

Aires protégées résilientes au changement climatique, PARCC Afrique de l'Ouest



Projections climatiques régionales pour l'Afrique de l'Ouest



FRANCAIS

Tamara Janes, Richard Jones and Andrew Hartley

Met Office Hadley Centre

2015

Le programme des Nations Unies pour l'environnement, Centre de surveillance de la conservation de la nature (UNEP-WCMC) est le centre spécialisé d'évaluation de la biodiversité du programme des Nations Unies pour l'environnement, l'organisation environnementale intergouvernementale la plus importante dans le monde. Le Centre a été en opération depuis plus de 30 ans, alliant recherche et conseils politiques pratiques.



Projections climatiques régionales pour l'Afrique de l'Ouest, rédigé par Andrew Hartley, Richard Jones and Tamara Janes, avec le financement du Fonds pour l'environnement mondial (FEM) par le biais du PNUE.

Droits d'auteur : 2015. Programme des Nations Unies pour l'environnement.

Reproduction : La reproduction de cette publication à des fins éducatives ou non commerciales est autorisée sans permission spéciale, à condition que la reconnaissance de la source soit faite. La réutilisation de toutes les figures est soumise à l'autorisation des détenteurs des droits d'origine. Aucune utilisation de cette publication ne peut être effectuée pour la vente ou toute autre fin commerciale, sans la permission écrite du PNUE. Les demandes d'autorisation, accompagnées d'une déclaration de l'intention et de l'étendue de la reproduction, doivent être envoyées au Directeur, DCPI, UNEP, P.O. Box 30552, Nairobi, Kenya.

Non responsabilité : Le contenu de ce rapport ne reflète pas nécessairement les vues ou la politique du PNUE, des organisations participantes ou des éditeurs. Les appellations employées et la présentation des documents dans ce rapport n'impliquent pas l'expression d'une opinion quelconque de la part du PNUE ou des organisations participantes, ou des éditeurs concernant le statut juridique des pays, territoires, villes ou leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites ou la désignation de leurs noms, frontières ou limites. La mention d'une entité commerciale ou d'un produit dans cette publication n'implique pas son approbation par le PNUE.

Citation : Janes, T., Jones, R. et Hartley, A. 2015. *Projections climatiques régionales pour l'Afrique de l'Ouest*. UNEP-WCMC *Technical Report*.

Disponibilité : UNEP-WCMC, 219 Huntingdon Road, Cambridge CB3 0DL, UK
Tel: +44 1223 277314; Fax: +44 1223 277136
Email: protectedareas@unep-wcmc.org
URL: <http://www.unep-wcmc.org>

Photo de couverture : Sternes caspiennes sur l'île de Bijol, Gambie. *Droits d'auteur* : Andrew Hartley.

UNEP promotes environmentally sound practices globally and in its own activities. This publication is printed on 100% recycled paper, using vegetable-based inks and other eco-friendly practices. Our distribution policy aims to reduce UNEP's carbon footprint.

Glossaire

CMIP5	Cinquième phase du projet d'intercomparaison de modèles couplés
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
HadCM3	Troisième modèle de prévision climatique du Centre Hadley
MCM	Modèles climatiques mondiaux
MCR	Modèle climatique régional
RCP	Profil représentatif d'évolution de concentration
RE5	Cinquième rapport d'évaluation
SRES	Rapport spécial sur les scénarios d'émissions

Sommaire

GLOSSAIRE	3
RESUME EXECUTIF.....	5
1. INTRODUCTION	6
2. TENDANCES OBSERVEES ET PROJECTIONS CLIMATIQUES MONDIALES ISSUES DU RE5 DU GIEC	7
Température.....	8
Précipitations.....	11
3. PROJECTIONS CLIMATIQUES REGIONALES A ECHELLE REDUITE	12
Le Tchad.....	13
Le Mali	17
La Sierra Léone	20
La Gambie.....	23
Le Togo	25
4. CONCLUSION ET POINTS DE DECISION.....	28
5. REFERENCES.....	30

Résumé exécutif

Ce rapport résume les projections climatiques qui découlent des expériences de modélisations climatiques régionales et mondiales visant à contribuer à l'établissement de prises de décisions et d'activités d'adaptation au niveau national dans cinq pays d'étude : le Tchad, le Mali, la Gambie, la Sierra Léone et le Togo. Les observations de ces dernières décennies montrent que le climat de l'Afrique de l'Ouest a changé, certains de ces changements étant nettement imputables au changement climatique mondial. Les projections du changement climatique régional futur, associées à la nécessité de stratégies locales en matière de prises de décisions et d'adaptation, servent de plus en plus d'outil pour l'élaboration d'activités liées aux prises de décisions, aux politiques et à l'adaptation.

Dans le cadre de ce projet, cinq expériences de modélisation du climat régional à haute résolution ont été réalisées afin d'évaluer les changements potentiels en termes de températures et de précipitations dans toute l'Afrique de l'Ouest, à une échelle spatiale pertinente quant à l'évaluation des impacts de ces changements. Ces expériences régionales indiquent toutes une tendance générale de réchauffement, qui concorde avec les expériences climatiques mondiales plus globales sur lesquelles est basé le Cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (désigné en tant que RE5 du GIEC dans le présent document). Conjointement à ce réchauffement, une augmentation de la variabilité est également manifeste dans les résultats liés au climat régional, et celle-ci pourrait engendrer une plus grande fréquence de phénomènes de chaleur inhabituelle. Le haut niveau de concordance parmi les modèles climatiques régionaux et mondiaux pour l'Afrique de l'Ouest nous permet d'établir avec une solide assurance qu'une augmentation escomptée de la température se produira de manière très vraisemblable (ce qui correspond aux résultats des rapports RE5 du GIEC). Les impacts sur les écosystèmes et les moyens de subsistance dans la région de l'Afrique de l'Ouest pourraient être considérables, impliquant qu'une adaptation de ces systèmes serait nécessaire afin de les rendre résilients face aux éventuelles conséquences négatives.

En ce qui concerne les précipitations dans les cinq pays d'étude, les projections découlant des expériences de modélisations climatiques régionales et mondiales sont très variables, et présentent peu voire aucun consensus quant au sens et à l'ampleur des changements potentiels

de précipitations. Parmi l'ensemble des résultats des modèles mondiaux décrits dans le RE5 du GIEC, des hausses et des baisses importantes sont escomptées pour une grande partie de la région. Les résultats sont similaires pour les projections liées aux modèles climatiques régionaux dans certaines zones des cinq pays d'étude, bien que dans d'autres zones il existe un consensus général quant aux hausses ou aux baisses des précipitations. Toutefois, compte tenu de la grande variation des résultats dans le contexte du GIEC, ceux-ci ne reflètent potentiellement pas la totalité des résultats possibles et ne doivent pas être considérés comme étant fiables. Par conséquent, les meilleures recommandations consistent à construire une résilience solide à la variabilité climatique actuelle, étant donné que les perspectives plus sèches ou plus humides de cette variabilité pourraient s'amplifier à l'avenir.

1. Introduction

Il est largement admis que le changement climatique observé a d'ores et déjà un impact négatif sur les moyens de subsistance et les écosystèmes en Afrique (Niang *et al.*, 2014). Dans la mesure où il est escompté que le changement climatique se poursuive tout au long du XXI^e siècle, il est essentiel de mieux comprendre comment celui-ci pourrait avoir un impact sur la résilience de ces écosystèmes à travers le continent africain. À ce jour, la plupart des activités d'adaptation mises en place sur le continent sont une réponse réactive aux contraintes à court terme, et manquent souvent de soutien de la part des parties prenantes gouvernementales (Vermuelen *et al.*, 2008 ; Ziervogel *et al.*, 2008 ; Berrang-Ford *et al.*, 2011 ; Niang *et al.*, 2014). Étant donné que le changement climatique potentiel constitue une menace vis-à-vis d'un éventail de secteurs et de moyens de subsistance, tels que la pêche, la sécurité alimentaire, la santé et le bien-être, et les activités socioéconomiques, une bonne compréhension et appréciation des projections liées aux modèles climatiques pour l'Afrique de l'Ouest peuvent contribuer à mettre au point des activités d'adaptation et la gestion des risques climatiques, de même qu'à orienter les opportunités de développement en Afrique de l'Ouest.

Ce rapport résume les tendances climatiques récentes et escomptées issues du RE5 du GIEC (Niang *et al.*, 2014). Il décrit également les résultats provenant d'un ensemble de simulations de modèles climatiques régionaux (conçus pour produire des informations détaillées sur le plan géographique concernant le climat futur pour les pays d'Afrique de l'Ouest) dans le contexte plus général de résultats issus de projections du RE5 du GIEC relatives à des modèles climatiques mondiaux pour la région. La section 2 expose les tendances du changement climatique observées au cours des dernières décennies pour le continent africain, et résume les

messages clés du RE5 du GIEC liés au changement climatique. À la suite de ce résumé, les projections qui découlent de nos expériences de modélisations climatiques régionales sont soulignées dans la section 3 pour chacun des cinq pays d'étude (le Tchad, le Mali, la Gambie, la Sierra Léone et le Togo). Une comparaison de la manière dont ces projections à haute résolution s'intègrent dans le contexte des résultats plus généraux du RE5 du GIEC est également présentée. Pour conclure, le rapport expose un résumé des résultats, de même que les implications potentielles quant aux stratégies d'adaptation dans les pays concernés.

2. Tendances observées et projections climatiques mondiales issues du RE5 du GIEC

Pour replacer dans leur contexte l'analyse et l'application des projections climatiques futures tirées des expériences de modélisations climatiques régionales, nous présentons d'abord des informations sur la manière dont le climat a changé dernièrement. Nous avançons également un aperçu des consensus scientifiques actuels et des limites que comportent les modélisations quant aux futures projections de modèles. Une compréhension de ces sujets nous permettra d'interpréter de manière adéquate les projections qui découlent des expériences climatiques régionales à haute résolution décrites dans la section 3.

Les observations du climat en Afrique ont précédemment révélé des changements, notamment dans les modifications enregistrées en termes de tendances des précipitations et des températures en surface au cours du XX^e siècle (Niang *et al.*, 2014). Les observations des impacts du changement climatique recueillies à travers le continent permettent davantage d'utiliser les projections liées aux scénarios climatiques futurs comme un outil contribuant à la prise de décisions dans une diversité de secteurs, dont notamment la conservation de la biodiversité et le développement durable, tels que les moyens de subsistance des communautés qui dépendent des services écosystémiques. Concernant le futur, il est largement admis que les changements continus relevés dans les tendances des précipitations et des températures associées au changement climatique causé par l'homme modifieront très probablement les écosystèmes terrestres en Afrique de manière significative (Niang *et al.*, 2014). Cette section vise à souligner les impacts observés et escomptés du changement climatique, tels que résumés dans le RE5 du GIEC, pour les variables climatiques clés que sont la température et les précipitations.

Température

La figure 1 (adaptation de la figure 22-1 au chap. 22 du rapport du GTII dans le RE5 : Niang *et al.*, 2014) illustre une hausse de la température annuelle moyenne dans une grande partie du continent africain au cours du siècle dernier (CDKN : *Le cinquième rapport d'évaluation du GIEC : Que contient-il pour l'Afrique ?*). En Afrique de l'Ouest et dans la région du Sahel, les observations du changement climatique ont été relevées sous la forme de températures en surface plus élevées au cours des 50 dernières années, avec un réchauffement significatif sur le plan statistique oscillant entre 0,5°C et 0,8°C de 1970 à 2010 (Collins, 2011 ; Niang *et al.*, 2014).

