

Évaluation des changements temporels et spatiaux du climat futur de 2021 à 2100 dans le bassin Nanija Bolong (Sénégal)

Modou NDIAYE^{1*} & Cheikh FAYE²¹ Département de Géographie, U.F.R. Sciences et Technologies, Université Assane Seck de Ziguinchor, Laboratoire de Géomatique et Environnement, Ziguinchor, Sénégal.² Département de Géographie, U.F.R. Sciences et Technologies, Université Assane Seck de Ziguinchor, Sénégal.*Corresponding author: m.n220@zig.univ.sn

ARTICLE INFO

Article history:

Received : March 25, 2026

Accepted after corrections:
May 26, 2026*Keywords:*

CMIP6, ISIMIP3b, climate change, spatial and temporal distribution, model, basin

ABSTRACT

With increasing frequency and intensity across the globe, climate change has posed high risks to any region of the world, including the Sahelian zones, which has significantly affected biodiversity, vegetation, and economies. Thus, the objective of this study is to quantify the annual and seasonal change in climate variables (rainfall and temperature), in response to potential climate change scenarios in the Nanija Bolong Basin. To do this, this study uses data from the reference period 1985-2014 as well as those extracted from four models (MODELE_GFDL_ESM4, MODELE_IPSL-CM6A-LR, MODELE_MPI-ESM1-2-HR and MODELE_MRI-ESM2) selected from about twenty models over 20-year periods (2021-2040, 2041-2060, 2061-2080 and 2081-2100) to project rainfall and temperature trends in the Nanija Bolong basin based on the latest version of the CMIP6 project global model according to three emission scenarios (SSP 126, SSP 370 and SSP 585). Using 1985-2014 as the reference period with all periods, this research extracted and predicted climate trends in the period 2021-2100 based on four scenarios. Projected maximum and minimum temperatures showed increasing trends (from 23.7°C under SSP 245 for 2021-2040 to 27.1°C under SSP 585 for 2081-2100 on minimum temperatures; from 32.2°C under SSP 370 for 2021-2040 to 36.6°C under SSP 585 for 2021-2040 on maximum temperatures), while the change in annual precipitation showed decreasing trends (variation from 483 mm under SSP 245 for 2021-2040 to 284 mm under SSP 585 for 2021-2040). The results of this study provide important implications for climate change adaptation scenarios and territorial planning in the Sahelian environment.

RESUME

Avec l'accroissement de la fréquence et de l'intensité des phénomènes climatiques à l'échelle mondiale, le changement climatique représente aujourd'hui un risque majeur pour toutes les régions du globe, y compris les zones sahéliennes. Ce phénomène a profondément impacté la biodiversité, la couverture végétale ainsi que les dynamiques économiques. Dans ce contexte, cette étude vise à quantifier les évolutions annuelles et saisonnières des variables climatiques, notamment les précipitations et les températures, en réponse à différents scénarios climatiques potentiels dans le bassin du Nanija Bolong. Pour atteindre cet objectif, l'analyse repose sur des données issues de la période de référence 1985-2014, ainsi que sur les projections fournies par quatre modèles climatiques (GFDL_ESM4, IPSL-CM6A-LR, MPI-ESM1-2-HR et MRI-ESM2), sélectionnés parmi une vingtaine de modèles du projet CMIP6. Ces modèles ont permis d'analyser les tendances climatiques futures sur quatre périodes de 20 ans (2021-2040, 2041-2060, 2061-2080 et 2081-2100), en s'appuyant sur trois scénarios d'émissions (SSP126, SSP370 et SSP585). En comparant chacune de ces périodes à la période de référence (1985-2014), les résultats mettent en évidence une tendance générale à l'augmentation des températures minimales (de 23,7°C sous le scénario SSP2-4.5 pour 2021-2040 à 27,1°C sous SSP585 pour 2081-2100) et des températures maximales (de 32,2°C sous SSP370 pour 2021-2040 à 36,6°C sous SSP585 pour la même période). En revanche, les précipitations annuelles montrent une tendance à la baisse, passant de 483 mm sous SSP2-4.5 pour 2021-2040 à 284 mm sous SSP585 pour la même période. Ces résultats apportent des éléments cruciaux pour l'élaboration de stratégies d'adaptation au changement climatique et pour une planification territoriale durable dans le contexte sahélien.

Mots-clés: CMIP6, changement climatique, distribution spatiale et temporelle, modèle, bassin.

1. Introduction

L'accès aux ressources en eau, essentiel à la fois pour la consommation humaine et le maintien des écosystèmes, dépend fortement de la distribution spatio-temporelle des précipitations et de l'évaporation (Milly et al., 2005). Le changement climatique est marqué par une diminution de la pluviométrie et une intensification des sécheresses, la dégradation des terres et des écosystèmes, la croissance démographique et la pression croissante sur les ressources naturelles constituent aujourd'hui des contraintes majeures au développement durable et à la préservation des systèmes naturels. Dans l'Anthropocène, la sécheresse ne peut plus être considérée comme un simple aléa naturel, car l'activité humaine en modifie désormais la fréquence, l'intensité et les caractéristiques (Haile, Tang, Li et al., 2020 ; Tang, 2020). Le réchauffement climatique aggrave encore ces impacts sur les environnements et les sociétés (Touma et al., 2015). Les émissions de gaz à effet de serre (GES), en particulier, sont à l'origine d'un assèchement régional et de la recrudescence de méga-sécheresses à l'échelle mondiale (Ault et al., 2016 ; Leng et al., 2015).

La croissance rapide de la population entraîne une augmentation significative de la demande alimentaire, ce qui risque d'aggraver l'insécurité alimentaire mondiale et de compromettre l'atteinte de l'objectif « Faim Zéro » fixé par les Nations Unies à l'horizon 2030 (FAO, 2017 ; Fujimori et al., 2019). Cette pression démographique s'accompagne également d'une hausse marquée de la consommation d'eau, contribuant à une augmentation de 27 % de la fréquence des sécheresses mondiales (Wada et al., 2013). Ainsi, le changement climatique s'impose comme l'un des défis les plus pressants auxquels l'humanité et les écosystèmes naturels doivent faire face (IPCC, 2013). Dans ce contexte, la mise en œuvre rapide et efficace de stratégies d'adaptation et de politiques de développement est cruciale pour réduire l'insécurité alimentaire et hydrique (AghaKouchak, 2015).

Pour anticiper les impacts futurs du climat, les modèles de circulation générale (MCG) constituent des outils essentiels. Développés par diverses institutions scientifiques à l'échelle mondiale, ces modèles offrent des projections du climat futur. Chaque MCG repose sur des hypothèses et des formulations mathématiques propres, ce qui engendre des divergences dans les projections climatiques (Konapala et al., 2020 ; Laurent et al., 2020). Par conséquent, le choix du modèle à utiliser dans une étude hydrologique est une étape décisive, bien que souvent effectuée avec une connaissance limitée de sa performance (Murphy, 2004).

