est suivie d'une période excédentaire. Pour les variables de températures et d'évapotranspiration potentielle la période excédentaire intervient avant celle déficitaire. Par ailleurs les températures observées ont connues un accroissement continu depuis 1976 jusqu'à ce jour. Ce qui témoigne un réchauffement pour le bassin.

Pour caractériser les événements climatiques extrêmes du bassin, les extrêmes de température, de précipitations et les indices SPI ont été analysés. Les extrêmes de température analysés sont les maxima annuels des températures (TXx), les minima annuels des températures (TNn), les écarts des températures diurnes (DTR), les nuits chaudes (TN90P), les jours chauds (TX90P), les séquences froides (CSDI) et les séquences chaudes (WSDI). Les extrêmes de pluie analysés sont les précipitations totales (PRCPTOT), les jours avec au moins 1 mm de pluie (R1mm), les séquences sèches (CDD), la pluie journalière maximale (RX1day), la pluie maximale sur cinq jours consécutifs pluvieux (RX5day) et les pluies intenses (R95p). Les indices SPI ont permis de caractériser les sécheresses météorologiques du bassin. Les pas de 12 et 36 mois sont employés pour la cause.

Il en résulte qu'au cours de la période historique, les indices de précipitation PRCTOT, R1mm et CDD et les indices de températures TNn, TXx, TX90p, TN90p, WSDI et DTR présentent des tendances chronologiques à la hausse. Les SPI calculés sur 12 et 36 mois présentent au cours de la période historique (1976-2019) des tendances à la hausse avec l'augmentation des durées de sécheresse et de pics moindres Cette situation a prédisposé le bassin aux risques

hydroclimatiques dont le raccourcissement des saisons pluvieuses. Ce qui a conduit à la dégradation de l'environnement et une diminution de rendement agricole sans oublier les infrastructures de transport.

Les scénarii RCP4.5 et RCP8.5 des modèles climatiques HIRHAM et REMO sont utilisés pour caractériser les tendances des précédents indices à l'horizon 2050 et 2080 sur le bassin béninois du fleuve Niger. Il en découle que les précipitations totales augmenteront probablement d'environ 1mm/décennie au cours de la période 2021-2050 et baissent d'environ 0,2 mm/décennie au cours de 2051-2080. Comme les moyennes de précipitation, les moyennes des jours avec au moins 1 mm de pluie (R1mm) augmentent en moyenne de 1 jour/décennie pour les scénarii RCP4.5 et RCP8.5 du modèle HIRHAM, de 0,5 jours/décennie pour le scénario RCP4.5 du modèle REMO pour le moyen et long terme. Le scénario RCP8.5 du modèle REMO pour sa part prévoit une baisse moyenne de 1,5 jours/décennie pour les deux périodes. Les scénarii RCP4.5 et RCP8.5 du modèle climatique REMO prévoient des tendances à la hausse pour le nombre maximal de jours consécutifs sec (CDD) (d'environ 0,8 jours/décennie) au cours du moyen et long terme sur le bassin béninois du fleuve Niger. Pour ce modèle, les tendances présentées par ces indices au cours de la période historique (1976-2019) seront poursuivies. Pour le modèle HIRHAM, le moyen terme (2021-2050) connaîtra une baisse des CDD avec le RCP4.5 et une hausse des CDD avec le RCP8.5. Pour le long terme, les deux scénarii prévoient de très légères augmentations (0,02 jours) pour cet indice. Pour le moyen et long terme, les deux scénarii du modèle REMO et le scénario RCP4.5 du modèle HIRHAM prédisent des tendances à la hausse des précipitations maximales journalières (RX1day) et des précipitations maximales sur 5 jours pluvieux (RX5day). Le modèle HIRHAM-RCP8.5 pour sa part donne pour le moyen terme des tendances baissières et à la hausse pour le long terme. Comme la période historique qui a connu des tendances à la hausse pour ces indices, le futur proche et lointain verront ces indices à la hausse selon la plupart des modèles climatiques. Il faut donc s'attendre aux risques d'inondation. Cette remarque est appuyée par l'augmentation tendancielle des indices sur les pluies intenses (R95p) prévue par tous les scénarii de tous les modèles excepté le RCP4.5 du modèle HIRHAM qui donne des baisses pour le R95p au cours du long terme.

Les indices de températures TN90P (nombre de nuit chaude) et TX90p (nombre de jour chaud) augmenteront probablement au cours du moyen et long terme quel que soit le modèle climatique et le scénario. Ces variations sont en moyenne de l'ordre de 2 jours par décennie. L'indice CSDI (indice de durée des séquences froides) baisse pour tous les scénarii de tous les modèles

climatiques d'environ 4 jours par décennie au cours des sous périodes de projection. Le WSDI (indice de durée des séquences chaudes) présente les mêmes tendances que les TX90p et TN90p c'est-à-dire augmentent chronologiquement (d'environ 3 jours par décennie) pour tous les modèles et pour tous les scénarii pour le moyen et le long terme. Au cours du moyen et long terme, les indices TXx (maxima des températures maximales), TNn (minima des températures minimales), et DTR (l'écart des températures) augmenteront en moyenne d'environ 0,6°C/décennie pour les scénarii RCP4.5 et RCP8.5 des deux modèles climatiques utilisés. Cette augmentation était de 0,7°C par décennie pour la période historique (1976-2019). Le réchauffement débuté dans le passé récent sur le bassin continuera pour le futur moyen et long terme. L'analyse des indices SPI selon la moyenne des RCP des MCRs montre pour le bassin, une augmentation des longueurs de sécheresse.

Les changements de chaque variable hydrométéorologique sont étudiés par rapport à la période de référence (1990-2019). Beaucoup de changements sont notés pour les indices météorologiques au cours de la période future par rapport à la période de référence. Ces variations surtout au niveau des indices de précipitation sont dues au fait que beaucoup de modèles de prévision climatiques ont de difficultés pour simuler les périodes humides. Ainsi, on retient pour les PRCPTOT, des hausses moyennes d'environ 4% par rapport à la période de référence. Le bassin verra ses pluies intenses à la hausse jusqu'en 2080 par rapport à la période de référence avec des valeurs qui vont osciller entre 15 et 30%. Les indices RX1day et RX5day varieront entre -30% et 30% par rapport à la période de référence. Les maximales de pluies journalières connaîtront beaucoup de changements soit à l'est ou l'ouest du bassin alors que les pluies maximales sur 5 jours changeront plus au sud du bassin. Les indices de température pour leur part augmenteront en moyenne selon les modèles climatiques utilisés. On note des taux d'augmentation moyens de 6% et 15% respectivement pour TXx et TNn pour le XXI^{ème} siècle par rapport à la période de référence. Le DTR (écart de température diurne) pour sa part augmente de 1,2% pour le modèle HIRHAM et baisse de 2,5% pour le modèle REMO. Au cours du moyen terme, les jours et nuits chauds (TX90p et TN90p) augmentent respectivement d'environ 16 et 17% par rapport à la période historique avec les deux modèles. Les changements au niveau des sécheresses météorologiques présentés par l'ensemble des modèles pour les périodes futures du bassin sont très faibles. Les intervalles de sécheresse seront à la baisse à 12 et 36 mois du SPI

L'analyse fréquentielle sur le bassin nous révèle que les quantiles de pluie varient peu. Les hauteurs moyennes de précipitations maximales de 89,36 ; 100,74 et 125,95; ont une période de retour respective de 5, 10 et 50 ans. Quelle que soit la période de retour considérée, la station

hydrométrique de Yakin présente les valeurs maximales de débits de pointe. On note par ailleurs que les évènements exceptionnels pouvant provoqué des débordements de cours d'eau sont subvenus des années 1987 et 2016. L'analyse des indices SDI montre qu'en moyenne, les sécheresses hydrologiques sur le bassin béninois du fleuve Niger se verront à la hausse à 36 mois et à la baisse à 12 mois du SDI. En fait, ces faibles variations des SDI seront accompagnées de l'augmentation de leurs durées et la baisse de leurs magnitudes. Les sécheresses détectées sur le bassin béninois du fleuve Niger au cours de la période historique vont se poursuivre jusqu'en 2080 dans la même gamme mais avec des longueurs de sécheresses plus étendues.

Il faut noter que la plupart des changements observés sur les indices calculés et analysés ne sont pas significatifs.

Cette recherche qui a caractérisé la variabilité climatique et dynamique des évènements hydrométéorologiques dans le bassin béninois du fleuve Niger apporte des éléments qui permettront de prendre conscience des effets des changements climatiques sur ledit bassin. Son utilité se trouve dans le fait qu'elle aborde les extrêmes qui sont souvent source de catastrophes naturelles dont les inondations. Par ailleurs, elle prévoit le devenir de ces extrêmes à moyen et long terme sur le bassin.

Perspectives

Il serait très intéressant qu'à l'avenir nous prenions en compte :

- les températures pour étudier les sécheresses qu'elles soient météorologiques ou hydrologiques
- les caractéristiques dynamiques réelles du bassin versant ainsi que les facteurs de pressions anthropiques
- la totalité du bassin du fleuve Niger pour maîtriser la diversité de l'ensemble des variables, ce qui favorisera leurs cartographies et la détermination des systèmes d'alerte qu'il faut pour chacune d'elles.

Références bibliographiques

- Abramowitz, M. & Stegun, I. A. (1965), Handbook of Mathematical Formulas, Graphs, and Mathematical Tables. *Dover Publications (eds)* : New York, 1046p.
- Adam K S., Boko M., (1993), Le Bénin. Paris, *Edicef*, 2ème édition, 93 p.
- Adjinacou C., Onibon H., (2004), Etude multisectorielle pour le développement durable dans la portion béninoise du bassin du fleuve Niger : analyse des opportunités et des contraintes. *Autorité du Bassin du fleuve Niger (ABN)/DG-Eau*, Cotonou, 176 p.
- Afouda A., Lawin E., et Lebel Th., (2004), A stochastic Streamflow Model based on Minimum Energy Expenditure Concept. In contemporary Problems in Mathematical Physics: Proceeding 3rd Intern. Workshop. *Word Scientific Publishing Co. Ltd.* pp 153 - 169.
- Afouda A, et Alamou E., (2010), Modèle Hydrologique basé sur le Principe de moindre action (MODHYPMA). *Annales des Sciences Agronomiques du Bénin*.
- Agli H., (1995), Recherches sur la variabilité pluviométrique dans le bassin-versant du Niger au Bénin. Mémoire du DEA "*climats et contraintes climatiques*", Centre de Recherche de Climatologie, Dijon, 48 p.
- Aka A., Servat E., Paturol J.E., Kouamé B., and Lubes H. & Masson, J.M. (1996): Analysis of the temporal variability of runoff in Ivory Coast: statistical approach and phenomena characterization, *Hydrological Sciences Journal*, 41(6), 959–970.
- Alamou E., (2011), Application du Principe de Moindre Action à la Modélisation Pluie-débit, thèse de Doctorat, Université d'Abomey Calavi, 231 pages & Annexes
- Allen R.G., L. Pereira, Raes D. and Smith M., (1998), Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop waters requirements – *FAO irrigation and drainage paper 56*; chapters 1, 2, 3 & 4, annex 3& 5. (www.fao.org/docrep/x0490E/x0490e00.htm)
- Alexander L., Zhang X., Peterson T., Caesar J., Gleason B., Klein Tank A., Haylock M., Collins D., Trewin B., Rahimzadeh F., Tagipour A., Ambenje P., Rupa Kumar K., Revadekar J., Griffiths G., Vincent L., Stephenson D., Burn J., Agui-lar E., Brunet M., Taylor M., New M., Zhai P., Rusticucci M., and Vazquez-Aguirre J. (2006), Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 111 no. D05109 . doi: 10.1029/2005JD006290.
- Ambroise B., (1999), “La dynamique du cycle de l’eau dans un bassin versant : processus, facteurs, modèles”. *Bucarest, Roumanie* : Editions HGA, 200p.
- Angelidis P., F.Maris, N.Vlassiois, (2011), Computation of Drought index SPI with Alternative distribution function, international journal of climatology, Vol. 26(9), pp 28-30
- Badou F. D., (2016), Multi-model evaluation of blue and green water availability under climate change in four-non Sahelian basins of the Niger river basin, thèse de Doctorat, *University of Abomey-Calavi (UAC)*, Institut National de l’Eau (INE), 155p.
- Batablinle L., Lawin A.E. et Celestin M., (2019), Future extremes temperature and rainfall : trends and changes assessment over the mono river basin in west Africa, XXXIIème Colloque Internationale de l’AIC, Thessaloniki - Grèce 29 mai au 1 juin 2019. pp9-14

- Benyahya L., A. Daigle, D. Caissie, D. Beveridge et A. St-Hilaire (2009), Caractérisation du régime naturel du débit des bassins versants de l'Est du Canada. *INRS-ETE, rapport R1057*, 88 pages.
- Beven K.J. (2012), *Rainfall-runoff modelling : the primer*. Wiley-Blackwell, Chichester, West Sussex ; *Hoboken, NJ*, 2nd ed edn.
- Bio Bigou L. B., (1987), *La vallée bénino-nigérienne du fleuve Niger : Population et développement économique*. Thèse de Doctorat (nouveau régime), 2 volumes. *Université de Bourgogne*, Dijon, 917 p.
- Boko M., (1988), *Climats et communautés rurales du Bénin. Rythmes climatiques et rythmes de développement*. Thèse d'Etat, *Paris IV*, 2 volumes, 608p.
- Bricquet J. P., Mahé G., Bamba F. et Olivry J. C. (1996), Changements climatiques récents et modification du régime hydrologique du fleuve Niger à Koulikoro (Mali). In: *Tropical Hydrology: a Geoscience and a Tool for Sustainability* (ed. by P. Chevallier & B. Pouyaud), 157–166. IAHS Publ. 238. IAHS Press, Wallingford, UK. <http://www.iahs.info/redbooks/238.htm>.
- Brown J. F., B. D. Wardlow, T. Tadesse, M. J. Hayes et B. C. Reed, (2008), «The Vegetation Drought Response Index (VegDRI): a new integrated approach for monitoring drought stress in vegetation», *GIScience & Remote Sensing*, 45:16–46.
- Brown O. et Crawford A., (2008), *Évaluation des conséquences des changements climatiques sur la sécurité en Afrique de l'Ouest, Étude de cas national du Ghana et du Burkina Faso*, *Institut international du développement durable*, 74pp.
- Brunet-Moret Y., Chaperon P., Lamagat J. P. & Molinier M. (1986), *Monographie hydrologique du fleuve Niger, Tome I: Niger supérieur*. Coll. monog. Hydrol. no. 8, ORSTOM, Paris, 396 p.
- Camara M., Arona D., Bamol A. S., Mamadou D. D., Samo D., Ibrahima M. et Ismaila D., (2013), *Analyse de la pluie simulée par les modèles climatiques régionaux de CORDEX en Afrique de l'Ouest*, *Sécheresse* ;vol 24, 17pp
- Cheikh F., Amadou A. S. et Jean B. N., (2015), *Étude des sècheresses pluviométriques et hydrologiques en Afrique tropicale : caractérisation et cartographie de la sècheresse par indices dans le haut bassin du fleuve Sénégal*, *Physio-Géo*, Vol 9, Varia 2015, 19p
- Christensen J. H, Hewitson B, Busuioc A, Chen A, Gao X, Held I. (2007), *Regional Climate Projections*. In : *Climate Change 2007: The physical Sciences Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M and HL Miller (eds.) *Cambridge University Press : Cambridge*, New York, 847-940. <https://www.ipcc-wg1.unibe.ch/publications/wg1-ar4/ar4-wg1-chapter11.pdf>.
- Christensen O.B., Drews M., Christensen J.H., (2006). *The HIRHAM regional climate model version 5*. *DMI Tech. Rep.*, 06-17 :22.
- Conway D. & Mahé G. (2009), *Riverflow modelling in two large river basins: the Parana (subtropical) and the Niger (tropical)*. *Hydrol. Processes* 23(22), 3186–3192.

- Dao A. (2007). Etude des pluies journalières Extrêmes de la Côte d'Ivoire, Mémoire de DEA, 62p.
- Davide S., (2016), Analyse des tendances passées et futures de variables météorologiques pour des stations de mesure de moyenne et haute altitude en suisse, 3e année BSc, TRP, septembre 2015-juillet 2016, 74p.
- De Longueville F., Y. C. Hountondji, I. Kindo, F. Gemenne & P. Ozer (2016), Long-term analysis of rainfall and temperature data in Burkina Faso (1950–2013). *International Journal of Climatology*, 36: 4393- 4405
- De Souza S., (1988), Noms des plantes dans les langues nationales béninoises. Cotonou (RP du Bénin), tome I et II, 294 pages
- Diallo I, Giorgi F, Deme A, Tall M, Mariotti L, and Gaye A.T. (2016), Projected changes of summer monsoon extremes and hydroclimatic regimes over West Africa for the twenty-first century,” *Climate Dynamics*, 2016.
- Dingman, S.L. (1992), Physical Hydrology. *Waveland press edn*. Ed 3, 644p.
- Edwards D.C. & McKee, T.B. (1997), Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple scales. *Climatology Report 97-2*, Department of Atmospheric Science, *Colorado state University*, 634:1–30.
- FAO (1998), Crop Evaporation – Guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage paper; Rome (Italy), 56, <http://www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm>.
- Faye C. (2013), - Évaluation et gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de variabilité hydroclimatique : cas du bassin versant de la Falémé. Thèse de Doctorat, l'Université Cheikh Anta DIOP de Dakar, FLSH, *Département de Géographie*, 309 p.
- Fontaine B., (1990), Etude comparée des moussons indienne et ouest africaine. Caractéristiques, variabilité et télé connexion. Thèse d'état de l'Université de Bourgogne, *Dijon*, 233
- Frich P, Alexander L. V., Della-Marta P., Gleason B., Haylock M., Klein Tank A. M. G., et Peterson T. (2002), Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Climate Res*, 19:193–212
- Gbatcho A. M., (1992), Contribution à l'étude des rythmes pluviométriques et hydrologiques du bassin de l'Ouémé au pont de Savè, Mémoire de maîtrise de géographie, *Université Nationale du Bénin*. FLASH/DGAT, 68 p.
- Gaba O. U. C., Biao I. E., Alamous A. E., and Afouda A., (2015), An Ensemble Approach Modelling to Assess Water Resources in the Mékrou Basin, Benin. *Hydrology*. Vol. 3, No. 2, pp. 22-32. doi : 10.11648/j.hyd.20150302.11.
- Ghenim Abderahmane Nekkache & Megnounif Abdessalem, (2011), Caractérisation de la sécheresse par les indices SPI et SSFI (nord-ouest de l'Algérie), *Revue scientifique et Technique*, LJEE N°18, Juin 2011, 20p