Il est anticipé que les températures en Afrique augmentent plus rapidement que les températures enregistrées en moyenne au niveau mondial au cours du XXI^e siècle (Christensen *et al.*, 2007 ; Joshi *et al.*, 2011 ; Sanderson *et al.*, 2011 ; James & Washington, 2013 ; GT2 du GIEC Ch22). Les projections pour l'Afrique de l'Ouest révèlent une exposition à des climats sans précédent et de plus en plus variables par rapport aux conditions climatiques connues précédemment au cours du siècle. Le cadre en haut à droite dans la figure 1 montre les hausses de températures escomptées, basées sur le groupement de la Cinquième phase du projet d'intercomparaison de modèles couplés (CMIP5). Ce dernier est un ensemble d'expériences de modélisations climatiques mondiales coordonné sur le plan international, dont l'objectif est d'améliorer notre compréhension des incertitudes relatives à la conception et à l'organisation des modèles climatiques (Taylor *et al.*, 2012). Dans cet ensemble d'expériences climatiques mondiales, quatre scénarios, dénommés les 'Profils représentatifs d'évolution de concentration' (ou les RCP), sont utilisés pour simuler une série de profils futurs d'évolution de concentration plausibles pour les gaz à effet de serre. Certains d'entre eux supposent que différentes mesures sont prises pour atténuer les émissions dans le futur. Il existe quatre profils : RCP2.6 (qui représente le profil à plus basses émissions, nécessitant l'atténuation la plus importante), RCP4.5, RCP6.0, et RCP8.5 (qui représentent les profils à plus fortes émissions, et généralement désignés comme étant de type 'statu quo'). Le nombre compris dans chaque nom de profil (p. ex. 2.6, 8.5) correspond à la quantité de forçage radiatif ou de 'réchauffement' supplémentaire résultant de l'augmentation de la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à la fin du XXI^e siècle.

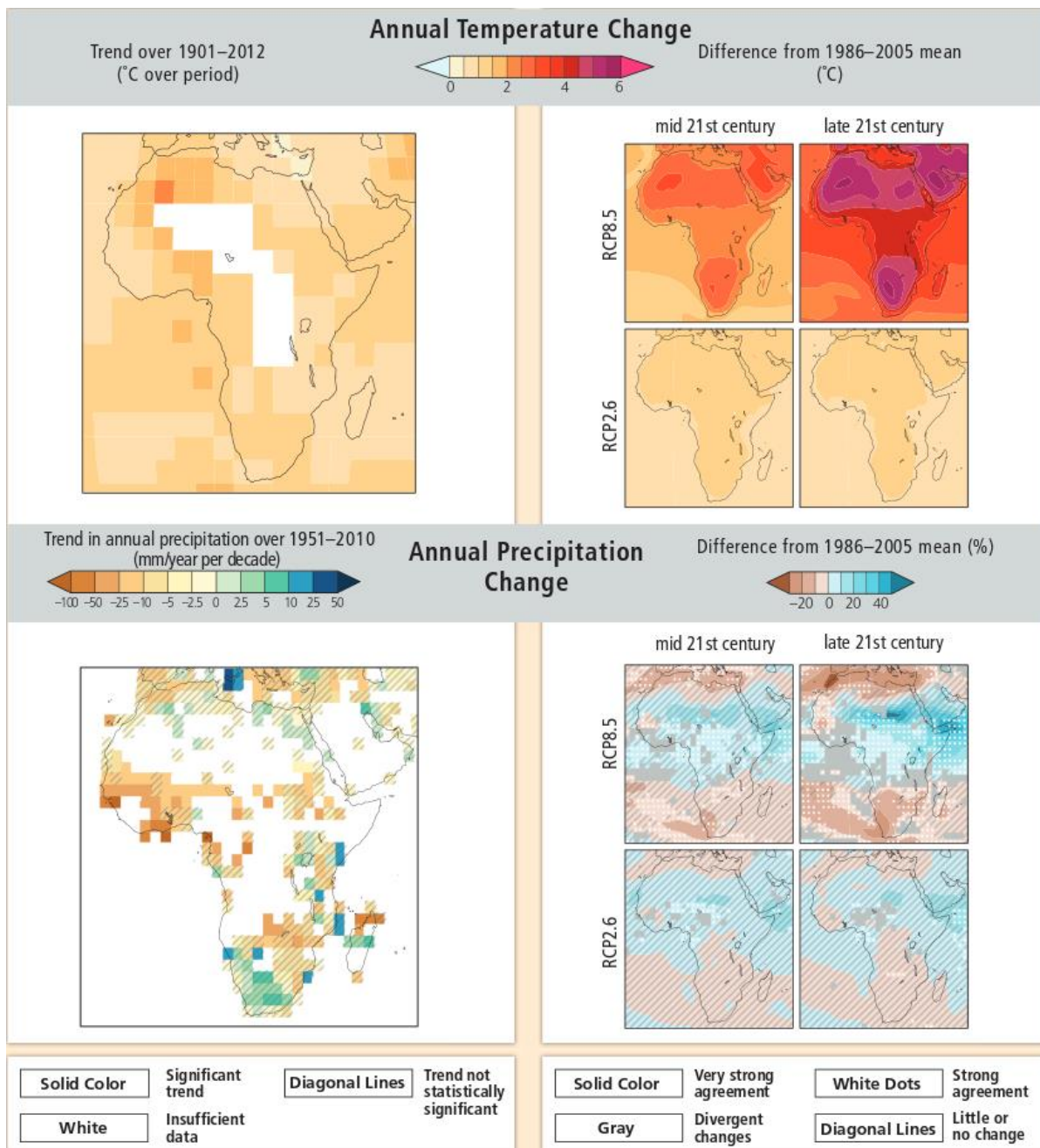


Figure 1 : Changements observés et escomptés en termes de températures et de précipitations moyennes annuelles. (Cadre en haut, à gauche) Tendances des températures moyennes annuelles observées de 1901 à 2012. [Figures RID.1 et 2.21 du RE5 du GTI] (Cadre en bas, à gauche) Carte du changement des précipitations annuelles observé de 1951 à 2010, dérivée d'une tendance linéaire. [Figures RID.2 et 2.29 du RE5 du GTI] Pour les températures et les précipitations observées, les zones blanches illustrent les régions qui manquent de données d'observation suffisantes pour une analyse. Les couleurs indiquent les zones où les tendances sont significatives au seuil de 10 %. Les lignes diagonales indiquent les zones où les tendances ne sont pas significatives. (Cadres en haut et en bas, à droite) Projections moyennes de modèles multiples de la CMIP5 relatives aux changements de températures moyennes annuelles et aux changements de pourcentage moyen des précipitations moyennes annuelles pour deux périodes (2046-2065 et 2081-2100) dans le cadre de deux scénarios d'émissions RCP. Les couleurs indiquent une concordance très élevée parmi les modèles ($\geq 90\%$ des modèles concordent), les points blancs représentent une forte concordance ($\geq 66\%$ des modèles concordent), les zones grises illustrent les changements divergents ($< 66\%$ des modèles concordent quant à l'indice du changement), et les lignes diagonales représentent les zones avec peu ou aucun changement par rapport à la variabilité climatique actuelle (bien qu'il puisse y avoir des changements significatifs à des échelles de temps plus courtes). Figure complète d'après la Fig 22-1 du RE5 du GT2.

Chaque RCP contient un ensemble de valeurs de départ ainsi que les émissions estimées jusqu'à la fin du XXI^e siècle, sur la base d'hypothèses relatives aux activités économiques, aux sources d'énergie, à la croissance démographique et à d'autres facteurs socioéconomiques. Bien que les projections socioéconomiques soient tirées des publications pour développer les profils d'évolution de concentration, la base de données ne comprend pas de données socioéconomiques (van Vuuren *et al.*, 2011).

D'après la figure 1, les résultats qui découlent de la CMIP5 suggèrent nettement une hausse de la température moyenne annuelle sur le territoire africain au milieu et à la fin du XXI^e siècle, présentant un fort consensus entre les modèles et un niveau de confiance élevé quant à cette projection. Les plus fortes hausses de température, dépassant 2°C au milieu du siècle et 4°C à la fin du siècle, sont associées au scénario d'émissions 'plus extrême' RCP8.5. En Afrique de l'Ouest particulièrement, les projections de températures dans le cadre du scénario d'émissions RCP8.5 atteignent 6°C, ce qui mène à l'identification du Sahel et de l'Afrique de l'Ouest tropicale comme étant les points chauds du changement climatique (Diffenbaugh & Giori, 2012 ; Niang *et al.*, 2014).

Dans la figure 2, qui compare les réponses anticipées en termes de températures et de précipitations vis-à-vis du forçage naturel ainsi que causé par l'homme, nous observons qu'une hausse clairement identifiable des températures observées et escomptées est attribuée au forçage influencé par l'homme. Il s'agit donc d'une réponse climatique très probable aux futures augmentations d'émissions de gaz à effet de serre dans le cadre d'activités de type 'statu quo'.

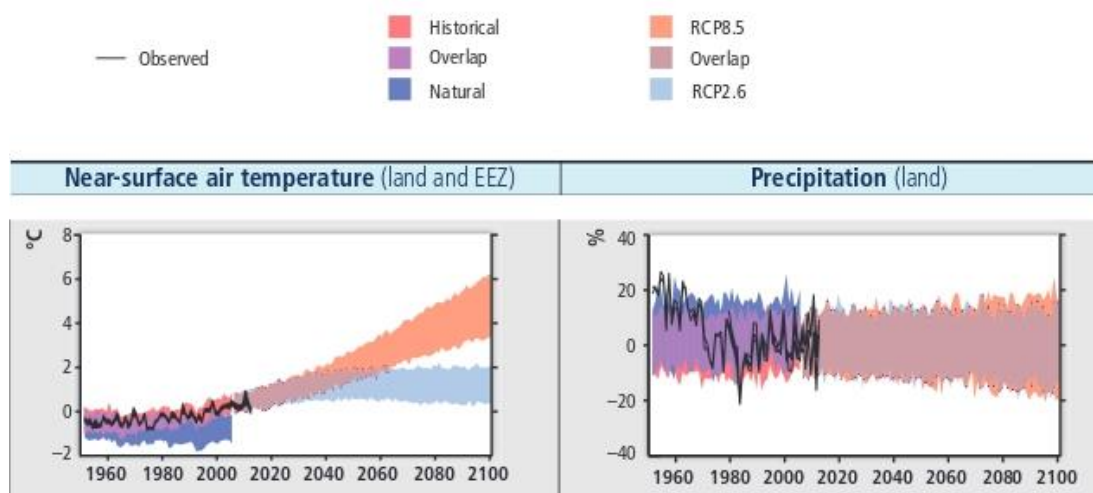


Figure 2 : Variations simulées et observées des températures et des précipitations moyennes annuelles futures pour la Communauté économique des États de l'Afrique de l'Ouest (CEDEAO). Les lignes noires montrent différentes estimations à partir de mesures d'observation. Les zones d'ombre indiquent la marge du 5^{ème} au 95^{ème} centile des simulations de modèles climatiques exécutées à partir des changements historiques relatifs aux moteurs naturels et anthropiques (62 simulations), des changements historiques relatifs aux moteurs naturels uniquement (34), du scénario d'émissions RCP2.6 (63) et du scénario d'émissions RCP8.5 (63). Les données présentées ci-dessus correspondent aux différences par rapport à la moyenne de 1986-2005.