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a lancé la sixième phase du projet d'inter comparaison des modèles couplés (CMIP6) dans son sixième rapport d'évaluation. Ce projet facilite une analyse comparative multi-modèles conforme aux standards scientifiques internationaux (Konapala et al., 2020 ; Laurent et al., 2020). Les ensembles multi-GCM, qui en découlent, permettent une approche probabiliste plus robuste dans l'évaluation des prévisions climatiques et la conception de stratégies d'adaptation. Les scénarios socio-économiques partagés (SSP) introduits dans le cadre de CMIP6 articulent le forçage radiatif avec les trajectoires de développement socio-économique, offrant une base scientifique essentielle pour le dernier rapport du GIEC (Chen et al., 2019). Ils ont été largement mobilisés à différentes échelles d'analyse (Almazroui et al., 2020 ; Parsons, 2020). Chaque SSP décrit une voie de développement spécifique : le SSP126 reflète un monde tourné vers la durabilité, avec un faible forçage radiatif et peu de vulnérabilités ; SSP245 correspond à une trajectoire intermédiaire avec des pressions modérées sur l'environnement ; tandis que SSP370 incarne une rivalité régionale avec de fortes émissions dues à une croissance rapide de la population et à un développement technologique lent (O'Neill et al., 2013).

Étant donné l'impossibilité de prédire avec certitude l'évolution future des facteurs socio-économiques, il est indispensable d'examiner un large éventail de scénarios, comme cela se fait depuis plus de quarante ans dans la recherche climatique. Ces scénarios sont fondés sur des hypothèses relatives aux trajectoires économiques, sociales, technologiques et environnementales, et servent d'entrées aux modèles climatiques afin d'explorer les réponses possibles à différentes conditions futures, y compris les rétroactions et sensibilités potentielles (O'Neill et al., 2016).

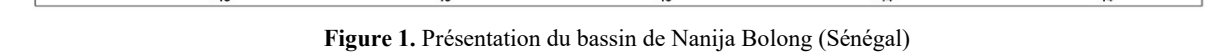
Dans ce cadre, la présente étude s'appuie sur des données de la période de référence 1985-2014 ainsi que sur les sorties de quatre modèles climatiques (GFDL_ESM4, IPSL-CM6A-LR, MPI-ESM1-2-HR et MRI-ESM2) pour analyser les tendances des températures et des précipitations dans le bassin du Nanija Bolong. Les projections portent sur quatre périodes futures de 20 ans : 2021-2040 (futur proche), 2041-2060 et 2061-2080 (futur moyen), et 2081-2100 (futur lointain). Les simulations ont été réalisées à une résolution spatiale de 2,5 minutes, en se basant sur les scénarios d'émissions SSP126, SSP370 et SSP585.

L'objectif spécifique est de quantifier les variations annuelles et saisonnières des précipitations et des températures dans la zone d'étude en réponse à ces scénarios climatiques. Les résultats obtenus fournissent des éléments essentiels pour la formulation de politiques de gestion durable des ressources en eau dans le bassin de Nanija Bolong, et plus largement dans les zones sahéliennes, afin de renforcer les capacités d'adaptation face aux changements climatiques à venir.

2. Matériels et méthodes

2.1. La zone d'étude

Le bassin versant du Nanija Bolong, est situé aux limites des régions de Tambacounda et Kaffrine (Sénégal). Structuré autour de son bras principal, le Nanija Bolong est un cours d'eau long de 208 km et qui draine un bassin versant de 3.700 km² et s'étend entre les latitudes 14°08'35"N et 13°50'45"N et les longitudes 14°09'40"W et 14°56'21"W. Administrativement, le bassin traverse plusieurs unités territoriales. Les communes Kouthia, Gaydi, Kouthiaba Ouolof, Malème Niani, Mareto et Pass Koto, situées en amont, constituent la principale zone de captage de l'eau pluviale, celles de Fass Thiekene, Ida Mouride, Koungheul, Koumpentou et Ndamé, en zone médiane, concentrent l'essentiel des activités agricoles irriguées et la commune de Saly Escalé, en aval, reçoit les principaux écoulements et sédiments du bassin.



Les données mobilisées proviennent de cinq modèles climatiques globaux du programme ISIMIP2b

Plotting indicator	Statistic	MDE	RMSE	Line	1-T	1- σ	IVS	Indicator	Line
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
8	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
9	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
10	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
11	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
12	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
13	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
14	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
15	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
16	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
17	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
18	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
19	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
20	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
21	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
22	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
23	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
24	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
25	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
26	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
27	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
28	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
29	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
30	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
31	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
32	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
33	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0				

Les résultats des cinq modèles climatiques ISIMIP2b disponibles au moment de l'analyse (Tableau 1) ont été

Tableau 1. Modèles ISIMIP3b utilisés pour l'étude (Source : <https://data.isimip.org/>)

Modèle ISIMIP3b (nom abrégé)	Institution	Membres de l'ensemble
GFDL-ESM4 (GFDL)	National Oceanic and Atmospheric Administration, Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, États-Unis	r1i1p1f1
IPSL-CM6A-LR (IPSL)	Institut Pierre Simon Laplace, France	r1i1p1f1
MPI-ESM1-2-HR (MPI)	Institut Max Planck de météorologie, Allemagne	r1i1p1f1
IRM-ESM2-0 (IRM)	Institut de recherche météorologique, Tsukuba, Japon	r1i1p1f1
UKESM1-0-LL (UKESM)	Met Office Hadley Centre, Royaume-Uni	r1i1p1f2

Les projections climatiques pour la période future ont été décomposées en quatre horizons temporels caractéristiques correspondant à différentes phases du XXI^e siècle :

- Le futur proche : 2021-2040 (horizon 2040 ou début du XXI^e siècle),
- Le futur moyen 1 : 2041-2060 (horizon 2060 ou milieu du siècle),
- Le futur moyen 2 : 2061-2080 (horizon 2080),
- Le futur lointain : 2081-2100 (horizon 2100 ou fin du XXI^e siècle).

Cette structuration temporelle permet une analyse détaillée de l'évolution progressive des variables climatiques selon les différents scénarios d'émissions.

3. Résultats et Discussion

3.1 Évolution des températures

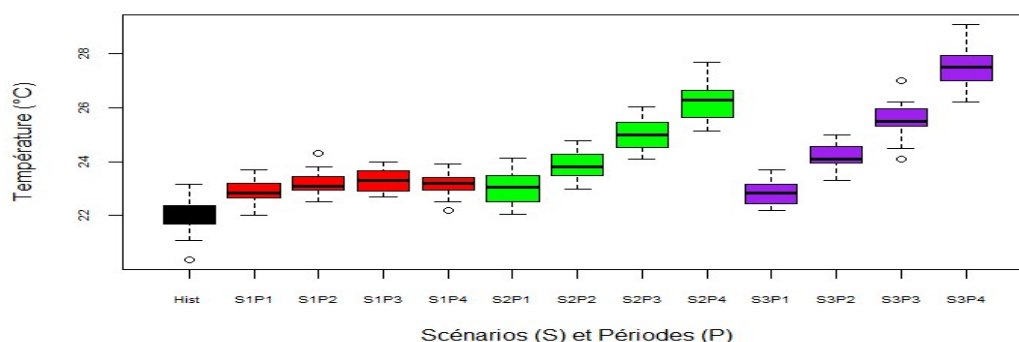
Les paramètres climatiques analysés dans cette étude sont les températures minimales, maximales et moyennes. L'évaluation porte à la fois sur les valeurs annuelles et mensuelles, comparées d'une période à une autre en fonction des scénarios socio-économiques retenus. Les températures annuelles projetées sont confrontées à celles de la période de référence 1985-2014, considérée ici comme période de contrôle.

