

Évaluation des températures futures de l'air en Afrique centrale selon les scénarios des projets CMIP5 et CMIP6

Magbini Tokpa MAMY¹, Lobanov Vladimir Alekseevich², Kolly Prosper Guilavogui³

Résumé

Bien qu'il y ait eu une certaine amélioration dans la génération de modèles du CMIP6, les résultats du CMIP5 et du CMIP6 sont généralement comparables dans l'ensemble. Dans cet article, les résultats des expériences historiques des projets CMIP5 et CMIP6 sont comparés entre eux et aux observations de 65 stations météorologiques sur le territoire de l'Afrique Centrale pour la période de 1950-2022, afin d'évaluer l'efficacité des estimations des scénarios des futures températures de l'air des modèles climatiques globaux IPSL et BCC. Les différences entre les données d'observation et de modélisation étant systématiques, les résultats des évaluations des scénarios ont été ajustés selon le principe de similitude des taux de croissance de la température pour la période d'observation historique (1981-2010) et la période du scénario futur (2011-2040, 2041-2070 et 2071-2100) jusqu'à la fin du 21^e siècle. Les températures futures de l'air ont été estimées à la fois pour les moyennes de la zone et pour les stations météorologiques individuelles sur la base des valeurs corrigées du scénario, qui ne diffèrent pas de plus de 0,1 °C entre CMIP5 et CMIP6. L'augmentation de la température moyenne de la région pour tous les mois d'ici la fin du 21^{ème} siècle atteint 2.0 °C à 2.3 °C dans l'ensemble. Les distributions spatiales des températures futures obtenues à partir des estimations des stations météorologiques individuelles montrent la plus forte augmentation (jusqu'à +3 °C) dans le nord de la région près du Sahel.

Mots clés : projets CMIP5/CMIP6, Afrique centrale, modèles IPSL/BCC, scénarios RCP/SSP, température de l'air.

Abstract

Assessment of future Central African air temperatures under the CMIP5 and CMIP6 project scenarios

Despite the advancements made in the generation of the CMIP6 model, the comparability of results from CMIP5 and CMIP6 remains evident. The objective of this paper is to evaluate the efficacy of scenario estimation for future air temperatures by the IPSL and BCC global climate models, using observational data from 65 meteorological stations in Central Africa for the period 1950-2022. To this end, data obtained from the historical experiments conducted by the CMIP5 and CMIP6 projects were compared with observational data, and the differences between them adjusted according to the principle of similar temperature growth rates. This adjustment was carried out for both historical and future observational periods to the end of the 21st century (1981-2010, 2011-2040, 2041-2070, and 2071-2100). Based on the scenario-corrected values, future air temperatures were estimated for both area averages and individual weather stations. The temperature estimates obtained from both CMIP5 and CMIP6 do not differ by more than 0.1°C. The results obtained show an overall average temperature increase of 2.0 °C to 2.3 °C for all months over the region by the end of the 21st century. Furthermore, the spatial distribution of future temperatures obtained from individual weather station estimates reveals the highest increase (up to +3 °C) in the northern part of the region near the Sahel.

Keywords: CMIP5/CMIP6 projects, Central Africa, IPSL/BCC models, RCP/SSP scenarios, air temperature.

¹, Enseignant Chercheur à l'Université de N'Zérékoré/Guinée Conakry, Doctorant, Université d'Etat d'Hydrométéorologie de Saint Pétersbourg/Fédération de Russie (UEHS),
Tél. : (8) 952-3601279 / +224 624 238 961,
Email : mtokpa@mail.ru / mtmamy2013@gmail.com.

² Docteur en Sciences Techniques, Professeur associé, département

Météorologie, Climatologie et la protection de l'Atmosphère (MCPA), UEHS, tél. : (8) 905-2595641, lobanov@EL6309.spb.edu .

³ Docteur en Sciences Géographiques, Directeur des Etudes avancées, Université de N'Zérékoré/Guinée-Conakry.

Tél : +224 622 247 611, guikopros@gmail.com

1 INTRODUCTION

Le réchauffement significatif du climat causé par les émissions de gaz à effet de serre et les aérosols est désormais très visible et a des conséquences potentiellement catastrophiques sur l'environnement (sécheresse, inondations, canicules etc.). Il est caractérisé par les changements temporels et spatiaux des variables climatiques. (Salman, S.A et al. 2020 ; Nashwan, M.S. et al. 2022 ; Hamed, M.M. et al. 2022 ; Salehie, O et al. 2021 ; Salehie, O et al. 2022). Malgré la mise en place des instances telles que le GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du Climat), qui alerte sur cet état de fait, les gaz à effet de serre continuent d'être émis à un rythme annuel croissant. Une partie importante de ces gaz se stocke dans l'atmosphère rendant ainsi largement irréversible une évolution qui crée par ailleurs une situation d'interdépendance totale entre les différentes régions de la planète, puisque ces gaz sont

continuellement mélangés par les mouvements de l'air, quelle que soit leur origine. Dans un tel contexte, il est impossible d'ignorer les risques définitivement croissants auxquels sont soumis les territoires où nous vivons. Par ailleurs, l'adaptation à ces changements et les risques et vulnérabilités futurs doivent être quantifiés tant à l'échelle mondiale que régionale.

Les modèles climatiques globaux (MCG) peuvent simuler l'impact des émissions de gaz à effet de serre (GES) sur les systèmes climatiques et fournir les estimations des paramètres des systèmes climatiques futurs sur la base de ces informations (Hartmann, D.L et al. 2016 ; Taylor, K.E et 2011). Le projet d'inter-comparaison des modèles couplés (CMIP, librement accessibles sur l'internet) est un ensemble de données de base qui fournit aux scientifiques les résultats les plus récents des modèles climatiques.

Depuis CMIP1 jusqu'à la version la plus récente CMIP6, les modèles CMIP ont été largement améliorés au fil des ans afin

de lever les incertitudes liées au manque de clarté des procédures physiques pour traiter le système climatique et les alternatives climatiques (Hamed, M.M et al. 2022 ; Weigel, A.P et al. 2010 ; Nashwan, M.S. et al. 2022 ; Song, Y.H. et al. 2021). Les expériences et les modèles de circulation générale de l'atmosphère (MCG) inclus dans CMIP5 sont plus complexes et sophistiqués, couvrant un plus large éventail de questions scientifiques en utilisant plusieurs voies de concentration représentatives (RCP, abrégé en anglais). La phase 6 du projet CMIP, bien qu'étant la version améliorée du CMIP5 dans la génération des modèles, les résultats de ces derniers sont généralement comparables. (GIEC, 2013 : Changements climatiques 2013). Le Groupe de travail I du GIEC présente une comparaison détaillée des résultats du CMIP5 et du CMIP6, fait également des projections à partir des deux dans le sixième Rapport d'évaluation (GIEC, 2021 : Changements climatiques 2021 ; Taylor, K.E. et al. 2012).

Certaines études ont signalé la robustesse des nouveaux modèles CMIP6 par rapport aux modèles CMIP5 en Afrique (Hamed, M. M. et al. 2022 ; Nashwan, M.S. et al. 2022 ; Ayugi, B. et al. 2021), dans les Amériques (Ortega, G. et al. 2021), en Asie (Zamani, Y. et al. 2020 ; Chen, C.-A. et al. 2021 ; Lun, Y. et al. 2021), au Canada (Bourdeau-Goulet, S.C. et al. 2021), en Chine (Shiru, M.S. et al. 2022) et en Corée (Song, Y.H. et al. 2021a).

Il sera évalué dans cette étude, l'efficacité des estimations des scénarios de la température future de l'air pour la région d'Afrique Centrale pour deux modèles climatiques dont la sélection et sa justification ont été données dans une étude précédente (Мами М.Т et В.А. Лобанов 2022), en utilisant les résultats de l'expérience historique des projets CMIP5 et CMIP6. L'objectif est également de comparer les résultats de modélisation des projets CMIP5 et CMIP6 entre eux et avec les observations des stations météorologiques de la région, à la fois sur la période de l'expérience historique et avec les observations des dernières années pour initier les projections climatiques futures.