Précipitations

En raison de l'insuffisance de données d'observation et des divergences parmi les jeux de données disponibles, il est difficile de tirer des conclusions concernant les tendances observées des précipitations annuelles sur le continent africain à partir du RE5 du GIEC (voir la figure 1, cadre en bas à gauche). Les zones qui présentent suffisamment de données pour une analyse sont notamment des secteurs de la région du Sahel en Afrique de l'Ouest, où les observations indiquent des baisses très probables des précipitations annuelles au cours du siècle dernier (Niang *et al.*, 2014). Cette baisse n'est pas un phénomène constant durant le siècle dernier, car la variabilité décennale a donné lieu à des sécheresses à grande échelle au Sahel dans les années 1970 et 1980, et à une reprise générale des précipitations plus récemment (Biasutti & Giannini, 2006 ; Biasutti *et al.*, 2008 ; Greene *et al.*, 2009 ; Niang *et al.*, 2014).

Les projections relatives aux précipitations dans l'ensemble de la CMIP5 présentent bien plus d'incertitudes que celles relatives aux températures en surface (Rowell, 2012). Comme le montre la figure 1, la plupart des zones du continent africain n'affichent pas de changements par rapport à la variabilité climatique actuelle (indiquée par les lignes diagonales). En Afrique de l'Ouest et au Sahel, la situation est d'autant plus compliquée du fait que certaines zones présentent à la fois une baisse et une hausse importantes des précipitations (respectivement pour les régions littorales et les régions plus à l'intérieur des terres), et que la concordance entre les modèles climatiques n'est que modérée dans d'autres zones. À proximité du golfe de Guinée, les modèles ne concordent pas entre eux quant à la nature des changements en termes de précipitations, ce qui engendre un niveau de confiance faible vis-à-vis des projections futures relatives aux précipitations. Les cadres de droite de la figure 1 illustrent bien l'incertitude liée aux modèles climatiques sur le continent, leurs limites étant décrites dans les sections suivantes.

Ce haut niveau d'incertitude est par ailleurs confirmé dans la figure 2, car aucune réponse claire au seul forçage anthropique n'apparaît en termes de précipitations, ce qui suppose que les projections futures des précipitations dans des concentrations croissantes de gaz à effet de serre sont très incertaines. Par conséquent, il est important d'interpréter prudemment les projections relatives aux précipitations qui sont décrites dans ce rapport.

3. Projections climatiques régionales à échelle réduite

Bien que les modèles climatiques mondiaux (MCM) utilisés pour élaborer le rapport RE5 du GIEC représentent un vaste ensemble d'expériences de modélisations climatiques, leurs résolutions sont généralement trop faibles pour pouvoir saisir précisément les détails à l'échelle locale et régionale qui influencent le climat régional. Afin de mieux saisir les caractéristiques climatiques régionales, il est important d'exécuter les simulations de modèles climatiques à une résolution adéquate. Nous utilisons donc une technique dénommée l'approche de 'réduction d'échelle dynamique' pour générer des informations climatiques régionales à plus haute résolution, en exécutant un modèle climatique régional (MCR).

Dans le cadre de ce projet, nous avons utilisé les résultats provenant d'un ensemble de 5 simulations de MCR en Afrique, exécutées à 50 km de résolution horizontale et à partir de versions du MCM du HadCM3 (Troisième modèle de prévision climatique du Centre Hadley) dont les représentations des processus atmosphériques ont été modifiées pour saisir l'incertitude dans les projections climatiques futures. Les résultats de 17 versions du MCM ont été analysés afin de sélectionner un sous-ensemble de cinq configurations de modèles, basées sur leur capacité à représenter le climat actuel de l'Afrique de l'Ouest (notamment la simulation précise du climat de la mousson en Afrique de l'Ouest), et leurs réponses escomptées en termes de changement de températures et de précipitations avant la fin du XXI^e siècle. Par la sélection de configurations de modèles mondiaux qui couvrent les futurs scénarios climatiques possibles à la fois plus chauds/plus froids et plus secs/plus humides, nous visons à saisir de manière appropriée un large éventail de futurs scénarios climatiques plausibles, sans déployer les moyens informatiques pour exécuter un grand nombre d'expériences de MCR.

Les sections ci-dessous résument les résultats des cinq expériences de MCR que nous avons réalisées (désignées dans le présent document en tant que Q0, Q2, Q9, Q13, et Q14 – le nombre indiquant les éléments spécifiques de l'ensemble du MCM utilisés pour exécuter le MCR), ainsi que les résultats tirés de l'ensemble de la CMIP5, pour chacun des cinq pays d'étude dans le cadre du projet PARCC Afrique de l'Ouest. Les expériences de MCR et les MCM à partir desquels elles sont exécutées étaient basés sur les concentrations de gaz à effet de serre du scénario d'émissions A1B du SRES (IPCC 2000), dont l'analogue le plus proche parmi les RCP est le RCP6.0 (une description complète des scénarios RCP est présentée dans la section précédente). Les

résultats des MCR sont ainsi comparés aux résultats du RCP6.0 de la CMIP5 pour nous permettre de représenter nos résultats des MCR dans le contexte du RE5 du GIEC.

Cette comparaison aux résultats de la CMIP5 est essentielle car elle permet d'évaluer le niveau de confiance quant aux projections de modèles régionaux du changement climatique dans la région, et par conséquent les changements escomptés en termes de services écosystémiques qui en découlent. Pour cette raison, nous présentons les résultats des MCR dans chacune des sous-sections nationales suivantes de manière à reconnaître ce contexte et à tirer des messages clairs quant à leur fiabilité. Ils sont à considérer comme étant soit :

- (a) des résultats auxquels nous nous fions car nous avons obtenu une forte concordance entre les modèles ainsi qu'une compréhension physique des raisons pour lesquelles le changement a été anticipé ; soit
- (b) des résultats qui sont plausibles car nous ne pouvons pas les exclure pour leur inexactitude, toutefois nous nous y fions peu car les résultats issus d'autres modèles sont différents mais également plausibles.

Le Tchad

Les résultats des cinq expériences de MCR indiquent une hausse générale des températures moyennes annuelles en surface, qui varient de 3 à 5°C avant la fin du XXI^e siècle (figure 3, cadre en bas à gauche). Sur le plan géographique, il est anticipé que cette hausse des températures soit plus élevée à proximité des montagnes du Tibesti dans les régions du nord et du sud-est du pays, avec des augmentations moins fortes dans les zones centrales (figure 3, cadres du haut). Le cadre en bas à gauche, dans la figure 3, illustre l'évolution des températures en surface pour la médiane de nos cinq expériences de MCR. Il montre clairement que les hausses anticipées de températures dans un futur proche (2020-2049) et éloigné (2070-2099) ne sont pas comprises dans la variabilité climatique simulée dans la période de référence (1971-2000). Cela indique que les températures futures pour le Tchad seront considérablement plus élevées qu'elles ne le sont actuellement. Ces résultats sont tirés de l'évaluation de la moyenne des températures en surface sur 30 ans au cours de ces trois périodes (lignes bleues), et de la comparaison de l'amplitude associée à l'écart-type de ± 1 par rapport à cette moyenne (lignes rouges). Le fait que les écarts entre ces lignes rouges ne se recoupent pas dans les trois périodes choisies indique que la hausse de température anticipée est clairement une réponse qui relève du changement climatique, et non un facteur de la variabilité climatique actuelle. Les projections montrent également une nette augmentation de la variabilité au cours de ces périodes de 30 ans, étant donné que la distance entre les deux lignes rouges s'accroît au fil du temps. Il s'agit d'un résultat clé qui suggère que le Tchad pourrait

connaître une hausse de la fréquence des phénomènes de chaleur extrême, en raison d'une variabilité climatique croissante, dépassant ce qui résulterait du réchauffement général anticipé, lié au changement climatique. Dans le futur éloigné, les températures en hausse auront vraisemblablement des effets négatifs sur la biodiversité, l'agriculture et la sécurité alimentaire, entraînant la probabilité d'un potentiel de rendement plus faible des cultures de subsistance clés (Schlenker & Lobell, 2010 ; Sultan *et al.*, 2013 ; Niang *et al.*, 2014). Il est possible que des cultures alternatives, plus résistantes aux températures en hausse, doivent être mises en place pour garantir une perte minimale des moyens de subsistance aux petits agriculteurs de la région.

Par comparaison à l'ensemble de la CMIP5, l'amplitude des hausses de températures anticipées, simulées par nos cinq expériences de MCR, est clairement comprise dans les limites supérieures de l'amplitude de la CMIP5 (figure 3, cadre en bas à droite). Cela indique un niveau de confiance élevé quant à la prévision du réchauffement des températures pour le Tchad au cours du XXI^e siècle.

Temperature Projections for Chad

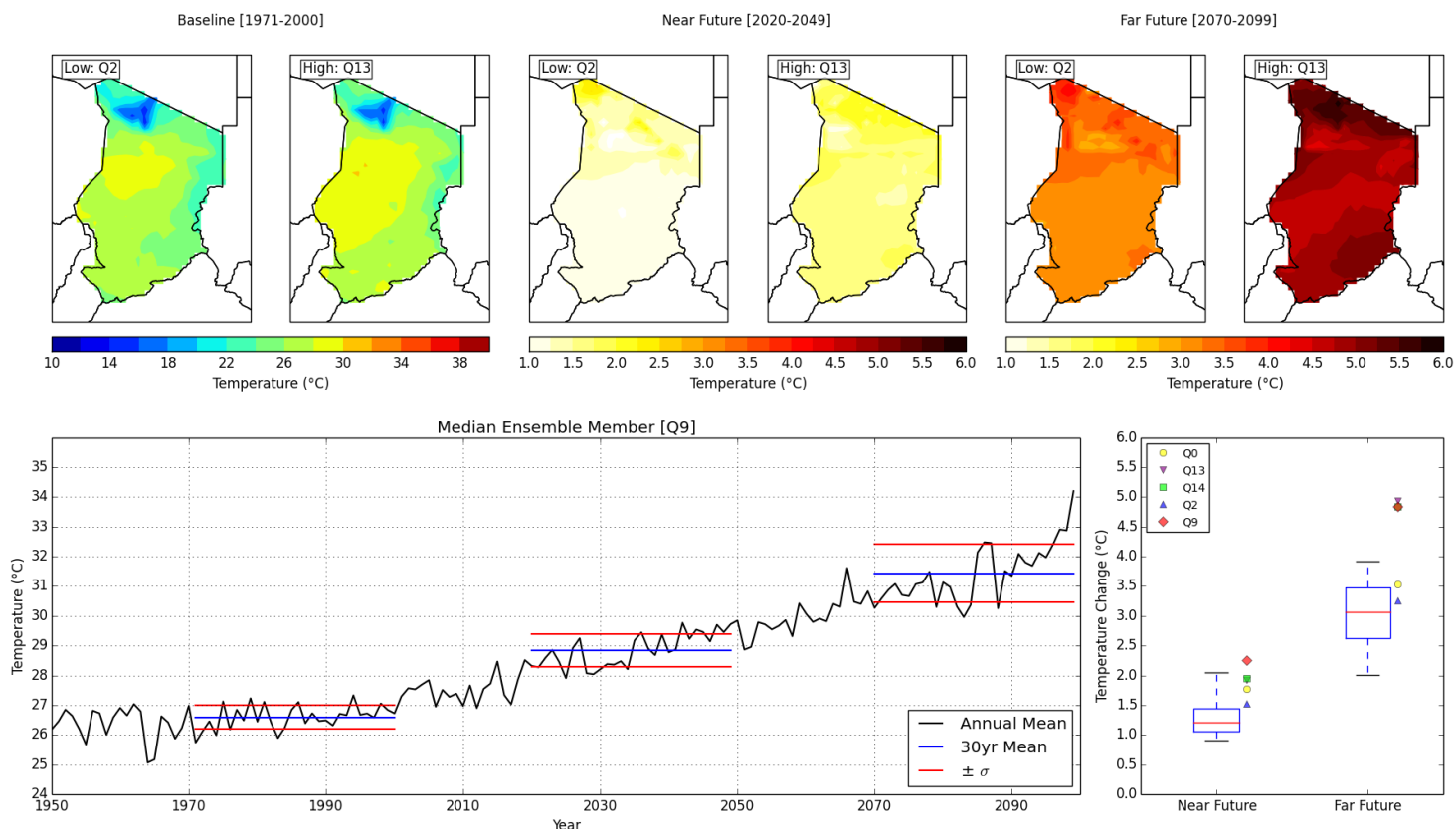


Figure 3 : Projections relatives aux températures pour le Tchad. (6 Cadres du haut) Moyenne annuelle des températures en surface (°C) pour la période de référence (1971-2000), et changements anticipés dans un futur proche (2020-2049) et éloigné (2070-2099), pour les modèles MCR qui présentent les sensibilités anticipées les plus faibles et les plus fortes dans la période du futur éloigné (pour le Tchad, il s'agit respectivement de Q2 et Q13). (Cadre en bas à gauche) Évolution des températures moyennes annuelles en surface de 1950 à 2100 pour l'élément médian de l'ensemble dans les cinq modèles (Q9), ainsi que la moyenne sur 30 ans et les écarts-types associés pour les périodes de référence, de futur proche et éloigné susmentionnées. (Cadre en bas à droite) Moyenne annuelle des changements de température pour les périodes de futur proche et éloigné, pour les cinq expériences de MCR ainsi que 18 expériences de MCM de la CMIP5 à partir du RCP6.0.