- GICC – RexHySS (2011), Résultat de projet, programme piren-seine, Programme Interdisciplinaire de Recherche sur l'Environnement de la Seine, Impact du changement climatique sur les ressources en eau du bassin versant de la Seine, 49p.
- GIEC, (2007). Changements Climatiques 2007. 114 p.
- Giguère M. et Gosselin P., (2006), Eau et santé: examen des initiatives actuelles d'adaptation aux changements climatiques au Québec. 28pp
- Gnanglè C. P., Romain G. K., Achille E. A., Samuel V., Jacob A. Y. et Nestor S. (2011), Tendances climatiques passées, modélisation, perceptions et adaptations locales au Bénin. *climatologie*, Vol. 8 (2011), 14p.
- Gnedenko B. (1943), Sur la distribution limite du terme maximum d'une série aléatoire. *Ann.Math.*, 44 :423–453.
- Graham L. P., J. Andréasson and B. Carlsson (2007), Assessing climate change impacts on hydrology from an ensemble of regional climate models, model scales and linking methods—A case study on the Lule River basin, *Clim. Change*, 81(S1), 293–307
- Guttman N. B., (1994), On the sensitivity of sample L moments to sample size. *Journal of Climate*, 7(6):1026–1029.
- Hache M., Perreault L., Remillard L. & Bobbée B., 1999: Une approche pour la sélection des distributions statistiques : application au bassin hydrographique du Saguenay Lac St Jean, *Revue Canadien de Génie Civil*. 26 (2), 216-225.
- Hayes M., M. Svoboda, N. Wall et M. Widhalm, (2011), «The Lincoln Declaration on Drought Indices: universal meteorological drought index recommended», *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92(4):485–488.
- Haylock M.R., Peterson T., Abreu De Sousa J.R., Alves L.M., Ambrizzi T., Anunciação Y.M.T., Baez J., Barbosa De Brito J.I., Barros V.R., Berlato M.A., Bidgain M., Colonel G., Corradi V., Garcia V.J., Grimm A.M., Jaido Dos Anjos R., Karoly D., Marengo J.A., Marino M.B., Meira P.R., Miranda, J.C., Molion L., Moncunill D.F., Nechet D., Ontaneda G., Quintana J., Ramirez E., Rebello E., Rusticucci M., Santos J.L., Trebejo I. & Vincent L. (2006). Trends in total and extreme South American rainfall in 1960-2000 and links with sea surface temperature. *Journal of climate*, 19: 1490-1512.
- Haylock M., (2004), STARDEX Core Indices, STARDEX Diagnostic Extremes Indices Software, *Version 3.3.1 updated 2nd June 2004*. 1p.
- Haythem B., (2015), Etude des tendances et des projections climatiques en Tunisie, *Institut National de la Météorologie (INM), Direction de recherche et développement* 44p.
- Halissou Yarou, Ezéchiél Obada, Eliezer I. Biao, Djigbo Félicien Badou et Eric Adéchina Alamou, (2019), Variabilité des extrêmes pluviométriques récents dans le bassin béninois du fleuve Niger (1960-2016), BÉNIN, *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, 34 (2019) 112 – 126., ISSN 1813-3290, <http://www.revist.ci>
- Heim R. R. Jr et Brewer M. J. (2012), The global drought monitor portal: The foundation for a global drought information system. *Earth Interactions* 16, 1–28 (2012).

- Hubert P., Carbonnel J. P., Chaouche A., (1989), Segmentation des séries hydrométéorologiques - Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest. *Hydrol.*, 110, 349-367.
- Hyndman R.J. and Y. Fan (1996), Sample quantiles in statistical packages. *The American Statistician*, 50, 361-367.
- INSAE, (2013), Effectifs de la population des villages et quartiers de ville du Bénin (RGPH-4, 2013), 33p.
- INSAE, (2002), : Recensement général de la population et de l'habitation. *Cotonou*, 47p.
- Intergovernmental Panel on Climate Change, février (2007), Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report, Summary for Policymakers, 18 pages.
- IPCC, (2013), : Changements climatiques en 2013, Les éléments scientifiques, résumé à l'intention des décideurs, service d'appui technique du groupe de travail I GTI, https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/docs/WG1AR5_SPM_brochure_fr.pdf, 34.
- IPCC (2007) Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, pp 391-431.
- Jacob D., Bärring L., Christensen O. B., Christensen J. H., Hagemann S., Hirschi M., Kjellström E., Lenderink G., Rockel B., Schär C., Seneviratne S. I., Somot S., Van Ulden A., Van den Hurk B., (2007), An inter-comparison of regional climate models for Europe : design of the experiments and model performance. *Clim Change*, 81 :31-52.
- Jones P. D. and Hulme M., (1996), Calculating regional climatic time series for temperature and precipitation: Methods and illustrations. *International Journal of Climatology*, 16, 361-377.
- Jones P. D., Horton E. B., Folland C. K., Hulme M., Parker D. E., (1999), The use of indices to identify changes in climatic extremes. *Clim Change* 1999, 42:131-149.
- Keetch J. J. and Byram G. M., (1968), A Drought Index for Forest Fire Control, United States Department of Agriculture Forest Service Research Paper SE-38, Southeastern Forest Experiment Station, *Asheville* (NC). 35p.
- Kiktev D., Sexton D., Alexander L. and Folland C. (2003), Comparison of modeled and observed trends in indices of daily climate extremes. *Journal of Climate*, 16 :3560- 3571.
- Klein Tank A. M. G. K. and Konnen G. P. (2003), Trends in indices of daily temperature and precipitation extremes in Europe, 1946-99. *J. Climate*, 16, 3665-3680.
- Kodja D. J., Batablinle L., Akognongbe A., Amoussou E., Mahe G., Vissin E. W., Paturel J. E. et Houndenou C., (2019), Rainfall and temperature changes in Oueme watershed by 2080 in west Africa, XXXIIème Colloque Internationale de l'AIC, Thessaloniki - Grèce 29 mai au 1 juin 2019.
- Kogan F. N., (1990), «Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas», *International Journal of Remote Sensing*, 11:1405-1419.

- Kogan F. N., (1997), «Global drought watch from space», *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78:621–636.
- Kogan F. N., (2001), «Operational space technology for global vegetation assessments», *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82(9):1949–1964.
- Koudamilaro O., Vissin E.W., Sintondji L.O. et Houssou C.S, (2015), Effets socio-économiques et environnementaux des risques hydroclimatiques dans le bassin versant du fleuve Ouémé à l'exutoire de Bétérou au Bénin (Afrique de l'ouest), *XXVIIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Liège 2015, 6pp
- Kumar R., Samaniego L. & Attinger S. (2013), Implications of distributed hydrologic model parameterization on water fluxes at multiple scales and locations. *Water Resources Research* 49, 360–379.
- Kuper M., Mullon C., Poncet Y. & Benga E. (2003), Integrated modelling of the ecosystem of the Niger river inland delta in Mali. *Ecol. Model.* 164(1), 83-102.
- Lafon T., Dadson S., Buys G. and Prudhomme C., (2013), Bias correction of daily precipitation simulated by a regional climate model : a comparison of methods. *International Journal of Climatology*, 33 (6). 1367-1381
- Lamb P. J., (1982), Persistence of sub-Saharan drought. *Nature*, 299, 46-48.
- Le Barbe L., Ale G., Millet B., Texier H. et Borel Y., (1993), Monographie des ressources en eaux superficielles de la République du Bénin. Paris, *ORSTOM*, 540 p.
- Le Barbe L. et Borel Y., (1987), Historique, description et étalonnage des stations hydrométriques de la République du Bénin. *Montpellier, ORSTOM*, 148 p.
- Lessard L., (1964), Hydrogéologie du bassin sédimentaire de Kandi. *Cotonou, ONU/PNUD*, 84p.
- Lienou G., Mahé G., Dieulin C., Paturel J. E., Bamba F., Sighomnou D. & Dessouassi R. (2010), The River Niger water availability: facing future needs and climate change. In: *Global Change: Facing Risks and Threats to Water Resources* (ed. by E. Servat, S. Demuth, A. Dezetter & T. Daniell), 637–645. *IAHS Publ.* 340. IAHS Press, Wallingford, UK.
- Linsley R. & Crawford N. H. (1960), Computation of a synthetic streamflow record on a digital computer. *International Association of Scientific Hydrology* 51, 526–538.
- Luterbacher J., Dietrich D., Xoplaki E., Grosjean M. and Wanner H. (2004), European seasonal and annual temperature variability, trends, and extremes since 1500. *Science*, 303p., 1499-1503, doi: 10.1126/science.1093877
- Ly M., Traoré S. B., Alhassane A. et Sarr B. (2013), Evolution of Some Observed Climate Extremes in the West African Sahel. *Weather and Climate Extreme*, 19–25, <http://dx.doi.org/10.1016/j>.
- Mahamoud A., Laminou M. O. et Ozer P. (2013), Evolution récente des extrêmes pluviométriques et des températures à Djibouti, 1p

- Mahé G., G. Lienou, F. Bamba, J. E. Paturel, O. Adeaga, L. Descroix, A. Mariko, J. C. Olivry, S. Sangare, A. Ogilvie & J. C. Clanet, (2011), Le fleuve Niger et le changement climatique au cours des 100 dernières années, *Hydro-climatology: Variability and Change* (Proceedings of symposium J-H02 held during IUGG2011 in Melbourne, Australia, July 2011) (*IAHS Publ.* 344, 2011), 7p.
- Mahé G. & Paturel J. E. (2009), 1896–2006 Sahelian rainfall variability and runoff increase of Sahelian rivers. *C. R. Geosciences* 341, 538–546.
- Maïga Housseini, Jérôme Marie, Pierre Morand, Hamady N'djim et Didier Orange (2007), *Avenir du fleuve Niger, Présentation du fleuve Niger*, 103p.
- McKee T. B., Doesken N. J. & Kleist J. (1993), The relationship of drought frequency and duration at time scales. *Eighth Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society*, Jan 17-23, Anaheim CA, 179-186.
- Ministère de l'eau du Québec, (2015), *Lignes directrices pour l'estimation des débits d'étiage sur le territoire Québécois*, 11p
- Modarres R., (2007), «Streamflow drought time series forecasting», *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 21:223–233.
- Mohammed L., (2008), Calcul des indicateurs de sécheresse à partir des images NOAA/AVHRR, *Technical Report*, Projet de Mise en place d'un Système d'Alerte précoce à la Sécheresse dans trois pays de la rive Sud de la Méditerranée: Algérie, Maroc, et Tunisie LIFE05 TCY/TN/000150, 38p.
- Moisselin J.M. et Dubuisson B., (2006), Évolution des valeurs extrêmes de température et de précipitations au cours du XXe siècle en France, *La Météorologie* - n° 54, 10p.
- Moore K., Pierson D., Pettersso K., Schneiderman E. and Samuelsson P., (2008), Effects of warmer world scenarios on hydrologic inputs to Lake Mälaren, Sweden and implications for nutrient loads. *Hydrobiologia*, 599, 191-199.
- Moustapha Tall1, Mouhamadou Bamba Sylla, Ismaïla Diallo, Jeremy S. Pal, Aïssatou Faye, Mamadou Lamine Mbaye et Amadou Thierno Gaye, (2017), Projected impact of climate change in the hydroclimatology of Senegal with a focus over the Lake of Guiers for the twenty-first century, *Theor Appl Climatol* (2017) 129:655–665 DOI 10.1007/s00704-016-1805-y
- Mulligan M., Saenz Cruz L. L., Pena-Arancibia J., Pandey B., Mahe G. & Fisher M. (2011), Water availability and use across the Challenge Program on Water and Food (CPWF) basins. *Water Intitut.* 36(1), 17–41
- Nalbantis I. et Tsakiris G., (2008), «Assessment of hydrological drought revisited», *Water Resources Management*, 23(5):881–897.
- New M., Todd M., Hulme M. and Jones P., (2001), Precipitation measurements and trends in the twentieth century. *International Journal of Climatology*, 21(15), 1889-1922.
- New M., Bruce H., David B. S., Alois T., Andries K., Atanasio M., Bernard G., Caio A. S. C., Dorcas N. M., Elina K., Ernest M., Francis A., Hemed S., Joseph K., Juliana A., Lebohang

- B., Lubega F., Marshall L. M., and Robert L., (2006), Evidence of trends in daily climate extremes over southern and west Africa, *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, Vol. 111,
- Obada E. (2017), Approche de quantification des changements récents et futurs de quelques paramètres hydro-climatiques dans le bassin de la Mékrou (Bénin), *Université d'Abomey-Calavi (Bénin)*, Thèse de Doctorat, 212p
- Ogilvie A., Mahé G., Ward, S., Lemoalle, J., Morand, P., Barbier, B., Diop, T., Caron, A., Namarra, K., Lukasiewicz, A., Paturel, J. E., Liénou, G. & Clanet, J. C. (2010), Water, agriculture and poverty in the Niger River basin. *Water Intitut.* 35(5), 594–622.
- Oguntundé G. P., Lischeid G., Abiodun J. B. et Dietrich O., (2016) Analysis of long-term dry and wet conditions over Nigeria, *Journal international de climatologie*, vol 37, N°9,
- OMM, (2013), Déclaration de l'OMM sur l'état du climat en 2012, 1119, 15 p.
- OMM et GWP, (2016), Manuel des indicateurs et indices de sécheresse, Programme de gestion intégrée des sécheresses, OMM-N° 1173, 52p
- Osborn T. J. and Briffa K. R. (2006), Simulations, observations and palaeoclimatic data: climate variability over the last 500 years. Final report to the EU of the SO&P project (EVK2-CT-2002-00160), *Climatic Research Unit, University of East Anglia, Norwich, UK.* 34p.
- Ozer P., Ousmane L. M., Adamou D. T., Bakary D. & De Longueville F., (2017), Evolution récente des extrêmes pluviométriques au Niger (1950-2014), *Geo-Eco-Trop.*, 41, 3, n.s. : 375-383, Numéro spécial, 10pp
- Ozer P., Hountondji Y.C., Niang A.J., Karimoune S., Laminou Manzo O., Salmon M., (2010), Désertification au Sahel : historique et perspectives. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 54, 69-84.
- Padgham J., Jabbour J., and Dietrich K., (2015), Managing change and building resilience : A multi-stressor analysis of urban and peri-urban agriculture in Africa and Asia. *Urban Climate*, 12, 183-204
- Palmer W.C., (1965), Meteorological Drought, Research Paper No. 45. *United States Weather Bureau, Washington.* 65p.
- Paturel J. E., Servat E., Brou K. et Boyer J. F. (1995), Manifestations de la sécheresse en Afrique de l'Ouest non sahélienne. Cas de la Côte d'Ivoire, du Togo et du Bénin, *Sécheresse*, no 1, vol. 6. 9p.
- Paturel J. E., Barrau C., Mahé G., Dezetter A. & Servat E. (2007), Modelling the impact of climatic variability on water resources in West and Central Africa from a non-calibrated hydrological model. *Hydrol. Sci. J.* 52(1), 38–48
- Perrin C., Michel C. & Andréassian V. (2003), Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology* 279, 275–289.
- Pettitt A. N., (1979), A non-parametric approach to the change-point problem. *Appl. Statist.*, 28(2), 126-135

- Poncelet C., (2016), Du bassin au paramètre : jusqu'où peut-on régionaliser un modèle hydrologique conceptuel, Thèse de Doctorat, *Université Pierre et Marie Curie*, 366p.
- Poff N.L., J.D. Allan, M.B. Bain, J.R. Karr, K.L. Prestegard, B.D. Richter, R.E. Sparks and J.C. Stromberg, (1997), The natural flow regime. *BioScience* 47: 769-784.
- Pushpalatha Raji, (2013), Simulation et prévision des étiages sur des bassins versants français : approche fondée sur la modélisation hydrologique, thèse de doctorat, *École doctorale Géosciences et Ressources naturelles*, 246p
- Qiang Z., Peng S., Jianfeng L., Mingzhong X. & Vijay P. S., (2014), Assessment of drought vulnerability of the Tarim River basin, Xinjiang, China, *Theoretical and Applied Climatology*, 12p.
- R. Balliet, B. S. Mahaman, L. A. E. Evrade, M. V. Sorokoby, H. V. N'Guessan B. I., A. O. N'Dri, B. K. Dje et J. Biemi, (2016), Évolution des extrêmes pluviométriques dans la région du Gôh (Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire), *European Scientific Journal*, Vol. 12, N°23 74 – 87pp
- Roche M. (1971), Les divers types de modèles déterministes. *La Houille Blanche*, N°2, pp. 111–130.
- Rousseau M, Billen G, Mouchel J-M et Martin D. (2011), Impact du changement climatique sur les ressources en eau du bassin versant de la Seine. 2011. 49 pp.
- Samaniego L., Kumar R. & Attinger S. (2010), Multiscale parameter regionalization of a grid-based hydrologic model at the mesoscale. *Water Resources Research* 46, 25p.
- Sangaré S., Mahé G., Paturol J. E. & Bangoura Y. (2002), Bilan hydrologique du fleuve Niger en Guinée de 1950 à 2000. *Sud Sciences et Technologies*, EIER, Ouagadougou 9, 21–33
- Sarr A. B. et Camara M., (2017), Evolution Des Indices Pluviométriques Extrêmes Par L'analyse De Modèles Climatiques Régionaux Du Programme CORDEX: Les Projections Climatiques Sur Le Sénégal, *European Scientific Journal*, Vol.13, No.17 17p.
- Sarr M. A. (2009), - Évolution récente du climat et de la végétation au Sénégal (cas du Ferlo). Thèse de Doctorat de l'Université Jean Moulin - Lyon 3, 410 p.
- Serhat S., Necla T., Alper A., Mithat E., Yusuf U., Mesut D., Hakkı A., Arzu T. et Hatice D., (2013), Trends in turkey climate indices from 1960 to 2010, *6th Atmospheric Science Symposium, Turkey from*, 24 -26 April 2013.
- Sharma T. C. (1997), Estimation of drought severity on independent and dependant hydrologic series. *Water Resources Management*, 11p., 35-49.
- Siegel S. (1956): Non-parametric statistics for the behavioral sciences, New York: McGraw-Hill, *J.Hydrol.*83, 202-213
- Somsubhra C., Dwayne R. E., Yao Y. & Ali H., (2017), An Assessment of Climate Change Impacts on Future Water Availability and Droughts in the Kentucky River Basin, *Environment. Process.* 30p.