2 Matériels et Méthodes

2.1 Matériels

2.1.1 Caractéristique climatique du milieu d'étude

La région prise en compte dans cet article se situe entre 13,8° de latitude nord et 14,4° de latitude sud et entre 6,7° et 33,8° de longitude est (Figure 1). Traversée par l'équateur et baignée par

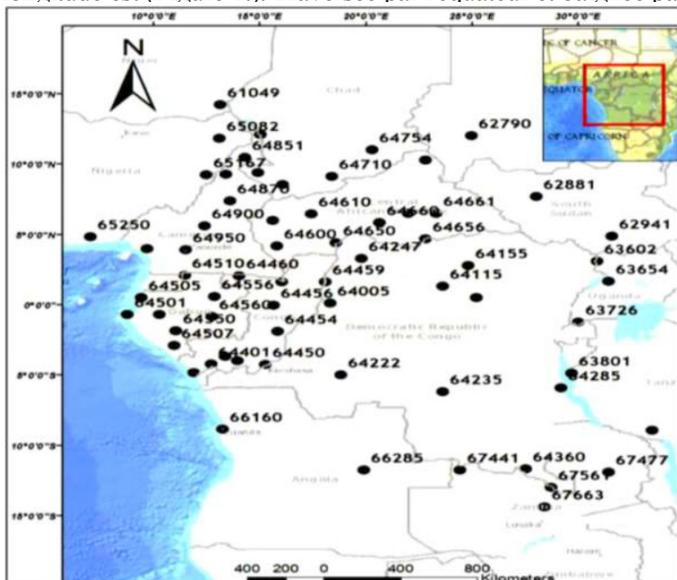


Figure 1. Répartition des stations météorologiques sur le territoire

l'océan Atlantique à l'ouest, cette partie de la zone intertropicale africaine est caractérisée par un climat tropical chaud et humide. Les températures sont élevées tout au long de l'année (jusqu'à +36 °C) avec des moyennes annuelles d'environ +26 °C. (Tsalefac, M. et al. 2015).

Cette région, dont le climat est influencé par les mouvements de la zone de convergence intertropicale, connaît des températures relativement basses en janvier (jusqu'à un maximum de 25 °C – 27 °C dans la région du golfe de Guinée). Les valeurs les plus basses sont enregistrées dans le nord-est et dans le sud-est montagneux (20 °C – 22 °C) par rapport au centre. Cela est dû à l'influence de la phase hivernale de la mousson africaine, pendant laquelle l'air froid et sec de l'Afrique du Nord se déplace vers le sud. Une augmentation du rayonnement entrant réchauffe toute la zone, atteignant des températures maximales en mars et avril, en particulier dans la partie nord (jusqu'à 32 °C – 33 °C). Juin est le début de la deuxième phase de la mousson africaine, lorsque la zone de convergence intratropicale (ZCIT) se déplace vers l'hémisphère nord, suivie par le mouvement d'air humide en provenance de l'Atlantique. La présence de nuages et d'air plus humide et frais en provenance de l'océan entraîne une baisse générale de la température, qui est particulièrement sensible dans les parties ouest et sud-ouest de la région, près du golfe de Guinée, où les températures deviennent similaires à celles de la partie montagneuse du sud-est (20 °C – 22 °C). Entre septembre et novembre, il y a un réchauffement radiatif naturel de la zone entre les moussons, avec des températures maximales dans la partie nord près du Sahel (jusqu'à 27 °C – 28 °C) et des températures minimales dans les régions montagneuses (21 °C – 22 °C). Les variations de température dans la région vont de 7 °C - 10 °C en hiver à 12 °C – 13 °C en avril (Мами М.Т et В.А. Лобанов 2022).

2.2 Démarche méthodologique

2.2.1 Données utilisées

Dans cette étude, les séries de données d'observations (sélectionnées et analysées statistiquement) de la température moyenne mensuelle de l'air de soixante-cinq (65) stations météorologiques de la zone d'étude, obtenues à partir des archives du site web de l'Institut météorologique du Royaume des Pays-Bas (<http://climexp.knmi.nl/selectstation.cgi?someone>) qui fournit des séries pluriannuelles des caractéristiques climatiques tel que les précipitations mensuelles, température moyenne mensuelle de l'air etc. et du site (<http://www.pogodsiklimat.ru>) qui fournit également des données historiques sur la météo et le climat pour 31788 stations météorologiques de Russie, des pays de la Communauté des États indépendants (CEI) et du monde, à partir de janvier 1701 jusqu'à la date actuelle. (Figure 1), ainsi que les scénarios historiques et futurs des projets CMIP5 et CMIP6 pour la température de l'air de surface ont été considérés (Лобанов В.А. et al. 2005 ; Гос. гидрол. ин-т. - Л: Гидрометеоиздат, 1979). Deux modèles climatiques globaux IPSL et BCC ont été sélectionnés pour les deux dernières étapes du projet CMIP (Мами М.Т et Лобанов В.А. 2022). Les résultats de l'expérience historique et les projections climatiques futures ont été obtenus à partir de <https://esgf-node.llnl.gov/projects/esgf-llnl/>. Trois des quatre scénarios de niveau 1 d'impact anthropique énergétique à la fin du 21^{ème} siècle (ssp1 2.6, ssp2 4.5 et ssp5 8.5), qui sont des versions mises à jour des scénarios des RCP du CMIP5 précédents (RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5 W/m²) sont prise en compte afin de faciliter

la comparaison entre les projections du CMIP5 et du CMIP6. Les scénarios de forçage radiatif faible (RCP2.6 et SSP1-2.6) et moyen (RCP4.5 et SSP2-4.5) supposent la mise en œuvre d'initiatives d'atténuation. En revanche, le scénario de forçage radiatif élevé (RCP8.5 et SSP5-8.5) représente un retour au statu quo avec une dépendance continue aux combustibles fossiles (Ortega, G. et al. 2021).

Les nouveaux scénarios de CMIP6, appelés "trajectoires socio-économiques partagées" (SSP, abrégé en anglais), permettent de mieux évaluer les effets des politiques de changement climatique (Eyring, V. et al. 2016). Ils sont donc plus précis que les versions précédentes, mais pourrait ne pas forcément produire des résultats plus proche des observations que les scénarios RCP. L'année de départ des scénarios futurs de CMIP5 est 2006 et celle de CMIP6 est 2015.

2.2.2 Méthode de traitement et d'analyse

La méthode appliquée dans cette étude est basée sur la comparaison des observations des stations météorologiques de 1950-2022 avec les résultats des expériences historiques qui couvre la période 1850-2005 pour le projet CMIP5 et 1850-2014 pour le projet CMIP6. Les évaluations des scénarios futurs des projets CMIP5 et CMIP6 des deux modèles climatiques, l'un français (IPSL) et l'autre chinois (BCC) ont été choisi à cause du faible écart entre les résultats des expériences historiques et les données des observations dans la région pour la période commune de 1950-2022 (Мами М.Т и Лобанов В.А. 2022). Sur la base des résultats de (Лобанов В.А. et К.С.Кириллина 2019), qui montrent une très faible corrélation entre les températures observées et les résultats des expériences historiques sur une période pluriannuelle commune, seules les moyennes pluriannuelles peuvent être comparées. Pour comparer les moyennes pluriannuelles, il a été choisi à la fois la période globale d'observation, qui varie selon les différentes stations météorologiques, et des périodes individuelles de 30 ans, en s'attachant particulièrement aux moyennes de la période d'observation la plus récente, à savoir 1976-2005 pour le projet CMIP5 et 1981-2010 pour le projet CMIP6. Il est clair que les résultats présentant la plus forte corrélation avec les moyennes à long terme des stations sont plus efficaces. L'évaluation de la relation entre les valeurs de température des différents projets et les observations aux stations consiste à construire des relations de régression de la forme $Y=B_1X+B_0$ avec évaluation de leurs paramètres et résidus (déviations de la ligne de régression), où B_1 , B_0 sont les coefficients de l'équation de régression, R est le coefficient de corrélation.

Pour déterminer la conception la plus efficace du CMIP, les erreurs systématiques associées aux coefficients B_1 et B_0 sont évaluées puis les ajustements sont effectués, à la fois sur les données historiques des expériences et sur les projections futures. Pour le faire, il est appliqué le principe de similitude du taux de croissance de la température des périodes d'observation historique et du scénario futur jusqu'à la fin du 21^e siècle qui est divisée en 3 intervalles pour estimer les valeurs moyennes : 2011-2040, 2041-2070 et 2071-2100 dans le projet CMIP6. Les taux ou gradients de croissance de la température sur une période de 30 ans (Δ) sont calculés à l'aide des formules suivantes :

$$\Delta_1 = \bar{T}_{2obs} - \bar{T}_{1obs}, \Delta_2 = \bar{T}_{2fut} - \bar{T}_{1fut}, \Delta_3 = \bar{T}_{3fut} - \bar{T}_{2fut} \quad (1)$$

$$\Delta_{moy_1} = \frac{1}{2}(\Delta_3 + \Delta_2), \Delta_{moy_2} = \frac{1}{2}(\Delta_{moy_1} + \Delta_1) \quad (2)$$

où : \bar{T}_{1obs} et \bar{T}_{2obs} sont les températures moyennes des deux périodes d'observation consécutives de 30 ans : 1951-1980 et 1981-2010, Δ_{moy_1} et Δ_{moy_2} sont respectivement le gradient moyen pour la période du scénario futur 2011-2100 et le gradient moyen issu des observations et des scénarios.

Les températures moyennes du scénario pour les 3 périodes futures du 21^{ème} siècle sont corrigées à l'aide des formules :

$$\bar{T}_{cor(2011-2040)} = \bar{T}_{2obs} + \Delta_{moy_2} \quad (3)$$

$$\bar{T}_{cor(2041-2070)} = \bar{T}_{cor(2011-2040)} + \Delta_2 \quad (4)$$

$$\bar{T}_{cor(2071-2100)} = \bar{T}_{cor(2041-2070)} + \Delta_3 \quad (5)$$

où $\bar{T}_{cor(2011-2040)}$, $\bar{T}_{cor(2041-2070)}$ et $\bar{T}_{cor(2071-2100)}$ sont les valeurs ajustées des températures moyennes des scénarios futurs pour les périodes 2011-2040, 2041-2070 et 2071-2100, respectivement.