L'analyse des figures 1, 2 et 3 révèle une hausse généralisée des températures minimales, maximales et moyennes au fil du temps, avec une intensification progressive jusqu'à la fin du siècle, en 2100. Cette augmentation est d'autant plus marquée que l'on s'approche de cet horizon temporel, en particulier dans le cadre du scénario le plus pessimiste, SSP585. Cette tendance à la hausse s'inscrit dans la continuité des changements observés depuis 1985, et reflète clairement les effets du réchauffement climatique en cours.

Les paramètres étudiés sont les températures minimales, maximales et moyennes. L'analyse porte sur les valeurs annuelles d'une période à une autre en fonction des scénarios. Celles annuelles sont comparées aux températures de la normale (1985-2014) qui est retenue comme période de contrôle.

3.1.1. Les températures minimales à l'échelle annuelle

À l'échelle annuelle, les températures minimales projetées varient entre 22,8 °C (sous le scénario SSP126 pour la période 2021-2040) et 27,5 °C (sous le scénario SSP585 à l'horizon 2081-2100). Une augmentation progressive est observée d'une période à l'autre, y compris dans le scénario le plus optimiste (SSP126), où les températures minimales dépassent 23,2 °C durant toutes les périodes futures. Des tendances similaires sont constatées pour les autres scénarios, avec des températures minimales dépassant 23 °C dès les premières périodes de projection. Dans le cadre du scénario le plus pessimiste (SSP585), les températures minimales atteignent 24,1 °C dès 2041-2060, pour culminer à environ 27,5 °C à la fin du siècle (2081-2100), traduisant une hausse marquée et continue en lien avec l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre (Figure 2).

**Figure 2.** Évolution de la température minimale par périodes et par scénarios du bassin de Nanija Bolong

La Figure 2 illustre l'évolution des températures minimales annuelles projetées pour le bassin du Nanija Bolong, mettant en évidence une tendance générale à l'augmentation des températures, avec des valeurs moyennes de plus en plus élevées au fil des périodes. Les boxplots montrent une variabilité accrue sous les scénarios les plus pessimistes, en particulier SSP585, où la médiane des températures minimales atteint 27,5°C en 2081-2100. Les boîtes les plus longues dans ce scénario indiquent une forte dispersion des données, tandis que les boîtes plus courtes pour SSP126 suggèrent une variabilité moindre, reflétant un réchauffement moins intense et plus stable.

En comparaison avec la période de référence 1985-2014, une augmentation généralisée des températures minimales est observée à travers tous les scénarios, cette hausse étant particulièrement marquée dans les scénarios les plus pessimistes, notamment SSP585, à mesure que l'on progresse vers la fin du siècle. La figure 1 illustre clairement cette tendance croissante. La variabilité spatio-temporelle des températures minimales annuelles dans le bassin a été analysée à l'aide de diagrammes en boîte et à moustaches (Figure 2). La position relative de la médiane par rapport à la moyenne fournit des indications sur la distribution des données : une médiane proche de la moyenne traduit une distribution symétrique ; une médiane inférieure à la moyenne indique une asymétrie positive (distribution étalée vers la droite) ; à l'inverse, une médiane supérieure signale une asymétrie négative (distribution étalée vers la gauche), conformément aux critères proposés par [Jenifer et Jha \(2021\)](#).

Les valeurs moyennes des températures minimales annuelles les plus élevées sont observées sous le scénario SSP585 pour la période 2081-2100, atteignant 27,5 °C. En revanche, les plus faibles valeurs moyennes, autour de 22,8 °C, sont relevées sous le scénario SSP126 pour la période 2021-2040 soit une différence de 4,7 °C entre les deux extrêmes. Cette amplitude est bien visible dans les boîtes les plus longues, correspondant aux scénarios et périodes les plus chauds (SSP585, 2081-2100), traduisant une variabilité temporelle accrue. À l'inverse, les boîtes les plus courtes, observées pour le scénario SSP126 sur la période 2021-2040, indiquent une variabilité plus faible.

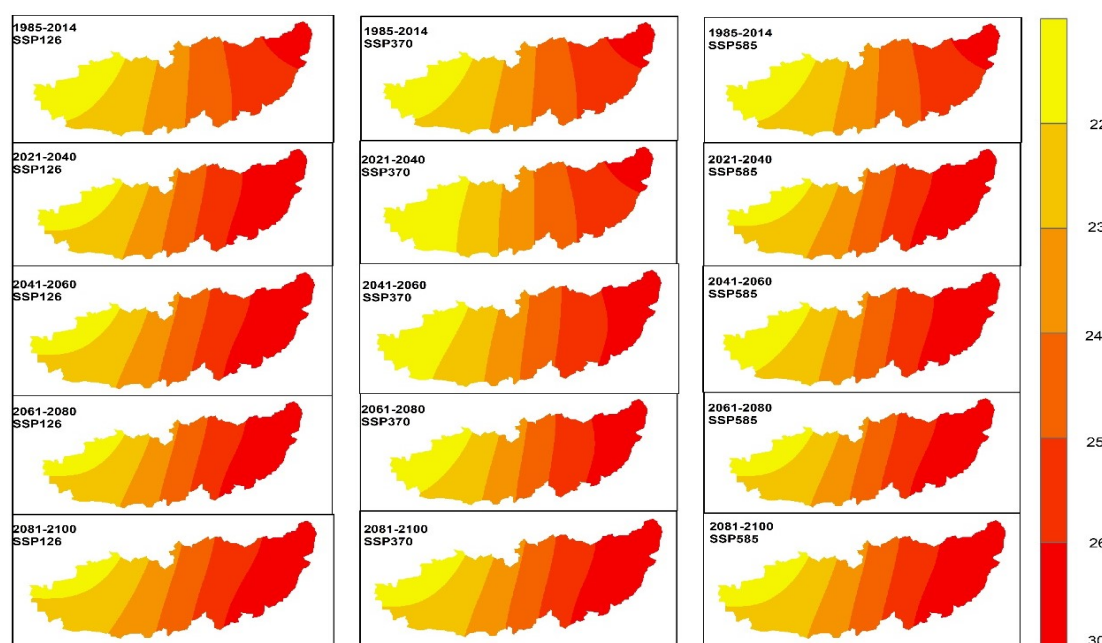


Figure 3. Répartition spatiale des températures minimales dans le bassin de Nanija Bolong en fonction des périodes et scénarios

La figure 3 illustre la répartition spatio-temporelle des températures minimales dans le bassin selon les différents scénarios climatiques et les périodes projetées. Elle met en évidence une augmentation progressive des températures minimales au fil du temps, laquelle s'intensifie à mesure que le scénario devient plus pessimiste. Les températures minimales dans le bassin varient spatialement de 22,8 °C à 27,5 °C, avec les valeurs les plus élevées observées sous le scénario SSP585 pour la période 2081-2100. Une comparaison avec la température minimale moyenne de la période de référence (1985-2014), estimée à 23,2 °C, révèle une hausse maximale pouvant atteindre 3,92 °C (Tableau 2). L'analyse montre que cette élévation est plus marquée à long terme et dans les scénarios les plus émetteurs. Par exemple, pour la période 2021-2040, l'augmentation des températures minimales reste modérée, de 0,4 °C (SSP126), 0,6 °C (SSP370) et 0,4 °C (SSP585). En revanche, pour la période 2081-2100, les hausses atteignent respectivement 0,7 °C (SSP126), 3,8 °C (SSP370) et un maximum de 5,0 °C (SSP585).