- Soubeyroux J.M., Vidal P.P., Baillon M., Blanchard M., Céron J.P., Franchistéguy L., Régimbeau F., Martin E, Vincendon J.C., (2010), Caractérisation et prévision des sécheresses et étiages en France à partir de la chaîne hydrométéorologique Safran-Isba-Modcou. *La Houille Blanche*, N° 5-, 10 p.
- Sperna Weiland F. C., L. P. H. Van Beek J. C. J. Kwadijk and M. F. P. Bierkens (2010), The ability of a GCM-forced hydrological model to reproduce global discharge variability, *Hydrol. Earth System Science*, 14(8), 1595–1621.
- Spinoni J., Paulo B., Edoardo B., John C., Tereza C., Jens H. C., Ole B. C., Erika C., Jason E., Beate G., F. G., Panos H., Daniela J., Jack K., Torben K., René L., Christopher J. L., M. Levent K., Delei L., Marta L., Niall M., Gustavo N., Grigory N., Tugba O., Hans-Juergen P., Rosmeri P. D. R., Burkhardt R., Silvina A. S., Jozef S., Fredolin T., Claas T., Robert V., Jürgen V. V., Katja W., George Z. And Alessandro D., (2020), Future Global Meteorological Drought Hot Spots: A Study Based on CORDEX Data, *Journal of Climate*, 27p.
- Spinoni J., Naumann G., Carrao H., Barbosa P. and Vogt J., (2013): World drought frequency, duration, and severity for 1951-2010. *International Journal of Climatology*, 34: 2792-2804.
- St-Hilaire, A., A. Daigle, D. Beveridge, D. Caissie et L. Benyahya. (2009), Analyse multivariée des indices d'altération hydrologique de l'Est du Canada. *INRS-ETE, rapport de recherche R1058*, 43 pages.
- Sylla M. B., Gaye A. T., Jenkins G. S (2012), On the fine-scale topography regulating changes in atmospheric hydrological cycle and extreme rainfall over West Africa in a regional climate model projections. *International Journal of Geophysics*, 981649. doi:10.1155/2012/981649.
- Sylla M. B., Elguindi N., Giorgi F., and Wisser D., (2016), Projected robust shift of climate zones over West Africa in response to anthropogenic climate change for the late 21st century. *Climatic Change*, 134(1), 241-253
- Taylor C. M., Belušić D., Guichard F., Parker D. J., Vischel T., Bock O., Harris P. P., Janicot S., Klein C. & Panthou G., (2017), Frequency of extreme Sahelian storms tripled since 1982 in satellite observations. *Nature*, 544: 475-478.
- Telesca L., M. Lovallo, I. Lopez-Moreno et S. Vicente-Serrano, (2012), «Investigation of scaling properties in monthly streamflow and Standardized Streamflow Index time series in the Ebro basin (Spain)», *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 391(4):1662–1678.
- Toudja A., (2017), contribution sur la modélisation pluie- débit par le modèle gr sur bassin versant de l'oued Sebaou (implementation sous logiciel R), mémoire de Master, *Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique -Arbaoui Abdellah-*, 84p
- Tramblay Y, Gachon P., Saint-Hilaire A. et Chaumont D. (2005), Variabilité et extrêmes de température et de précipitation entre 1941 et 2000 : le cas du golfe du fleuve saint laurent. *INRS-ETE, rapport de recherche R-805*, 52p.
- Vissin E. W., (2007), Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger, Thèse de Doctorat, 310p.

- Vissin E. W., Boko, M., Perard J., Houndenou C., (2003), Recherche de ruptures dans les séries pluviométriques et hydrologiques du bassin béninois du fleuve Niger (Bénin, Afrique de l'Ouest). *Association Internationale de Climatologie*, Besançon. Vol 15, p. 368-376
- Vissin E. W., (2001), Contribution à l'étude de la variabilité des précipitations et des écoulements dans le bassin béninois du fleuve Niger. Mémoire de DEA *Université de Bourgogne, Dijon, France*, 53 p.
- Vissin E. W., (1998), Contribution à l'étude du fonctionnement hydrologique du bassin de la Sota. Mémoire de Maîtrise, *Université d'Abomey-Calavi, Abomey-Calavi*, 123 pages.
- Xinyang Y., Gengxing Z., Weijun Z., Tingting Y. and Xiujie Y., (2017), Analysis of Precipitation and Drought Data in Hexi Corridor, Northwest China, *hydrology*, 12p
- Zengchao H., Amir A., Navid N. and Alireza F. (2014), Global integrated drought monitoring and prediction system, scientific data, SUBJECT CATEGORIES » *Water resources* » *Hydrology*, 10p
- Zhang X., Lisa A., Gabriele C. H., Philip J., Albert K. T., Thomas C. P., Blair T. and Francis W. Z. (2011), Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data, *Advanced Review*, 20p
- Zhang, X., G. Hegerl, F.W. Zwiers, and J. Kenyon, (2005), Avoiding inhomogeneity in percentile-based indices of temperature extremes. *Journal of Climate*, 18 :1641– 1651.
- Zhang Xuebin and Yang Feng, (2004), RCLimDex (1.0), User Manual, Climate Research Branch, Environment Canada, *Downsview, Ontario, Canada* 23p
- Zhao C., Brissette F., Chen J. and Martel J.-L. (2020), Evolution of future extreme drought frequency in two climate model large ensembles, *EGU General Assembly 2020, Online*, 4–8 May 2020, EGU2020-11449, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-11449>, 2020
- Zhao Cha, Brissette François, Chen Jie and Martel Jean-Luc, (2019), Frequency change of future extreme summer meteorological and hydrological droughts over North America, *Journal of Hydrology*, 11p.

ANNEXES

Annexe 0.0 : Liste de publications

Publications

1. Halissou, Y., Eric, A. A., Ezéchiél, O., & Eliézer, B. I. (2021). Extreme Temperature Trends in the Beninese Niger River Basin (Benin). *American journal of Climate Change*, 10, 371-385. <https://doi.org/10.4236/ajcc.2021.104018>
2. Halissou Yarou, Ezéchiél Obada, Eliezer I. Biao, Djigbo Félicien Badou et Eric Adéchina Alamou, (2019), Variabilité des extrêmes pluviométriques récents dans le bassin béninois du fleuve Niger (1960-2016), BÉNIN, *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, 34 (2019) 112 – 126., ISSN 1813-3290, <http://www.revist.ci>

Contribution aux publications

1. Djevi Joseph Fanakpon, Yarou Halissou, Adamou Alfari Afani, Ahouantoume Geoffroy Et Yabi Ibouaraïma, (2018), Perception et adaptation des producteurs de coton à la variabilité pluviométrique dans la commune de Kouandé (au Bénin, Afrique de l'ouest), *Septembre 2018, vol.1 ISBN : 978-99919-822-6-7*

Annexe 0.1 : Stations météorologiques

Tableau 12 : Stations météorologiques

N°	Noms	Données	Longitudes	Latitudes
POSTES PLUVIOMETRIQUES				
1	Alfakoara	Pluies	3.07	11.45
2	Banikoara	Pluies	2.43	11.3
3	Bembèrèkè	Pluies	2.67	10.2
5	Djougou	Pluies	1.67	9.7
6	Ina	Pluies	2.73	9.97
7	Kalalé	Pluies	3.38	10.3
8	Karimama	Pluies	3.18	12.07
10	Kouandé	Pluies	1.68	10.33
11	Malanville	Pluies	3.4	11.87
12	Nikki	Pluies	3.2	9.93
13	Ségbana	Pluies	3.7	10.93
14	Tanguiéta	Pluies	1.27	10.62
STATIONS SYNOPTIQUES				

20	Kandi	Pluies, T, ETP	2.93	11.13
21	Natitingou	Pluies, T, ETP	1.38	10.32
22	Parakou	Pluies, T, ETP	2.6	9.35

Annexe 0.2 : Stations hydrologiques

Tableau 13 : Stations hydrologiques

N°	Noms	Données	Longitudes	Latitudes	Superficie (Km ²)
28	Couberi	Débit, Côte	3.326	11.737	13410
29	Gbassè	Débit, Côte	3.250	10.978	8300
30	Kompongou	Débit, Côte	2.1833	11.4	5670
31	Yakin	Débit, Côte	2.661	11.247	8170

Annexe 1 : Futurs indices d'intensité (2021-2050)

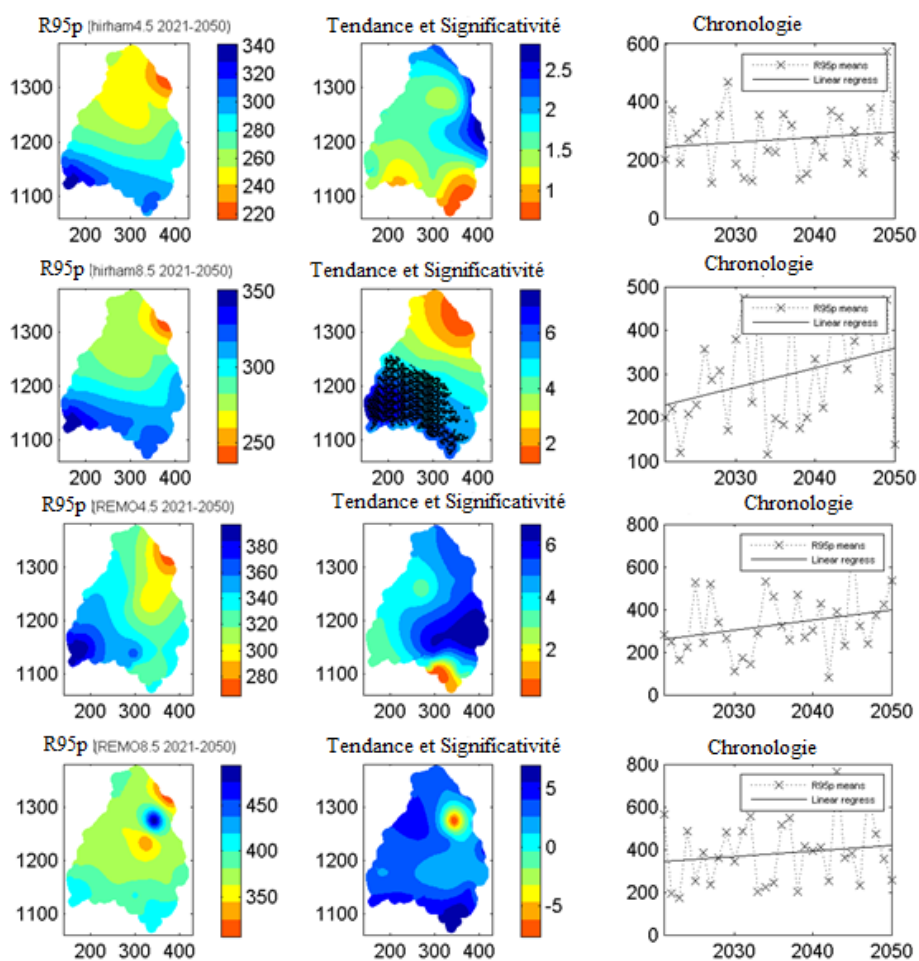


Figure 74 : Spatialisation des moyennes de R95p, sa tendance et la significativité (2021-2050).

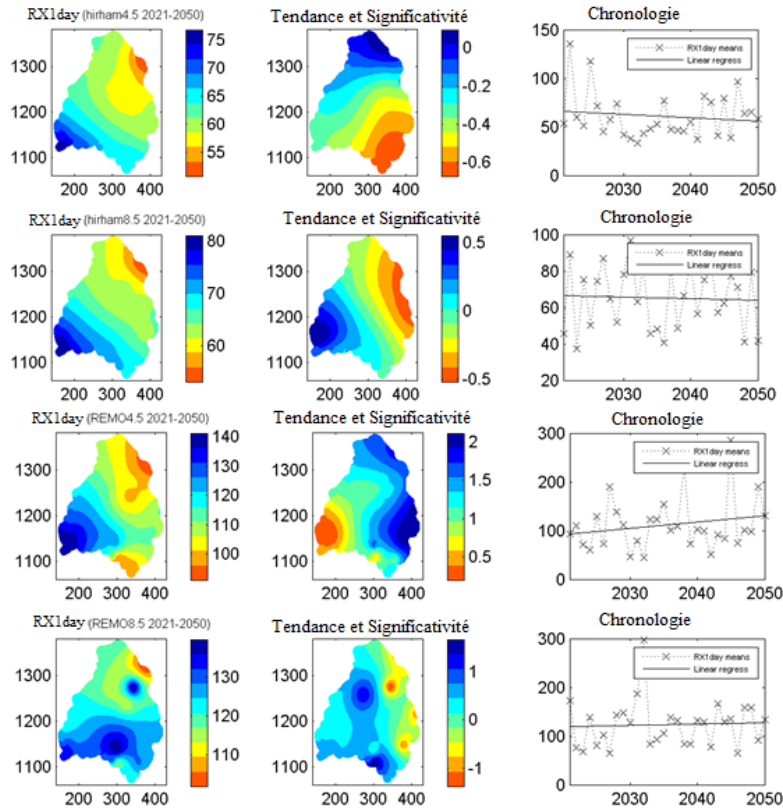


Figure 75: Spatialisation des moyennes de RX1day, sa tendance et la significativité (2021-2050).

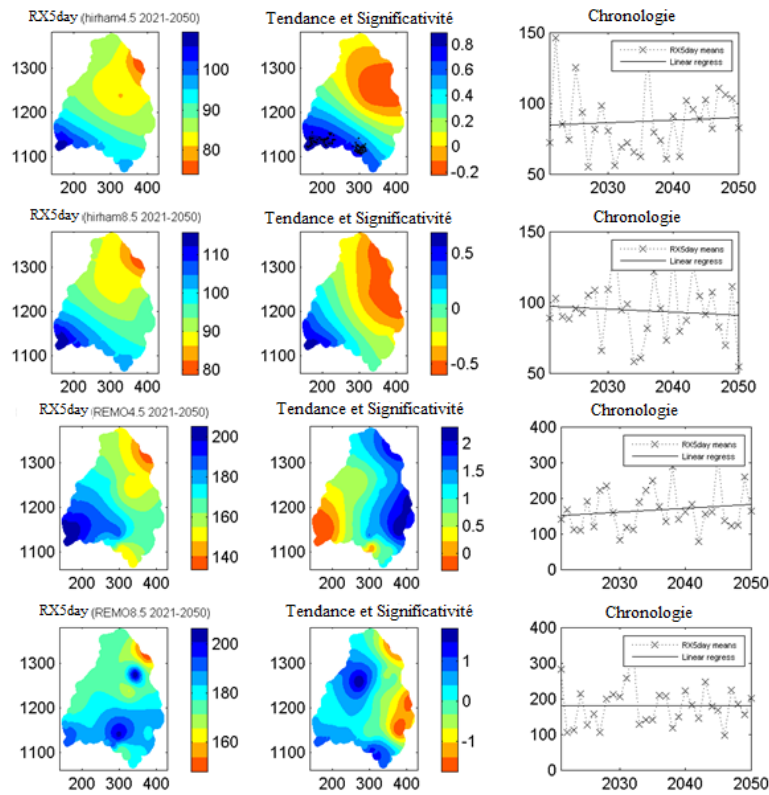


Figure 76 : Spatialisation des moyennes de RX5day, sa tendance et la significativité (2021-2050).

Annexe 2 : Futurs indices de fréquence (2021-2050)

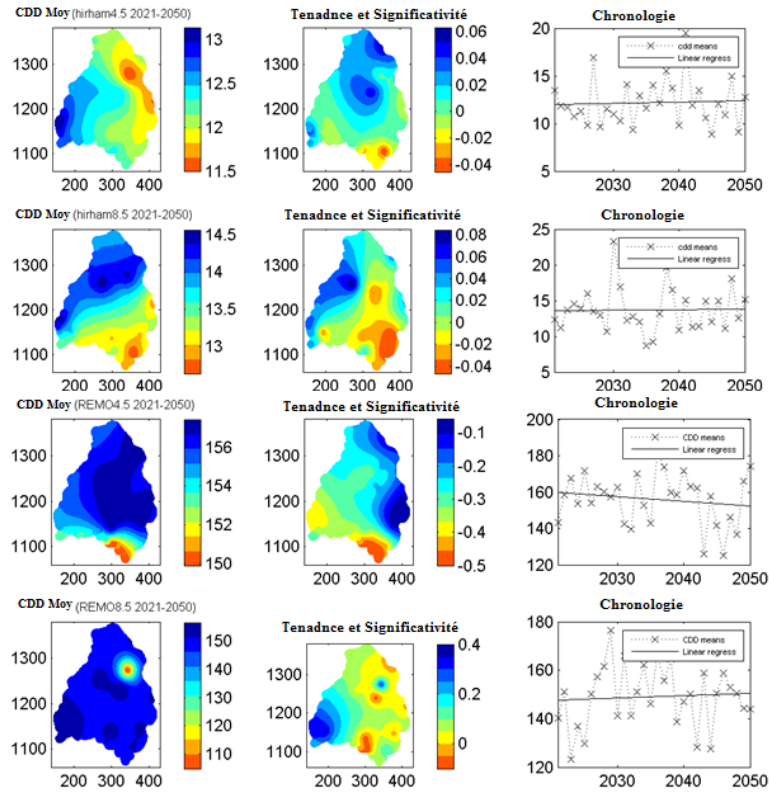


Figure 77 : Spatialisation des moyennes de CDD, sa tendance et la significativité (2021-2050).

Annexe 3 : Futurs indices d'intensité (2051-2080)

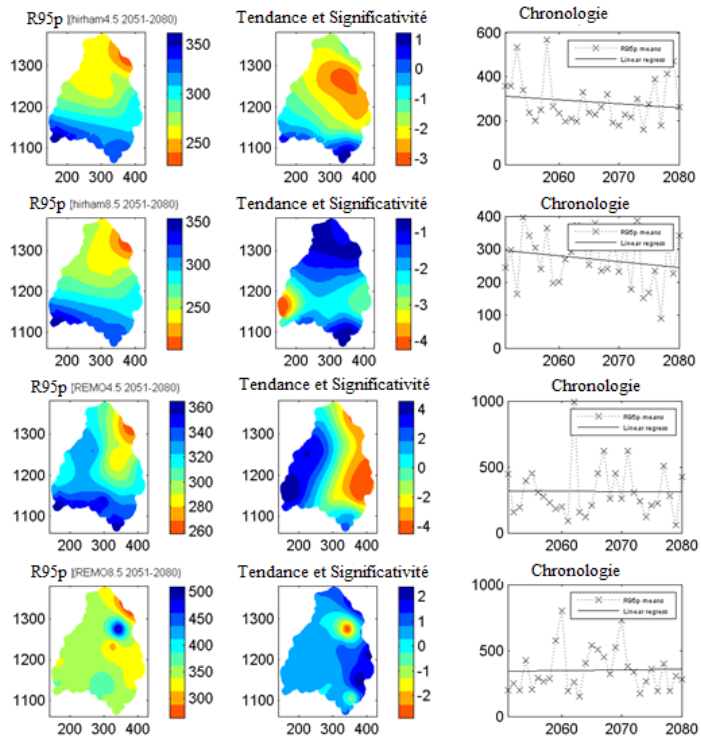


Figure 78 : Spatialisation des moyennes de R95p, sa tendance et la significativité (2051-2080).

