

Evolution récente et future des précipitations du site urbain de l'agglomération de Pointe-Noire, République du Congo

Martin MASSOUANGUI-KIFOUALA*

Université Marien Ngouabi, Faculté des Lettres, Arts et Sciences Humaines, Laboratoire Géographie, Environnement et Aménagement (LAGEA), Brazzaville, République du Congo

(Reçu le 23 Juin 2022 ; Accepté le 23 Septembre 2022)

* Correspondance, courriel : mmartinkif@gmail.com

Résumé

Les changements climatiques et les phénomènes extrêmes qui les caractérisent menacent les villes côtières d'Afrique centrale en général et de la République du Congo en particulier où sont concentrées des foules humaines. Détecter les tendances récentes et futures des précipitations de l'agglomération de Pointe-Noire est l'objectif que vise cette étude. Les indices des précipitations extrêmes ont été calculés à partir des données observées (1950-2017) et des données de simulation du programme CORDEX-Africa (2041-2100), après contrôle de qualité, validation et correction des biais du modèle climatique régional CLMcom-KIT-CCLM5. Les principaux résultats montrent que le climat du site urbain de Pointe-Noire de 1950 à 2017 s'est caractérisé par une tendance à la hausse des totaux pluviométriques annuels (PRCPTOT) et des intensités simples des pluies (SDII). Par contre, les jours très pluvieux (R95p) et extrêmement pluvieux (R99p) sont en décroissance. L'horizon 2070 sera marqué, à Pointe-Noire, par une hausse généralisée des PRCPTOT, des R95p et des R99p. L'augmentation des totaux pluviométriques persistera jusqu'à l'horizon 2100. Les jours très humides et extrêmement humides, par contre, accuseront une nette décroissance. Cette ambiance climatique va probablement aggraver les problèmes environnementaux qui menacent actuellement le site urbain de Pointe-Noire (inondation, érosion, stagnation des eaux pluviales et dégradation des routes). Une bonne politique de gouvernance urbaine s'impose en toute évidence pour rendre résiliente l'agglomération côtière de Pointe-Noire face à la menace climatique.

Mots-clés : *République du Congo, Pointe-Noire, précipitations, tendances, phénomènes extrêmes.*

Abstract

Recent and future evolution of rainfall in the urban area of Pointe-Noire (Republic of Congo)

Climate change and the extreme phenomena that characterize it threaten the coastal cities of Central Africa in general and the Republic of Congo in particular where human crowds are concentrated. The objective of this study is to detect recent and future trends in rainfall in the Pointe-Noire agglomeration. Extreme precipitation indices were calculated from observed data (1950-2017) and simulation data from the CORDEX-Africa program (2041-2100), after quality control, validation and bias correction of the regional climate model CLMcom-KIT-

CCLM5. The main results show that the climate of the urban site of Pointe-Noire from 1950 to 2017 was characterized by an increasing trend of annual rainfall totals (PRCPTOT) and simple rainfall intensities (SDII). In contrast, very wet (R95p) and extremely wet (R99p) days are decreasing. The 2070 horizon will be marked, in Pointe-Noire, by a general increase in PRCPTOT, R95p and R99p. The increase in rainfall totals will persist until 2100. Very wet and extremely wet days, on the other hand, will show a marked decrease. This climatic environment is likely to aggravate the environmental problems that currently threaten the urban site of Pointe-Noire (flooding, erosion, stagnation of rainwater and degradation of roads). A good urban governance policy is clearly needed to make the oceanic agglomeration of Pointe-Noire resilient to the climate threat.

Keywords : *Republic of Congo, Pointe-Noire, rainfall, trends, extreme events.*

1. Introduction

La vulnérabilité aux changements climatiques est considérée comme dynamique et varie d'un continent ou d'un pays à un autre. Son degré dépend des facteurs géographiques, démographiques, économiques, sociaux, institutionnels, de gouvernance et d'environnement [1]. Depuis le début des années 1990, l'évaluation de la vulnérabilité des zones côtières est devenue une nécessité dans l'identification des impacts des changements climatiques et l'aménagement des zones côtières à travers le monde [2, 3]. En effet, les dégâts provoqués par des inondations dans le monde imputables à la seule élévation du niveau de la mer et aux phénomènes extrêmes connexes pourraient, d'ici à 2100, atteindre jusqu'à 27 000 milliards de dollars par an, soit environ 2,8 % du PIB mondial en 2100 [4]. Les villes côtières d'Afrique sont particulièrement plus vulnérables au changement et à la variabilité climatique [1]. Ces villes à forte croissance démographique font face à des risques concrets qui s'intensifieront au cours des prochaines décennies au fur et à mesure que les conséquences du changement climatique se feront sentir davantage [5]. La littérature sur la vulnérabilité actuelle des villes côtières d'Afrique centrale en général et du Congo en particulier face aux changements climatiques est moins abondante. En République du Congo, la plaine côtière, où est située l'agglomération de Pointe-Noire a été identifiée comme zone vulnérable aux changements climatiques [6].

Capitale économique du Congo, l'agglomération de Pointe-Noire de par ses infrastructures socio-économiques exerce une influence attractive sur le reste du pays, surtout sur les zones rurales. Cette attraction a pour conséquences : l'explosion démographique, l'expansion du tissu urbain, l'occupation anarchique de l'espace et la naissance des nouveaux quartiers très précaires. Nombreux sont des problèmes qui minent aussi bien les nouveaux que les anciens quartiers de la ville. Les plus récurrents sont : l'érosion côtière et continentale, l'ensablement et les inondations [7]. Les stratégies d'adaptation mises en place par les habitants de ces quartiers ne répondent point face à l'ampleur de ces phénomènes [8]. Ces problèmes qui ne surviennent qu'en saison des pluies ont une relation très étroite avec l'ambiance climatique de Pointe-Noire. Les études sur le climat urbain de Pointe-Noire sont peu nombreuses et présentent des lacunes ne pouvant pas permettre de faire une corrélation avec les problèmes environnementaux. Elles sont orientées soit vers l'agroclimatologie [9, 10], soit vers des considérations très générales du climat [11] sans lien avec les problèmes pressants qui minent le site urbain de Pointe-Noire [12]. Une étude portant sur l'évolution récente et future des précipitations de l'agglomération de Pointe-Noire s'impose donc de toute évidence. On peut alors se demander, vu les problèmes environnementaux enregistrés par le site urbain de Pointe-Noire, quelles sont les tendances récentes et futures des précipitations de cette agglomération ? Telle est la question autour de laquelle s'articulera la présente étude. L'objectif visé par cet article est l'analyse des tendances récentes (1950 à 2017) et futures (2071-2100) des précipitations de l'agglomération de Pointe-Noire. Elle a l'avantage