Tableau 2 . Changements futurs des températures minimales (en °C) à l'échelle annuelle sur les quatre périodes futures dans le bassin de Nanija Bolong

SSP	1985-2014	2021-2040	Différence	2041-2060	Différence	2061-2080	Différence	2081-2100	Différence
126	22,4	22,8	0,4	23,2	0,8	23,3	0,8	23,2	0,7
SSP	1985-2014	2021-2040	Différence	2041-2060	Différence	2061-2080	Différence	2081-2100	Différence
370	22,4	23,0	0,6	23,9	1,4	25,0	2,5	26,2	3,8
SSP	1985-2014	2021-2040	Différence	2041-2060	Différence	2061-2080	Différence	2081-2100	Différence
585	22,4	22,8	0,4	24,1	1,7	25,5	3,1	27,5	5,0

3.1.2. Les températures maximales à l'échelle annuelle

À l'échelle annuelle, l'évolution des températures maximales suit une tendance similaire à celle des températures minimales, avec une augmentation généralisée au fil du temps, quel que soit le scénario. Les températures maximales, estimées à 36,4 °C sur la période de référence 1985-2014, pourraient atteindre jusqu'à 41,7 °C à l'horizon 2081-2100 sous le scénario SSP585.

Dans les scénarios les plus optimistes, tels que SSP126 et SSP370, les températures maximales restent relativement modérées, ne dépassant pas 35 °C au cours de la période 2021-2040. Toutefois, pour SSP126, les périodes 2061-2080 et 2081-2100 montrent une augmentation, avec des températures atteignant ou dépassant 36 °C.

En revanche, dans les scénarios à fortes émissions comme SSP585, une hausse marquée est observée dès la période 2041-2060, où les températures maximales avoisinent 38 °C. À la fin du siècle, ce scénario projette une température maximale annuelle de 41,7 °C, représentant une élévation de plus de 5 °C par rapport à la période de référence. Comme pour les températures minimales, cette hausse continue des températures maximales est confirmée dans l'ensemble des scénarios étudiés, avec une intensité accrue dans les scénarios les plus pessimistes à mesure que l'on se rapproche de la fin du XXI^e siècle (Figure 4).

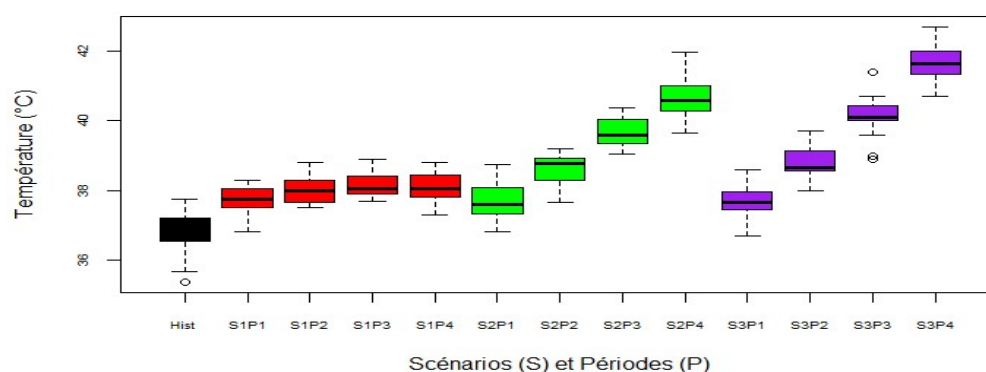


Figure 4. Évolution de la température maximale par périodes et par scénarios dans le bassin de Nanija Bolong

La Figure 5 offre une vue d'ensemble de la répartition spatio-temporelle des températures maximales annuelles, en fonction des différentes périodes projetées et des scénarios climatiques retenus. Une hausse progressive des températures est observée du futur proche vers le futur lointain. Sur le plan spatial, les températures les plus élevées sont localisées dans la partie nord-est du bassin (zone amont), tandis que les valeurs les plus modérées se retrouvent dans la partie sud-ouest (zone aval).

La variabilité spatio-temporelle des températures maximales annuelles dans le bassin a été analysée à l'aide de diagrammes en boîte et à moustaches, comme présenté dans la figure 2. À l'instar des températures minimales, les résultats montrent que les valeurs moyennes les plus élevées de températures maximales sont observées sous le scénario SSP585, notamment pour la période 2081-2100, avec une moyenne atteignant 41,7 °C. En revanche, les valeurs les plus faibles sont relevées sous le scénario SSP370, au cours de la période 2021-2040, avec une moyenne de 37,7 °C, soit une différence de 4,0 °C entre les deux extrêmes (tableau 3). Les boîtes les plus longues, associées au scénario SSP585 et à la période 2081-2100, traduisent une variabilité temporelle plus importante des températures maximales. À l'inverse, les boîtes les plus courtes apparaissent dans le scénario SSP126 pour la période 2021-2040, indiquant une variabilité plus réduite à court terme et dans les scénarios à faibles émissions.

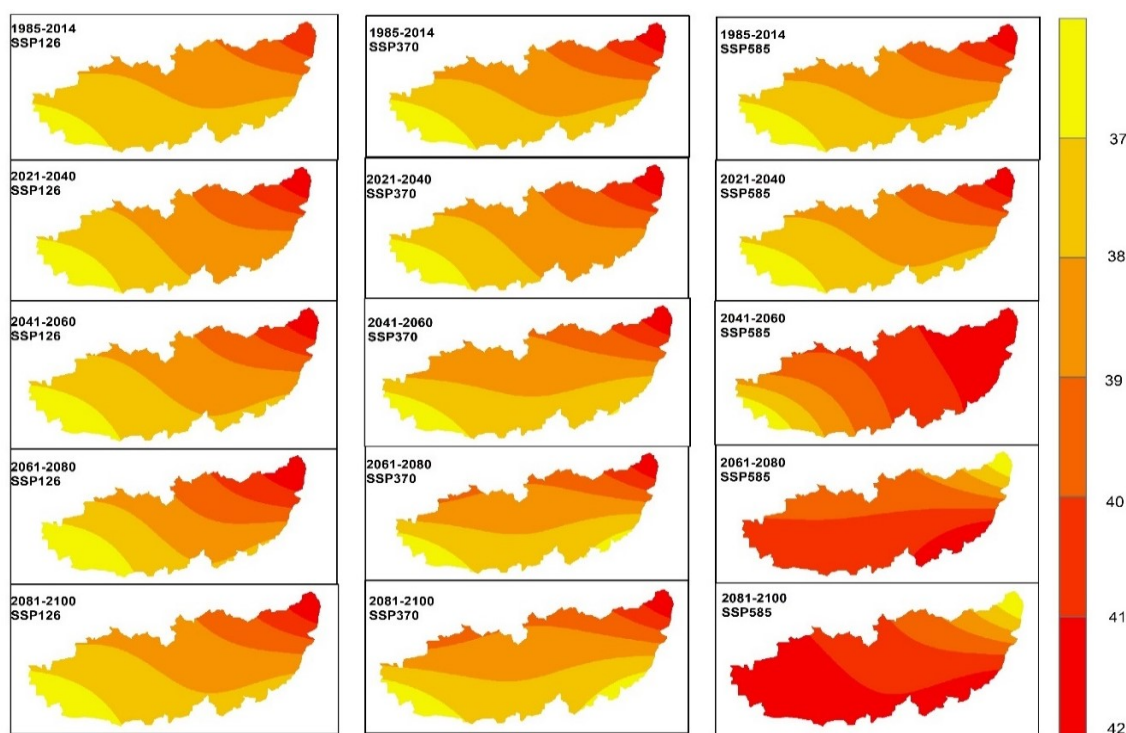


Figure 5. Répartition spatiale des températures maximales dans le bassin de Nanija Bolong en fonction des périodes et scénarios