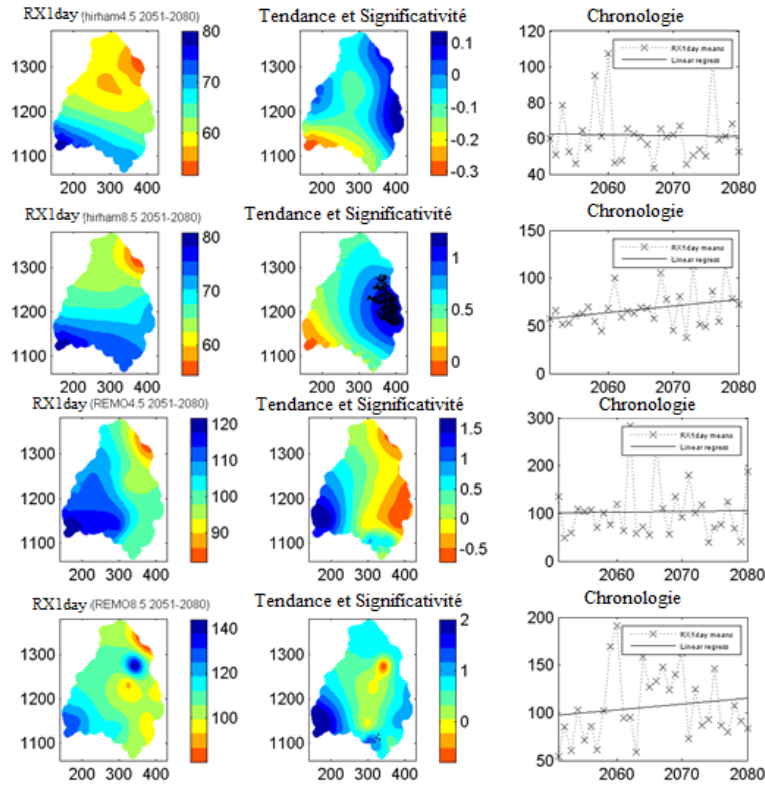


Figure 79 : Spatialisation des moyennes de RX1day, sa tendance et la significativité (2051-2080).

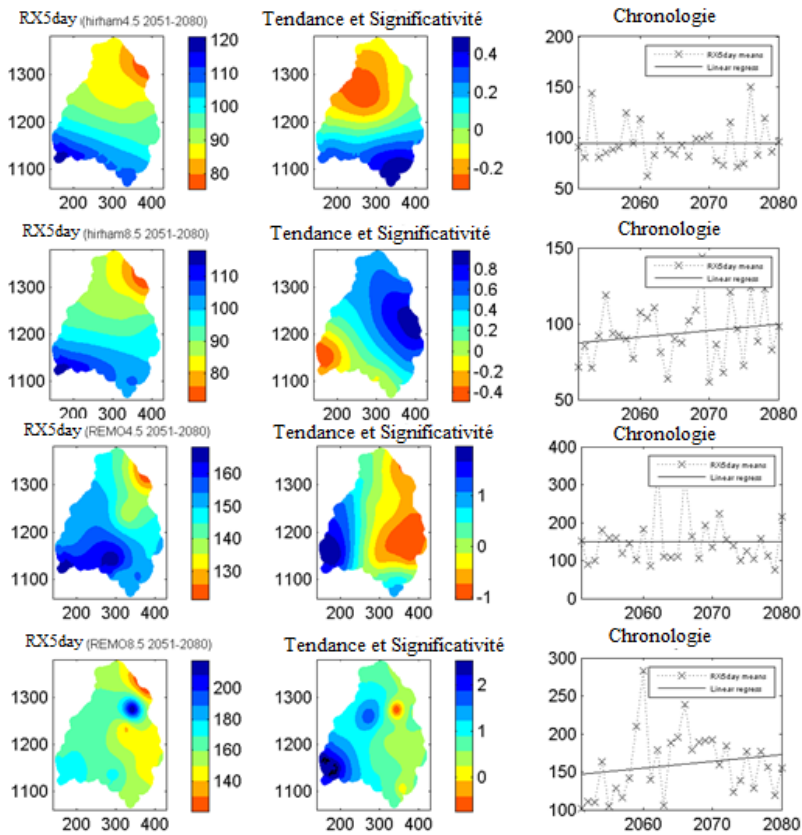


Figure 80 : Spatialisation des moyennes de RX5day, sa tendance et la significativité (2051-2080).

Annexe 4 : Futurs indices de fréquence (2051-2080)

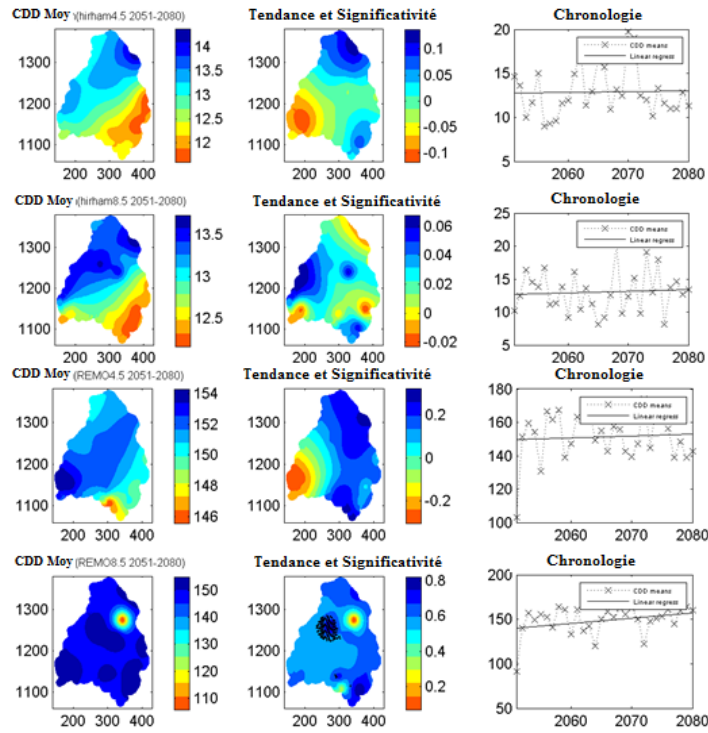


Figure 81 : Spatialisation des moyennes de CDD, sa tendance et la significativité (2051-2080).

Annexe 5 : Changements et significativités des indices de pluies.

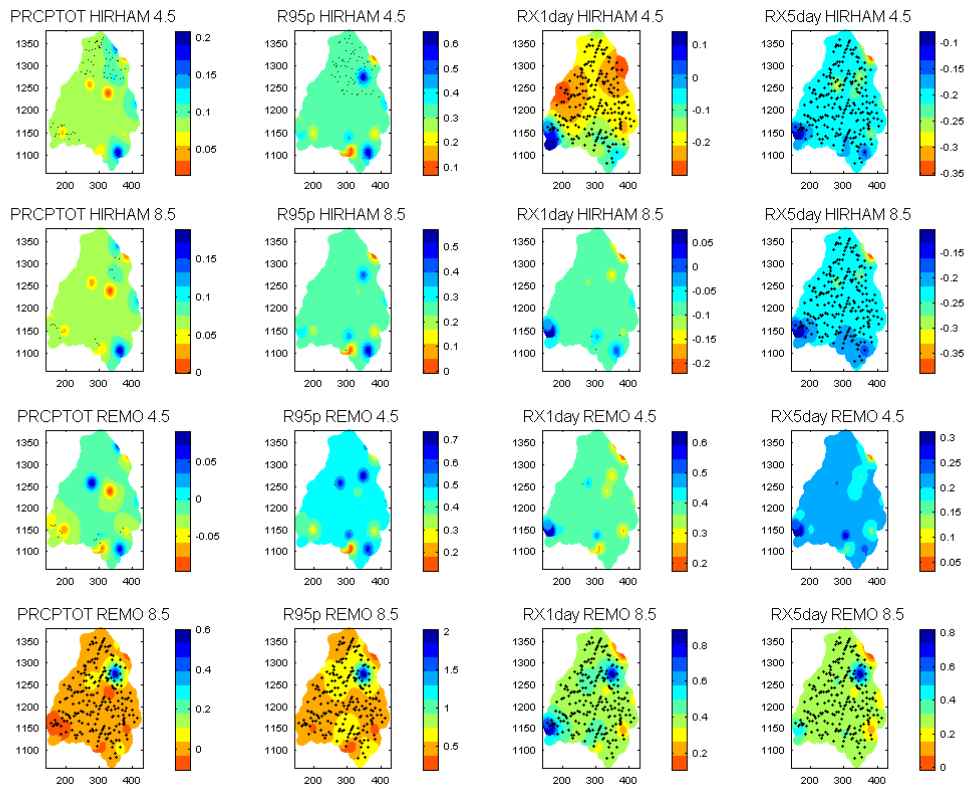


Figure 82 : Changement et significativité des indices d'intensité de pluies (2051-2080).

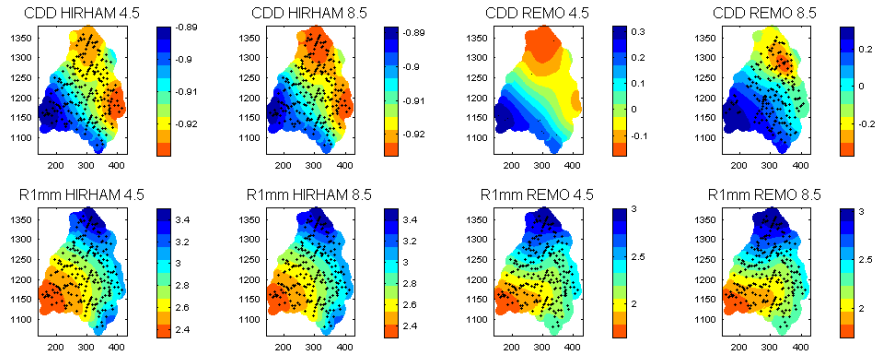


Figure 83 : Changement et significativité des indices de fréquence de pluies (2051-2080).

Annexe 6 : Indice de température pour le futur proche.

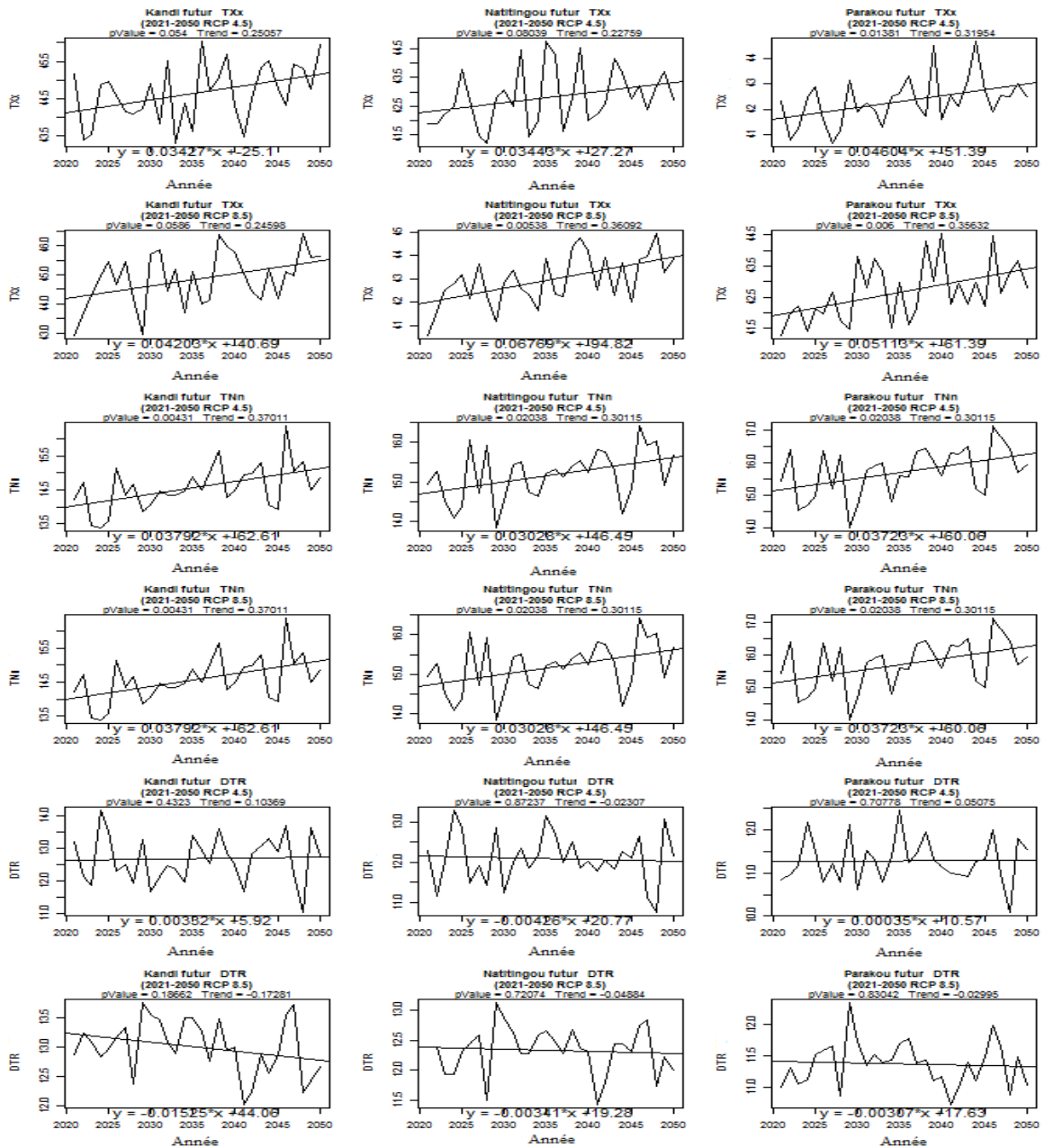


Figure 84 : Variations futures des indices d'intensité de température extrême (2021-2050).

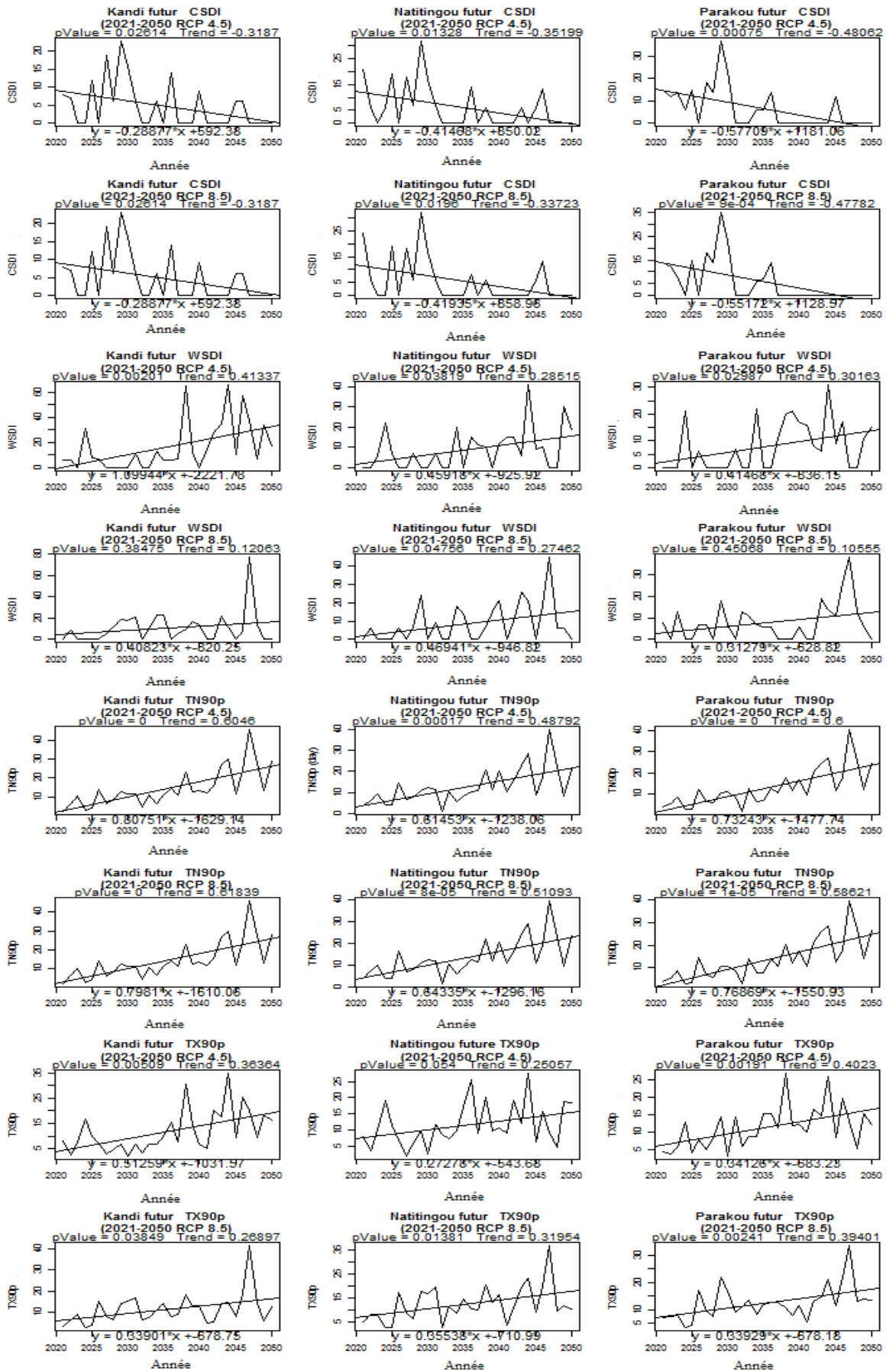


Figure 85 : Variations futures des indices de fréquence de température extrême (2021-2050).

Annexe 7 : Indice de température pour le futur lointain.