d'utiliser à la fois les données d'observation et les sorties de modèles climatiques régionaux à haute résolution : données CORDEX-Africa. Une fois réalisée, ce travail pourra permettre de mieux comprendre et connaître les problèmes environnementaux auxquels les populations de l'agglomération de Pointe-Noire devront faire face dans un futur proche ou lointain. Il fournit aux décideurs des informations utiles pouvant être prises en compte dans l'élaboration du schéma directeur et des plans locaux d'urbanisme de l'agglomération de Pointe-Noire afin de la rendre résiliente face au changement et à la variabilité climatique [13], d'assurer un environnement durable conformément au septième Objectif du Millénaire pour le Développement (OMD).

2. Matériel et méthodes

2-1. Cadre de l'étude

L'agglomération de Pointe-Noire est située dans la partie sud-ouest du Congo, plus précisément entre 4° et 5° de latitudes Est et entre 11°30' et 12° de longitudes Sud (*Figure 1*). Sa superficie actuelle est estimée à 114 400 ha [14]. L'ensemble de la ville est sous l'influence du climat de type tropical humide. Il se caractérise par une alternance des saisons des pluies (Octobre-novembre-décembre et mars-avril-mai) et saison sèche (juin-septembre).

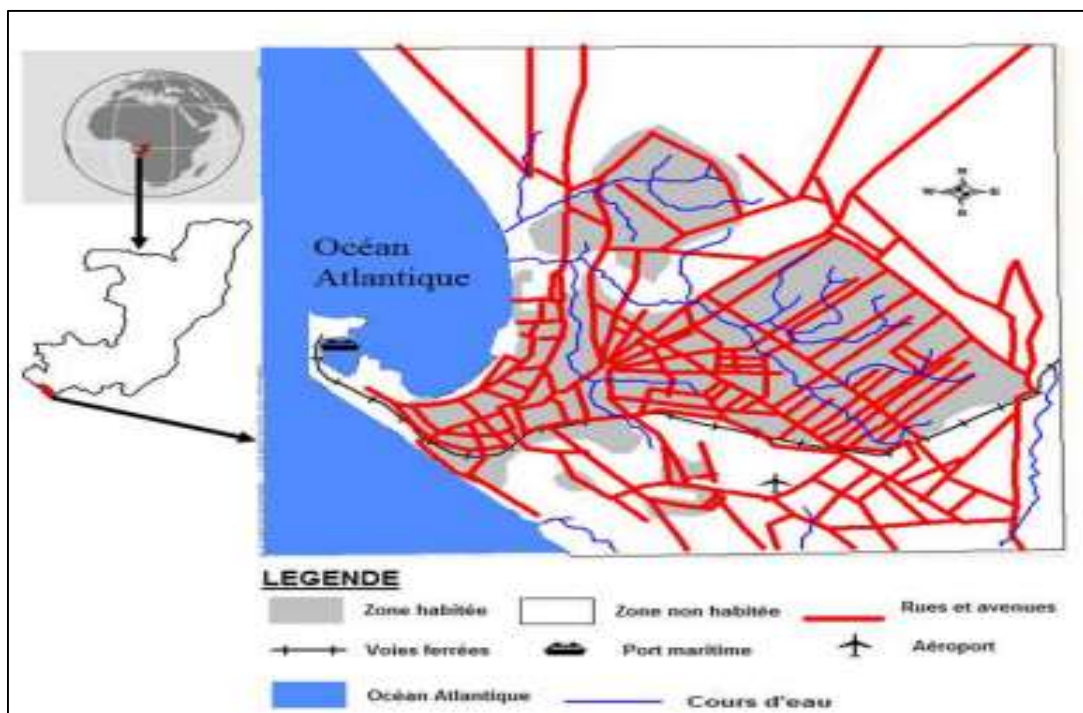


Figure 1 : Agglomération de Pointe-Noire

2-2. Données utilisées

Deux jeux de données sont utilisés dans le cadre de cette étude : les observations in situ et les données de simulation des modèles climatiques régionaux (MCR).

2-2-1. Données in-situ

Nous avons utilisé les données des précipitations journalières observées à la station synoptique de Pointe-Noire par les services de la Direction nationale de Météorologie. Elles couvrent la période allant de 1950 à 2017. Ces données présentent des lacunes en 1997, 1998 et en 2002 liées aux conflits socio-politiques qu'a connu le pays. A défaut de les combler, ces années ont été écartées dans cette étude qui travaille sur un pas de temps journalier. A cette échelle, le comblement n'est pas aisé.

2-2-2. Données de simulation

Afin de projeter les événements extrêmes des précipitations pour le futur, les sorties de modèles climatiques régionaux du programme CORDEX-Africa (COordinated Regional climate Downscaling EXperiment) ont été utilisées sous le scénario de forçages radiatifs « Representative Concentration Pathways » (RCPs) RCP 8.5. Ce sont des données de simulation à résolution spatiale à échelle fine ($0.22^{\circ} \times 0.22^{\circ}$). Elles sont disponibles sur le site <https://cds.climate.copernicus.eu>. Ces données sont issues des modèles climatiques régionaux (MCR) qui sont : le CCCma-CanRCM4, GERICs-REMO2015 et CLMcom-KIT-CCLM5. Elles couvrent deux périodes :

- Passage historique : 1971-2000 ;
- Et passage futur : 2041-2100.

Les données futures ont été réparties en deux horizons à savoir : le futur moyen (2041-2070) et le futur lointain (2071-2100). Le **Tableau** ci-après présente les différents modèles climatiques régionaux et les modèles climatiques globaux associés (**Tableau 1**).

Tableau 1 : Modèles climatiques régionaux-CORDEX avec les modèles climatiques globaux associés

GMC	RCMS	Scénarios	Résolution
CCCma-CanESM2	CCCma-CanRCM4	RCP8.5	$0.22^{\circ} \times 0.22^{\circ}$
MOHC-HadGEM2-ES	GERICS-REMO2015	RCP8.5	$0.22^{\circ} \times 0.22^{\circ}$
NCC-NorESM1-M	CLMcom-KIT-CCLM5	RCP8.5	$0.22^{\circ} \times 0.22^{\circ}$

2-3.Méthodes

Afin de bien analyser l'évolution future des précipitations de l'agglomération de Pointe-Noire, il est important de trouver un modèle qui simule le mieux son climat.