Tableau 3. Changements futurs des températures maximales (en °C) à l'échelle annuelle sur les quatre périodes futures dans le bassin Nanija Bolong

SSP	1985-2014	2021-2040	Différence	2041-2060	Différence	2061-2080	Différence	2081-2100	Différence
126	36,4	37,7	1,3	38,0	1,6	38,1	1,7	38,1	1,7
370	36,4	37,7	1,3	38,6	2,2	39,7	3,3	40,7	4,3
585	36,4	37,7	1,3	38,8	2,4	40,1	3,7	41,7	5,2

3.1.3. Les températures moyennes à l'échelle annuelle

L'évolution des températures moyennes suit la même dynamique que celle observée pour les températures minimales et maximales, comme l'illustrent la Figures 6, la Figures 7, ainsi que le Tableau 4. Les projections indiquent une tendance générale à la hausse, avec des températures moyennes passant de 29,9 °C sous les scénarios SSP126 et SSP370 pour la période 2021-2040, à 34,2 °C sous le scénario SSP585 à l'horizon 2081-2100. Cette augmentation est particulièrement marquée dans le futur lointain, et plus accentuée dans le scénario à fortes émissions SSP585 (Figure 7).

Tableau 4. Changements futurs des températures moyennes (en °C) à l'échelle annuelle sur les quatre périodes futures dans le bassin Nanija Bolong

SSP	1985-2014	2021-2040	Différence	2041-2060	Différence	2061-2080	Différence	2081-2100	Différence
126	29,4	29,9	0,5	30,2	0,8	30,3	0,9	30,2	0,8
370	29,4	29,9	0,6	30,8	1,4	32,0	2,6	33,1	3,7
585	29,4	30,0	0,4	31,1	1,7	32,5	3,1	34,2	4,8

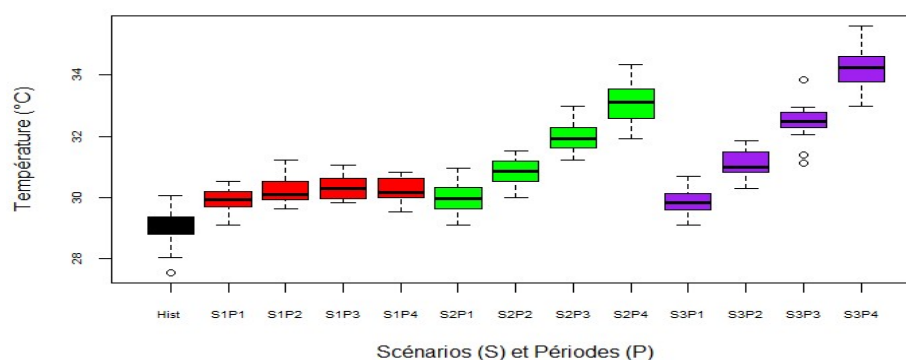


Figure 6. Évolution des températures moyennes annuelles par périodes et par scénarios dans le bassin Nanija Bolong

Cette figure présente une série de boîtes à moustaches illustrant la distribution des températures (°C) selon différents scénarios (S1, S2, S3) et périodes (P1 à P4), comparés à une situation historique (Hist). On observe globalement une tendance nette à l'augmentation des températures au fil des périodes et des scénarios : les médianes s'élèvent progressivement de la situation historique vers les projections futures, avec une hausse plus marquée pour les scénarios S2 et surtout S3. Les boîtes deviennent également légèrement plus étendues dans les périodes futures, suggérant une variabilité accrue. Le scénario S1 montre une augmentation modérée et progressive, tandis que S2 traduit un réchauffement plus prononcé, particulièrement à partir de P3. Le scénario S3 présente les températures les plus élevées, avec des valeurs maximales atteignant les niveaux les plus hauts en P4. La présence de quelques valeurs aberrantes (points isolés) indique des épisodes extrêmes ponctuels. Dans l'ensemble, cette figure met en évidence un réchauffement progressif et différencié selon les scénarios climatiques, confirmant une intensification des températures futures.

Par rapport à la période de référence 1985-2014, une hausse généralisée des températures moyennes est observée à travers l'ensemble des scénarios, avec une intensification notable dans les scénarios les plus pessimistes, notamment SSP585, à mesure que l'on progresse vers la fin du siècle (voir Figure 3). Sous ce scénario, la hausse des températures moyennes pourrait atteindre jusqu'à 4,8 °C à l'horizon 2081-2100, comme l'indique le Tableau 4.

La figure 7 illustre la répartition spatio-temporelle des températures moyennes en fonction des différents scénarios climatiques et des périodes considérées. Elle met en évidence une tendance générale à la hausse des températures au fil du temps, une hausse d'autant plus marquée que le scénario envisagé est pessimiste. Dans le bassin étudié, les températures moyennes varient spatialement entre 29,4 °C et 34,2 °C, avec des valeurs maximales observées pour le scénario SSP585 sur la période 2081-2100.

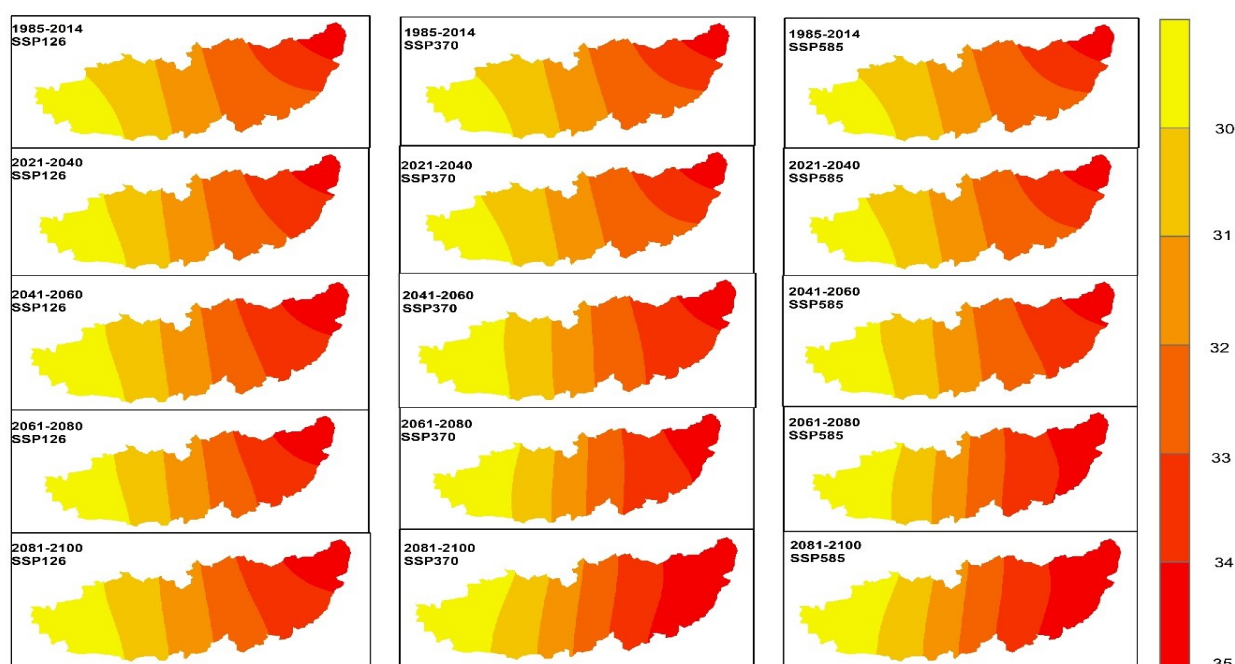


Figure 7 : Répartition spatiale des températures moyennes dans le bassin Nanija Bolong en fonction des périodes et scénarios