Selon (3), la moyenne du premier scénario $\bar{T}_{cor(2011-2040)}$ pour la période 2011-2040 est corrigée par le gradient moyen entre les gradients moyens des données observées et des données du scénario ; à cette moyenne corrigée on ajoute le gradient des températures moyennes du scénario (Δ_2) pour déterminer la valeur corrigée pour la 2^{ème} période future 2041-2070 ; en fin, à la température corrigée $\bar{T}_{cor(2041-2070)}$, est ajouté le gradient Δ_3 pour obtenir la valeur corrigée de la température pour la 3^{ème} période future 2071-2100.

Pour combiner les résultats de l'expérience historique avec les estimations des scénarios futurs, les moyennes sur 30 ans de l'expérience historique doivent également être corrigées pour les données d'observation à l'aide des formules :

$$\bar{T}_{cor(1951-1980)} = \bar{T}_{hist(1951-1980)} + (\bar{T}_{1obs} - \bar{T}_{hist(1951-1980)}) \quad (6)$$

$$\bar{T}_{cor(1981-2010)} = \bar{T}_{hist(1981-2010)} + (\bar{T}_{1obs} - \bar{T}_{hist(1981-2010)}) \quad (7)$$

où : $\bar{T}_{hist(1951-1980)}$ et $\bar{T}_{hist(1981-2010)}$ sont les températures moyennes selon les données historiques expérimentales pour les périodes 1951-1980 et 1981-2010, respectivement ;

$\bar{T}_{cor(1951-1980)}$ et $\bar{T}_{cor(1981-2010)}$ sont les températures moyennes corrigées de l'expérience historique pour les périodes 1951-1980 et 1981-2010, respectivement.

Etant donnée que les deux projets ont des années de fin d'expérience historique différentes, leur comparaison entre eux et aux données d'observation prend en compte la période commune 1950-2005, en considérant l'année commune de début des séries d'observations dans les stations météorologiques (1950). Les valeurs moyennes des températures modélisées et observées pour cette période commune ont été calculées pour chacune des 65 stations météorologiques d'Afrique Centrale pour les mois caractéristiques de chacune des saisons de l'année : janvier, avril, juillet et octobre. Les températures moyennes CMIP5 et CMIP6 ont été interpolées avec les coordonnées des stations météorologiques aux points de l'espace par la méthode d'interpolation spatiale qui inclut à la fois des facteurs zonaux (taux de précipitations, température, etc.) et azonaux (hauteur, couvert forestier, marécage, etc.) déterminés par les propriétés

d'un territoire donné uniquement. (Лубанов В. А. et al. 2011, Санкт-Петербург)

Cette équation générale, alliant continuité et discrétion, est :

$$Y_i = f_1(\varphi_i, \lambda_i) + f_2(X_1, X_2, X_3, \dots) \pm E$$

où Y_i est la caractéristique climatique considérée; $f_1(\varphi_i, \lambda_i)$ - une composante du zonage géographique, qui dépend des coordonnées; $f_2(X_1, X_2, X_3, \dots)$ - une composante régionale (azonale), qui est une dépendance des principaux facteurs dans une zone homogène donnée; E - facteurs non pris en compte et individuels.

3 Résultats et discussions

3.1 Comparaison des résultats de l'expérience historique des projets CMIP5 et CMIP6 entre eux et avec les données d'observation

Une relation de régression a été tracée entre les températures moyennes pour les 65 points de l'espace, ses coefficients B_1 et B_0 et le coefficient de corrélation R (coefficient de détermination R^2) ont été calculés, ainsi que l'erreur moyenne (Δ_{Cp}) et les erreurs pour les valeurs maximales (Δ_{Max}) et minimales (Δ_{Mini}) comme différences entre les données de l'expérience historique pour CMIP5 et CMIP6 et les mêmes différences entre les moyennes observées et modélisées. Les résultats sont présentés dans le tableau 1 pour les deux modèles climatiques : IPSL français et BCC chinois.

Tableau 1. Résultats des comparaisons des données historiques expérimentales des CMIP5 et CMIP6 et entre les projets et les données d'observation des stations météorologiques d'Afrique centrale de 1950 à 2005.

IPSL							BCC					
CMIP5 et CMIP6							CMIP5 et CMIP6					
Période	B_1	B_0	R^2	Δ_{Cp}	Δ_{Max}	Δ_{Mini}	B_1	B_0	R^2	Δ_{Cp}	Δ_{Max}	Δ_{Mini}
Janvier	1.0	-0.5	0.9	-0.3	1.2	0.1	1.1	-1.3	0.8	1.0	1.6	0.0
Avril	1.0	-0.8	0.9	-1.1	-0.3	-0.8	1.1	-2.2	0.8	1.1	3.2	-1.3
Juillet	0.9	0.5	0.8	-1.2	-0.7	-1.5	1.1	-1.5	0.8	1.0	2.3	-1.0
Octobre	1.0	-0.2	0.9	-1.2	-0.4	-1.9	1.1	-1.4	0.8	1.1	3.5	-1.1
CMIP5 et Observation							CMIP5 et Observation					
Période	B_1	B_0	R^2	Δ_{Cp}	Δ_{Max}	Δ_{Mini}	B_1	B_0	R^2	Δ_{Cp}	Δ_{Max}	Δ_{Mini}
Janvier	0.3	16.9	0.1	-0.6	4.6	-4.2	0.2	18.3	0.1	0.0	4.6	-2.7
Avril	0.0	25.4	0.0	1.6	7.4	-8.3	-0.1	28.2	0.0	2.0	9.7	-5.2
Juillet	-0.1	24.5	0.0	-1.7	10.2	-9.9	0.0	24.3	0.0	-1.1	10.3	-12.4
Octobre	0.2	21.1	0.0	1.1	3.3	-5.7	0.1	22.9	0.0	0.8	5.7	-2.8
CMIP6 et Observation							CMIP6 et Observation					
Période	B_1	B_0	R^2	Δ_{Cp}	Δ_{Max}	Δ_{Mini}	B_1	B_0	R^2	Δ_{Cp}	Δ_{Max}	Δ_{Mini}
Janvier	0.3	17.9	0.1	0.6	5.7	-1.9	0.2	18.9	0.1	-1.1	-3.1	-3.7
Avril	0.0	26.4	0.0	2.7	9.2	-6.5	0.0	27.3	0.0	1.0	8.2	-8.4
Juillet	-0.1	24.9	0.0	-0.6	12.0	-9.3	-0.1	26.1	0.0	-2.1	9.6	-13.0
Octobre	0.1	22.5	0.0	1.3	5.3	-3.1	0.0	24.6	0.0	-0.3	3.7	-4.3

Source : Résultat du traitement des données

Source : Résultat du traitement des données

Il ressort des données du tableau 1 que les coefficients de détermination des dépendances entre les températures moyennes pour 1950-2005 des projets CMIP5 et CMIP6 sont assez élevés et se situent dans la fourchette $R^2=0.8-0.9$, mais que les dépendances entre les observations et les sorties de modèle sont très faibles et statistiquement non significatives ($R^2=0.0-0.1$). Ce résultat indique que les données des expériences historiques des projets CMIP5 et CMIP6 ne sont pas très différentes, et que les modèles climatiques mondiaux ne reproduisent pas non seulement la variabilité climatique temporelle, mais aussi l'hétérogénéité spatiale associée aux caractéristiques climatiques locales. Par conséquent, même les moyennes pluriannuelles ne coïncident pas avec celles des points d'observation du territoire.

Les écarts entre les températures moyennes observées et modélisées (Δ_{Cp}) des différentes moyennes du territoire ne dépassent pas 2°C dans la plupart des cas. Ces incertitudes spatiales systématiques sont plus faibles pour la période sèche, représentée dans le tableau par octobre et janvier (maximum $1.1^\circ\text{C} - 1.3^\circ\text{C}$) et plus fortes pour la période humide de l'année (maximum $2.1^\circ\text{C} - 2.7^\circ\text{C}$) et le modèle IPSL donnant des différences légèrement plus faibles que le BCC (tableau 1). Les différences entre les valeurs les plus élevées et les plus basses, dues aux caractéristiques climatiques locales (relief, couverture végétale etc.) de chaque région du territoire, peuvent atteindre 4°C à 5.7°C pour les deux modèles en période sèche et 10°C à 13°C pendant la saison humide. Ce résultat indique que même si en moyenne le modèle climatique donne une petite erreur systématique pour le territoire, ces erreurs peuvent être plusieurs fois plus importantes dans certaines parties du territoire en raison de facteurs locaux et leur distribution spatiale devrait être construite et analysée.