En termes de précipitations, les résultats des cinq expériences de MCR anticipent une augmentation de la quantité totale des pluies au cours des mois de juillet, août et septembre (désignés en tant que JAS dans le présent rapport), qui varie approximativement entre 20 et 50 % avant la fin du XXI^e siècle (figure 4, cadre en bas à droite). Ici, JAS correspond à la période choisie pour l'analyse car elle représente typiquement le moment de la mousson en Afrique de l'Ouest, un facteur clé en termes de météorologie et de climat dans cette région du monde. La hausse des précipitations est plus forte dans les régions du nord, avec des zones réduites ne présentant aucun/peu de changement ou des précipitations potentiellement en baisse à travers le pays (figure 4, cadres du haut). Dans le cadre de cette analyse, les résultats présentés proviennent des deux MCR qui définissent l'amplitude des changements anticipés des MCR basés sur leurs changements anticipés dans la période du futur éloigné (2070-2099). En termes de précipitations, cette amplitude peut comprendre des valeurs positives ou négatives uniquement, ou les deux. Il existe très peu de concordance entre les modèles parmi les cinq expériences de MCR relatives à la

répartition géographique des changements de précipitations pour le Tchad (cadres du haut de la figure 4). L'évolution de l'accumulation des pluies en JAS pour la médiane de nos cinq expériences de MCR souligne le niveau d'incertitude associé aux projections relatives aux précipitations dans cette région. Cette variabilité au cours des trois différentes périodes (illustrée par l'écart compris entre les lignes rouges) est assez grande et se recoupe dans le temps, ce qui suggère que les précipitations futures pour le Tchad au cours des mois de JAS pourraient être plus variables qu'elles ne le sont actuellement. Cela pourrait impliquer des phénomènes plus fréquents de crues subites et de sécheresses, en particulier dans les régions du nord, engendrant des impacts sur l'agriculture, la santé et la gestion des ressources en eau.

Par comparaison à des résultats similaires provenant de l'ensemble de la CMIP5, l'amplitude des hausses de précipitations anticipées simulées par nos cinq expériences de MCR est comprise dans la variation de la CMIP5 (figure 4, cadre en bas à droite). Il est cependant clair, d'après la variation de la CMIP5, que les MCM dans cet ensemble divergent quant à l'ampleur et au sens des changements de précipitations anticipés, étant donné que l'écart couvre de vastes changements de pourcentages positifs et négatifs. Le haut niveau d'incertitude associé aux projections relatives aux précipitations dans cette région est ainsi réitéré, tout en démontrant les raisons pour lesquelles les projections de MCR pour le Tchad utilisées dans ce projet, bien que plausibles, doivent être considérées comme étant peu fiables.

Seasonal Total Rainfall Projections for Chad

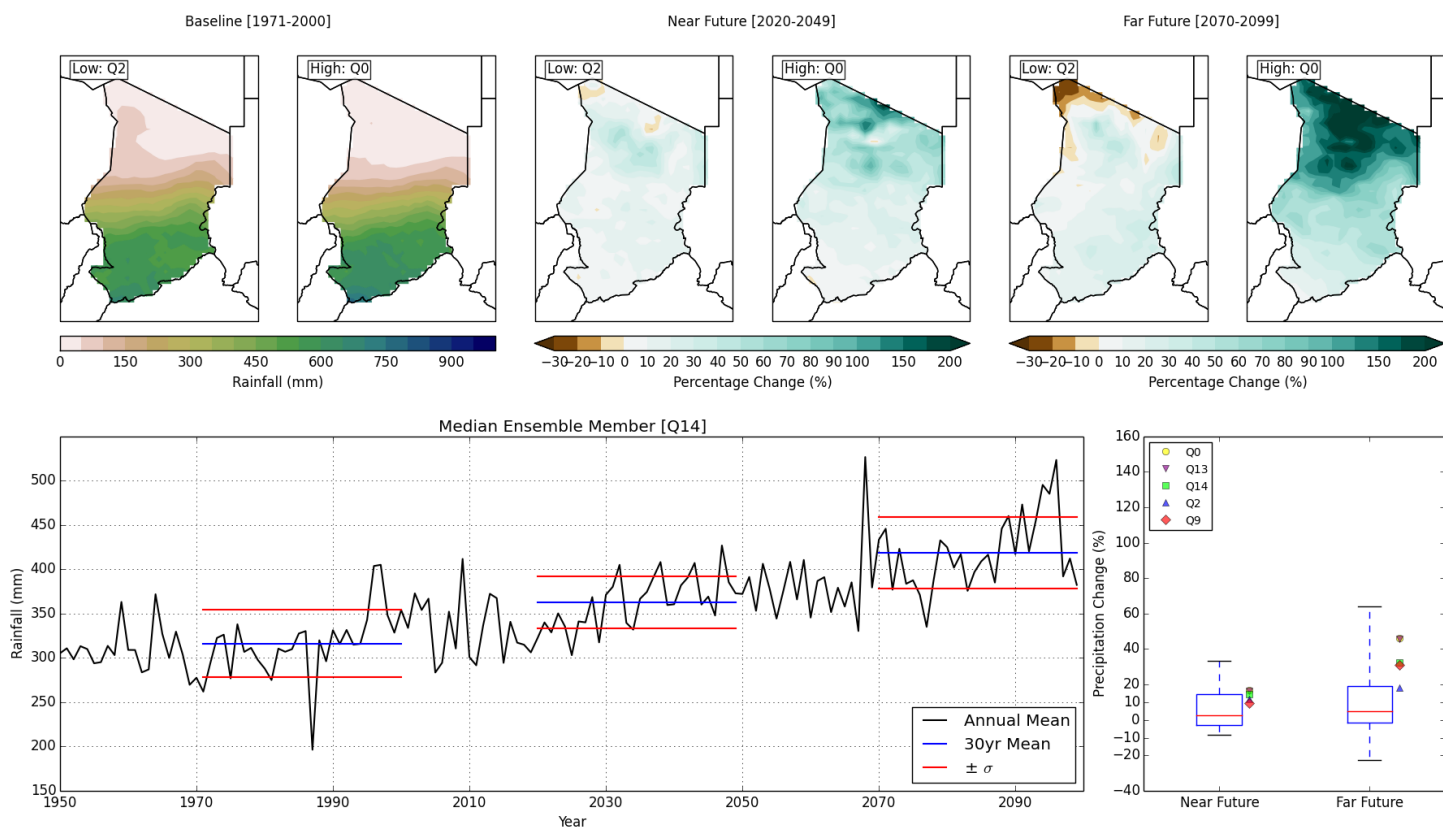


Figure 4 : Projections relatives aux précipitations pour le Tchad. (6 Cadres du haut) Moyenne annuelle des températures en surface (°C) pour la période de référence (1971-2000), et changements anticipés dans un futur proche (2020-2049) et éloigné (2070-2099), pour les modèles MCR qui présentent les sensibilités anticipées les plus faibles et les plus fortes dans la période du futur éloigné (pour le Tchad, il s'agit respectivement de Q2 et Q0). (Cadre en bas à gauche) Évolution des précipitations totales saisonnières en JAS de 1950 à 2100 pour l'élément médian de l'ensemble dans les cinq modèles (Q14), ainsi que la moyenne sur 30 ans et les écarts-types associés pour les périodes de référence, de futur proche et éloigné susmentionnées. (Cadre en bas à droite) Changements anticipés en termes de pourcentages concernant les précipitations totales saisonnières en JAS, pour les périodes de futur proche et éloigné, pour les cinq expériences de MCR ainsi que 18 expériences de MCM de la CMIP5 à partir du RCP6.0. REMARQUE : Les modèles présentant une forte et une faible sensibilité sont identifiés du fait d'anomalies relatives aux valeurs absolues, plutôt que du fait d'anomalies pures comme dans la figure 3.

Le Mali

Pour le Mali, les cinq expériences de MCR indiquent une hausse générale des températures moyennes annuelles en surface, qui varient de 4 à près de 6°C avant la fin du XXI^e siècle (figure 5, cadre en bas à gauche). Cette augmentation des températures est essentiellement uniforme à travers le pays, avec des hausses légèrement plus fortes dans les régions centrales (figure 5, cadres du haut). L'évolution des températures en surface pour la médiane des cinq expériences de MCR reflète une réponse manifeste qui relève du changement climatique, avec des hausses de température dans le futur proche et éloigné qui ne sont pas comprises dans l'amplitude de la variabilité climatique actuelle. À nouveau, une nette amplification de la variabilité climatique au fil

du temps est observée, ce qui suggère une augmentation de la fréquence des phénomènes de chaleur extrême, en raison d'une variabilité climatique croissante, dépassant ce qui résulterait du réchauffement général anticipé, lié au changement climatique. Comme pour le Tchad, des températures plus élevées avant la fin du XXI^e siècle pourraient avoir des impacts néfastes sur les pratiques agricoles actuelles, en particulier dans les régions agricoles du sud du Mali.