La comparaison entre les températures moyennes futures et celle de la période de référence (1985-2014), dont la valeur est de 29,4 °C, révèle une augmentation variant de 0,4 °C à 4,8 °C (Tableau 4). Cette hausse est d'autant plus marquée que les projections sont pessimistes et que l'on avance dans le temps. Ainsi, pour la période 2021-2040, les augmentations restent modérées : 0,5 °C pour le scénario SSP126, 0,6 °C pour SSP370 et 0,4 °C pour SSP585. En revanche, sur la période 2081-2100, les écarts atteignent des niveaux nettement plus élevés, avec des hausses respectives de 0,8 °C, 3,7 °C et 4,8 °C pour les mêmes scénarios.

3.2. Évolution des précipitations à l'échelle annuelle

Les précipitations montrent une tendance générale à la baisse dans le bassin, avec une réduction qui s'accroît au fil du siècle et selon l'intensité des scénarios d'émissions, particulièrement sous SSP585, où le déficit devient le plus marqué à l'horizon 2100. Une exception notable concerne SSP370, qui présente des précipitations légèrement inférieures à SSP585 durant les périodes 2021-2040 et 2041-2060.

Spatialement, les zones sud et est du bassin restent les plus pluvieuses, avec des valeurs variant de 695 à 177 mm. Dans le futur proche, les précipitations se situent entre 400 et 600 mm, atteignant 578 mm sous SSP126. À l'inverse, durant le futur moyen et lointain, presque tous les scénarios, sauf SSP126 projettent des totaux annuels inférieurs à 400 mm, signe d'un déficit croissant.

Les Figures 8 et 9 montrent une forte variabilité spatio-temporelle : la plus faible pluviométrie annuelle est enregistrée sous SSP585 entre 2081-2100 (~400 mm), alors que la plus élevée correspond à SSP370 en 2021-2040 (~483 mm). La variabilité interannuelle est maximale sous SSP126 (2021-2040) et minimale sous SSP585 (2081-2100).

L'ensemble de l'analyse compare les précipitations futures et futur proche, futur moyen et futur lointain à la période de référence 1985-2014, mettant en évidence une évolution vers un climat plus sec, plus variable et plus contrasté selon les scénarios.

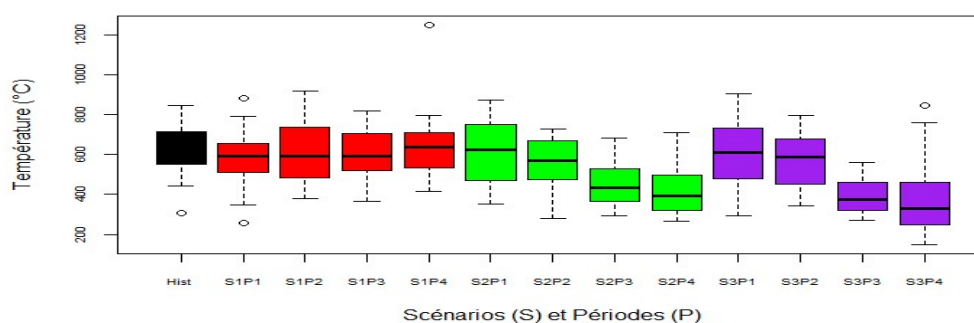


Figure 8. Évolution de la pluviométrie par périodes et par scénarios dans le bassin Nanija Bolong

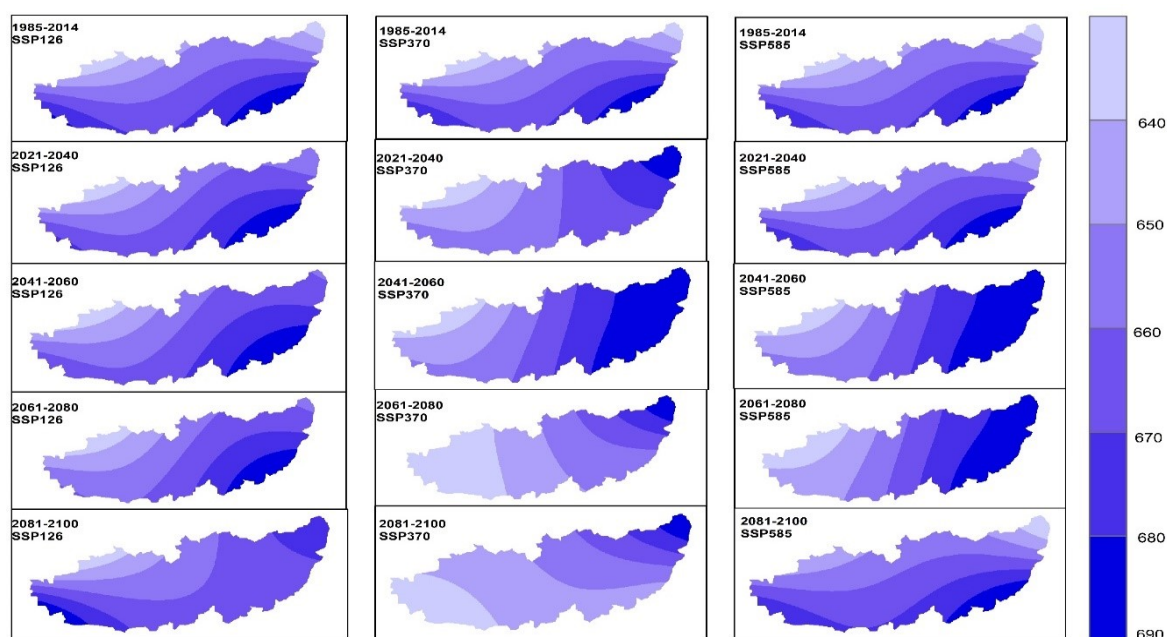


Figure 9. Répartition spatiale des précipitations dans le bassin Nanija Bolong en fonction des périodes et scénarios

Sous le scénario optimiste SSP126, les précipitations restent globalement plus élevées que la référence mais montrent une baisse progressive, atteignant 14,7 % entre 2061-2080 puis 14,1 % à l'horizon 2100. Dans le futur proche, SSP126 projette même des excédents de précipitations (+4,27 %), alors que SSP370 et SSP585 indiquent des déficits de 6,9 % et 4,4 %. Pour la période 2041-2060, toutes les trajectoires montrent une baisse généralisée :

- -5,56 % sous SSP126,
- -17,2 % sous SSP370,
- -15,0 % sous SSP585.