La démarche retenue comprend quatre étapes : l'évaluation et la validation des modèles climatiques régionaux, la correction des biais, le calcul des indices des précipitations extrêmes et détection des tendances.

2-3-1.Evaluation et validation du modèle

Il existe plusieurs méthodes pour évaluer et valider un modèle climatique régional [15, 16]. Toutefois, aucune méthode d'évaluation ou paramètre statistique de performance utilisé seul est à mesure de fournir des bons résultats. Il est plutôt conseillé de combiner plusieurs techniques et paramètres qui fournissent une vue d'ensemble complète de la performance du modèle. A cet effet, des paramètres statistiques recommandés par l'Organisation Météorologique Mondiale [17, 18] ont été utilisés. Ces paramètres statistiques comprennent : le biais, l'erreur quadratique moyenne (MSE) et le coefficient de corrélation.

2-3-1-1. Biais

Ramenés, en pourcentage (NBias), le biais est une mesure de la sous-estimation ou de la surestimation globale d'une variable climatique particulière par les MRC. Les valeurs NBias positives indiquent une surestimation tandis que les valeurs négatives traduisent une sous-estimation par le modèle climatique. **L'Equation (1)** est la suivante :

$$\text{Biais} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N (Fi - Oi) \quad \text{ou} \quad \text{Nbais} = \frac{\text{bais}}{\text{moy obs}} * 100 \quad (1)$$

F et O sont respectivement les valeurs simulées et observées sur la période i

2-3-1-2. Racine des erreurs quadratiques moyennes (RMSE)

Converties en pourcentage (NRMSE), la racine des erreurs quadratiques moyennes est une mesure de l'erreur absolue du modèle climatique dans la simulation de certaines variables climatiques [19]. Plus le NRMSE est petit, meilleur est le modèle et vice versa. **L'Equation (2)** se présente de la manière suivante :

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N (Fi - Oi)^2} \quad \text{ou} \quad \text{NRMSE} = \frac{\text{RMSE}}{\text{moy obs}} * 100 \quad (2)$$

2-3-1-3. Coefficient de corrélation

Le coefficient de corrélation de Pearson est une mesure de la force de la relation entre les sorties du modèle et les observations in situ. Il varie entre 1 et -1. Un coefficient de corrélation de Pearson de 1 indique une corrélation positive parfaite entre les données du modèle et les valeurs observées, alors que -1 traduit une corrélation négative parfaite entre les deux. Il est calculé à partir de **L'Equation (3)** ci-après:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (Fi - \bar{F})(Oi - \bar{O})}{\sqrt{\frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N (Oi - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^N (Fi - \bar{F})^2}} \quad (3)$$

2-3-2. Correction des biais

Il existe dans la littérature plusieurs techniques pouvant permettre de corriger les biais contenus dans des simulations historiques et futures. Elles se basent sur la différence entre les données observées et simulées au cours de la période de contrôle commune. Cependant, les méthodes Delta et quantile-quantile sont le plus souvent utilisées [19, 20]. Elles ont été retenues pour corriger les simulations futures (2041-2100) issues du modèle climatique régional CLMcom-KIT-CCLM5 validé après évaluation et pour le scénario d'émissions RCP 8.5.

2-3-2-1. Méthode du Delta

Elle consiste à déterminer un changement (ou une anomalie) qui correspond à la différence des moyennes entre une simulation de climat futur moins la simulation de climat présent, en calculant simplement un changement moyen sur l'ensemble de la distribution des observations [19].

2-3-2-2. Méthode de correction quantile-quantile (Q-Q)

Autrement appelée quantile mapping, elle consiste à estimer la correction en fonction des quantiles de la distribution de probabilité de la variable analysée [21]. Un quantile de la distribution simulée est remplacé par le même quantile de la distribution observée. Une fois estimée, la fonction de correction est appliquée à la variable issue des simulations de climat futur qui peut être finalement prise en compte dans des études d'impacts socio-économiques dans le contexte des changements climatiques.

2-3-3. Calcul des indices des précipitations extrêmes

Un ensemble de 4 indices sur 27 proposés par Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI) ont été calculés, après contrôle de qualité, en utilisant le logiciel *ClimPact 2*, disponible dans le site <https://github.com/ARCCSS-extremes/climpact2/>. La description détaillée de ces indices et les équations nécessaires pour leurs calculs sont disponibles sur le site web http://etccdi.pacificclimate.org/indices_cal.shtml. Le *tableau 2* présente les noms et les définitions des indices des extrêmes des précipitations retenus pour détecter les signaux des changements climatiques récents et futurs du site urbain de Pointe-Noire. Ces indices sont repartis en deux catégories. Il s'agit :

- **des indices des conditions moyennes**, c'est-à-dire les totaux annuels des précipitations (PRCPTOT) et l'intensité simple des précipitations (SDII) ;
- **des indices absolus** qui représentent les valeurs maximales des totaux des précipitations journalières au-dessus des percentiles 95 (jours très pluvieux (R95p)) et 99 (jours extrêmement pluvieux (R99p))

Tableau 2 : Indices des extrêmes des précipitations journalières [22]

Identification	Noms de l'indice	Définition	Unité
SDII	Intensité simple des pluies	Total annuel des précipitations sur le nombre des jours pluvieux ($PRCP \geq 1$ mm)	mm/année
PRCPTOT	Total annuel des pluies	Précipitations totales annuelles des jours pluvieux ($RR \geq 1,0$ mm)	mm/année
R95p	Jours très pluvieux	Précipitations totales annuelles avec précipitations $> 95^{\text{e}}$ percentile	mm/année
R99p	Jours extrêmement pluvieux	Précipitations totales annuelles avec les précipitations $> 99^{\text{e}}$ percentile	mm/année

Source : [22]

2-4. Détection des tendances

L'analyse des tendances a été réalisée par régression linéaire entre les différents indices pluviométriques et le temps (en années). Les pentes estimées (slope) ont été regroupées en trois classes : non significative [$p > 0,05$], significative [$0,01 < p < 0,05$] et très significative [$p < 0,01$] indiquant des tendances à la hausse ou à la baisse.