Temperature Projections for Mali

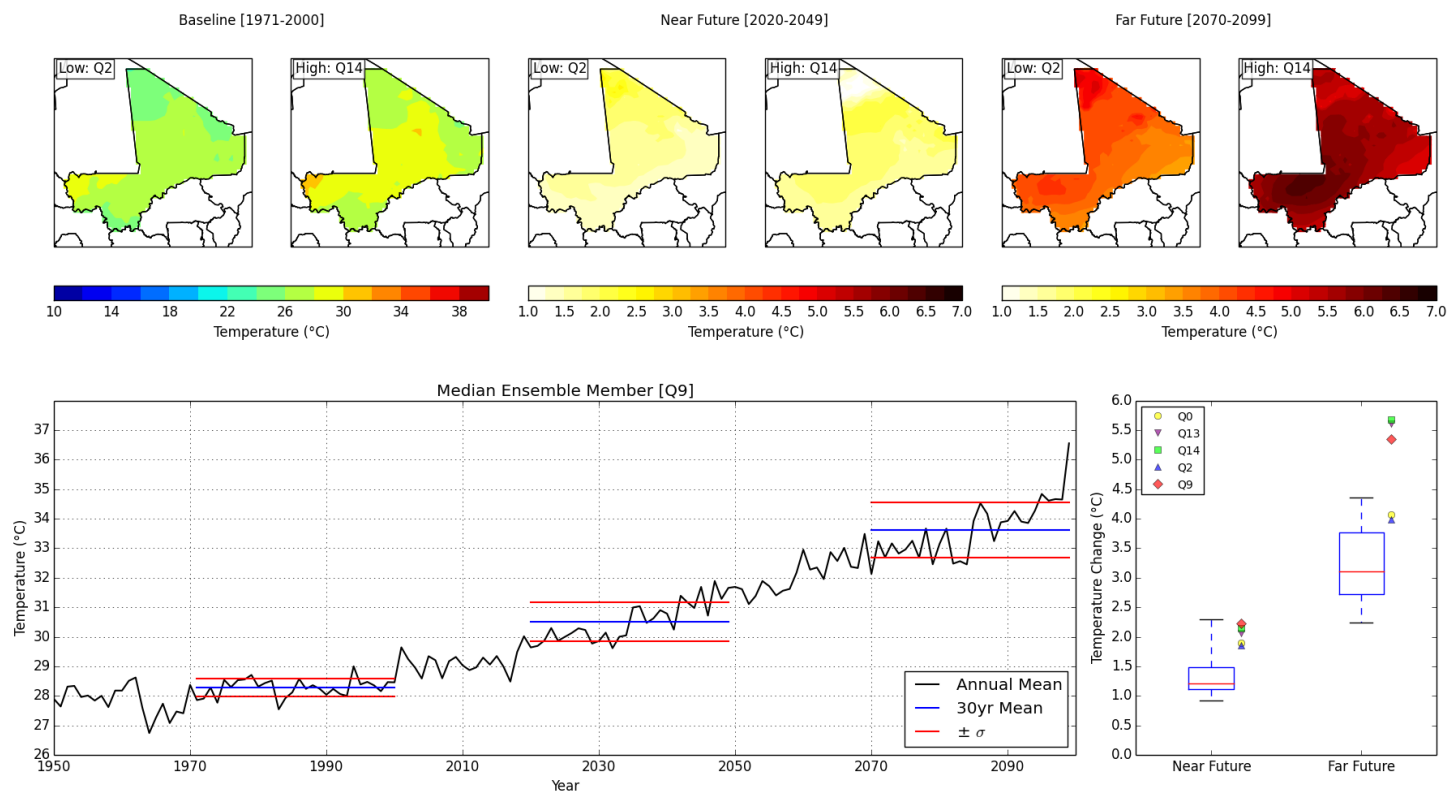


Figure 5 : Idem que dans la figure 3, mais pour le Mali.

Par comparaison à des résultats similaires provenant de l'ensemble de la CMIP5, l'amplitude des températures anticipées dans nos cinq expériences de MCR est comprise dans celle des modèles de la CMIP5 pour la période du futur proche, mais elle s'étend au-delà de cette amplitude pour la période du futur éloigné (figure 5, cadre en bas à droite).

En termes de précipitations, les résultats des cinq expériences de MCR indiquent des conséquences variables concernant l'accumulation totale des pluies en JAS, allant de peu/aucun changement à une baisse de 20 % avant la fin du XXI^e siècle (figure 6, cadre en bas à droite). Cette baisse a tendance à se produire dans les régions du centre et de l'ouest du pays, toutefois la possibilité d'une hausse des précipitations dans le nord-ouest est observée (figure 6, cadres du haut). Il est important de noter que, dans les six cadres du haut de la figure 6, une forte variabilité

décennale peut être clairement observée au cours des différentes périodes. Elle est particulièrement significative dans le modèle présentant une faible sensibilité (Q0), qui anticipe une légère augmentation des précipitations au cours de la période du futur proche, mais revient à peu/aucun changement avant la fin du siècle (ce phénomène est par ailleurs confirmé par la position du symbole de Q0 dans le cadre en bas à droite de la figure 6). De manière similaire aux résultats obtenus pour le Tchad, l'évolution de l'accumulation des précipitations en JAS pour la médiane de nos cinq expériences de MCR souligne à nouveau le niveau d'incertitude associé aux projections relatives aux précipitations dans cette région, étant donné que la variabilité au cours des trois différentes périodes (illustrée par l'écart entre les lignes rouges) n'indique pas une réponse imposante qui relève du changement climatique. Une baisse potentielle des précipitations dans cette région pourrait avoir un impact négatif sur la biodiversité, mais également sur la disponibilité de l'eau, la productivité des cultures, et mener à la dégradation des écosystèmes et des moyens de subsistance.

Seasonal Total Rainfall Projections for Mali

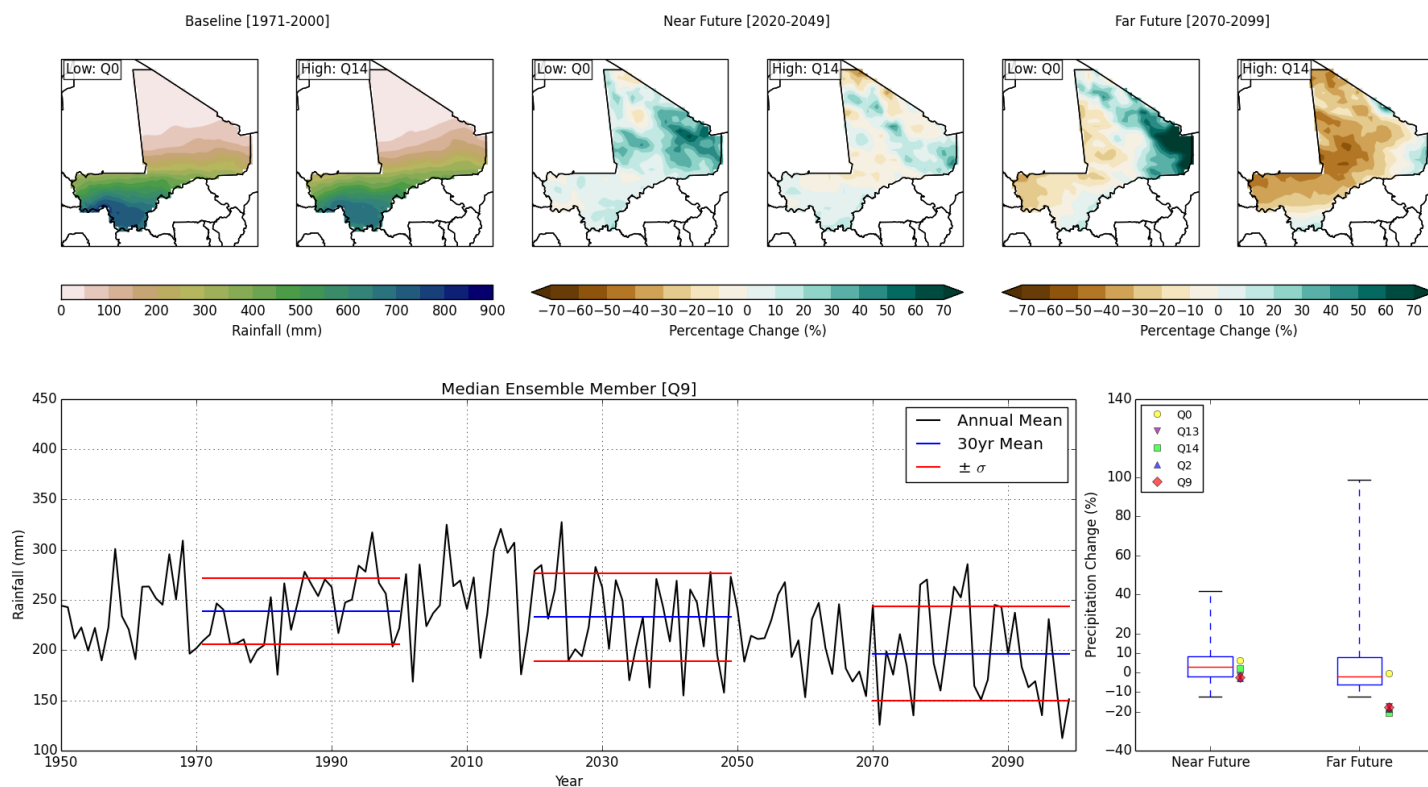


Figure 6 : Idem que dans la figure 4, mais pour le Mali.

Par comparaison à des résultats similaires provenant de l'ensemble de la CMIP5, l'amplitude des changements de précipitations anticipés dans les cinq expériences de MCR est comprise dans

les limites de celle de la CMIP5 au cours de la période du futur proche, mais elle s'étend hors de cette amplitude dans le futur éloigné, présentant des baisses plus fortes anticipées dans les MCR. Il est cependant clair à nouveau, d'après la variation de la CMIP5, que la majorité des MCM dans cet ensemble divergent quant à l'ampleur et au sens des changements de précipitations escomptés, la plupart anticipant de faibles changements positifs ou négatifs.

La Sierra Léone

De même que pour le Tchad et le Mali, les cinq expériences de MCR indiquent une augmentation générale des températures moyennes annuelles en surface pour la Sierra Léone, qui varient de juste en-dessous de 3°C à plus de 4°C avant la fin du XXI^e siècle (figure 7, cadre en bas à gauche). L'ampleur de ces changements anticipés est légèrement plus faible que pour les pays précédents, le climat de la Sierra Léone étant quelque peu régulé par la proximité de l'océan. Cette hausse des températures est plus forte dans les régions du pays qui se situent le plus à l'intérieur des terres, à nouveau en lien avec les influences océaniques (figure 7, cadres du haut). Comme nous l'avons continuellement constaté précédemment, l'évolution des températures en surface pour la médiane de nos cinq expériences de MCR indique une réponse évidente qui relève du changement climatique. Les hausses de températures dans le futur éloigné ne sont pas comprises dans l'amplitude de la variabilité climatique actuelle, et l'amplitude potentielle de la variabilité climatique s'élargit au fil du temps (figure 7, cadre en bas à gauche). À nouveau, cette hausse des températures au cours du XXI^e siècle pourrait avoir des impacts négatifs sur les activités agricoles de subsistance qui permettent à une grande partie de la population de survivre.