À noter que le scénario SSP370, bien qu'intermédiaire, projette une pluviométrie plus faible que le scénario très pessimiste SSP585 durant cette période.

Tableau 5. Changements futurs de la pluviométrie (en %) à l'échelle annuelle sur les quatre périodes futures dans le bassin Nanija Bolong

SSP	1985-2014	2021-2040	Différence	2041-2060	Différence	2061-2080	Différence	2081-2100	Différence
126	734	578	-156	624	-111	599	-135	643	-91
SSP	1985-2014	2021-2040	Différence	2041-2060	Différence	2061-2080	Différence	2081-2100	Différence
370	734	604	-130	554	-180	460	-274	417	-317
SSP	1985-2014	2021-2040	Différence	2041-2060	Différence	2061-2080	Différence	2081-2100	Différence
585	734	606	-128	571	-163	395	-339	394	-340

Les projections climatiques pour les périodes 2061-2080 et 2081-2100 annoncent un déficit pluviométrique croissant dans le bassin, qui s'accroît avec le niveau d'émissions et l'avancée dans le siècle. Entre 2061 et 2080, les précipitations diminueraient de 18,4 % sous SSP126, de 37,3 % sous SSP370 et de 46,2 % sous SSP585. En fin de siècle, la baisse atteindrait 43,2 % sous SSP370 et 46,3 % sous SSP585, ce dernier scénario indiquant un maximum de déficit dans un contexte mondial à fortes émissions. La comparaison des précipitations annuelles futures avec la moyenne de référence de 734 mm (1985-2014) montre une dégradation progressive du régime pluviométrique selon l'intensité des émissions.

Sous SSP126, la baisse reste modérée, avec un minimum de 578 mm en 2021-2040, suivi d'une légère reprise atteignant 643 mm en 2081-2100. Le climat demeure relativement stable, bien que des mesures d'adaptation demeurent nécessaires. Sous SSP370, la réduction devient marquée et continue, atteignant -317 mm en fin de siècle, soit une perte de plus de 43 %, signalant un stress hydrique croissant et une menace pour l'agriculture pluviale.

Le scénario SSP585 présente la baisse la plus sévère, avec des précipitations autour de 394-395 mm d'ici 2100, soit une réduction de 46 %. Ce scénario annonce un effondrement hydrométéorologique, mettant en péril les écosystèmes, la sécurité hydrique et les moyens de subsistance, et souligne l'urgence d'une atténuation climatique ambitieuse.

L'analyse des projections climatiques CMIP6 selon les scénarios SSP (2021-2100) dans le bassin de Nanija Bolong révèle un signal de réchauffement robuste, en accord avec les tendances observées en Afrique de l'Ouest. Les températures minimales et maximales augmentent significativement dans l'ensemble des scénarios, avec une intensification marquée sous SSP370 et SSP585, où les maximales pourraient atteindre 47,1 °C en fin de siècle. Le scénario SSP126 présente des hausses plus modérées, ne dépassant pas 38 °C.

Les précipitations annuelles montrent une tendance généralisée à la baisse. Sous SSP126, la diminution demeure limitée, tandis que sous SSP370 et SSP585, les pertes atteignent respectivement 317 mm et 340 mm (43-46 %). Cette contraction pluviométrique, combinée au réchauffement, accentue le risque de sécheresse hydrologique et menace la sécurité alimentaire régionale. L'analyse intra-annuelle indique par ailleurs un affaiblissement et un raccourcissement de la saison des pluies, une réduction prononcée des précipitations en juillet-août (jusqu'à -50 % sous SSP585) et un probable retard du démarrage de la saison culturale, associés à une variabilité interannuelle accrue.

Malgré les incertitudes inhérentes aux modèles CMIP6 et aux processus de régionalisation, les résultats convergent avec les travaux antérieurs menés au Sahel, ce qui renforce leur robustesse. Les changements projetés, particulièrement critiques pour un bassin à vocation agricole, appellent à des stratégies d'adaptation renforcées, incluant l'amélioration des prévisions saisonnières, la promotion de pratiques agricoles résilientes et une gestion optimisée des ressources hydriques, tout en soulignant l'importance des efforts globaux d'atténuation.

3.3. Discussion

Les résultats du modèle climatique analysé montrent des évolutions importantes des températures et des précipitations dans le bassin du Nanija Bolong, avec des implications directes pour la gestion des ressources en

eau et l'agriculture. L'analyse des températures projetées montre une hausse généralisée des températures minimales, maximales et moyennes sur l'ensemble des périodes futures, avec une intensification de ces hausses dans les scénarios les plus pessimistes. Par exemple, sous le scénario SSP585, les températures minimales devraient augmenter de 22,8°C en 2021-2040 à 27,5°C en 2081-2100, tandis que les températures maximales augmenteraient de 36,4°C en 1985-2014 à 41,7°C d'ici 2100, ce qui reflète une tendance au réchauffement global déjà observée dans d'autres régions du Sahel (Faye, 2025 ; Gaye, 2022).

En ce qui concerne les précipitations, une réduction générale est attendue dans le bassin du Nanija Bolong, particulièrement sous les scénarios de forte émission de gaz à effet de serre (SSP370 et SSP585). Sous le scénario SSP585, les précipitations pourraient diminuer de 734 mm en 1985-2014 à environ 394 mm en 2081-2100, soit une baisse de près de 46%. Cette tendance à la baisse des précipitations pourrait provoquer des déficits hydriques graves, impactant notamment les systèmes agricoles et les écosystèmes aquatiques (Hrou, 2023 ; Bouklikha, 2021).

Les résultats de cette étude sont cohérents avec ceux d'autres recherches menées dans des bassins similaires en Afrique de l'Ouest, notamment sur les impacts du changement climatique dans le bassin du Bafing au Sénégal (Gaye, 2022), du bassin versant de la Tafna (Bouklikha, 2021), ainsi que dans le bassin de la Sandougou (Faye, 2025). Les projections indiquent que le changement climatique aura des conséquences graves sur la gestion de l'eau et la sécurité alimentaire dans la région. Il est donc crucial d'adopter des stratégies d'adaptation efficaces, comme l'amélioration des pratiques agricoles résilientes et la gestion durable des ressources en eau (Coundono, 2025).

En conclusion, les résultats de cette analyse soulignent l'importance d'intégrer les prévisions climatiques dans la planification des ressources en eau et des politiques agricoles pour faire face aux défis posés par le changement climatique, comme le suggèrent plusieurs études dans la région (Amiot et al., 2023 ; Thirel et al., 2015). Des stratégies d'adaptation adaptées à chaque contexte local seront essentielles pour réduire la vulnérabilité face aux impacts climatiques attendus.

4. Conclusion

L'analyse des projections climatiques pour le bassin de Nanija Bolong sur la période 2021-2100 révèle une hausse progressive et marquée des températures, plus forte sous le scénario pessimiste SSP585, où les températures minimales et maximales pourraient atteindre respectivement 27,1 °C et 36,6 °C en fin de siècle. Le scénario optimiste SSP126 montre une augmentation plus modérée, avec des maximaux restants sous les 35 °C.

Parallèlement, les précipitations annuelles moyennes devraient diminuer, passant d'environ 483 mm à 245 mm selon les scénarios. Cette baisse, combinée au réchauffement, accentuerait la pression sur les ressources en eau, un enjeu critique pour un bassin à forte vocation agricole.