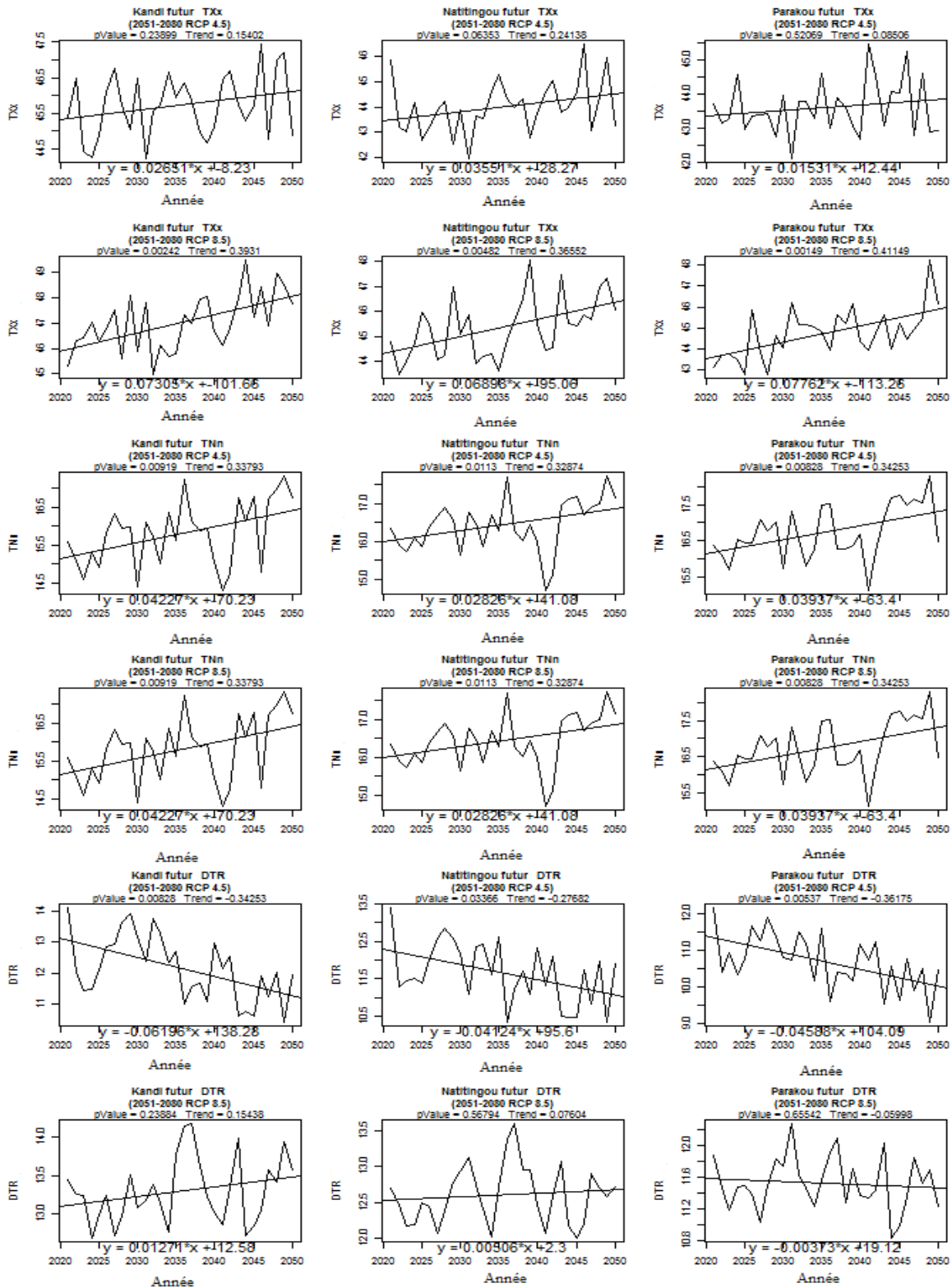


Figure 86 : Variations futures des indices d'intensité de température extrême (2051-2080).

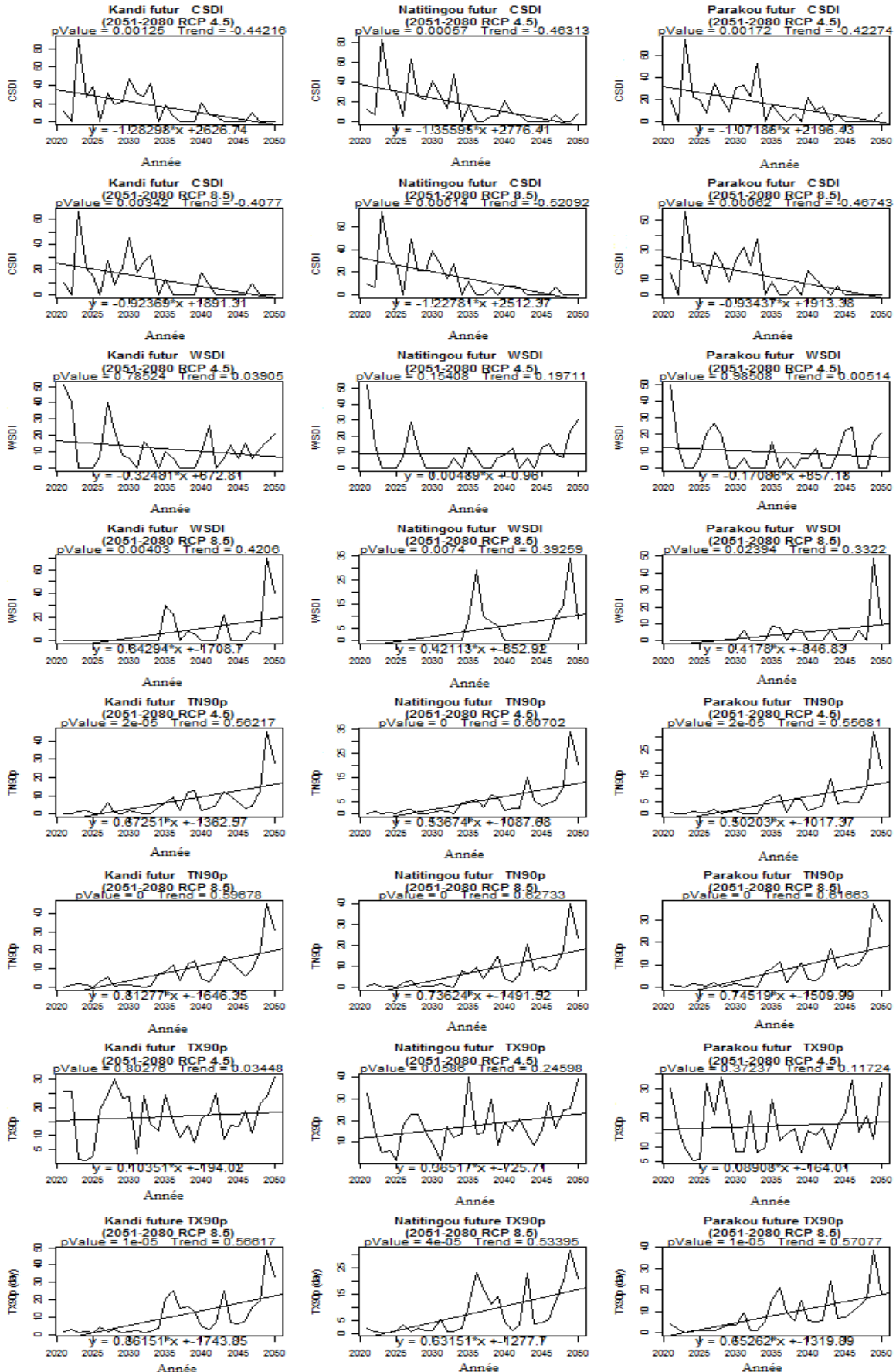
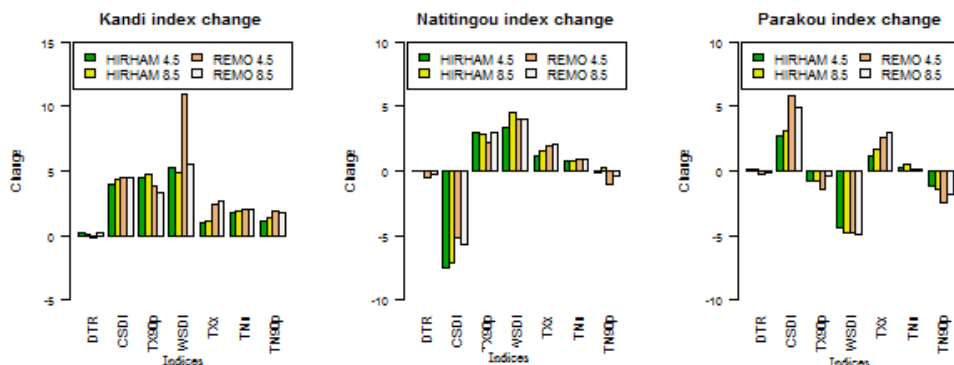


Figure 87 : Variations futures des indices de fréquence de température extrême (2051-2080).

Annexe 8 : Taux de changement et significativité des changements.

Changement des indices entre 1990-2019 et 2021-2050



Changement des indices entre 1990-2019 et 2051-2080

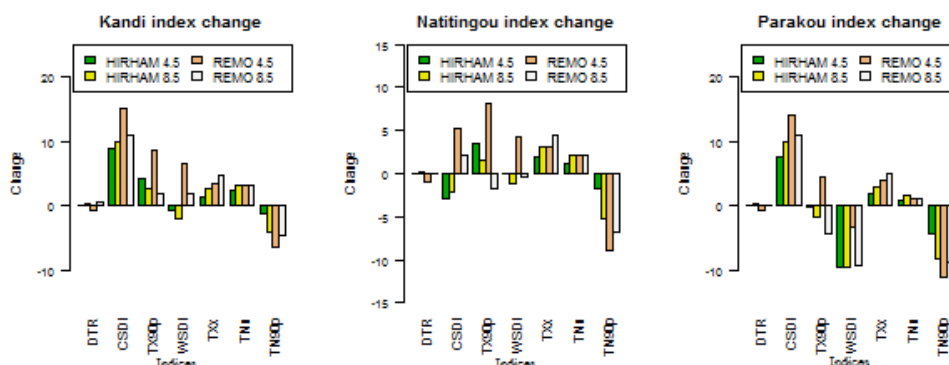


Figure 88 : Changement des indices de température par rapport à la période de référence.

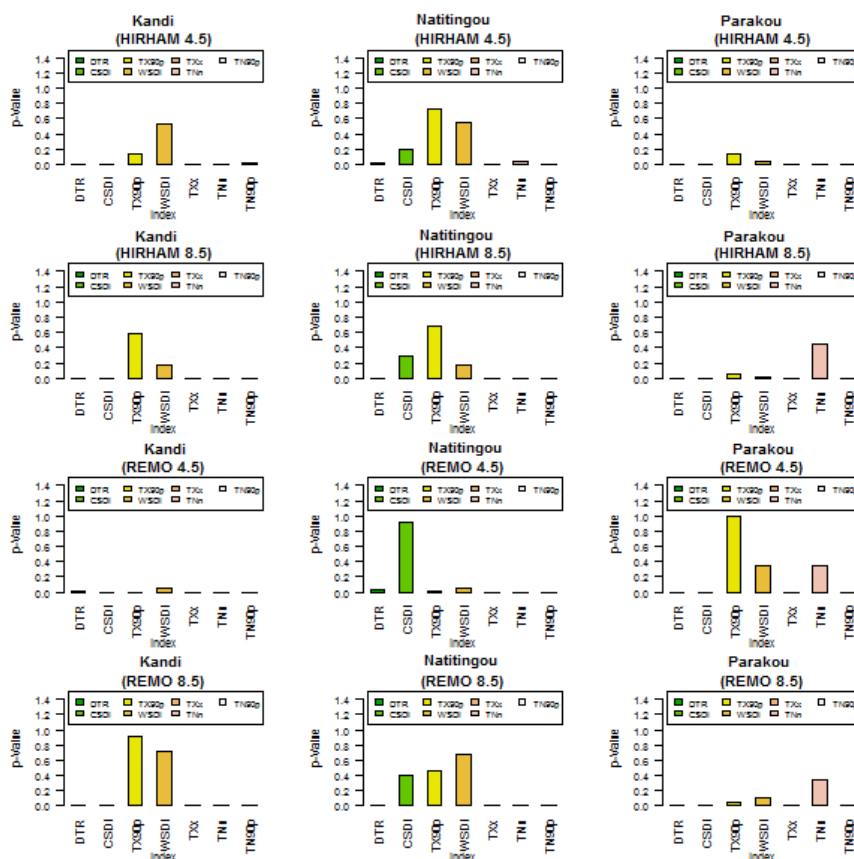


Figure 89 : Significativité des changements des indices de température par rapport à la période de référence.

Annexe 9 : Indices SPI.

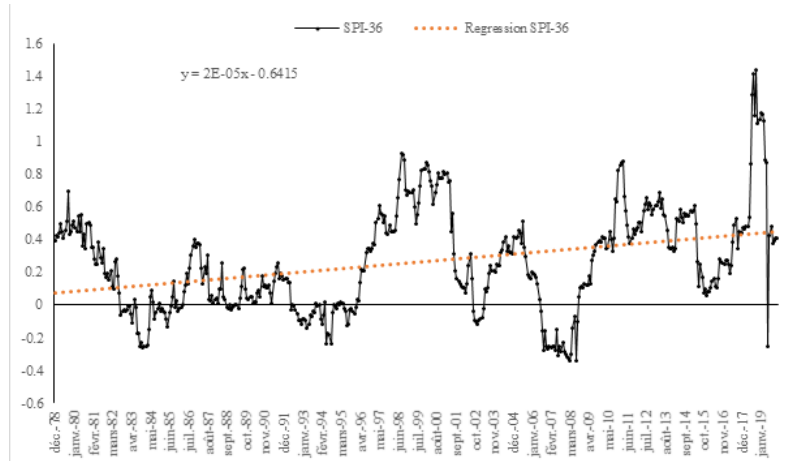


Figure 90 : Tendence du SPI 36 mois au cours de la période historique.

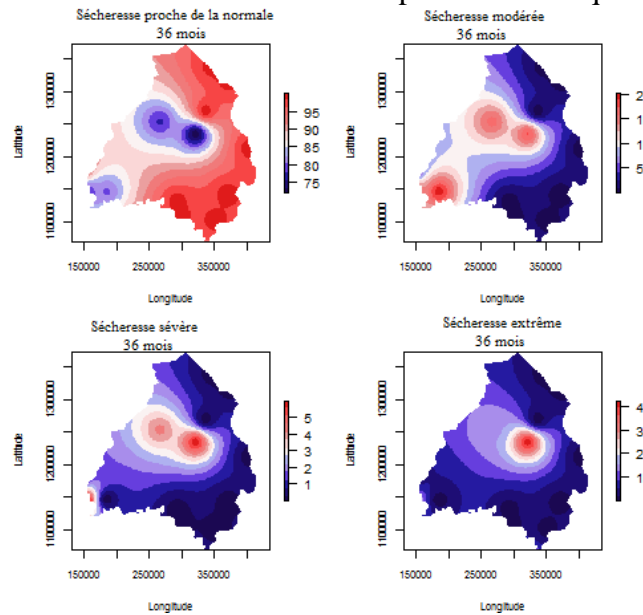


Figure 91 : Spatialisation des types de sécheresse au cours de 1976-2019 (SPI-36 mois)

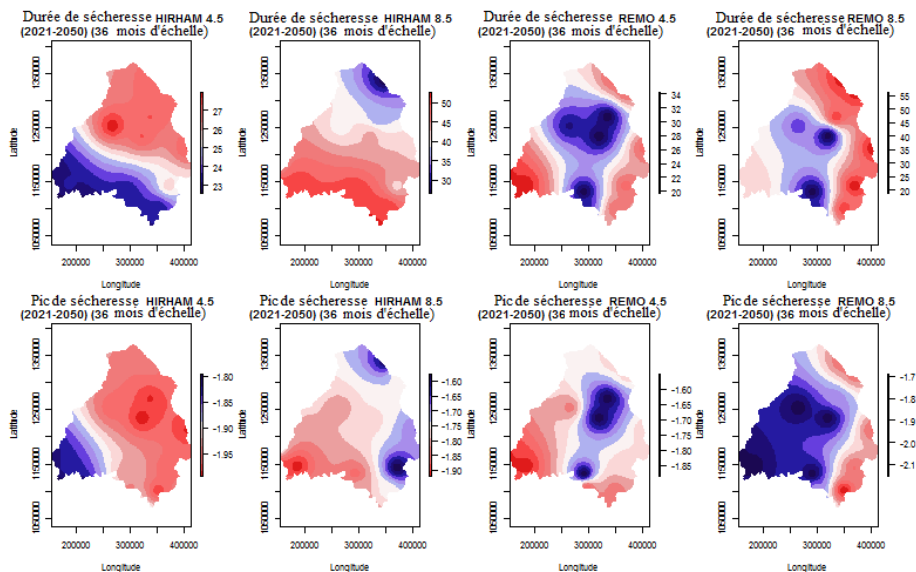


Figure 92 : Spatialisation des durées et pics de sécheresse projetés à l'échelle 12 mois du SPI (2021-2050)

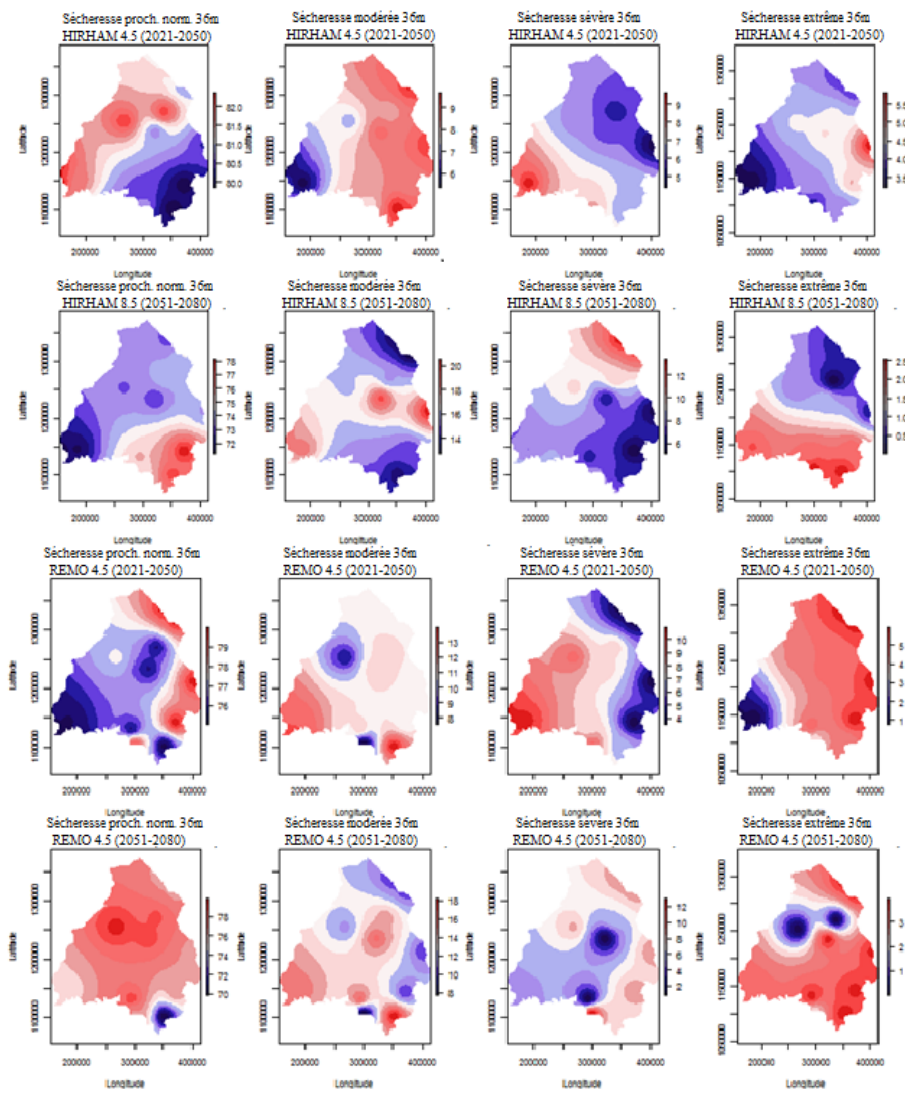


Figure 93 : Spatialisation des types de sécheresse projetés à l'échelle 36 mois du SPI (2021-2050)