3. Résultats

3-1. Evolution récente des précipitations

L'évolution des précipitations à la station de Pointe-Noire sur la période allant de 1950 à 2017 a été appréciée au moyen des indices suivants : les intensités simples des pluies (SDII), les totaux pluviométriques annuels (PRCPTOT), les jours très pluvieux (R95p) et les jours extrêmement pluvieux (R99p). Deux grandes tendances se dégagent (**Figure 2**). La tendance à la baisse est accusée par les R95p (-0,72 mm d'eau/année) et surtout par les R99p (-1,23 mm d'eau/année). Cette décroissance n'est pas significative à 95 % comme seuil de significativité. Les valeurs de p-Value sont respectivement de l'ordre de 0,56 et 0,09. Par contre, les intensités simples des pluies (0,01 mm d'eau/année) et les totaux pluviométriques annuels (0,33 mm/année) sont à la hausse, une hausse non signification. En effet, les valeurs des p-valeur sont respectivement de 0,97 et 0,88.

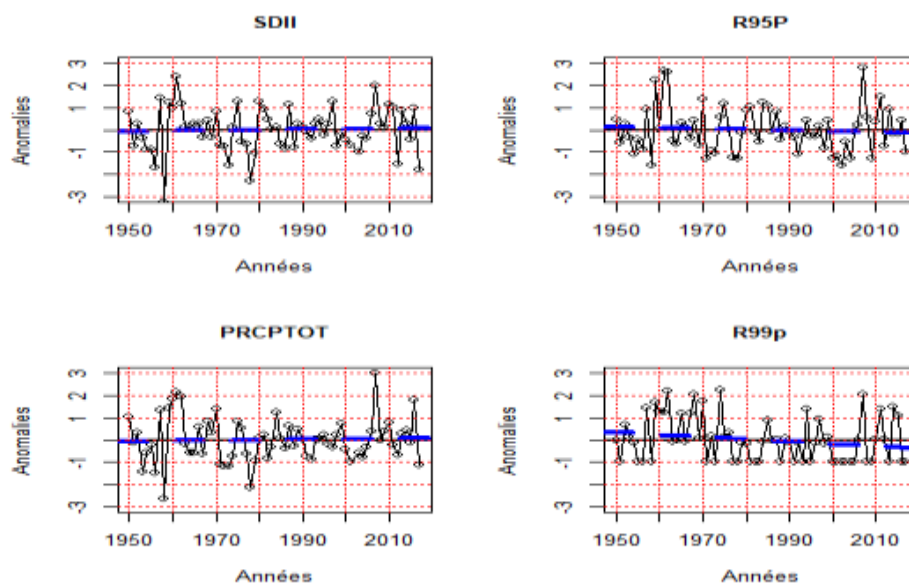


Figure 2 : Evolution récente des indices des précipitations extrêmes à Pointe-Noire (1950-2017)

3-2. Projections futures des précipitations du site urbain de Pointe-Noire

Les sorties des trois modèles climatiques régionaux (MCR) du programme CORDEX-Africa ont été analysées pour apprécier leur capacité à simuler le cycle annuel et la tendance interannuelle des précipitations de l'agglomération de Pointe-Noire. Il s'agit des modèles GERICs-REMO2015, CLMcom-KIT-CCLM5 et CCCma-CanRCM4. A cet effet, nous avons utilisé comme critères d'évaluation des performances : le biais, l'erreur quadratique moyenne, le coefficient de corrélation (R) de Pearson et l'analyse des tendances. Les résultats ont montré que seul le modèle climatique régional CLMcom-KIT-CCLM5 capture mieux le cycle annuel et interannuel des précipitations de l'agglomération de Pointe-Noire (**Tableau 3**). Les données issues de ce modèle présentent le même régime pluviométrique et tendance interannuelle que les données in situ sur la période commune allant de 1971-2000. Ce modèle présente en plus une faible valeur de NRMSE (2,10 %), une faible sous-estimation de valeurs des précipitations (Nbias = -7,27 %) et un coefficient de corrélation positive (R = 0,40).

Tableau 3 : Résultats des critères d'évaluation de la performance entre les données observées et les valeurs simulées à l'échelle annuelle

MODELES	R	Biais	Nbais (%)	RMSE	NRMSE
GERICS-REMO2015	0,73	-57,06	-60,57	16,47	17,48
CLMcom-KIT-CCLM5**	0,4	-6,85	-7,27	-1,97	2,1
CCCma-CanRCM4	0,11	19,04	20,22	5,49	5,83

3-2-1. Projections futures des précipitations à l'horizon moyen (2041-2070)

L'analyse des données des précipitations à partir des indices des précipitations extrêmes à l'horizon 2070 montre une hausse généralisée (**Figure 3**). Les totaux pluviométriques (PRCPTOT) annuels connaîtront une hausse très significative avec un p-Value=0,02 à 95 % comme seuil de confiance. Cette augmentation considérable est évaluée à 3,51 mm d'eau/année. Les intensités simples des précipitations (SDII) est le seul indice qui ne subira pas des modifications significatives. Les résultats obtenus montrent une tendance à la stabilité. La valeur de la tendance est de l'ordre 0,001 mm d'eau/année. Les jours très pluvieux (R95p), à l'instar des totaux pluviométriques, vont enregistrer une croissance. Cette hausse bien qu'elle ne sera pas significative, elle est évaluée à 0,52 mm d'eau/ année. Les jours extrêmement pluvieux (R99p) vont évoluer presque au même rythme que les R95p d'ici 2070 à la station de Pointe-Noire. La tendance sera à la hausse. Les apports en eau des jours extrêmement vont augmenter de 0,33 mm d'eau/ année. La hausse concomitante des PRCPTOT, des R95p et des R99p pourra faire que les problèmes environnementaux qui minent de nos jours l'agglomération de Pointe-Noire puissent s'aggraver si une bonne politique de gouvernance urbaine n'est pas mise place (**Figure 4**). Les problèmes les plus récurrents sont : les inondations, les érosions la stagnation des eaux des pluies et la dégradation des infrastructures routières.