Les résultats de la comparaison des moyennes modélisées pour les deux projets CMIP5 et CMIP6 sont également intéressants. Bien que les coefficients de détermination R^2 entre les données modélisées soient élevés, il existe des différences systématiques. Par exemple, le coefficient B_1 devrait être de 1.0 s'il n'y a pas de différences systématiques, ce qui correspond à la tangente de la pente de la ligne de régression passant par 45° . Pour le modèle français IPSL, c'est presque le cas, tandis que pour le BCC chinois, le coefficient B_1 est de 1.1, ce qui donne des valeurs inférieures à la moyenne territoriale et supérieures à la moyenne. Le coefficient B_0 caractérise la déviation systématique dans la zone des valeurs minimales marginales, il est négatif dans presque tous les cas et est 1.5 fois plus grand pour le modèle BCC que pour IPSL. De même, les écarts entre les valeurs les plus élevées et les plus basses sont plus importants pour le modèle BCC, atteignant 3.2°C à 3.5°C , et 1.5°C à 1.9°C pour le modèle IPSL.

Sur la base de l'analyse des coefficients et des écarts, on peut conclure que pour le modèle IPSL, les résultats des calculs à partir de l'expérience historique dans les projets CMIP5 et CMIP6 sont presque les mêmes et les écarts aléatoires moyens ne dépassent pas 1°C . Pour le modèle BCC, il y a des déviations systématiques dans les données expérimentales historiques obtenues pour les deux projets : les valeurs au-dessus de la moyenne sont surestimées, les valeurs en-dessous de la moyenne sont sous-estimées et les déviations maximales sont déjà de $3.0^\circ\text{C} - 3.5^\circ\text{C}$. La comparaison avec les données d'observation montre que pour le modèle IPSL, les erreurs modulo moyennes sont de 1.0°C dans le projet CMIP5 et de 1.3°C dans le projet CMIP6, tandis que les erreurs les plus importantes atteignent $8^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C}$ dans le projet CMIP5 et $9^\circ\text{C} - 12^\circ\text{C}$ dans le projet CMIP6. Par conséquent, il semble que dans le projet CMIP6, les données expérimentales historiques soient encore moins efficaces que dans le projet CMIP5. Pour le modèle BCC, les erreurs modulo moyennes sont de 1.0°C dans le projet CMIP5 et de 1.1°C dans le projet CMIP6, tandis que les erreurs les plus importantes atteignent $10^\circ\text{C} - 12^\circ\text{C}$ dans le projet CMIP5 et $10^\circ\text{C} - 13^\circ\text{C}$ dans le projet CMIP6. Il s'ensuit que les données du projet CMIP6 n'ont pas réduit l'écart avec les observations, et l'ont même légèrement augmenté. Par conséquent, l'évaluation du climat futur ne peut pas s'appuyer uniquement sur les scénarios CMIP6, mais doit également utiliser les estimations des scénarios CMIP5, car l'expérience historique de CMIP6 n'a pas prouvé que les résultats de ce projet sont plus efficaces que ceux de CMIP5.

Pour évaluer la robustesse des résultats obtenus dans

le tableau 1, la période de référence d'observations a été divisée en deux sous-périodes, 1950-1977 et 1978-2005, et les mêmes comparaisons ont été faites entre les deux sous-périodes, et la période de référence, et presque les mêmes conclusions ont été obtenues. Ainsi, pour le modèle chinois BCC, si l'on compare les données de modélisation CMIP5 et CMIP6, $R^2=0.8$, le coefficient $B_1=1.1$, le coefficient B_0 est également négatif, mais déjà 2 fois plus élevé que pour la période 1950-2005, et l'écart moyen $0.2\text{ }^\circ\text{C}$ de moins, bien que les écarts aux valeurs les plus élevées et les plus basses soient les mêmes, atteignant $3.5\text{ }^\circ\text{C}$. En comparant les simulations aux observations, $R^2=0.0-0.1$ et les écarts les plus importants atteignent également $10-13\text{ }^\circ\text{C}$, bien que les écarts moyens soient légèrement plus importants, s'élevant à $1.6\text{ }^\circ\text{C}$ contre $1.1\text{ }^\circ\text{C}$ pour toute la période.

3.2 Comparaison des résultats des scénarios futurs des projets CMIP5 et CMIP6

Parallèlement aux données historiques, les scénarios futurs (2.6, 4.5 et 8.5) RCP/SSP ont été comparés pour les projets CMIP5 et CMIP6. Les résultats sont présentés dans le tableau 2 pour le modèle BCC et le tableau 3 pour le modèle IPSL, dans lesquelles les périodes 1, 2 et 3 désignent respectivement les intervalles 2011-2040, 2041-2070 et 2071-2100. Les coefficients R^2 et B_1 ne sont pas indiqués dans les tableaux pour le fait que leurs valeurs sont presque identiques à ceux de la comparaison des résultats de l'expérience historique : $R^2=0.8$ dans BCC et $R^2=0.9$ dans IPSL, coefficient $B_1=1.1$ pour BCC et $B_1=1.0$ pour IPSL. Par conséquent, le modèle BCC dans les deux projets présente des différences plus importantes que le modèle IPSL dans lequel les données des deux projets sont plus liées et il n'y a pas de déviations systématiques.

Tableau 2. Résultats de la comparaison des estimations des scénarios futurs dans les projets CMIP5 et CMIP6 pour le territoire de l'Afrique centrale en utilisant le modèle BCC,

Période	Scénario											
	2.6				4.5				8.5			
	B_0	Δ_{Cp}	Δ_{Max}	Δ_{Min}	B_0	Δ_{Cp}	Δ_{Max}	Δ_{Min}	B_0	Δ_{Cp}	Δ_{Max}	Δ_{Min}
Janvier												
1	-2.1	0.9	1.8	-1.3	-1.4	0.9	1.5	-0.6	-1.6	0.7	1.5	-0.8
2	-2.0	1.0	1.7	-0.1	-1.6	1.0	1.7	0.0	-1.7	0.7	1.7	-0.4
3	-1.4	1.1	1.9	-0.2	-2.4	1.2	2.2	0.4	-2.8	0.7	2.1	-3.6
Avril												
1	-2.5	0.9	3.2	-1.4	-1.8	0.9	2.9	-2.0	-1.9	0.7	2.9	-1.2
2	-2.3	1.0	2.7	-1.1	-2.4	1.0	2.9	-1.6	-2.5	0.7	2.9	-2.4
3	-1.5	1.1	3.1	-0.5	-3.0	1.2	3.6	-0.8	-3.7	0.8	3.6	-2.1
Juillet												
1	-1.7	0.9	1.9	-1.7	-1.5	0.8	1.7	-2.2	-1.7	0.7	1.9	-2.1
2	-2.0	1.0	2.2	-1.2	-2.2	0.9	1.8	-1.8	-3.1	0.7	1.5	-3.0
3	-1.1	1.0	2.1	-0.7	-1.9	1.2	2.1	-1.0	-3.8	0.8	1.4	-3.4
Octobre												
1	-1.6	1.0	3.2	-1.0	-1.4	0.9	3.1	-1.5	-1.5	0.8	3.2	-2.0
2	-1.9	1.1	3.5	-1.0	-1.8	1.0	3.1	-1.1	-2.1	0.8	3.0	-2.5
3	-1.3	1.1	3.8	-1.4	-1.9	1.3	3.5	-0.8	-3.2	0.9	3.5	-2.8

Source : Résultat du traitement des données

Tableau 3. Résultats de la comparaison des estimations des scénarios futurs dans les projets CMIP5 et CMIP6 pour le territoire de l'Afrique centrale en utilisant le modèle IPSL.

Période	Scénario											
	2.6				4.5				8.5			
	B_0	Δ_{Cp}	Δ_{Max}	Δ_{Min}	B_0	Δ_{Cp}	Δ_{Max}	Δ_{Min}	B_0	Δ_{Cp}	Δ_{Max}	Δ_{Min}
Janvier												
1	-0.3	-0.4	0.3	1.1	-0.8	-1.3	1.4	0.0	-0.3	-0.5	0.2	0.7
2	-0.2	-0.3	0.6	0.9	-0.6	-1.1	1.4	0.2	-1.0	-0.5	0.0	-0.3
3	-0.6	-0.3	0.4	0.3	-0.9	-1.2	1.7	-0.1	-0.3	-0.1	1.3	0.8
Avril												
1	-1.1	-0.3	-0.7	-0.2	-0.7	-1.2	-0.5	-1.3	-1.4	-0.4	-0.7	-0.2
2	-1.1	-0.2	-0.6	-0.2	-1.1	-1.0	-0.3	-1.0	-2.5	-0.4	-0.6	-0.4
3	-1.4	-0.2	-0.5	-0.4	-1.3	-1.1	-0.6	-0.9	-2.4	0.0	0.2	0.9
Juillet												
1	0.7	-0.3	0.6	-0.5	1.9	-1.1	-0.4	-2.1	0.3	-0.4	0.6	-0.1
2	0.0	-0.2	0.8	-0.3	0.8	-1.0	-0.3	-1.8	0.0	-0.4	1.0	-0.7
3	-0.3	-0.2	0.6	-0.5	0.2	-1.1	-0.8	-1.6	1.5	0.0	1.5	0.7
Octobre												
1	-0.6	-0.4	0.7	-0.8	0.0	-1.3	-0.7	-1.5	-0.5	-0.4	0.2	-0.8
2	-0.6	-0.3	0.7	-0.2	-0.3	-1.1	-1.7	-0.8	-1.4	-0.5	0.4	-0.5
3	-1.2	-0.3	0.5	-0.9	-0.5	-1.2	-0.7	-1.6	-0.1	-0.1	1.2	0.1