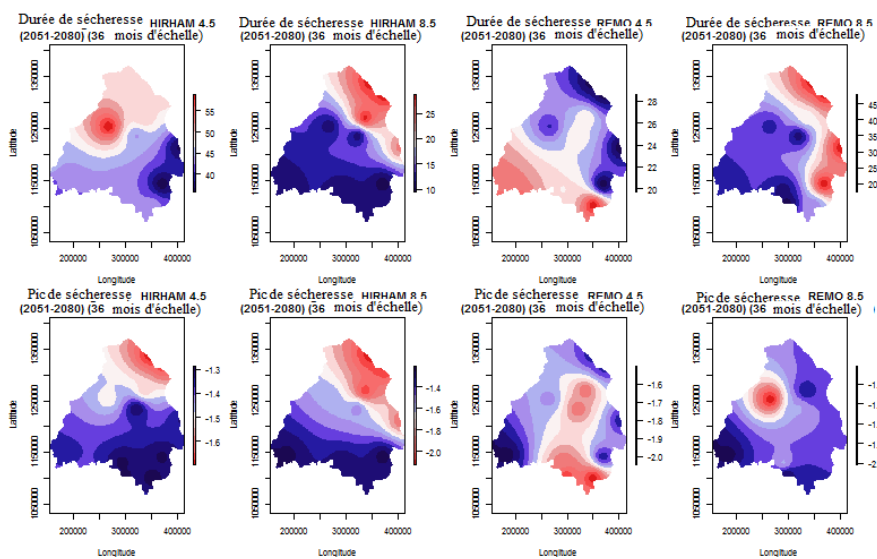


Figure 94 : Spatialisation des durées et pics de sécheresse projetés à l'échelle 12 mois du SPI (2021-2050)

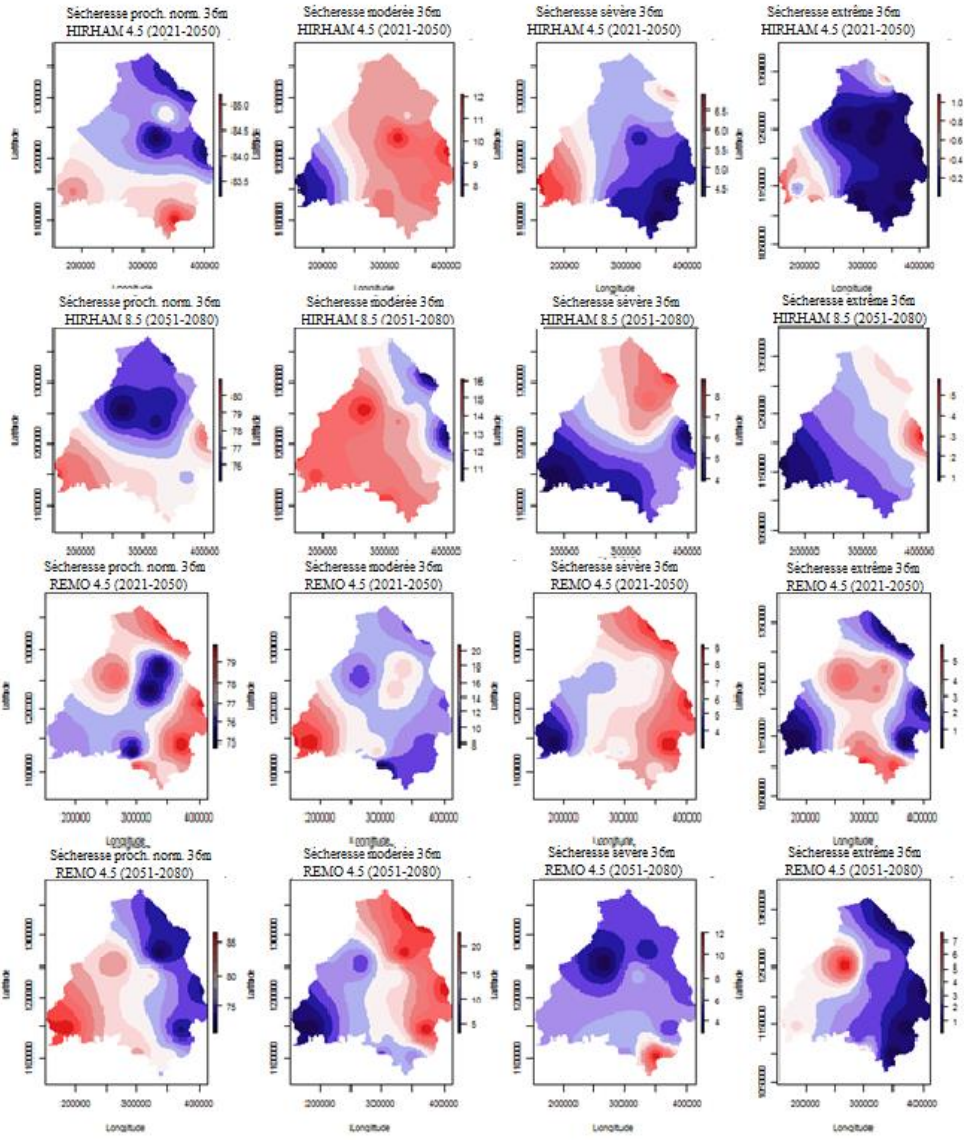


Figure 95 : Spatialisation des types de sécheresse projetés à l'échelle 36 mois du SPI (2051-2080)

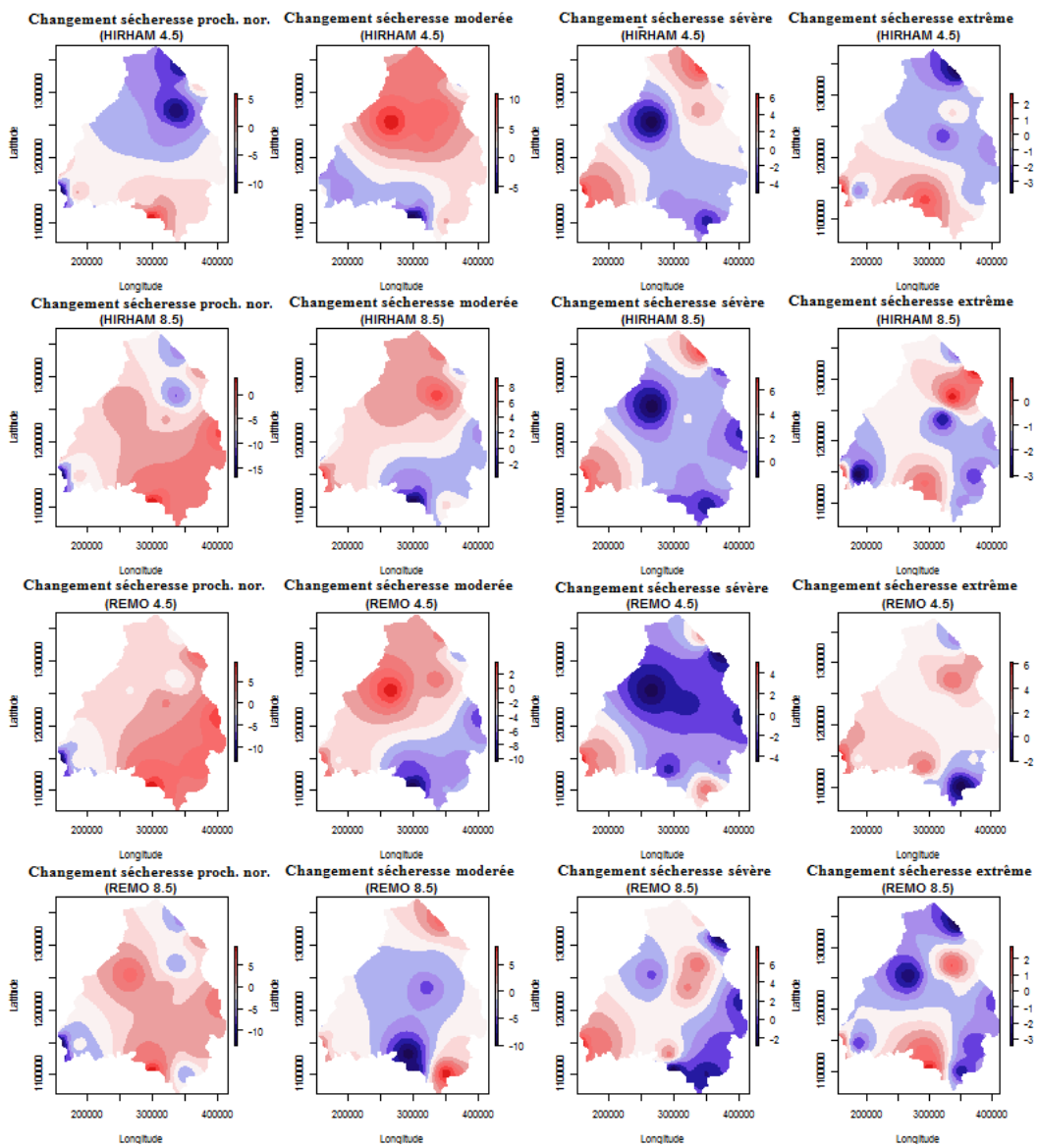


Figure 96 : Spatialisation des changements sur les types de sécheresse à l'échelle 12 mois du SPI (2021-2050).

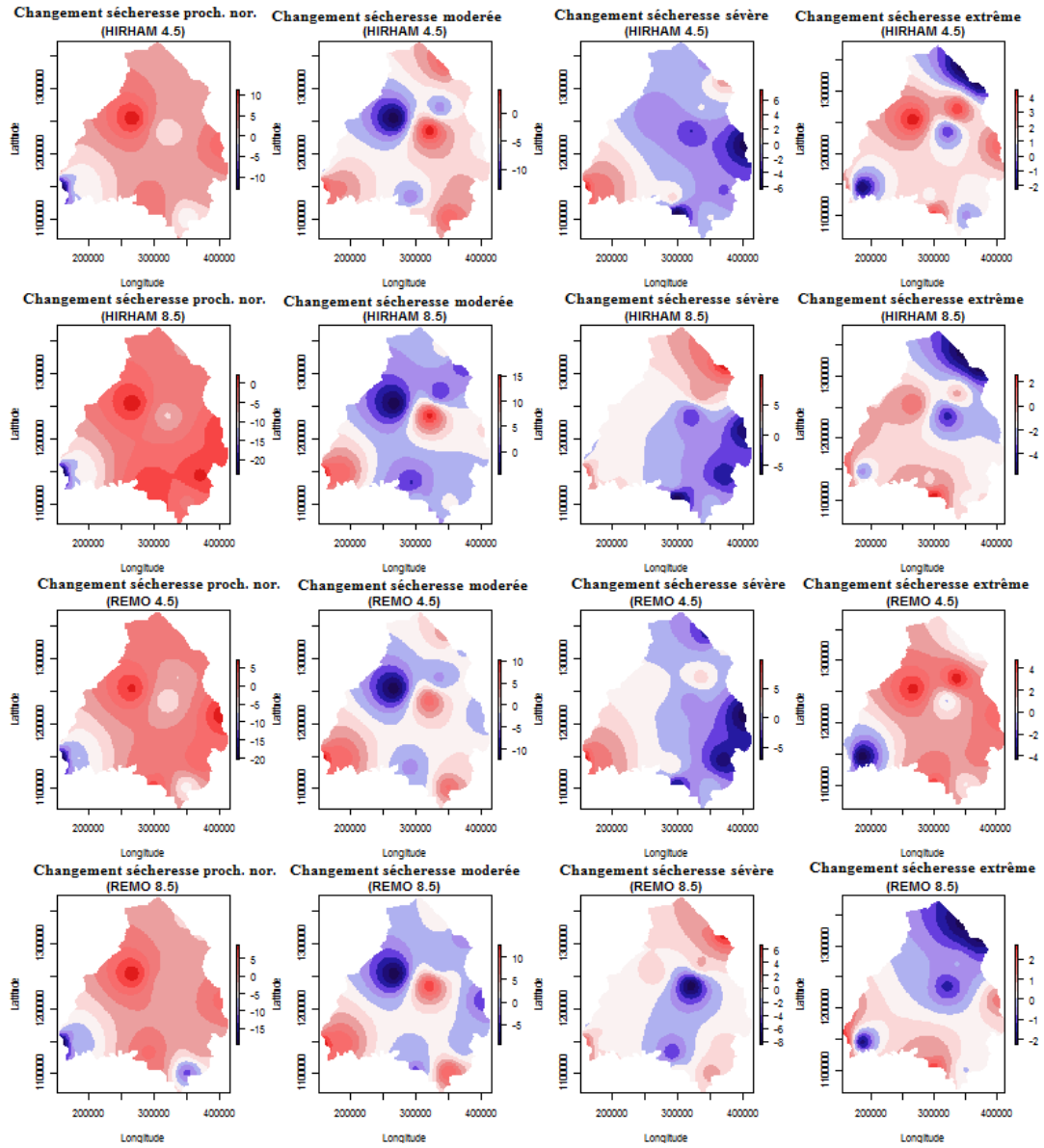


Figure 97 : Spatialisation des changements sur les types de sécheresse à l'échelle 36 mois du SPI (2021-2050).

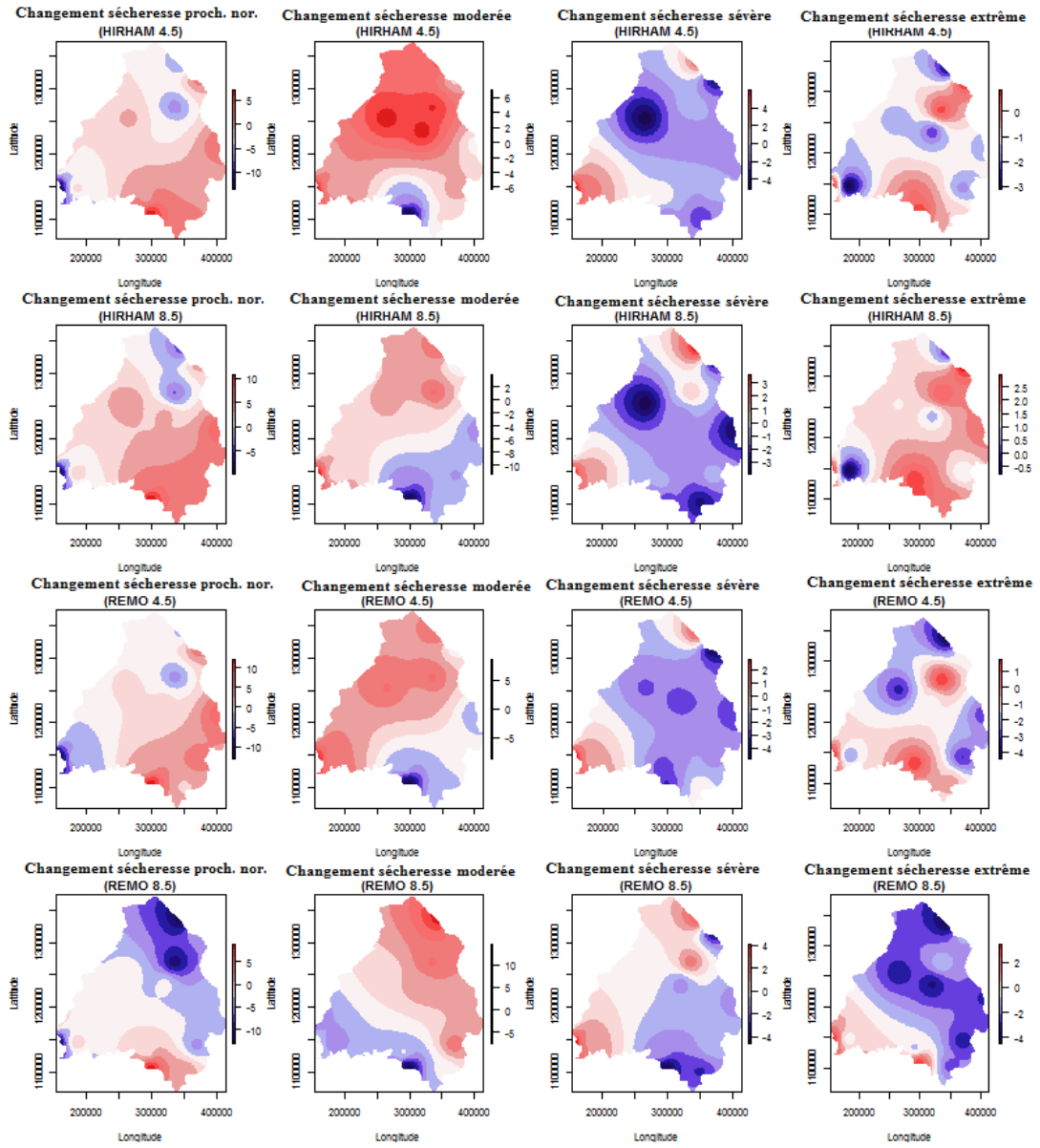


Figure 98 : Spatialisation des changements sur les types de sécheresse à l'échelle 12 mois du SPI (2051-2080).

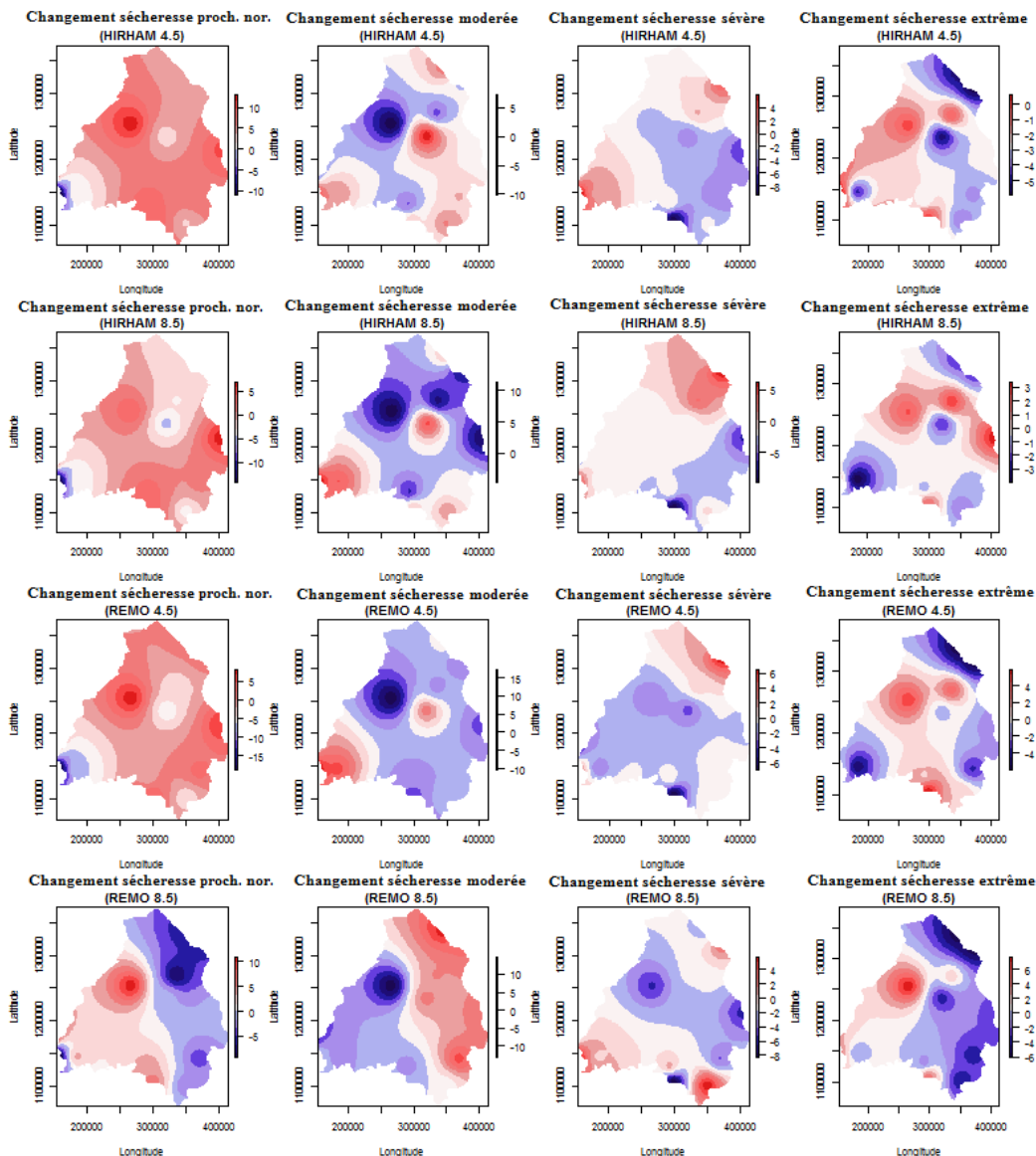


Figure 99 : Spatialisation des changements sur les types de sécheresse à l'échelle 36 mois du SPI (2051-2080).