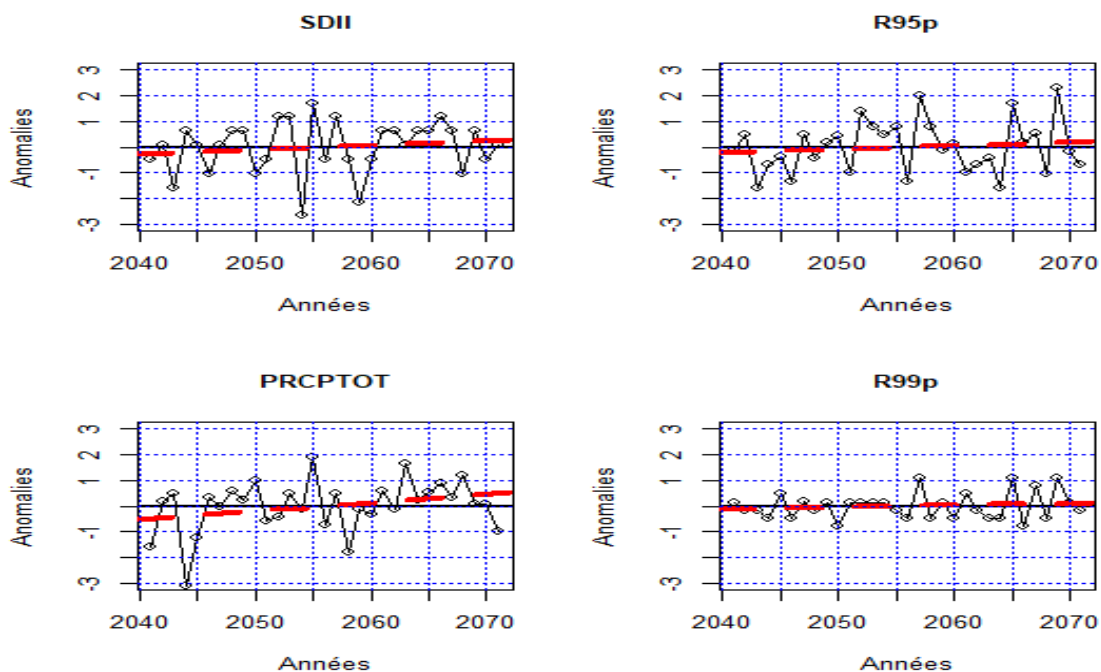


Figure 3 : Evolution future des précipitations de Pointe-Noire à l'horizon 2041-2071

3-2-2. Projections futures des précipitations à l'horizon lointain (2071-2100)

L'horizon 2100, le climat du site urbain de Pointe-Noire sera marqué par hausse persistante des PRCPTOT (1,41 mm d'eau/décade) et par une diminution concomitante des R95p (-0,14 mm d'eau/ année) et des R99p (-0,53 mm d'eau/année). Quant aux SDII, la tendance sera une fois plus à la stabilité. Comparé à l'horizon 2070, on peut dire l'horizon 2100 sera moins inquiétant, vu les tendances qui se dégagent (*Figure 4*).

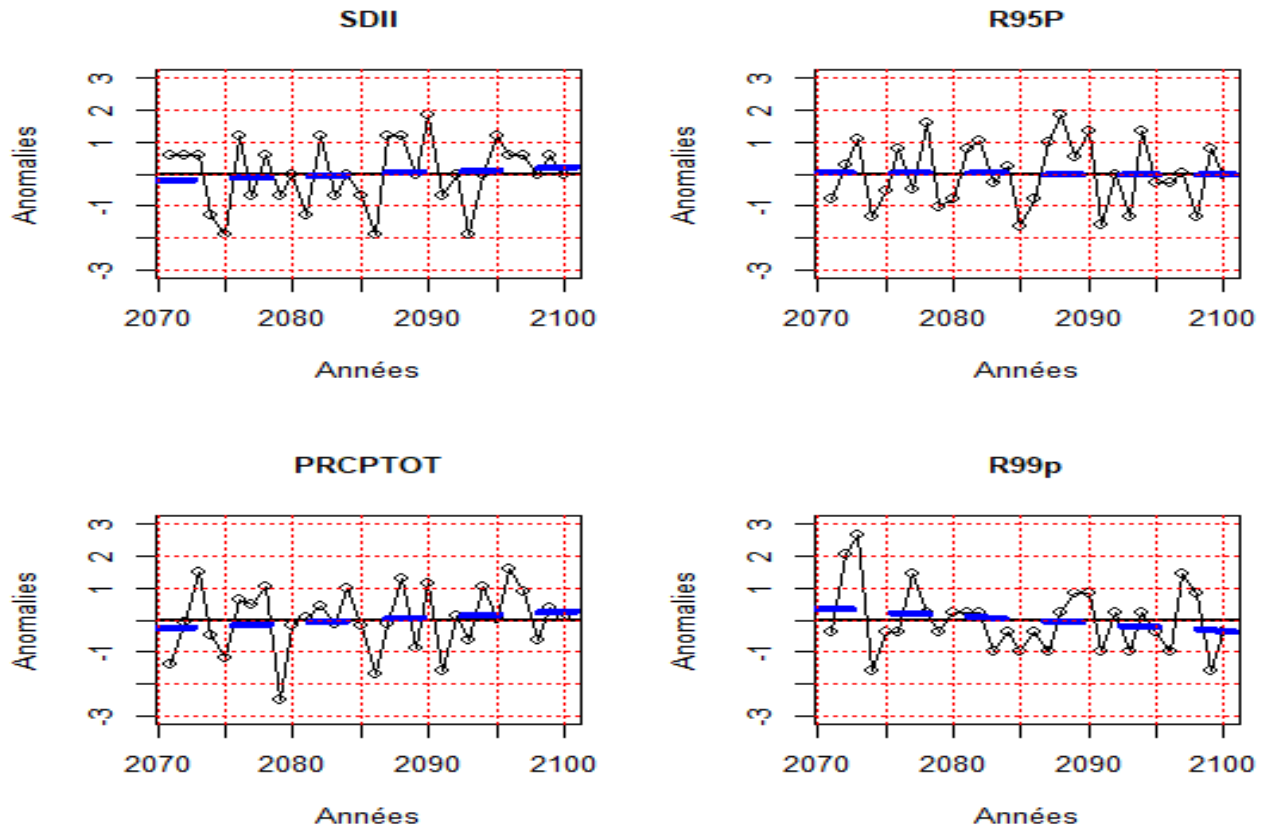


Figure 4 : Evolution future des précipitations de Pointe-Noire à l'horizon 2071-2100

4. Discussion

La meilleure façon de rendre résilientes les villes face au changement et à la variabilité climatique est de mettre en place les stratégies durables qui doivent tenir compte des tendances récentes et futures du climat urbain. Ce qui suppose que des études sur le climat urbain doivent être menées au préalable pour détecter ces tendances. Effectivement, les tendances récentes permettent de comprendre et d'expliquer les problèmes environnementaux auxquels les villes sont confrontées. Alors que les tendances futures renseignent sur le devenir des zones urbaines face au changement climatique. Pour les cas de l'agglomération de Pointe-Noire, cette étude a permis de mettre en évidence plusieurs tendances aussi bien sur l'évolution récente que future des précipitations journalières.