Ces résultats s'accordent globalement avec les études climatiques menées au Sénégal et ailleurs, tout en présentant certaines divergences régionales, notamment par rapport aux hautes terres d'Éthiopie.

Les incertitudes liées aux modèles et aux scénarios de forçage soulignent toutefois la nécessité de prudence et d'analyses locales plus fines.

En conclusion, cette première étude détaillée sur le climat futur du bassin met en avant l'importance d'intégrer les données climatiques dans la planification territoriale, la gestion de l'eau et le développement agricole, et appelle à des stratégies d'adaptation flexibles et échelonnées dans le temps.

Références bibliographiques

1. AghaKouchak A., 2015. Recognizing anthropogenic drought. *Nature*, 524(7566): 409–411. <https://doi.org/10.1038/524409a>
2. Almazroui, M., Ashfaq, M., Islam, M.N., Rashid, I.U., Kamil, S., Abid, M.A., O'Brien, E., Ismail, M., Reboita, M.S., Sörensson, A.A., Arias, P.A., Alves, L.M., Tippet, M.K., Saeed, S., Haarsma, R., Doblas-Reyes, F.J., Saeed, F., Kucharski, F., Nadeem, I., Silva-Vidal, Y., 2021. Assessment of CMIP6 performance and projected temperature and precipitation changes over South America. *Earth Systems and Environment*, 5(2): 155–183.
3. Almazroui, M., Saeed, F., Saeed, S., Nazrul Islam, M., Ismail, M., Klutse, N.A.B., Siddiqui, M.H., 2020. Projected changes in temperature and precipitation over Africa from CMIP6. *Earth Systems and Environment*, 4: 455–475.
4. Arragaw, A., Woldeamlak, B., 2017. Smallholder farmers' coping and adaptation strategies to climate change and variability in the central highlands of Ethiopia. *Local Environment*. <https://doi.org/10.1080/13549839.2017.1290058>

5. Ault, T.R., Mankin, J.S., Cook, B.I., Smerdon, J.E., 2016. Relative impacts of mitigation, temperature, and precipitation on 21st-century megadrought risk in the American Southwest. *Science Advances*, 2: e1600873. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600873>
6. Boukhlikha, A., 2021. *Changement climatique, situation actuelle et future : cas du bassin versant de la Tafna*. Thèse de doctorat, Université HABI Mohammed / HAMOUDI Saeed.
7. Chen, Y., Liu, A., Zhang, Z., Hope, C., Crabbe, M.J.C., 2019. Economic losses of carbon emissions from circum-Arctic permafrost regions under RCP-SSP scenarios. *Science of the Total Environment*, 658: 1064–1068.
8. Coundono, S., 2025. *Changement climatique et impact sur la dynamique des ressources en eau et des activités socio-économiques dans le bassin versant du Niéri-Ko (bassin de la Gambie, Sénégal)*. Mémoire/Thèse.
9. Diakhaté, M., Mbaye, M.L., Camara, I., Barry, M.B., 2022. Projected changes in the rainfall annual cycle over the Senegal River Basin using CMIP5 bias-corrected simulations. *American Journal of Environmental Protection*, 10(1): 41–46. <https://doi.org/10.12691/env-10-1-5>
10. Diaz, L.B., Saurral, R.I., Vera, C.S., 2020. Assessment of South America summer rainfall climatology and trends in global climate model ensembles. *International Journal of Climatology*, 41(S1): E59–E77.
11. Eyring, V., Bony, S., Meehl, G.A., Senior, C.A., Stevens, B., Stouffer, R.J., Taylor, K.E., 2016. Overview of the coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9: 1937–1958.
12. FAO, 2017. *The state of food security and nutrition in the world: Building resilience for peace and food security*. Rome: FAO.
13. Faye, O., 2025. *Impacts de la variabilité et du changement climatique sur les ressources dans le bassin versant de la Sandougou (affluent du fleuve Gambie, Tamedou)*. Mémoire/Thèse.
14. Fujimori, S., Hasegawa, T., Krey, V., Riahi, K., Bertram, C., Bodirsky, B.L., Bosetti, V., Callen, J., Després, J., Doelman, J., Drouet, L., Emmerling, J., Frank, S., Fricko, O., Havlik, P., Humpenöder, F., Koopman, J.F.L., van Meijl, H., Ochi, Y., Popp, A., Schmitz, A., Takahashi, K., van Vuuren, D., 2019. Implications of climate change mitigation for agriculture. *Nature Sustainability*, 2(5): 386–396. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0286-2>
15. Gaye, I.T., 2022. *Modélisation des impacts du changement climatique sur les ressources en eau du bassin versant du Bafing (haut bassin du fleuve Sénégal)*. Mémoire/Thèse.
16. Girma, E., Tino, J., Wayessa, G., 2016. Rainfall trend and variability analysis in Setema-Gatira area of Jimma, Southwestern Ethiopia. *African Journal of Agricultural Research*, 11(32): 3037–3045. <https://doi.org/10.5897/AJAR2015.10160>
17. Haile, G.G., Tang, Q., Leng, G., Jia, G., Wang, J., Cai, D., Sun, S., Baniya, B., Zhang, Q., 2020. Long-term spatiotemporal variation of drought patterns over the Greater Horn of Africa. *Science of the Total Environment*, 704: 135299. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135299>
18. Hawkins, E., Sutton, R.T., 2009. The potential to narrow uncertainty in regional climate predictions. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(8): 1095–1107.
19. Hrou, Y., 2023. *Évaluation de l'impact du changement climatique sur la disponibilité des ressources en eau dans un bassin méditerranéen agricole : cas du bassin du Bas-Loukkos*. Thèse de doctorat, IAV Hassan II, Maroc.
20. IPCC, 2013. *Climate change 2013: The physical science basis*. Cambridge University Press.
21. Konapala, G., Mishra, A.K., Wada, Y., Mann, M.E., 2020. Climate change will affect global water availability through changes in seasonal precipitation and evaporation. *Nature Communications*, 11: 3044.
22. Laurent, L., Buoncristiani, J.-F., Pohl, B., Zekollari, H., Farinotti, D., Huss, M., Mugnier, J.-L., Pergaud, J., 2020. The impact of climate change and glacier mass loss on hydrology in the Mont-Blanc massif. *Scientific Reports*, 10: 10420.
23. Thirel, G., Perrin, C., Drogue, G., Gerlinger, K., Krumm, J., Wagner, J.P., 2015. Évolution future des débits des cours d'eau dans le bassin du Rhin en contexte de changement climatique. In: *Les tensions sur l'eau en Europe et dans le bassin méditerranéen*. Actes de colloque.
24. Yakubu, F., Böhner, J., Bouwer, L. M., & ul Hasson, S., 2026. Changes in Compound Hot-Dry Extremes and Their Exposures under Climate Change.
25. Zhang, G., Zeng, G., Yang, X., & Jiang, Z., 2021. Future changes in extreme high temperature over China at 1.5 C–5 C global warming based on CMIP6 simulations. *Advances in Atmospheric Sciences*, 38(2), 253–267).

Please cite this Article as:

NDIAYE M. , FAYE C., 2026. Évaluation des changements temporels et spatiaux du climat futur de 2021 à 2100 dans le bassin Nanija Bolong (Sénégal). *Agriculture and Forestry Journal*, 10(1) : 25-36. <https://doi.org/10.46325/afj.v10i1.214>