Source : Résultat du traitement des données

L'analyse des écarts dans les tableaux 2 et 3 montre également qu'entre les deux modèles, BCC du CMIP6 présente plus de divergences que dans le CMIP5. Les écarts les plus importants atteignent $3.5\text{ }^\circ\text{C}$ - $3.8\text{ }^\circ\text{C}$ pour BCC et $1.7\text{ }^\circ\text{C}$ - $2.1\text{ }^\circ\text{C}$ pour le IPSL, tandis que les écarts moyens (Δ_{Cp}) pour IPSL ne dépassent pas $0.5\text{ }^\circ\text{C}$ sauf dans le scénario 4.5, où ils sont rarement supérieurs à $1.2\text{ }^\circ\text{C}$. Pour le BCC, la valeur de Δ_{Cp} est comprise entre $0.7\text{ }^\circ\text{C}$ et $1.3\text{ }^\circ\text{C}$ et presque tous les Δ augmentent avec le nombre de périodes futures, c'est-à-dire que le projet CMIP6 donne de grandes variations pour des intervalles de temps plus longs. On peut également noter que la différence entre les estimations des scénarios des deux projets est plus faible pendant la saison sèche qu'humide. De ce qui précède, il convient de conclure que tout comme dans le cas de l'expérience historique, les estimations des scénarios dans les projets CMIP5 et CMIP6 présentent des différences à peu près équivalentes.

3.3 Estimations des futures températures de l'air en Afrique centrale jusqu'en 2100

La comparaison précédente des modèles des projets CMIP5 et CMIP6 entre eux et avec les observations permet de conclure que les modèles des deux projets devraient être utilisés pour les futures évaluations de scénarios, car lorsqu'ils sont comparés aux observations, les modèles du projet CMIP6 ne présentent pratiquement aucun avantage par rapport aux modèles du projet CMIP5. Toutefois, il est possible de comparer les résultats de l'évaluation des températures du scénario CMIP5 avec les observations réelles des 15-16 dernières années, à partir de 2006. Afin de comparer les données d'observation avec les estimations des scénarios du projet CMIP6, une période commune de 6-7 ans n'est pas encore suffisante pour obtenir des valeurs moyennes fiables. Par conséquent, les valeurs moyennes obtenues à partir des données d'observation depuis 2006 ont été comparées aux données du scénario pour la même période et les résultats sont donnés dans le tableau 4.

Tableau 4. Résultats de l'évaluation de la performance des températures du scénario du projet CMIP5 avant et après ajustement basé sur des données d'observation pour le modèle BCC.

Scénario	Mois	Données	B_1	B_0	R^2	Δ_{Cp}	Δ_{Max}	Δ_{Min}
RCP2.6	Janvier	CMIP5	0.6	10.2	0.21	0.4	4.8	-2.1
		CMIP5cor	0.9	1.6	0.94	0.3	0.3	0.1
	Avril	CMIP5	-0.5	40.2	0.08	1.9	13.6	-5.0
		CMIP5cor	1.0	-1.0	0.99	-0.1	-0.2	-0.4
	Juillet	CMIP5	0.2	19.9	0.01	-0.8	1.2	-8.9
		CMIP5cor	1.0	0.5	0.98	0.1	0.3	-0.2
Octobre	CMIP5	0.5	13.0	0.15	1.4	2.7	-2.4	
	CMIP5cor	1.0	-0.1	0.96	0.2	0.7	-0.2	
RCP4.5	Janvier	CMIP5	0.5	11.6	0.18	0.3	4.8	-2.3
		CMIP5cor	0.9	1.7	0.95	0.2	0.2	0.2
	Avril	CMIP5	-0.5	40.2	0.08	-0.2	-0.1	-0.3
		CMIP5cor	1.0	-0.9	0.99	-0.2	-0.1	-0.3
	Juillet	CMIP5	0.2	19.4	0.01	-0.9	-9.2	1.0
		CMIP5cor	1.0	0.7	0.98	0.1	0.3	-0.1
Octobre	CMIP5	0.5	13.0	0.14	1.3	2.7	-2.7	
	CMIP5cor	1.0	0.2	0.96	0.2	0.6	-0.1	
RCP8.5	Janvier	CMIP5	0.6	11.4	0.19	0.3	4.6	-2.4
		CMIP5cor	0.9	1.7	0.94	0.2	0.1	0.2
	Avril	CMIP5	-0.5	40	0.07	1.8	13.8	-5.1
		CMIP5cor	1.0	-1.01	0.99	-0.3	-0.4	-0.5
	Juillet	CMIP5	0.1	20.7	0.00	-0.8	1.2	-9.3
		CMIP5cor	1.0	0.6	0.98	-0.1	-0.2	0.2
Octobre	CMIP5	0.5	14.6	0.11	1.3	2.7	-2.7	
	CMIP5cor	1.0	0.1	0.96	0.1	0.5	-0.2	

Source : Résultat du traitement des données

Le tableau 4 présente des comparaisons pour deux cas ou deux ensembles de données : les estimations de température du scénario directement telles qu'elles apparaissent sur Internet (CMIP5) et avec des ajustements selon les formules (3)-(5), qui sont étiquetées "CMIP5cor" dans le tableau 4. Les valeurs de température du scénario sont dérivées du modèle climatique BCC.

Ainsi, Les conclusions suivantes peuvent être tirées des résultats du tableau 4 :

- les moyennes sur 15 ans (2006-2020) des données du projet CMIP5 n'ont pratiquement aucune corrélation avec les mêmes données d'observation moyennes, comme l'indique le R² variant de R²=0.00 à R²=0.21 ;

- les différences de moyennes entre les valeurs observées et les valeurs des scénarios pour le territoire sont les plus faibles en janvier ($\Delta_{cp} = +0.3 \text{ °C} - +0.4 \text{ °C}$), mais atteignent +1.4 °C - +1.9 °C en avril et octobre, et en juillet les valeurs moyennes observées sont inférieures aux valeurs des scénarios et sont de -0.8 °C - -0.9 °C pour tous les scénarios ;

- les écarts Δ_{max} pour les valeurs les plus élevées atteignent -9.2 °C en juillet et +13.6 °C à +13.8 °C en avril, en janvier ils sont systématiquement sous-estimés par le modèle et $\Delta_{ma} = +4.6 \text{ °C}$ à +4.8 °C.

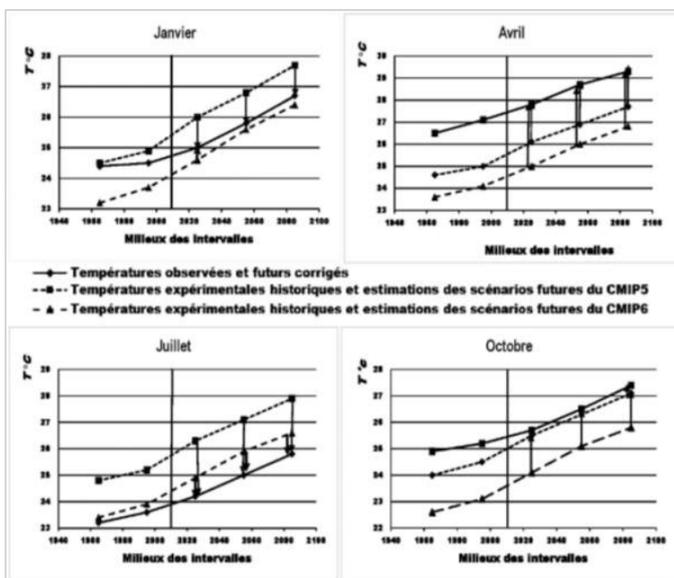
- les écarts Δ_{min} pour les valeurs les plus basses atteignent -8.9 °C à -9.3 °C en juillet, -5.1 °C en avril et jusqu'à -2.1 °C à -2.7 °C en janvier et octobre.

On constate donc que même les températures moyennes par zone et par période s'écartent des moyennes observées de 2 °C, et que les écarts les plus importants, dus à l'hétérogénéité climatique spatiale locale, peuvent atteindre 9 °C à 13 °C.

Après ajustement des températures à l'aide des formules (3) - (5) R² = 0.94–0.99, le coefficient B₁ est proche de 1.0, $\Delta_{cp} = -0.2 \text{ °C} - +0.3 \text{ °C}$, et les plus grandes différences n'ont pas dépassé 0.4 °C – 0.5 °C modulo.