4-1. Tendances récentes

L'analyse des tendances récentes des précipitations de l'agglomération côtière de Pointe-Noire a montré que les intensités simples des pluies (SDII) et les totaux pluviométriques annuels (PRCPTOT) ont été à la hausse. Cette augmentation du risque de précipitations extrêmes au cours du XXI^{ème} siècle était probable [23]. Ces résultats riment bien avec les conclusions des travaux menés à l'échelle du globe [24]. Ils ont trouvé des valeurs plus importantes que celles obtenues à Pointe-Noire. Néanmoins la tendance à la baisse est confirmée (**Tableau 4**). Par contre, en Afrique Centrale, les jours très pluvieux (R95p) tout comme les jours extrêmement pluvieux (R99p) accusent une tendance à la baisse. Cette conclusion est en phase avec les travaux menés par [25]. Effet, ces derniers ont montré que les R95p et les R99p vont décroître respectivement de -12,19 et de -1,23 mm d'eau/ décade. Bien que la tendance soit la même, mais il convient de noter que la baisse observée à Pointe-Noire est moins importante. En Afrique de l'Ouest, plus particulièrement au Sénégal, les totaux pluviométriques annuels, les jours très pluvieux et extrêmement pluvieux sont en baisse [26].

Tableau 4 : Récapitulation des tendances récentes des précipitations des travaux antérieurs

INDICES	Tendances		
	Pointe-Noire	Afrique centrale [25]	Globe [24]
SDII	0,01	0,06	0,05
PRCPTOT	0,33	-31,13	10,59
R95P	-0,72	-12,19	4,07
R99P	-1,23	-3,66	2,52

4-2. Tendances futures

Il est devenu de plus en plus important de connaître l'évolution future du climat pour mieux s'adapter surtout pour les pays africains qui sont considérés comme très vulnérables face aux changements climatiques [27]. A cet effet, les projections climatiques régionales futures sont de plus en plus utilisées comme outil dans l'élaboration d'activités relatives à l'adaptation, aux politiques et aux prises de décisions. L'analyse des données des précipitations issues des projections climatiques régionales a montré qu'à l'horizon 2070, l'agglomération de Pointe-Noire connaîtra une hausse des totaux pluviométriques annuels (PRCPTOT), des intensités simples des pluies (SDII), des totaux pluviométriques des jours très pluvieux (R95p) et des jours extrêmement pluvieux (R99p). La hausse la plus importante sera enregistrée par les totaux pluviométriques annuels. La tendance à la hausse accusée par les PRCPTOT et SDII persistera jusqu'à l'horizon 2100. Par contre, les R95p et R99p connaîtront une décroissance non significative. Ces résultats sont bien en phase avec les conclusions des nombreux auteurs. On peut citer le [6] qui a montré que d'ici 2050, le sud du Congo connaîtra une augmentation des précipitations annuelles de l'ordre de 4 à 24 % et de 6 à 27 % d'ici 2100. Des valeurs plus élevées seront observées à Pointe-Noire. Mais, les travaux de [28] prévoient une décroissance des PRCPTOT à Pointe-Noire de l'ordre de 9,27 % à l'horizon 2070 et de 11,3 % à l'horizon 2100. En plus, les jours très pluvieux et extrêmement pluvieux accuseront une tendance à la hausse aussi bien à l'horizon 2070 qu'à l'horizon 2100. Malheureusement, l'auteur ne précise pas le modèle climatique régional utilisé. Il dit avoir fait recours aux données du modèle climatique régional CORDEX-Africa. Or, CORDEX est un programme et non un modèle ; un programme qui regorge plusieurs modèles climatiques régionaux. Dans l'ensemble du Bassin du Congo [29] où est située l'agglomération de Pointe-Noire, on s'attend à une augmentation des totaux

pluviométriques annuels de l'ordre 3,2 % à l'horizon 2070 et de 5,4 % à l'horizon 2100, peu importe le scénario utilisé (RCP 4.5 et RCP 8.5). Le climat de l'Afrique de l'Ouest présentera pratiquement les mêmes tendances que celui de du Bassin du Congo. Il sera marqué par une hausse des événements pluvieux exceptionnels (R99p) et des intensités simples des jours pluvieux (SDII) dans la partie Ouest du Sahel, à l'horizon 2100 [30]. En Afrique du Nord plus précisément en Egypte, une décroissance des PRCPTOT de 1,52 % et attendue d'ici 2100. La baisse sera aussi observée au niveau des Intensités Simples de pluies (SDII) [31]. En Algérie, les variations des pluies simulées par le modèle MPI pour le scénario climatique RCP 4.5 au cours de la période 2075-2099 mettent en relief une décroissance des cumuls annuels de précipitations comprise entre -19 % et -38 % à l'échelle du bassin oranais [32]. En comparant les tendances récentes aux tendances futures des précipitations, force est de constater que l'horizon 2070 sera très inquiétant pour l'agglomération de Pointe-Noire. En effet, avec une hausse des totaux pluviométriques de l'ordre de 0,33 mm d'eau/an, l'agglomération de Pointe-Noire a connu des sérieux problèmes environnementaux de 1950 à 2017. On doit s'attendre à des situations plus alarmantes à l'horizon 2070. Il est prévu une hausse des PRCPTOT de l'ordre de 3,53 mm d'eau/an, soit 10 fois plus importante qu'avant, c'est-à-dire entre 1950-2017. Il faut ajouter à cela l'augmentation des jours très pluvieux (R95p) et extrêmement pluvieux (R99p) qui jusque-là ont été à la baisse. La hausse concomitante des PRCPTOT, des R95p et R99p pourra dégrader de façon considérable le site urbain de Pointe-Noire et imposer aux autorités municipales et aux populations des mesures et des stratégies durables pour s'adapter à la nouvelle ambiance climatique. Cette situation pourra perdurer jusqu'à l'horizon 2100 à cause de la hausse persistante des PRCPTOT. Il est important de souligner que Pointe-Noire est une agglomération de la République du Congo, pays en voie de développement. Les pays africains en voie de développement, en grande partie, ne sont pas encore prêts à faire face aux effets du changement et variabilité climatique. Ils ont encore des grands défis de taille auxquels ils doivent faire face [27, 32]. Il s'agit des problèmes socio-économiques qui sont encore plus pressants que les risques et les catastrophes liés aux changements climatiques. Parmi ces grands défis figurent en bonne place : l'insuffisance des infrastructures adéquates et du personnel dans le domaine de l'éducation et de la santé, l'instabilité politique, l'insécurité alimentaire, le problème de transport et une pauvreté endémique. La résolution de ces problèmes exige des moyens très colossaux que ces pays déjà très endettés ne disposent pas. Ils sont obligés de solliciter les aides auprès des grandes puissances.