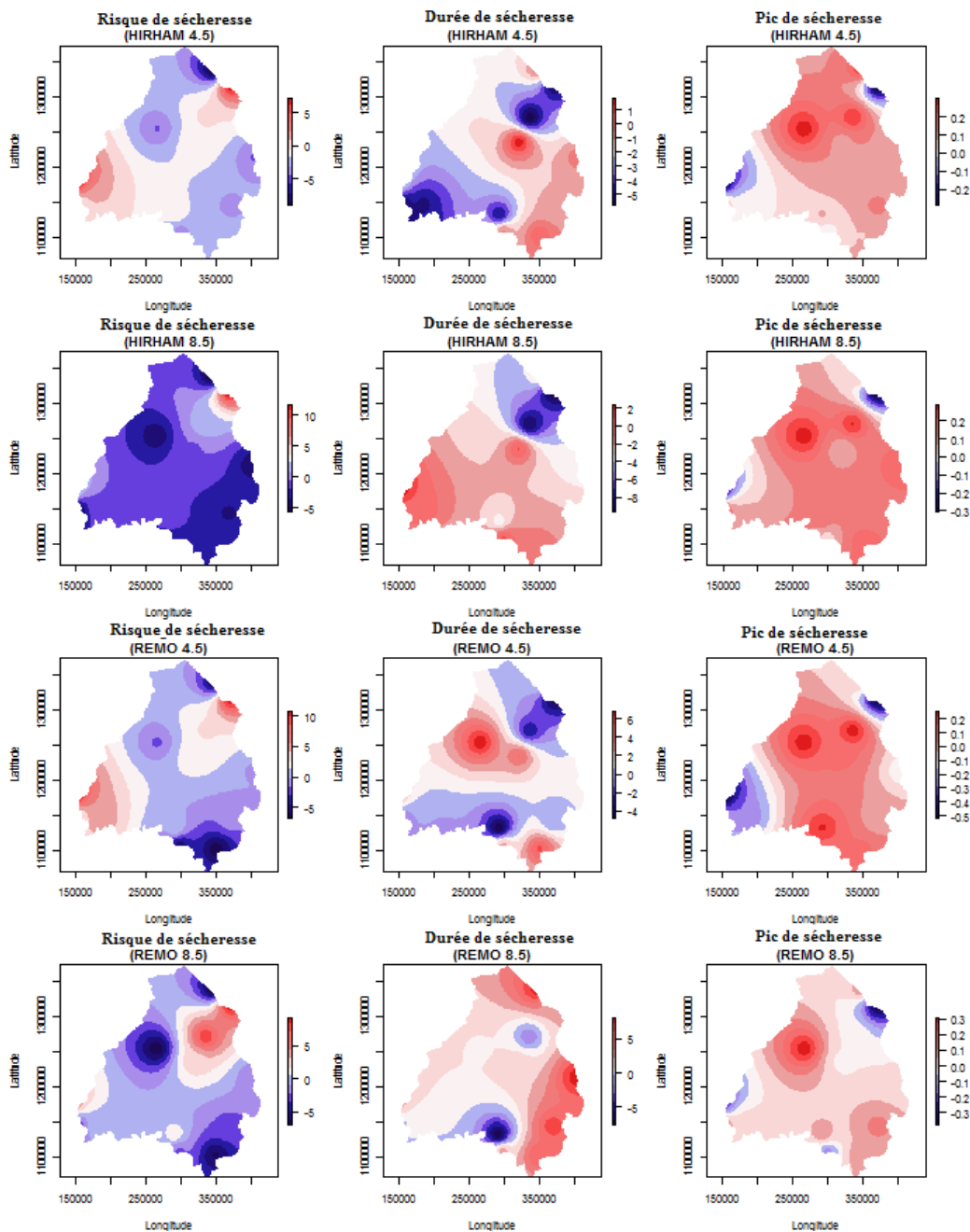


Figure 100 : Spatialisation des changements sur les durées, pics et risques de sécheresse à l'échelle 12 mois du SPI (2021-2050).

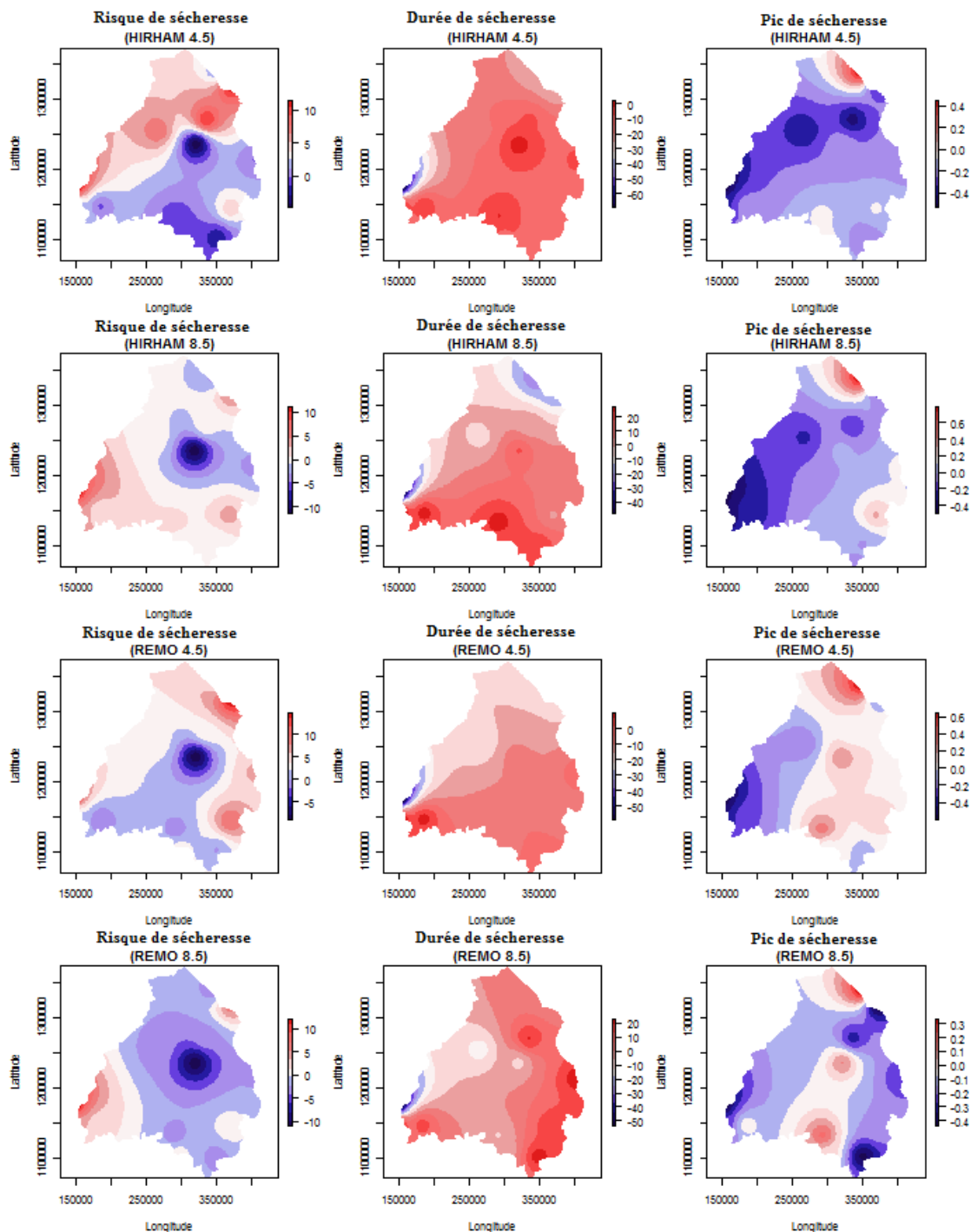


Figure 101 : Spatialisation des changements sur les durées, pics et risques de sécheresse à l'échelle 36 mois du SPI (2021-2050).

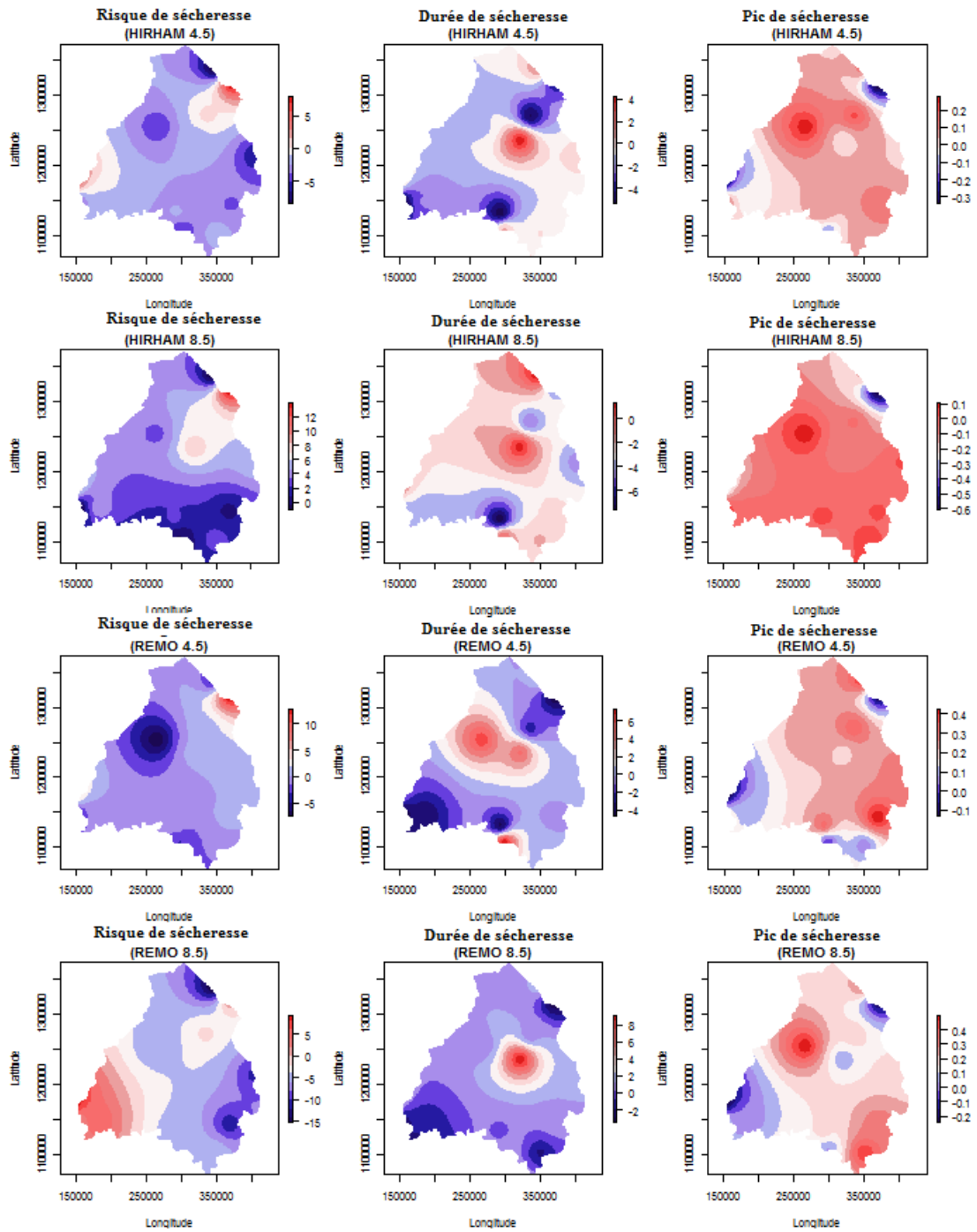


Figure 102 : Spatialisation des changements sur les durées, pics et risques de sécheresse à l'échelle 12 mois du SPI (2051-2080).

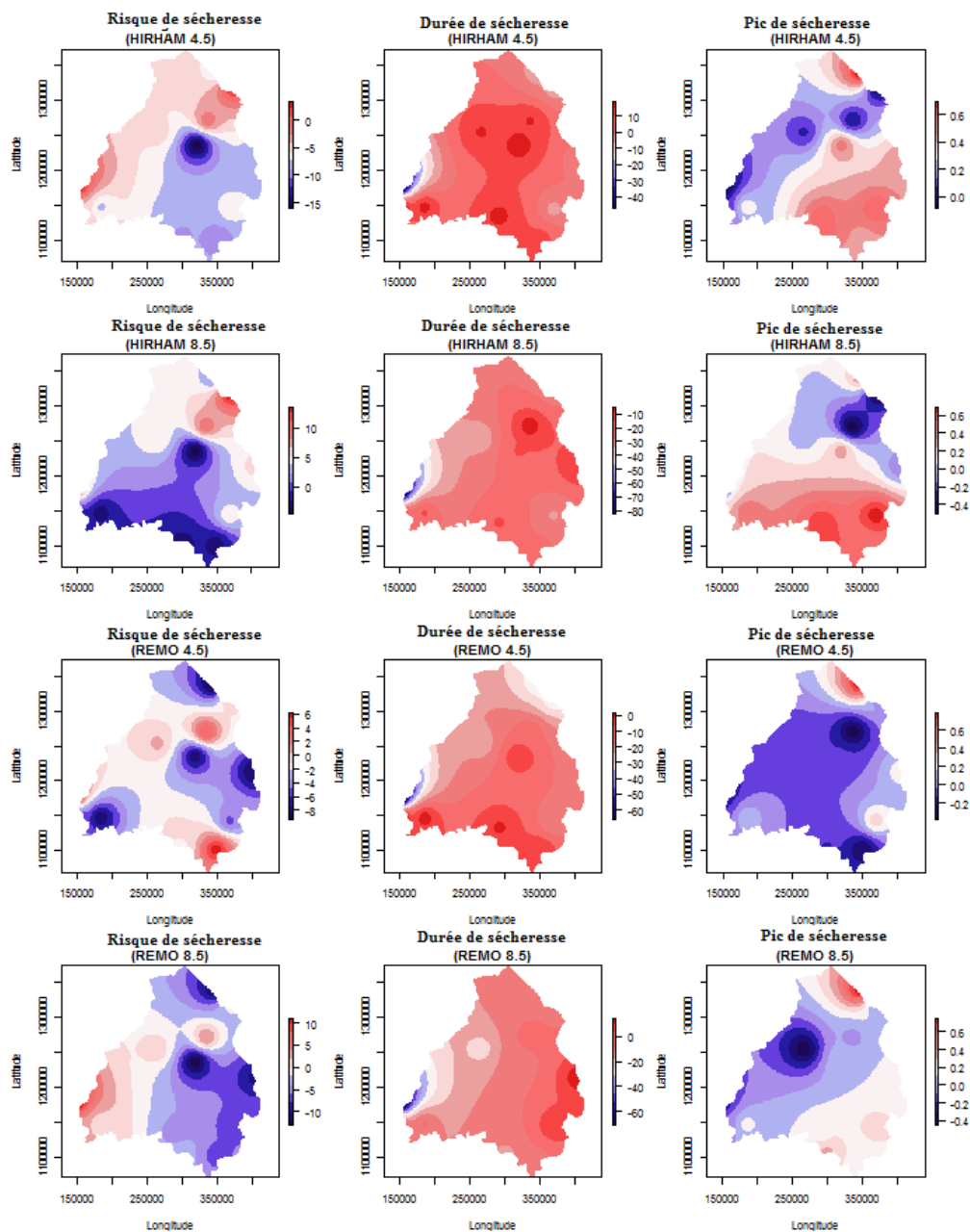


Figure 103 : Spatialisation des changements sur les durées, pics et risques de sécheresse à l'échelle 36 mois du SPI (2051-2080).