Les futures températures de l'air en Afrique Centrale ont été estimées à la fois pour les moyennes de la zone et pour les températures des stations météorologiques individuelles, sur la base des valeurs ajustées du scénario. Un exemple d'ajustement de la température moyenne de l'air pour le territoire issu du modèle français IPSL et du scénario moyen 4.5 est présenté à la figure 2.

Figure 2. Température moyenne future de l'air corrigées par scénario combinant le modèle IPSL et le scénario 4.5W/m².



Source : Résultat du traitement des données

La figure 2 montre que les moyennes sur 30 ans des températures de l'air pour les mois caractéristiques de toutes les saisons de l'année (janvier, avril, juillet, octobre) pour le milieu

de 5 intervalles de temps : deux actuels (1951 - 1980, 1981–2010) et trois futurs (2011 - 2040, 2041 - 2070 et 2071–2100.) par les données observées et les estimations futures après ajustement, et par les données expérimentales historiques et les estimations futures des projets CMIP5 et CMIP6 non ajustés. Les flèches verticales dans les graphiques indiquent la direction de l'ajustement. Étant donné que les estimations du scénario post-ajustement pour les projets CMIP5 et CMIP6 étaient les mêmes et ne différaient parfois que de 0,1 °C, elles ont été combinées et sont représentées par une seule ligne sur la figure 2.

Les graphiques de la (figure 2) montrent que, comparativement aux données issus des observations dans les stations, la température en janvier pour la région de l'Afrique Centrale (24.5 °C observée) a été légèrement surestimée dans CMIP5 (24.9 °C) et sous-estimée dans CMIP6 (23.7 °C) selon l'expérience historique, pour la période 1981-2010. Par ailleurs, la comparaison de CMIP5 et 6 aux observations a montré des écarts plus ou moins considérables dans les deux projets qu'il faut prendre en compte pour une estimation optimale des températures futures. Par conséquent, les résultats des projections futures de CMIP5 devraient être réduits et ceux de CMIP6 légèrement augmentés. Au mois d'avril, les données de l'expérience historique dans les deux projets donnent des températures sous-estimées par rapport aux températures observées (25.0 °C et 24.1 °C respectivement dans CMIP5 et 6 contre 27.1 °C observée) ; ainsi, les valeurs du scénario futur devraient être augmentées par ajustement. En juillet, au contraire, les valeurs futures de tous les scénarios devraient être diminuées et davantage pour CMIP5. En octobre, la situation est à nouveau inverse, et toutes les estimations des modèles devraient être augmentées et plus encore pour CMIP6. Par ailleurs, sans ajustement des scénarios d'observation, la température moyenne au milieu du 21e siècle en octobre pour CMIP6 et le scénario 4.5 sera de 25.1 °C en Afrique centrale, contre 25.2 °C avant 2010. Globalement, les données historiques de l'expérience surestiment la température de juillet et sous-estiment les températures d'avril et d'octobre de 2 °C à 3 °C.

Les estimations ajustées des scénarios futurs de la température régionale moyennes pour les deux modèles (IPSL et BCC), trois scénarios et trois intervalles de temps futurs sont présentés dans le tableau 5.

Tableau 5. Moyenne des températures des scénarios futurs ajustés prenant en compte les modèles IPSL et BCC et les trois scénarios pour les mois typiques de l'année (1- janvier, 4-avril, 7-juillet, 10-octobre), en Afrique centrale.

Mois	Scén.	Périodes futures											
		2011-2040				2041-2070				2070-2100			
		BCC		IPSL		BCC		IPSL		BCC		IPSL	
1	2.6	24.8	24.8	24.7	24.9	24.9	25.0	24.8	25.1	24.9	25.2	25.0	25.4
	4.5	25.0	25.1	25.0	25.0	25.4	25.7	25.8	25.9	25.9	26.3	26.6	26.7
	8.5	25.4	25.4	25.5	25.6	26.7	26.7	27.4	27.6	28.2	28.0	29.2	29.4
4	2.6	27.4	27.5	27.5	27.5	27.5	27.6	27.7	27.8	27.6	27.8	27.9	28.0
	4.5	27.6	27.7	27.8	27.8	28.1	28.3	28.6	28.7	28.5	28.9	29.5	29.1
	8.5	28.1	28.1	28.3	28.4	29.4	29.4	30.1	30.4	30.7	30.7	32.0	32.4
7	2.6	23.9	23.9	23.9	23.9	24.0	24.1	24.0	24.1	24.0	24.1	24.2	24.4
	4.5	24.1	24.2	24.2	24.2	24.5	24.8	25.0	25.0	24.9	25.4	25.8	25.9
	8.5	24.5	24.5	24.7	24.7	25.8	25.9	26.5	26.7	27.2	27.2	28.4	28.7
10	2.6	25.4	25.4	25.4	25.4	25.5	25.6	25.6	25.6	25.6	25.8	25.7	25.9
	4.5	25.6	25.7	25.7	25.7	26.1	26.3	26.5	26.6	26.5	26.9	27.3	27.4
	8.5	26.0	26.0	26.2	26.3	27.3	27.4	28.1	28.3	28.7	28.7	29.9	30.3

Source : Résultat du traitement des données

Les résultats du tableau 5 montrent que la différence entre les valeurs des scénarios CMIP5 et CMIP6 ne dépasse pas en général 0.1 °C, et que l'augmentation de la température moyenne pour tous les mois à la fin du 21e siècle par rapport à aujourd'hui atteint 0.2 °C – 0.5 °C dans le cadre du scénario

2.6 ; 1.2 °C – 1.7 °C dans le cadre du scénario 4.5 et 2.6 – 4.2 °C dans le cadre du scénario 8.5, la limite inférieure de la fourchette de changement étant obtenue avec le modèle BCC et la limite supérieure avec le modèle IPSL. Pour les scénarios 2.6 et 4.5, la différence entre les deux modèles est de 0.3 °C et 0.5 °C, respectivement, mais pour le scénario 8.5, cette différence est importante, près de 2 °C. Par conséquent, on peut considérer que le scénario 8.5 n'est pas seulement un scénario marginal improbable, mais aussi peu fiable lorsqu'il est évalué sur sa base par différents modèles climatiques.

Les résultats suivants de l'estimation de la température future de l'air sont déjà obtenus pour chacune des 24 stations météorologiques sélectionnées dans les conditions de leur uniformité sur le territoire pour une interpolation spatiale fiable. Un exemple des cartes obtenues des distributions spatiales des températures des scénarios futurs pour la température moyenne d'octobre sur des périodes de 30 ans est présenté à la figure 3 pour le modèle IPSL et deux scénarios 4.5 (première ligne) et 8.5 (deuxième ligne).

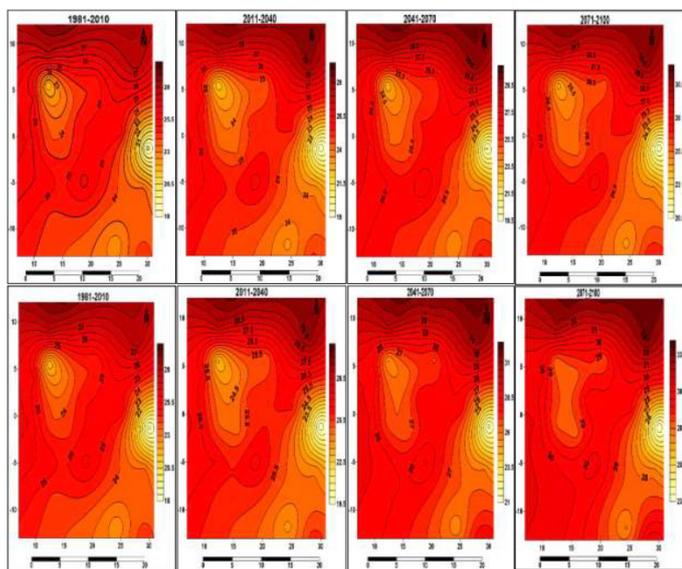


Figure 3. Distributions spatiales des températures actuelles et des scénarios d'octobre pour l'Afrique centrale en utilisant le modèle IPSL et les scénarios 4.5 W/m² (en dessus) et 8.5 W/m² (en dessous).

Source : Résultat du traitement des données

Au regard de la répartition spatiale des températures dans le cadre du scénario moyen 4.5 (fig.3), la zone où les températures sont supérieures à 28 °C s'étendra progressivement du nord (actuellement) vers les parties centrales et occidentales de l'Afrique centrale. À la fin du XXI^e siècle, cette zone couvrira plus de la moitié du territoire, à l'exception des régions montagneuses du nord-ouest et du sud-est, où les températures atteindront, voire dépasseront, 25 °C. La plus forte augmentation de température à l'échelle de la zone dans le nord, près du Sahel, passera de 27-28 °C actuellement à 31 °C dans le dernier tiers du 21^e siècle. Dans le reste du territoire, y compris les régions montagneuses, les températures n'augmenteront pas de plus de 2 °C. Selon le scénario 8.5, au milieu du siècle, les températures seraient supérieures à 28 °C dans la quasi-totalité de l'Afrique Centrale, avec des maxima de 31 °C à 32 °C dans le nord, et dans le dernier tiers du siècle, une petite zone montagneuse localisée de 23 °C ne subsisterait qu'à l'est, les températures sur l'ensemble du territoire allant de 28 °C dans les hautes terres à 33 °C dans le nord.