5. Conclusion

La présente étude portant sur le site urbain de l'agglomération de Pointe-Noire avait pour objectif de détecter les tendances récentes (1950 à 2017) et futures (2041 à 2100) des précipitations. Afin d'atteindre cet objectif, nous avons analysé les données in situ et les sorties des modèles climatiques régionaux, plus précisément le modèle climatique CLMcom-KIT-CCLM5. Des indices des extrêmes climatiques ont été calculés à partir du logiciel *ClimPact 2*. Il ressort de l'analyse des données des précipitations in-situ que l'agglomération de Pointe-Noire a été marquée sur le plan climatique de 1950 à 2017 par une hausse non significative des totaux pluviométriques annuels (PRCPTOT) et des intensités simples des pluies (SDII). Par contre, les jours très pluvieux (R95p) et les jours extrêmement pluvieux (R99p) ont enregistré une décroissance. Au total, les données de simulations de trois modèles climatiques régionaux ont été téléchargées. Après évaluation de performance à partir des paramètres statistiques, seul le modèle climatique régional CLMcom-KIT-CCLM5 a été retenu pour des projections futures des précipitations à Pointe-Noire. Ce modèle capture mieux le cycle annuel et interannuel des précipitations. L'analyse des données issues de ce modèle montre une nette augmentation aussi bien des PRCPTOT, SDII, R95p que des R99p à l'horizon 2070. La hausse des totaux pluviométriques surtout va persister jusqu'à l'horizon 2100. Les jours très pluvieux (R95p) et extrêmement

pluvieux (R99p), par contre vont accuser une tendance à la décroissance. Quant aux SDII, la tendance sera une fois plus à la stabilité. Cette situation peut être inquiétante pour l'agglomération de Pointe-Noire qui de nos jours enregistre des nombreux problèmes environnementaux en rapport avec les précipitations. On peut citer entre autres : l'érosion continentale, les inondations dans des nombreux quartiers, la stagnation des eaux des pluies et la dégradation des infrastructures routières. Face à la montée de ces phénomènes qui risquent d'être aggravés par les tendances futures des précipitations surtout pendant la période allant de 2041 à 2071, il est important de mettre en place une bonne politique de gouvernance urbaine afin de rendre résiliente l'agglomération de Pointe-Noire face aux modifications climatiques. Cette politique devrait se fonder sur l'assainissement des eaux des pluies et des eaux usées, la gouvernance foncière et la gestion des ordures ménagères. En perspective, il serait intéressant de mener des études sur la perception endogènes et les stratégies d'adaptation dans les quartiers précaires de l'agglomération de Pointe-Noire. Cette étude permettra d'évaluer le degré de vulnérabilité et de résilience des populations des quartiers précaires face à la variabilité et au changement climatique.

Références

- [1] - GIEC, Gestion des risques de catastrophes et de phénomènes extrêmes pour les besoins de climatique. Ré des décideurs, (2012) 32 p.
- [2] - M. YATES-MICHELIN et BULTEAU, T. CECILE, l'évolution pluri-décennale du trait de côte : synthèse bibliographique. Rapport BRGM RP/50061-FR, (2011) 104 p.
- [3] - G. LE COZANNET, M. GARCIN, TH. BULTEAU, C. MIRGON, MARISSA L. YATES, M. MENDEZ, A. BAILLS, D. IDIER, C. OLIVEROS, An AHP-derived method for mapping the physical vulnerability of coastal areas at regional scales. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Copernicus Publ. | *European Geosciences Union*, 13 (2013) 1209 - 1227
- [4] - S. JEVREJEVA, LP. JACKSON, A. GRINSTED, D. LINCKE et B. MARZEION, Flood damage costs under the sea level rise with warming of 1.5°C and 2°C, *Environmental Research Letters*, (2018) 1 - 11
- [5] - Y. ENNESSER, M. TERRIER et V. SAID, Les grandes villes côtières d'Afrique du Nord face au changement climatique et aux risques naturels, *géosciences la revue du BRGM pour une terre durable*, N°21, (2016) 50 - 57
- [6] - MINISTERE DE L'INDUSTRIE MINIERE ET DE L'ENVIRONNEMENT, Communication Nationale Initiale (République du Congo - Brazzaville), (2001) 74 p.
- [7] - A. LENGA, L. E. BAGHAMBOULA et J. VOUIDIBIO, Fragmentation d'un écosystème Littoral : cas de la baie de Loango au Congo-Brazzaville, *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 6(5) (2012) 2113 - 2130
- [8] - R. NGATSE, B. A. MAYIMA, I. BOUZOU MOUSSA et M. J. SAMBA - KIMBATA, Perception du phénomène des ravinements par les populations de Pointe-Noire en République du Congo, *Afrique SCIENCE*, 16(2) (2020) 22 - 33
- [9] - M. MASSOUANGUI-KIFOUALA, E. DESSOUZA MARIANO & P. S. L. MALEKE, Détermination des périodes favorables aux semis agricoles dans la ville de Pointe-Noire (République du Congo), *Geo-Eco-Trop.*, 45, 3, (2021) 467 - 474
- [10] - M. MASSOUANGUI-KIFOUALA, Identification des dates de démarrage et de fin des saisons des pluies à Pointe-Noire (République du Congo), *International Journal of Innovation and Applied Studies* Vol. 32, N°1, (2021) 83 - 92
- [11] - G. SAMBA, le climat du Congo Brazzaville, L'Harmattan, (2020), 241 p.