Annexe 10 : Indices SDI

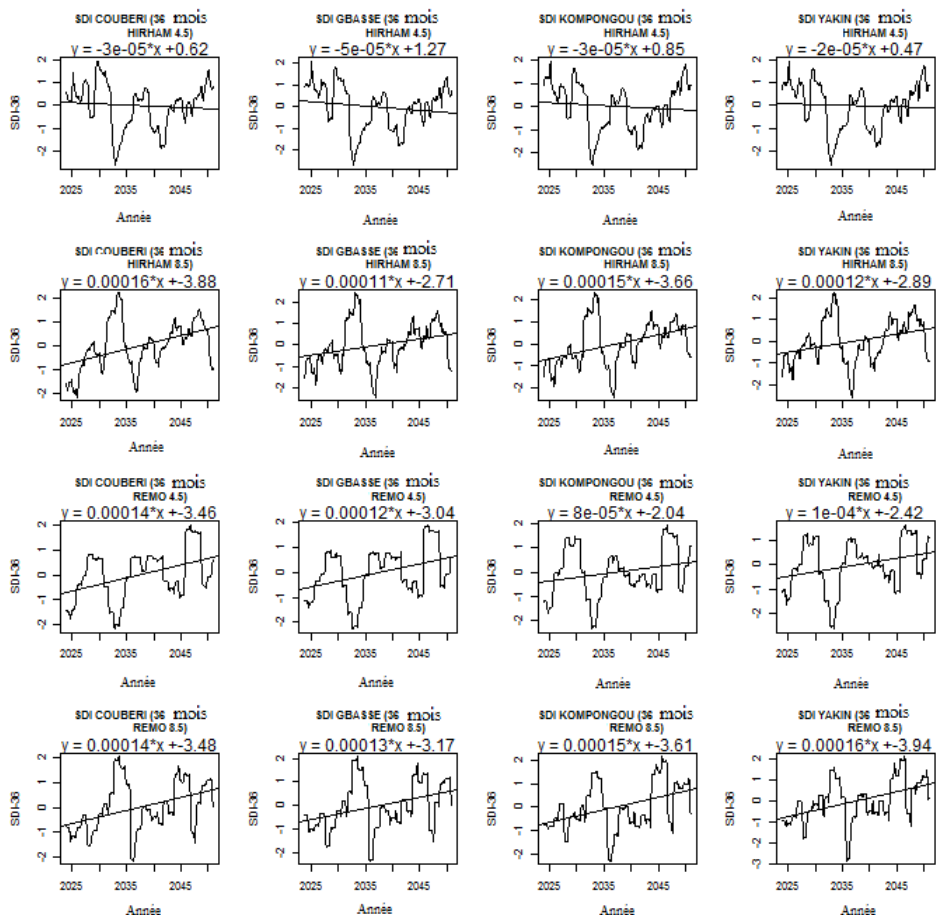


Figure 104 : Variation chronologique des indices SDI-36 mois (2021-2050)

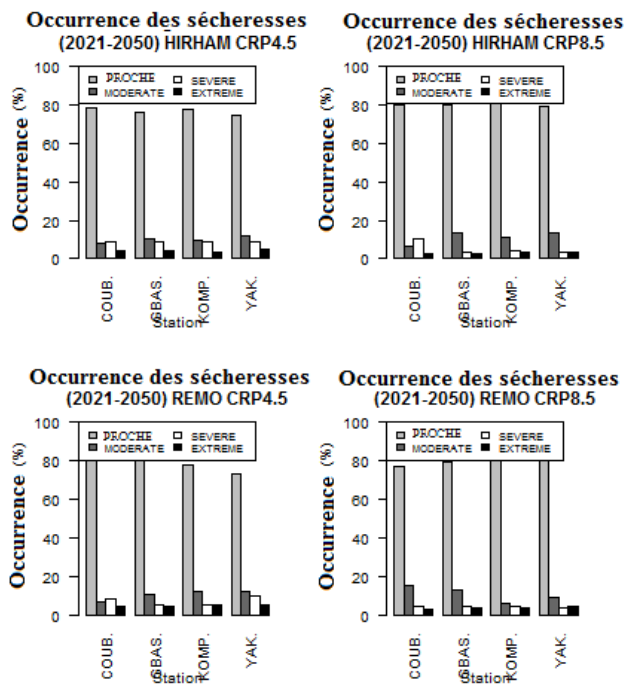


Figure 105 : Occurrences des types de sécheresses hydrologique à l'échelle 36 mois (2021-2050).

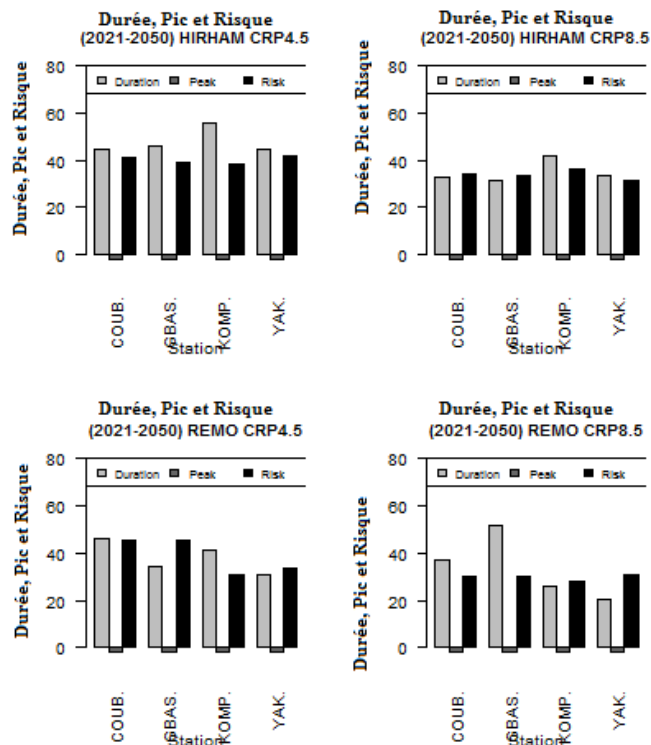


Figure 106 : Moyennes des durées, pics et risques de sécheresse hydrologique à l'échelle 36 mois (2021-2050).

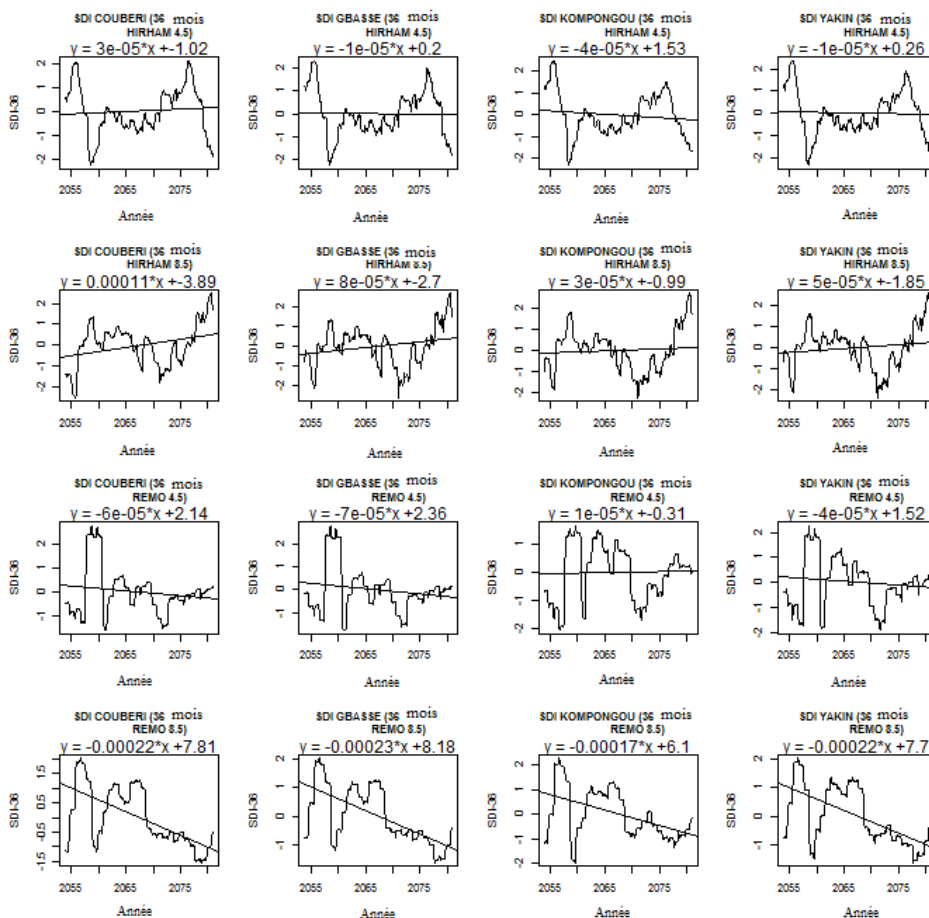


Figure 107 : Variation chronologique des indices SDI-36 mois (2051-2080)

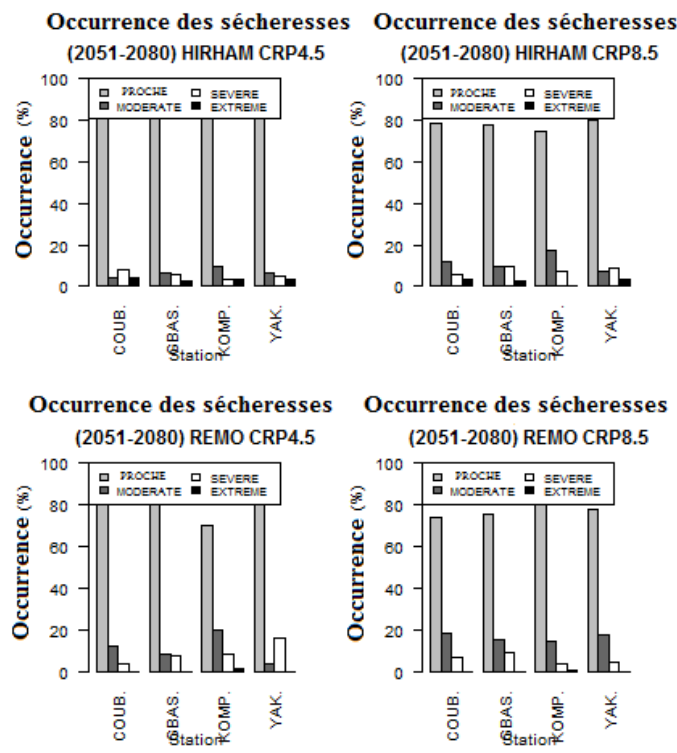


Figure 108 : Occurrences des types de sécheresses hydrologique à l'échelle 36 mois (2051-2080).

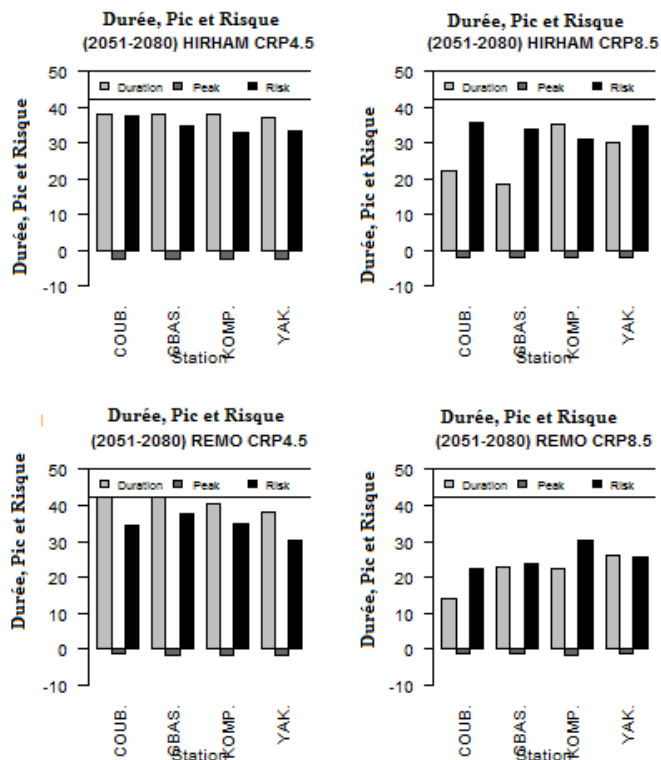


Figure 109 : Moyennes des durées, pics et risques de sécheresse hydrologique à l'échelle 36 mois (2051-2080).

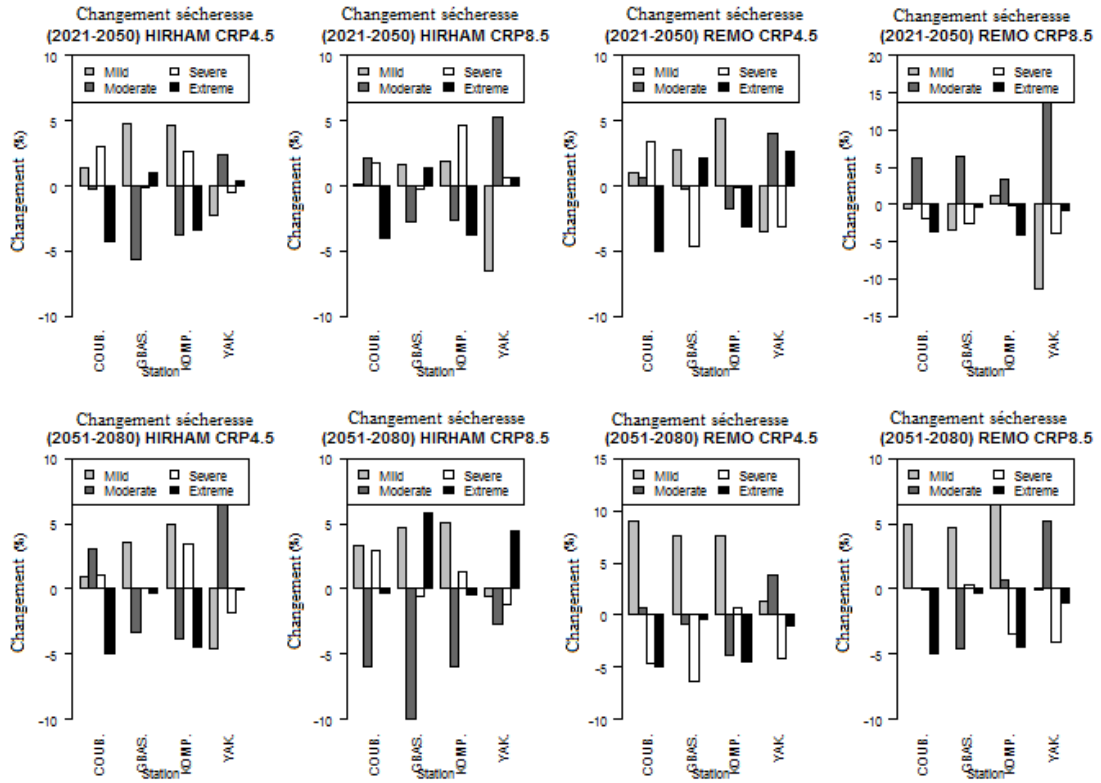


Figure 110 : Changement des types de sécheresse par rapport à la période de référence à l'échelle 12 mois du SDI.

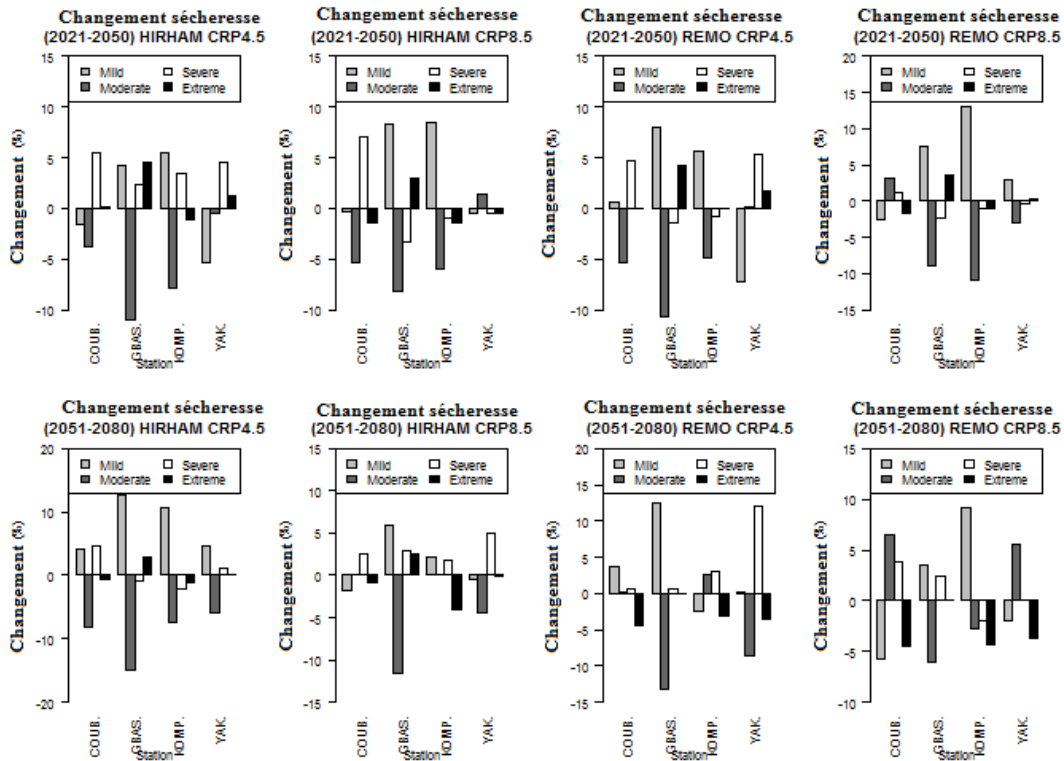


Figure 111 : Changement des types de sécheresse par rapport à la période de référence à l'échelle 36 mois du SDI.

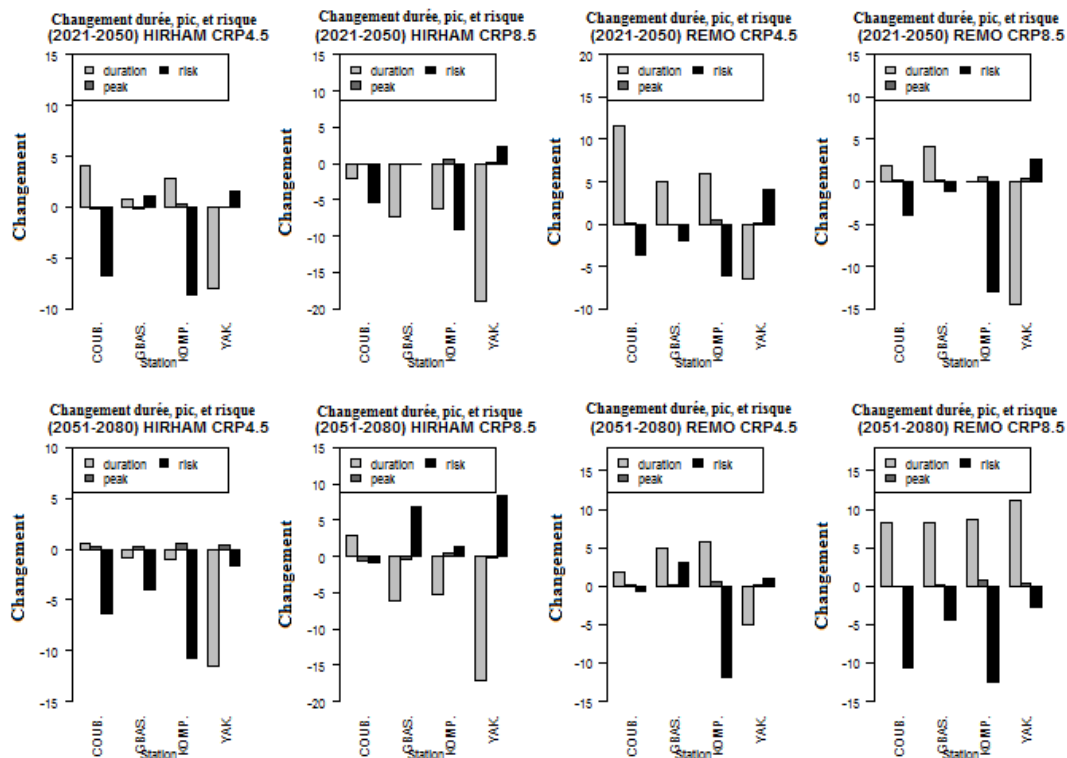


Figure 112 : Changement des durées, pics et risques de sécheresse par rapport à la période de référence à l'échelle 36 mois du SDI