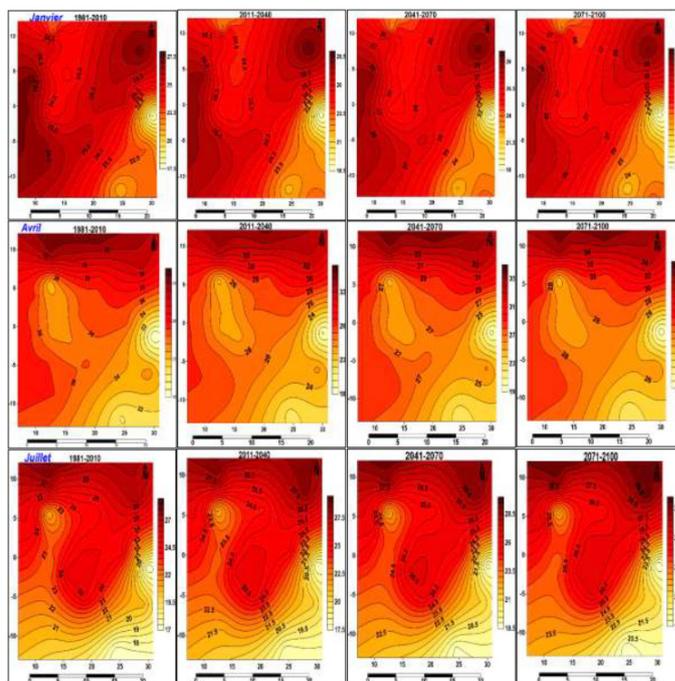


Figure 4. Distributions spatiales des températures actuelles et des scénarios en janvier, avril et juillet pour l'Afrique centrale par le modèle IPSL et le scénarios 4.5 W/m².

Source : Résultat du traitement des données

Pour les autres mois caractéristiques des saisons de l'année, la distribution spatiale est indiquée sur la (figure 4) considérant le scénarios 4.5 uniquement. Les conclusions suivantes peuvent être tirées d'une comparaison des changements dans les configurations spatiales entre la période actuelle et le dernier tiers du 21^e siècle pour chaque saison de l'année.

1. La période sèche (janvier) est due à la première phase de la mousson Africaine, lorsque de l'air sec et frais se déplace avec la ZCIT (Zone de Convergence Intratropicale) depuis les déserts d'Afrique du Nord ; pendant cette période, les températures les plus élevées de 27 °C sont enregistrées près du Golf de Guinée et à l'est à l'intérieur des terres, tandis que les températures les plus basses sont observées dans les zones montagneuses et dans le nord de la région et sont de 22 °C à 24 °C. À la fin du 21^{ème} siècle, les températures devraient augmenter de 2 °C à 3 °C, avec des températures supérieures à 27 °C dans les parties occidentale et centrale.
2. La dynamique des distributions spatiales de température en avril répète pratiquement les changements spatiaux de température en octobre. Le réchauffement affecte également dans un premier temps la partie nord du territoire, puis l'ouest et l'est, et d'ici le dernier tiers du 21^e siècle, les températures de 28 °C et plus (jusqu'à 36 °C dans le nord) seront présentes sur la quasi-totalité de l'Afrique Centrale, à l'exception de certaines zones montagneuses du centre et du sud-est. L'augmentation globale de la température au cours du 21^e siècle pourrait être de 2 °C à 3 °C.
3. En saison pluvieuse (juillet), pendant la deuxième phase de la mousson Africaine, lorsque l'air humide arrive de l'Atlantique, les températures élevées (supérieures à 27 °C) qui ne sont actuellement enregistrées que dans l'extrême nord de la région se produiront dans la moitié nord du territoire, à l'exception des régions montagneuses, d'ici la fin du 21^{ème} siècle. La fourchette d'augmentation de la température d'ici la fin du siècle est de 2 ° - 2,5 °C, ce qui est légèrement plus

faible que pour les autres saisons de l'année.

3.4 Discussion

Pendant que le climat se réchauffe, il est nécessaire de mieux comprendre ses impacts sur l'économie, la société et l'environnement de la région d'Afrique Centrale. La performance des résultats des modèles CMIP6 par rapport aux modèles CMIP5 pour l'évaluation de l'impact du réchauffement climatique est mise au centre des inquiétudes. Ainsi, la présente étude évalue la performance des nouveaux modèles climatiques globaux du CMIP6 par rapport à ceux du CMIP5 afin d'évaluer l'efficacité des estimations des scénarios des futures températures de l'air des modèles climatiques globaux IPSL et BCC sur la région de l'Afrique Centrale. L'étude examine également, les différences entre les données d'observation et de modélisation pour les deux projets dans le but de comprendre si l'incertitude est réduite dans CMIP6. Des techniques robustes telles que la construction des relations de régression de la forme $Y=B_1X+B_0$ et le principe de similitude du taux de croissance de la température des périodes d'observation historique et du scénario futur sont appliqués.

Il a été obtenu que les projets CMIP5 et CMIP6 ne sont pas très différentes, mais que les moyennes pluriannuelles de la température ne coïncident pas avec celles des points d'observation du territoire. Cela voudrait dire que les modèles climatiques mondiaux ne reproduisent pas seulement la variabilité climatique temporelle, mais aussi l'hétérogénéité spatiale associée aux caractéristiques climatiques locales. En outre, aucune des températures moyennes modélisées des différents modèles CMIP5/CMIP6 ne correspond nécessairement aux moyennes observées. En fait, les simulations ont généralement tendance à sous-estimer ou à surestimer les valeurs ; le modèle IPSL donnant les différences légèrement plus faibles que le BCC. Donc, fondamentalement, le projet CMIP6 n'a pas vraiment amélioré la différence entre les données modélisées (historiques et scénarios futurs) et les observations - il l'a même quelque peu exacerbé. Cela signifie que nous ne pouvons pas nous fier uniquement aux scénarios CMIP6 pour prédire le climat futur, nous devons également utiliser les estimations CMIP5, CMIP6 n'ayant pas vraiment démontré d'efficacité accrue par rapport à son prédécesseur.

En comparant les simulations des modèles climatiques des périodes passées et futures, on prévoit qu'un changement de température important se produira d'ici la fin du siècle. Le scénario moyen 4.5 W/m² prévoit une augmentation notable de la température dans la plupart des régions, à l'exception de certaines zones montagneuses du nord-ouest et du sud-est, (plus notable en saison sèche qu'en saison humide). Ce changement de température pourrait potentiellement entraîner divers problèmes, notamment ceux liés à l'agriculture, aux infrastructures et à la santé humaine et environnementale. Cependant, plus de recherches sont nécessaires pour développer des stratégies d'adaptation et d'atténuation qui peuvent sauvegarder les communautés et les écosystèmes d'Afrique centrale et soutenir les économies de ses pays constitutifs.

Les résultats de la présente étude diffèrent de ceux obtenus dans des études sur d'autres parties du monde (Song et al., 2021a). Dans l'ensemble, ces études ont révélé une amélioration des modèles CMIP6 par rapport à la version précédente. Des améliorations dans la modélisation CMIP6 ont été notées dans les études du plateau tibétain (Lun et al., 2021), de l'Amérique centrale et du sud (Ortega et al., 2021), au Canada

(Bourdeau-Goulet, S.C. et al. 2021), en Chine (Shiru, M.S. et al. 2022) et en Corée (Song, Y.H. et al. 2021a). La supériorité des modèles CMIP6 sur celles antérieures CMIP5 a aussi été soutenue pour les indices extrêmes en Afrique de l'Est (Ayugi, B. et al. 2021), l'évaluation des changements climatiques en Égypte (Hamed, M. M. et al. 2022). Nashwan, M.S. et al. (2022) ont découvert une meilleure capacité du Multimodel Ensemble (MME) CMIP6 à reproduire la variabilité spatiale des précipitations et des températures sur l'Égypte. Les faits suivants pourraient expliquer cette différence :

- La grande majorité de ces études sont réalisées à partir des données de réanalyse. Par contre, dans cette étude, les données d'observations issues des stations hydrométéorologiques sont considérées.

- Dans la présente étude, deux modèles climatiques globaux (IPSL et BCC) qui présentent le plus faible écart possible (par les moyennes territoriales) avec les observations de la région ont été considérés sur la base de la comparaison des résultats de modélisation des expériences historiques d'un ensemble de 10 modèles globaux de CMIP5 et CMIP6 ; alors que les autres études utilisent les ensembles de modèles.