Temperature Projections for Sierra Leone

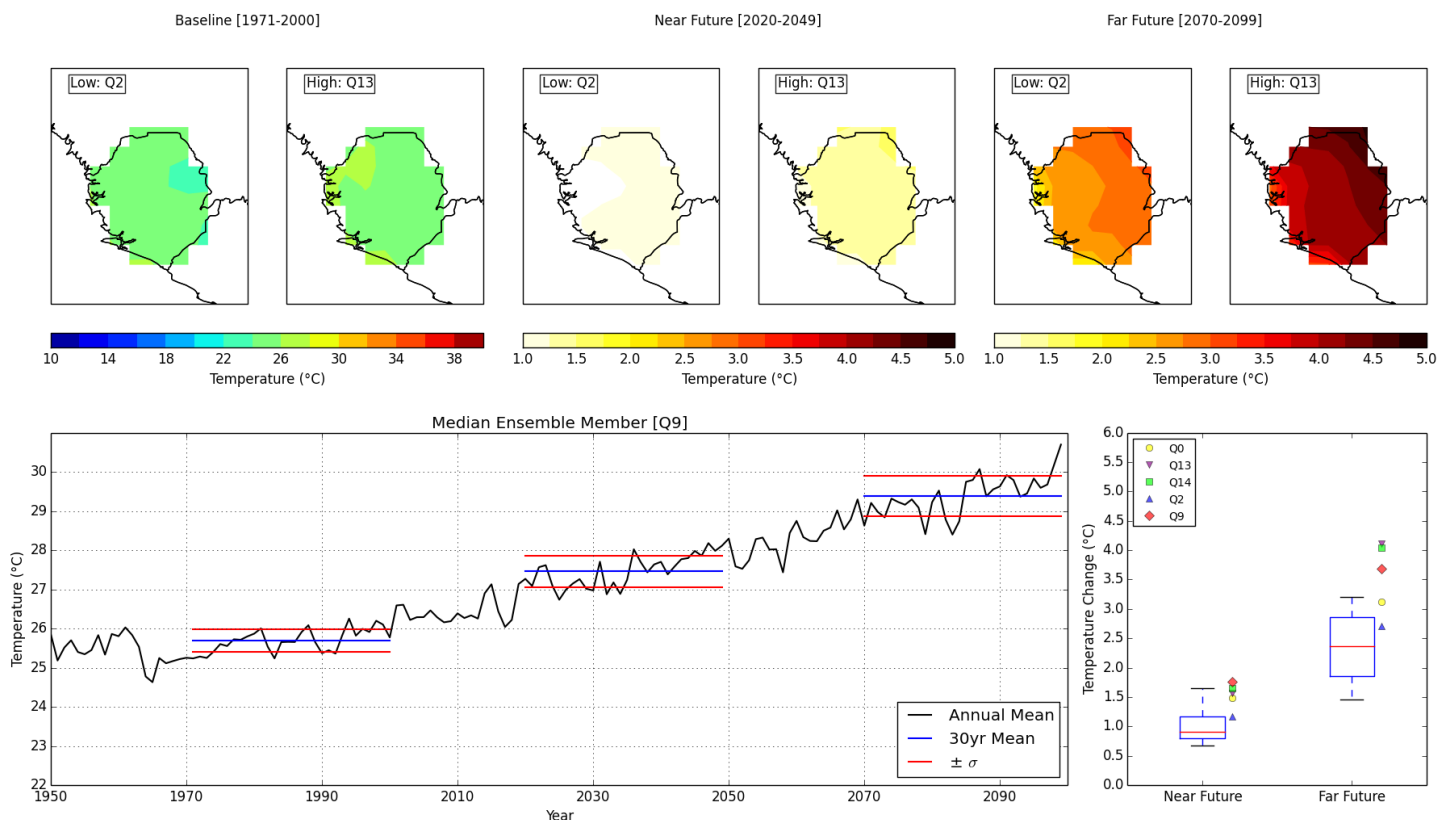


Figure 7 : Idem que dans la figure 3, mais pour la Sierra Léone.

Par comparaison aux résultats provenant de l'ensemble de la CMIP5, l'amplitude des températures anticipées dans nos cinq expériences de MCR correspond à la limite supérieure de l'amplitude des modèles de la CMIP5 pour la période du futur proche, mais elle s'étend bien au-delà de celle-ci pour la période du futur éloigné (figure 7, cadre en bas à droite). La concordance entre les modèles concernant la hausse de température anticipée pour la Sierra Léone suggère à nouveau un niveau de confiance élevé quant au réchauffement global à venir.

En termes de précipitations, les résultats des cinq expériences de MCR suggèrent des augmentations faibles à moyennes de la quantité totale des pluies en JAS, allant de moins de 10 % à 20 % d'augmentation avant la fin du XXI^e siècle (figure 8, cadre en bas à droite). Ces résultats ont tendance à se produire dans les régions littorales du pays, et s'étendent plus à l'intérieur des terres à mesure que le siècle avance (figure 8, cadres du haut). À la différence des autres pays, il existe des preuves qu'il s'agit d'un indice significatif du fait que la majeure partie des modèles de la CMIP5 anticipent également des hausses de la même ampleur. Une légère hausse des précipitations, comme le suggèrent les cinq expériences de MCR, pourrait avoir des conséquences

à la fois positives et négatives, telles qu'une meilleure gestion des ressources et de la disponibilité de l'eau, et un risque plus élevé d'inondations qui pourraient également résulter de la plus forte variabilité anticipée à la fin du siècle.

Seasonal Total Rainfall Projections for Sierra Leone

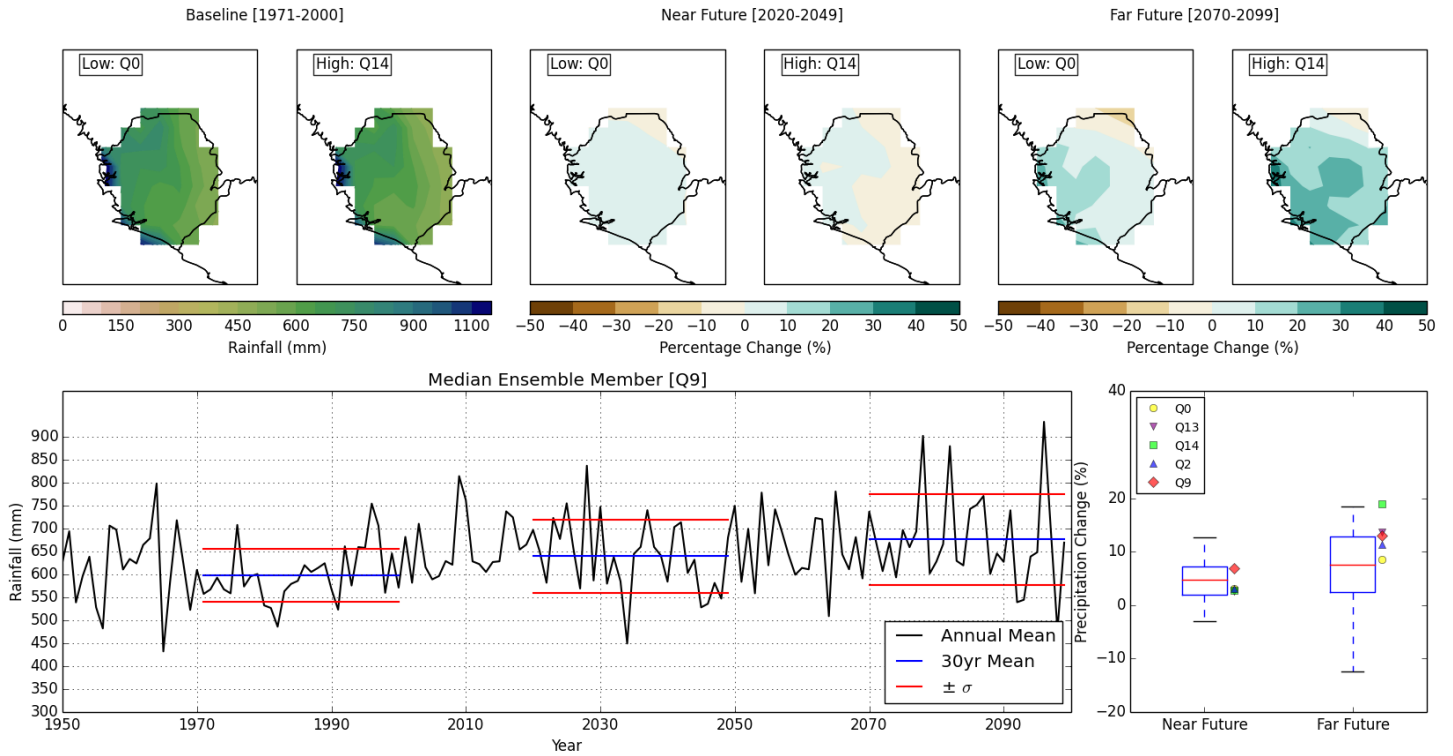


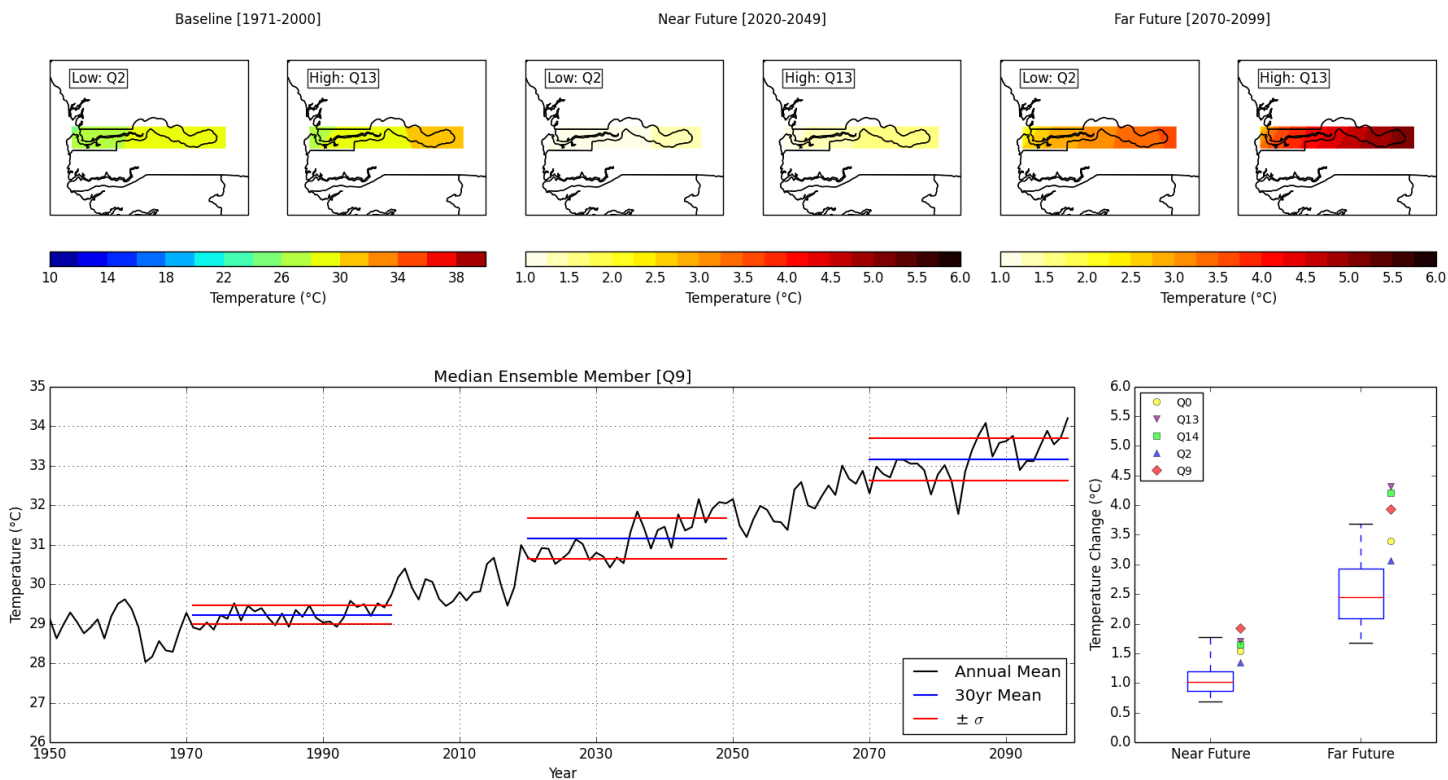
Figure 8 : Idem que dans la figure 4, mais pour la Sierra Léone.

La Gambie

Pour la Gambie, nos cinq expériences de MCR indiquent une hausse générale des températures moyennes annuelles en surface, qui varient de 3°C à 4,5°C avant la fin du XXI^e siècle (figure 9, cadre en bas à gauche). En concordance avec les résultats obtenus pour la Sierra Léone, l'ampleur de ces changements anticipés est légèrement plus faible que pour d'autres pays d'étude (p. ex. le Tchad et le Mali) du fait de l'influence régulatrice du climat provenant de l'océan. Cette influence océanique est évidente dans les projections spatiales des températures pour la Gambie, les hausses de températures les plus fortes étant anticipées dans les régions de l'est qui se situent le plus à l'intérieur des terres (figure 9, cadres du haut). À nouveau, l'évolution des températures en surface pour l'expérience médiane de MCR indique une réponse manifeste qui relève du changement climatique, présentant à la fois un déplacement vers le haut et un élargissement de l'amplitude de la variabilité climatique (figure 9, cadre en bas à gauche). Le réchauffement des températures et la variabilité plus forte dans le futur pourraient avoir un impact sur la biodiversité et les écosystèmes en Gambie, car une adaptation à ces températures plus élevées sera nécessaire.