- [12] - A. P. BATCHI MAV, M. MASSOUANGUI KIFOUALA et M. J. SAMBA-KIMBATA, analyse des extrêmes pluviométriques par la méthode des indices climatiques en République du Congo, *Revue de Géographie de l'Université de Ouagadougou*, N°09, Vol. 1, (2020) 167 - 185
- [13] - G. LE COZANNET, M. GARCIN, T. BULTEAU, C. MIRGON, M. L. YATES, M. MENDEZ, A. BAILLS, D. IDIER, and C. OLIVEROS, An AHP-derived method for mapping the physical vulnerability of coastal areas at regional scales, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 13 (2013) 1209 - 1227
- [14] - MINISTERE DE LA CONSTRUCTION, DE L'URBANISME, DE LA VILLE ET DU CADRE DE VIE, Schéma Directeur de l'Urbanisme de la ville de Pointe-Noire, (2016), 88 p.
- [15] - G. FLATO, J. MAROTZKE, B. ABIODUN, and P. BRACONNOT, Evaluation of climate models. Climate Change 2013 : The Physical Science Basis, T. Stocker et al., Eds., *Cambridge University Press*, (2013) 1158 - 1167
- [16] - R. JAMES, R. WASHINGTON, B. ABIODUN, G. KAY, J. MUTEMI, W. POKAM, N. HART, G. ARTAN and C. SENIOR, evaluating climate models with an african lens, *American Meteorological Society*, (2018) 313 - 336
- [17] - D.-L. GUO, J.-Q. SUN & E.-T. YU, Evaluation of CORDEX regional climate models in simulating temperature and precipitation over the Tibetan Plateau, *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 11, 3, (2018) 219 - 227
- [18] - Y. TONG, X. GAO, Z. HAN, Y. XU and F. GIORGI, Bias correction of temperature and precipitation over C using the QM and QDM methods, *Clim. Dynam.*, 57, 1 - 19
- [19] - S. TAÏBI, A. ZEROUAL and N. MELHANI, Evaluation de deux méthodes de correction de biais des sorties de modèles climatiques régionaux Cordex-Africa pour la prévision des pluies : cas du bassin côtier oranais, *Proc. IAHS*, 384, (2021) 213 - 218
- [20] - A. J. CANNON, S. R. SOBIE, T. Q. MURDOCK, Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes? *J. Clim.* 28, (2015), 6938 - 6959
- [21] - M. MENDEZ, B. MAATHUIS, D. HEIN-GRIGGS and L. F. ALVARADO-GAMBOA, Performance Evaluation of Bias Correction Methods for Climate Change Monthly Precipitation Projections over Costa Rica, *Water*, 12, (2020) 482
- [22] - L. ALEXANDER and N. HEROLD, *ClimPACT2*, Indices and software, Commission for Climatology (CCI) Expert Team on Sector-Specific Climate Indices (ET-SCI), WORLD CLIMATE PROGRAMME, (2016), 46 p.
- [23] - J.-M. SOUBEYROUX, L. NEPPEL, J.-M. VEYSSEIRE, Y. TRAMBLAY, J. C., V. GOUGET, Evolution des précipitations extrêmes en France en contexte de changement climatique, *La Houille Blanche*, n° 1, (2015) 27 - 33
- [24] - L. V. ALEXANDER, X. ZHANG, T. C. PETERSON, J. CAESAR, B. GLEASON, A. M. G. KLEIN TANK, M. HAYLOCK, D. COLLINS, B. TREWIN, F. RAHIMZADEH, A. TAGIPOUR, K. RUPA KUMAR, J. REVADEKAR, G. GRIFFITHS, L. VINCENT, D. B. STEPHENSON, J. BURN, E. AGUILAR, M. BRUNET, M. TAYLOR, M. NEW, P. ZHAI, M. RUSTICUCCI, and J. L. VAZQUEZ-AGUIRRE, : Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 111, (2006) 1 - 22
- [25] - E. AGUILAR, A. AZIZ BARRY, M. BRUNET, L. EKANG, A. FERNANDES, M. MASSOUKINA, J. MBAH, A. MHANDA, D. J. DO NASCIMENTO, T. C. PETERSON, O. THAMBA UMBA, M. TOMOU AND X. ZHANG, Changes in temperature and precipitation extremes in western central Africa, Guinea Conakry, and Zimbabwe, 1955 - 2006, *J. Geophys. Res.*, 114, (2009) 1 - 11
- [26] - Ch. FAYE, Caractéristiques spatio-temporelles de la pluviométrie et de l'écoulement extrême dans un contexte de changements climatiques en Afrique de l'ouest : l'exemple du Sénégal. *Revue scientifique et technique*, (2018) 29 - 50
- [27] - GIEC, Incidences de l'évolution du climat dans les régions : Evaluation de la vulnérabilité Afrique, Rapport spécial, (2001) 53 p.

- [28] - G. IBIASSI MAHOUNGOU, Diagnostic de l'évolution actuelle (1960 à 2019) et future (2040 ; 2070 ; 2100) des facteurs d'exposition climatiques à Pointe-Noire (République du Congo), *Revue Espace Géographique et Société Marocaine*, N° 52, (2021) 43 - 64
- [29] - S. KARAM, O. SEIDOU, N. NAGABHATLA, D. PERERA, R. M. TSHIMANGA, Assessing the impacts of climate change on climatic extremes in the Congo River Basin, *Climatic Change*, 170, 40 (2022) 1 - 24
- [30] - A. BADARA SARR et M. CAMARA, 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 (2017) 206 - 222
- [31] - A. N. MOSTAFA, A. WHEIDA, M. EL NAZER, M. ADEL, L. EL LEITHY, G. SIOUR, A. COMAN, A. BORBON, A. WAHAB MAGDY, M. OMAR, A. SAAD-HUSSEIN, S. C. ALFARO, Past (1950 - 2017) and future (2100) temperature and precipitation trends in Egypt, *Weather and Climate Extremes*, 26, (2019) 1 - 12
- [32] - UA, Stratégie Africaine sur les Changements Climatique, (2014), 84p