Limites de l'étude

Bien que l'étude ait donné de bons résultats, certaines contraintes ont été observées qui ont eu un impact sur les résultats actuels. Il s'agit par exemple de la restauration des données manquantes dans les séries pluriannuelles, malgré l'efficacité de la technique de restauration utilisée, basée sur la construction de dépendances de régression pour une période conjointe entre des séries d'observation courtes et plus longues à des points analogiques. Il s'agit également de l'approche statistique utilisée ou encore du nombre limité de modèles globaux mis en compétition. Néanmoins, les résultats de l'étude ont permis de lever l'équivoque sur la performance des modèles CMIP6 (pour la région) et d'avoir une prévision plus ou moins précise de la température de l'air pour le climat futur en utilisant CMIP5/6. Le nombre restreint d'études sur le climat de la région laisse planer des doutes dans le contexte du réchauffement climatique actuel. Cela entraîne une confusion et un manque de consensus sur l'état futur du climat régional pour la formulation d'une politique appropriée et d'adaptation.

Conclusion

Cette étude a permis de comprendre que les écarts aléatoires moyens entre les résultats de l'expérience historique des projets CMIP5 et CMIP6 n'excèdent pas 1 °C (0.95 °C) dans le modèle IPSL, mais qu'entre les projets et les données d'observation, les erreurs sont de 1 °C dans CMIP5 et 1.3 °C dans CMIP6. Par conséquent, le modèle IPSL de CMIP6 est encore moins efficace que celui de CMIP5 pour le territoire de l'Afrique centrale. Le modèle BCC dans les deux projets présente des différences plus fortes (jusqu'à 3.5 °C) entre les projets ; avec les observations, les erreurs modulo moyennes sont de 1.0°C dans CMIP5 et de 1.1 °C dans CMIP6, tandis que les écarts maximaux atteignent 12 °C dans CMIP5 et 13 °C dans CMIP6. Étant donné que, lors de la comparaison des résultats de l'expérience historique avec les données d'observation, les modèles du projet CMIP6 n'ont donné aucun avantage par rapport aux modèles CMIP5, les scénarios des deux projets ont été utilisés dans l'évaluation du climat futur. En comparant les estimations des scénarios du projet CMIP5 avec les données d'observation pour la période commune des

15-16 dernières années, à partir de 2006, il a été constaté que même les températures du scénario s'écartent des moyennes observées de près de 2 °C, et que les plus grandes différences dues à l'hétérogénéité climatique spatiale locale peuvent atteindre 13 °C. L'augmentation globale de la température d'ici la fin du siècle devrait être de 2 °C à 3 °C et légèrement moins pendant la période hivernale de juin - août : 1,5 °C à 2,5 °C.

Bibliographies

Ayugi, B. ; Jiang, Z. ; Zhu, H. ; Ngoma, H. ; Babaousmail, H. ; Karim, R. ; Dike, V. (2021). Comparison of CMIP6 and CMIP5 models in simulating mean and extreme precipitation over East Africa. *Int. J. Climatol.* 41, 6474–6496.

Bourdeau Goulet, S. C., & Hassanzadeh, E. (2021). Comparisons between CMIP5 and CMIP6 models: Simulations of climate indices influencing food security, infrastructure resilience, and human health in Canada. *Earth's Future*, 9(5), e2021EF001995.

Chen, C.-A.; Hsu, H.-H.; Liang, H.-C. (2021). Evaluation and comparison of CMIP6 and CMIP5 model performance in simulating the seasonal extreme precipitation in the Western North Pacific and East Asia. *Weather Clim. Extrem.* 31, 100303.

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(5), 1937–1958.

GIEC, 2013 : Changements climatiques 2013 : Les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley (éd.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY, États Unis, 1535 p.

GIEC, 2021 : Résumé à l'intention des décideurs. Dans : Changements climatiques 2021 : Les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au sixième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu et B. Zhou (éd.)]. Cambridge University Press. Sous presse.

Гос. гидрол. ин-т. - Л. : Гидрометеоздат, (1979). Рекомендации по приведению рядов речного стока и их параметров к многолетнему периоду. - 64 с.

Hamed, M. M., Nashwan, M. S., Shahid, S., bin Ismail, T., Wang, X. J., Dewan, A., & Asaduzzaman, M. (2022). Inconsistency in historical simulations and future projections of temperature and rainfall: A comparison of CMIP5 and CMIP6 models over Southeast Asia. *Atmospheric Research*, 265, 105927.

Hamed M. M., Nashwan M. S. et Shahid S.(2022). A novel selection method of CMIP6 GCMs for robust climate projection. *International Journal of Climatology*, vol. 42, no 8, p. 4258-4272.

Hartmann, D.L. (2016). Chapter 11—Global Climate Models. In *Global Physical Climatology*, 2nd, ed.; Elsevier: Boston, MA, USA, pp. 325–360. ISBN 978-0-12-328531-7.

Lun, Y.; Liu, L.; Cheng, L.; Li, X.; Li, H.; Xu, Z. (2021). Assessment of GCMs simulation performance for precipitation and temperature from CMIP5 to CMIP6 over the Tibetan Plateau. *Int. J. Climatol.*, 41, 3994–4018.

Лобанов В.А., Лемешко Н.А., Жильцова Е.Л., Горлова С.А., Ренева С.А. (2005). Восстановление многолетних рядов температуры воздуха на Европейской территории России *Метеорология и гидрология*, №2, с.5-14.

Лобанов В. А. et al. (2011). Практикум по климатологии часть 1, Санкт-Петербург. с 67

Лобанов В.А., Кириллина К.С. (2019). Современные и будущие изменения климата Республики Саха (Якутия). Монография - Санкт-Петербург, Изд-во РГГМУ, – 157 с.

Мами М.Т, В.А. Лобанов (2022). Выбор эффективной модели климата для Центральной Африки; Наука и инновации – современные концепции: сборник научных статей по итогам работы Международного научного форума, Москва, 20 мая, 236 с. – ISBN 978-5-905695-78-0. DOI 10.34660/INF.2022.16.93.145

Nashwan, M.S.; Shahid, S. (2022). Future precipitation changes in Egypt under the 1.5 and 2.0 °C global warming goals using CMIP6 multimodel ensemble. *Atmos. Res.*, 265, 105908.

Nashwan, M.S.; Hamed, M.M.; Shahid, S. (2022). Inter-comparison of Historical Simulation and Future Projection of Rainfall and Temperature by CMIP5 and CMIP6 GCMs Over Egypt. *Int. J. Climatol.* 42, 4316–4332.

Ortega, G.; Arias, P.A.; Villegas, J.C.; Marquet, P.A.; Nobre, P. (2021). Present-day and future climate over central and South America according to CMIP5/CMIP6 models. *Int. J. Climatol.*, 41, 6713–6735.

Salehie, O.; Hamed, M.M.; Ismail, T.; Tam, T.H.; Shahid, S. (2021). Selection of CMIP6 GCM With Projection of Climate over the Amu Darya River Basin. *Prepr. Available Res. Sq.*, 1–27.

Salehie, O.; Ismail, T.B.; Hamed, M.M.; Shahid, S.; Idlan Muhammad, M.K. (2022). Projection of Hot and Cold Extremes in the Amu River Basin of Central Asia using GCMs CMIP6. *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.* 1–22.

Salman, S.A.; Shahid, S.; Afan, H.A.; Shiru, M.S.; Al-Ansari, N.; Yaseen, Z.M. (2020). Changes in climatic water availability and crop water demand for Iraq region. *Sustainability*, 12, 3437.

Shiru, M.S.; Chung, E.S.; Shahid, S.; Wang, X. jun (2022). Comparison of precipitation projections of CMIP5 and CMIP6 global climate models over Yulin, China. *Theor. Appl. Climatol.*, 147, 535–548.

Song, Y.H.; Nashwan, M.S.; Chung, E.S.; Shahid, S. (2021). Advances in CMIP6 INM-CM5 over CMIP5 INM-CM4 for precipitation simulation in South Korea. *Atmos. Res.*, 247, 105261.

- Song, Y.H.; Chung, E.S.; Shahid, S. (2021a).** Spatiotemporal differences and uncertainties in projections of precipitation and temperature in South Korea from CMIP6 and CMIP5 general circulation models. *Int. J. Climatol.*, 41, 5899–5919.
- Taylor, K.E., Stouffer, R.J., et Meehl, G.A. (2012).** An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4), 485-498. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>.
- Taylor, K.E.; Balaji, V.; Hankin, S.; Juckes, M.; Lawrence, B.; Pascoe, S. (2011).** CMIP5 Data Reference Syntax (DRS) and Controlled Vocabularies; San Francisco Bay Area: San Francisco, CA, USA.
- Tsalefac, M., Hiol Hiol, F., Mahé, G., Laraque, A., Sonwa, D. J., Scholte, P., ... & Doumenge, C. (2015).** Climat de l'Afrique centrale : passé, présent et futur.
- Weigel, A.P.; Knutti, R.; Liniger, M.A.; Appenzeller, C. (2010).** Risks of model weighting in multimodel climate projections. *J. Clim.*, 23, 4175–4191.
- Zamani, Y.; Hashemi Monfared, S.A.; Azhdari Moghaddam, M.; Hamidianpour, M. (2020).** A comparison of CMIP6 and CMIP5 projections for precipitation to observational data: The case of Northeastern Iran. *Theor. Appl. Climatol.*, 142, 1613–1623.