Figure 9 : Idem que dans la figure 3, mais pour la Gambie.

Temperature Projections for the Gambia



Par comparaison aux résultats provenant de l'ensemble de la CMIP5, l'amplitude du changement de température anticipé à partir des expériences de MCR correspond à la limite supérieure de l'amplitude de la CMIP5 pour la période du futur proche, mais elle s'étend au-delà de celle-ci pour la période du futur éloigné (figure 9, cadre en bas à droite). Cela suggère à nouveau un niveau de confiance élevé quant au réchauffement à venir en Gambie.

En termes de précipitations, les expériences de MCR anticipent de fortes baisses de la quantité totale de pluies en JAS, variant de 40 % à près de 60 % avant la fin du XXI^e siècle (figure 10, cadre en bas à droite), mais celle-ci augmente ou diminue au milieu du siècle (figure 10, cadres du haut). Il est important de noter que, du fait que la Gambie est un très petit pays, seul un nombre réduit de points d'intersection de quadrillage le saisissent dans les MCR, et un nombre encore plus infime dans les MCM de la CMIP5. Par conséquent, ces statistiques pourraient être peu fiables. L'évolution des précipitations en JAS pour la médiane de nos cinq expériences de MCR indique un haut niveau d'incertitude, avec apparemment peu de changement dans la moyenne mais une variabilité accrue au milieu du siècle. Des baisses de précipitations sont anticipées avant la fin du siècle, toutefois avec peu de changement en termes de variabilité, par comparaison au présent (figure 10, cadre en bas à gauche). Une diminution des précipitations en Gambie pourrait

affecter la biodiversité et potentiellement mener à des phénomènes de sécheresses prolongées, une baisse de production des cultures et des écosystèmes dégradés dans l'ensemble du pays.

Seasonal Total Rainfall Projections for the Gambia

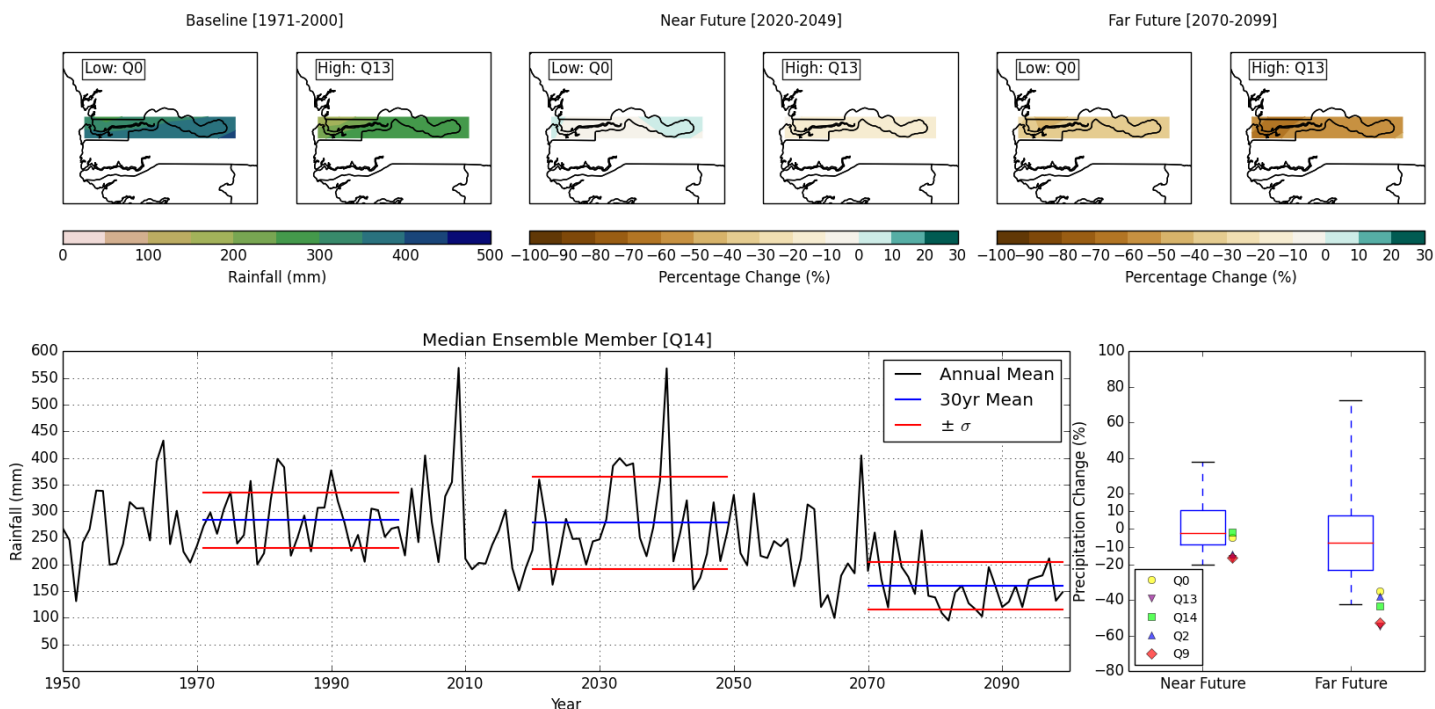


Figure 10 : Idem que dans la figure 4, mais pour la Gambie.

Toutefois, bien que les MCR indiquent une forte baisse des précipitations en Gambie à la fin du siècle, l'amplitude des changements anticipés dans la CMIP5 montre très peu de concordance entre les modèles dans cette zone, avec des changements positifs et négatifs majeurs, anticipés au cours de cette période. Par conséquent, il est important d'interpréter les résultats des cinq expériences de MCR avec une extrême prudence.

Le Togo

Les résultats de nos cinq expériences de MCR pour le Togo correspondent à ceux obtenus pour les autres pays d'étude, et ils indiquent une hausse générale des températures moyennes annuelles en surface, qui varie de 3°C à près de 5°C avant la fin du XXI^e siècle (figure 11, cadre en bas à gauche). Sur le plan géographique, ces changements anticipés de températures sont à nouveau légèrement plus faibles dans les régions littorales du sud du Togo, en raison des influences océaniques (figure 11, cadres du haut). Comme nous l'avons constaté dans les quatre pays précédents, l'évolution des températures en surface pour l'expérience médiane de MCR indique une réponse manifeste qui relève du changement climatique, présentant à la fois un

déplacement vers le haut et un léger élargissement de l'amplitude de la variabilité climatique (figure 11, cadre en bas à gauche). Tout comme dans les pays précédents, le réchauffement climatique au XXI^e siècle pourrait avoir des impacts majeurs sur la sécurité alimentaire, les écosystèmes et les moyens de subsistance dans la région.

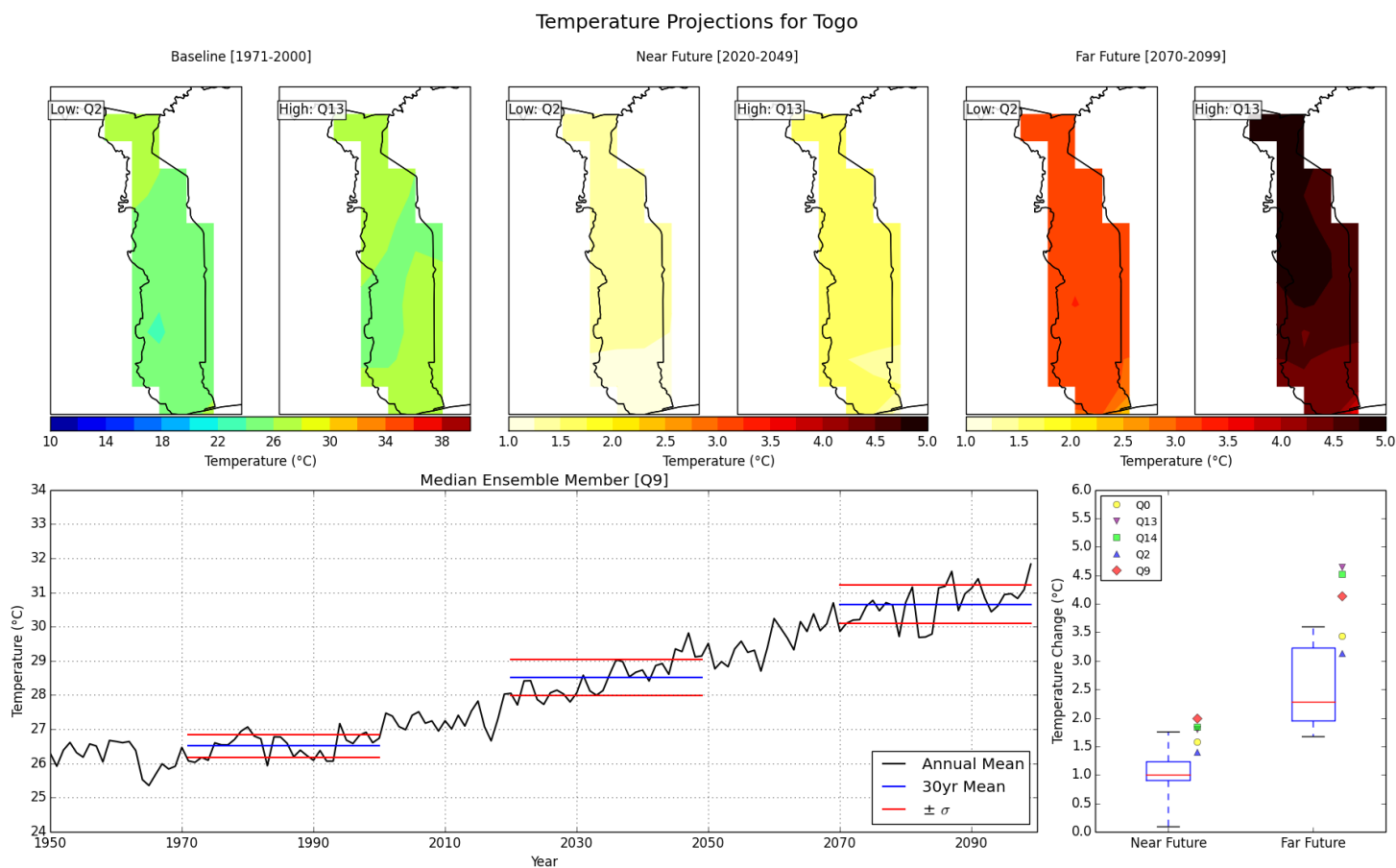


Figure 11 : Idem que dans la figure 3, mais pour le Togo.

Par comparaison à des résultats similaires provenant de l'ensemble de la CMIP5, l'amplitude des températures anticipées à partir des expériences de MCR s'étend légèrement au-delà de la limite supérieure de l'amplitude des modèles de la CMIP5 pour la période du futur proche, et elle s'étend davantage au-delà de celle-ci pour la période du futur éloigné (figure 11, cadre en bas à droite). Comme développé précédemment, cela indique un niveau de confiance élevé quant au réchauffement climatique au Togo au cours du XXI^e siècle.

En termes de précipitations, les résultats de nos cinq expériences de MCR présentent une forte incertitude, anticipant une ampleur similaire des hausses et des baisses de l'accumulation totale des pluies en JAS avant la fin du XXI^e siècle (figure 12, cadre en bas à droite). Sur le plan géographique, les expériences de MCR anticipent des hausses de précipitations dans les régions du nord du pays et des baisses de précipitations le long du littoral. L'évolution de l'accumulation

des pluies en JAS pour la médiane de nos cinq expériences de RCM confirme par ailleurs le haut niveau d'incertitude associé aux projections relatives aux précipitations dans cette région, du fait qu'aucune réponse climatique claire ne peut être tirée des résultats (figure 10, cadre en bas à gauche).

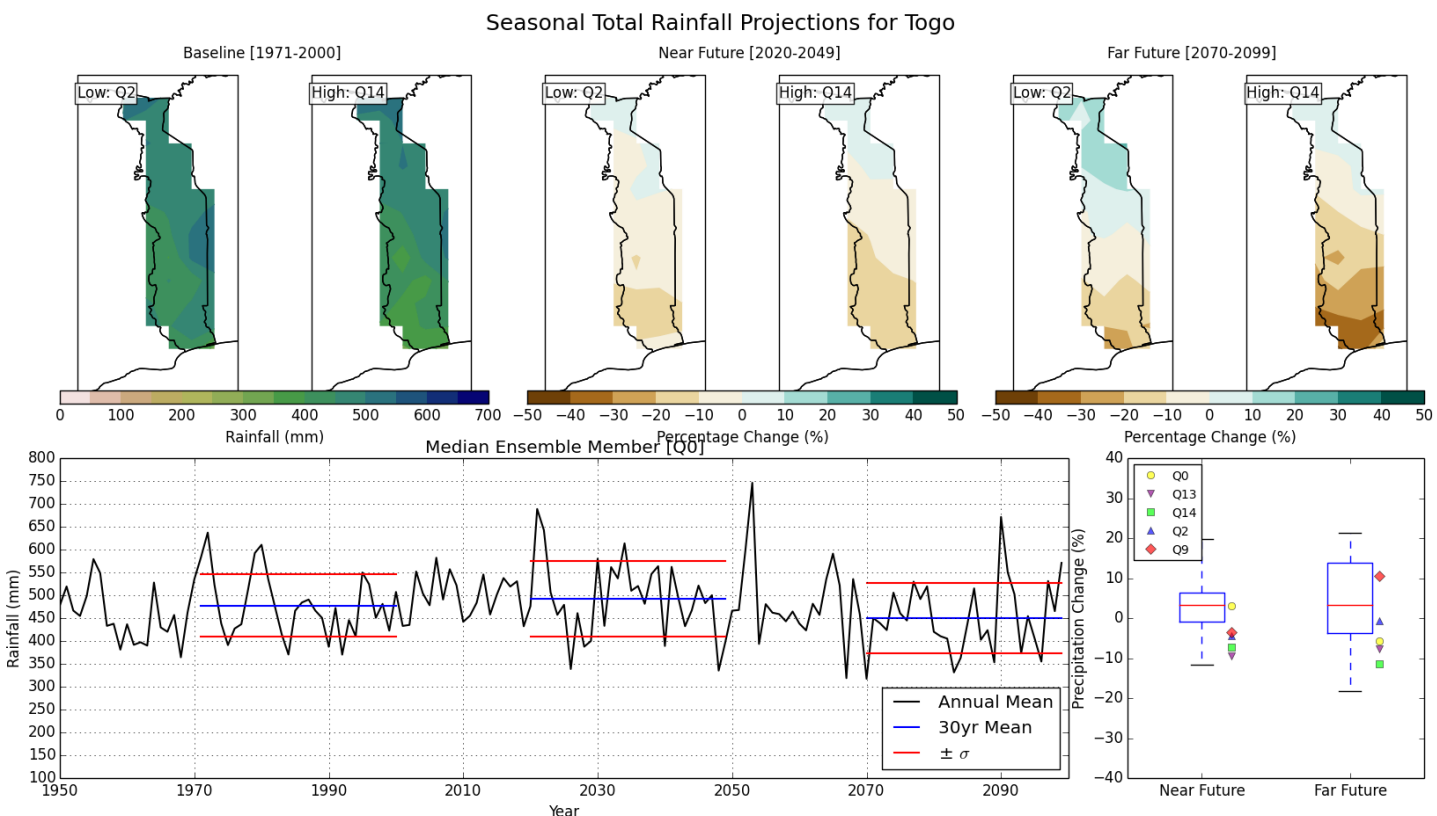


Figure 12 : Idem que dans la figure 4, mais pour le Togo.

Le haut niveau d'incertitude pour notre ensemble de MCR comportant 5 éléments correspond au niveau d'incertitude dans l'ensemble de la CMIP5. À nouveau, cela suggère une concordance très faible entre les modèles dans cette région, avec des changements positifs et négatifs majeurs quant au pourcentage des précipitations au cours de la saison de JAS.

4. Conclusion et points de décision

Bien que les projections relatives aux températures et aux précipitations dans le RE5 du GIEC constituent une source d'informations utile concernant les conditions climatiques futures, les projections climatiques régionales basées sur des modèles à haute résolution peuvent être une valeur ajoutée et fournir davantage de détails géographiques aux données climatiques, à utiliser dans le processus de prises de décisions.

Les cinq expériences innovantes de MCR utilisées pour contribuer au projet PARCC Afrique de l'Ouest suggèrent toutes une hausse de la température dans les cinq pays d'étude (le Tchad, le Mali, la Sierra Léone, la Gambie et le Togo). Le réchauffement climatique à venir pourrait avoir de graves répercussions sur la productivité agricole, les écosystèmes et les moyens de subsistance en Afrique de l'Ouest. En outre, les informations relatives au climat régional indiquent une augmentation de la variabilité des températures au cours du XXI^e siècle, ce qui pourrait générer dans le futur des phénomènes de chaleur extrême encore plus fréquents qu'il ne serait escompté suite aux seules hausses des températures moyennes. Le haut niveau de consensus parmi les résultats des modèles climatiques régionaux et mondiaux dans cette région suggère qu'il est très probable qu'une hausse des températures en surface se produise dans l'ensemble des cinq pays d'étude. Des stratégies d'adaptation, telles que la sélection de cultures alternatives et des réseaux d'aires mieux protégées pour assurer la survie des espèces, seront nécessaires en vue de réduire les conséquences d'un réchauffement climatique inévitable dans le futur.

Les résultats en termes de précipitations dans les cinq expériences de MCR sont très variés et indiquent de légères diminutions des pluies en JAS pour le Mali et la Gambie, ainsi que des augmentations potentielles pour la Sierra Léone et le Tchad. Une concordance très faible est observée parmi les cinq expériences de MCR concernant les projections relatives aux précipitations pour le Togo. Bien que certains résultats décrits ci-dessus pourraient suggérer une réponse claire au changement climatique, par comparaison à des résultats similaires obtenus dans l'ensemble de la CMIP5, il en ressort un haut niveau d'incertitude associé aux projections relatives aux précipitations en Afrique de l'Ouest, et très peu de concordance entre les modèles quant au sens (positif ou négatif) et à l'ampleur des changements potentiels en termes de précipitations dans le futur. Par conséquent, il est recommandé que des activités

d'adaptation soient mises en place pour construire une résilience solide aux impacts de la variabilité climatique actuelle, car cette résilience contribuera à la survie des espèces, à la protection des services écosystémiques, et à la garantie de moyens de subsistance améliorés pour les années et les décennies à venir. Ainsi, une meilleure capacité d'adaptation pourra être atteinte quant aux conditions plus humides ou plus sèches qui découleront du changement climatique.

5. Références

- Berrang-Ford, L., Ford, J. D., Paterson, J., 2011. Are we adapting to climate change? *Global Environmental Change*, **21(1)**, 25-33.
- Biasutti, M., and Giannini, A., 2006. Robust Sahel ddrying in response to late 20th century forcings. *Geophysical Research Letters*, **33(11)**, DOI:10.1029/2006GL026067.
- Biasutti, M., Held, I. M., Sobel, A. H., Giannini, A., 2008. SSTt forcings and Sahel rainfall variability in simulatitons of the twentieth and twenty-first centuries. *Journal of Climate*, **21(14)**, 3471-3486.
- CDKN report, *IPCC Fifth Assessment Report: What's in it for Africa?*, <http://cdkn.org/ar5-toolkit/ar5-africa/>
- Christensen, J. J., Hewitson, B., Busuioc, A., Chen, A., Gao, X., Held, I., Jones, R., Kollie, R. K., Kwon, W. -T., Laprise, R., Magana Rueda, V., Mearns, L., Menendez, C. G., Raisanen, J., Rinke, A., Sarr, A., Whetton, P., 2007. Regional climate projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M., Miller, H. L. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 847-940.
- Collins, J., M., 2011. Temperature variability over Africa. *Journal of Climate*, **24(14)**, 3649-3666.
- Greene, A. M., Giannini, A., Zebiak, S. E., 2009. Drought return times in the Sahel: a question of attribution. *Geophysical Research Letters*, **36(12)**, DOI:10.1029/2009GL038868.
- James, R., and Washington, R., 2013. Changes in African temperature and precipitation associated with degrees of global warming. *Climatic Change*, **117(4)**, 859-872.
- Joshi, M., Hawkins, E., Sutton, R., Lowe, J., Frame, D., 2011. Projections of when temperature changes will exceed 2°C above pre-industrial levels. *Nature Climate Change*, **1(8)**, 407-412.
- Niang, I., Ruppel, O. C., Abdrabo, M. A., Essel, A., Lennard, C., Padgham, J., Urquhart, P., 2014. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Barros, V. R., Field, C. B., Dokken, D. J., Mastrandrea, M. D., Mach, K. J., Bilir, T. E., Chatterjee, M., Ebi, K. L., Estrada, Y. O., Genova, R. C., Girma, B., Kissel, E. S., Levy, A. N., MacCracken, S., Mastrandrea, P. R., and White, L. L. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, PP. 1199-1265.
- Sanderson, M. G., Hemming, D. L., Betts, R. A., 2011. Regional temperature and precipitation changes under warming. *Philisophical Transactions of the Royal Society A*, **369(1934)**, 85-98.

- Schlenker, W., and Lobell, D. B., 2010. Robust negative impacts of climate change on African agriculture. *Environmental Research Letters*, **5(1)**, DOI:10.1088/1748-9326/5/1/014010
- Sultan, B., Roudier, P., Quirion, P., Alhassane, A., Muller, B., Dingkuhn, M., Ciais, P., Guimberteau, M., Traore, S., Baron, C., 2013. Assessing climate change impacts on sorghum and millet yields in the Sudanian and Sahelian savannas of West Africa. *Environmental Research Letters*, **8(1)**, doi:10.1088/1748-9326/8/1/014040
- Taylor, K.E., Stouffer, R.J., Meehl, G. A., 2012. An Overview of CMIP5 and the experiment design. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **93**, 485-498, DOI:10.1175/BAMS-D-11-00094.1
- van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A, Hibbards, K., Hurtt, G. C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J-F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S. J., Rose, S. K., 2011. The representative concentration pathways: an overview. *Climate Change*, **109**, DOI: 10.1007/s10584-011-0148-z
- Vermuelen, S., Dossou, K., Macqueen, D., Walubengo, D., Nangoma, E., 2008. SpringBack: Climate Resilience at Africa's Grassroots. *Sustainable Development Opinions*, International Institute for Environment and Development (IIED). London, UK, 2 pp.
- Ziervogel, G., Taylor, A., Hachigonta, S., Hoffmaister, J., 2008. Climate Adaptation in Southern Africa: Addressing the Needs of Vulnerable Communities. Stockholm Environment Institute (SEI), Stockholm, Sweden, 56 pp.