

PAS-PNA

SENEGAL

Évaluation de la variabilité climatique et des tendances climatiques futures dans la région de Fatick - Sénégal

Projet d'Appui Scientifique aux processus de Plans Nationaux d'Adaptation.

Juin 2019

Mis en oeuvre par :

giz Deutsche Gesellschaft
für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Mandaté par :

 Ministère fédéral
de l'Environnement, de la Protection de la Nature
et de la Sécurité nucléaire

de la République fédérale d'Allemagne

Sous la tutelle de :


République du Sénégal
"Un Peuple - Un But - Une Foi"
Ministère de l'Environnement et du
Développement Durable
(MEED)



En coopération avec :

**CLIMATE
ANALYTICS**

AUTEURS

Ibrahima CAMARA

Méline NOBLET

Quentin LEJEUNE

Youssouph SANÉ

Avec la contribution de: Dimitri Defrance, Saidou M. Sall et Serigne Faye.

Remerciements à l'équipe de recherche de AMMA2050 pour sa contribution et la mise à disposition des données, à l'ANACIM et au LPAO ainsi qu'à l'ensemble des membres des consortia du PAS-PNA qui ont facilité la mise à disposition des données nécessaires à l'étude.

Cette publication a été développée avec le support technique des équipes scientifiques de Climate Analytics, dans le cadre de la Composante 2 du projet Projet d'Appui Scientifique aux processus de Plans Nationaux d'Adaptation dans les pays francophones les moins avancés d'Afrique subsaharienne (PAS-PNA).

Cette publication peut être reproduite en tout ou partie, sous quelque forme que ce soit, à des fins pédagogiques et non lucratives, sur autorisation spéciale de Climate Analytics, à condition que sa source soit mentionnée et référencée.

Cette publication ne peut être revendue ou utilisée à des fins commerciales sans autorisation écrite préalable de Climate Analytics.

Nous regrettons toutes erreurs ou omissions qui auraient été commises involontairement.

Ce document peut être cité sous le titre :

CAMARA I., NOBLET M., LEJEUNE Q., SANÉ Y., 2019. Évaluation de la variabilité climatique et des tendances climatiques futures dans la région de Fatick - Sénégal. Report produced under the project "Projet d'Appui Scientifique aux processus de Plans Nationaux d'Adaptation dans les pays francophones les moins avancés d'Afrique subsaharienne", Climate Analytics gGmbH, Berlin.

Une copie numérique de ce rapport est disponible en ligne sur :

www.climateanalytics.org/publications.

Cette étude est financée dans le cadre du Projet d'Appui Scientifique aux processus de Plans Nationaux d'Adaptation dans les pays francophones les moins avancés d'Afrique subsaharienne, relevant de l'Initiative Internationale pour le Climat (IKI) soutenue par le Ministère fédéral de l'Environnement, de la Protection de la Nature et de la Sécurité Nucléaire (BMU) en vertu d'une décision du Parlement de la République fédérale d'Allemagne, et mis en oeuvre par Climate Analytics et la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.

Table des matières

Liste des Figures	2
Liste des Tableaux	3
Liste des acronymes	4
1 Contexte	5
2 Approche générale d'évaluation de la vulnérabilité au changement climatique	6
3 Evaluer la composante exposition	9
3.1 Objectifs	9
3.2 Zone d'étude : Delta du Saloum / Région de Fatick	9
3.2.1 Position géographique.....	9
3.2.2 Climat.....	10
4 Données et Méthode	11
4.1 Données	11
4.2 Méthodes	13
5 Résultats	15
5.1 Évaluation de la moyenne d'ensembles des modèles	15
5.2 Exposition climatique passée	16
5.2.1 Cumul pluviométrique et Indices de Pluies Standardisés.....	16
5.2.2 Début et longueur de la saison des pluies.....	17
5.2.3 Cumul des jours très humides (95 ^{ème} percentile).....	19
5.2.4 Températures maximale et minimale.....	19
5.3 Exposition climatique future	21
5.3.1 Les indices climatiques liés aux précipitations.....	21
5.3.2 Les températures maximales et minimales.....	25
6 Conclusion	27
7 Références	28
8 Annexes	30

Liste des Figures

Figure 1: Déterminants actuels et futurs de la vulnérabilité à la variabilité climatique et aux changements climatiques	6
Figure 2: Approche combinée locale et globale pour gérer les impacts des changements climatiques	7
Figure 3: Les composantes de la vulnérabilité selon l'AR4 du GIEC	8
Figure 4: Localisation de la région de Fatick.....	9
Figure 5: La température de surface globale moyenne mensuelle observée	14
Figure 6: Cumul pluviométrique saisonnier moyen (1981-2005) observé et simulé	15
Figure 7: Début de saison des pluies moyen (1981-2005) observé et simulé.....	15
Figure 8: Evolution de la moyenne mobile sur 5 ans du cumul pluviométrique annuel dans la région de Fatick	16
Figure 9: Evolution de l'Indice standardisé des précipitations moyenné sur la région de Fatick	17
Figure 10: Evolution du début de la saison des pluies moyenné sur la région de Fatick	17
Figure 11: Perception des populations sur l'évolution du début de la saison des pluies actuelle et dans le passé	18
Figure 12: Evolution de la longueur moyenne de la saison des pluies pour la région du Fatick.....	19
Figure 13: Cumul saisonnier des jours très humides (95ème percentile).....	19
Figure 14: Evolution de la moyenne mobile de la température maximale dans la région de Fatick	20
Figure 15: Evolution de la moyenne mobile de la température minimale dans la région de Fatick.....	20
Figure 16: Evolution de la moyenne mobile sur 5 ans du cumul pluviométrique pour l'historique	22
Figure 17: Evolution de l'indice de pluie standardisé de l'historique, de l'observation, du scénario RCP4.5 et du scénario RCP8.5	22
Figure 18: Evolution de la moyenne mobile sur 5 ans du cumul des jours très humides (95ème percentile) de l'historique, du scénario RCP 4.5 et du scénario RCP8.5	23
Figure 19 : Evolution de la moyenne mobile sur 5 ans du début de la saison des pluies de l'historique, du scénario RCP4.5 et du scénario RCP8.5	23
Figure 20 : Evolution de la moyenne mobile sur 5 ans de la longueur de la saison des pluies de l'historique, du scénario RCP4.5 et du scénario RCP8.5.	24
Figure 21: Evolution de la moyenne mobile sur 5ans de la température maximale saisonnière de l'historique, du scénario RCP4.5 et du scénario RCP8.5.....	25
Figure 22: Evolution de la moyenne mobile sur 5ans des températures minimales de l'historique, du scénario RCP4.5 et du scénario RCP8.5	26

Liste des Tableaux

Tableau 1: Nom et résolution temporelle et spatiale des 24 modèles globaux corrigés utilisées pour cette étude, après désagrégation.	12
Tableau 2: Changement absolu moyen du cumul pluviométrique, des pluies extrêmes, du début de la saison des pluies et de la longueur de la saison des pluies pour les horizons 2035 et 2050 des deux scénarios (RCP4.5 et RCP8.5)	21
Tableau 3: Changement absolu moyen des températures maximales et minimales pour les horizons 2035 et 2050 des deux scénarios (RCP4.5 et RCP8.5).	25

Liste des acronymes

AMMA2050:	Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine 2050
CHIRPS:	Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data
CMIP5:	Coupled Model Intercomparison Project phase 5
CRU:	Climatic Research Unit
DSP:	Début de la Saison des Pluies
GES:	Gaz à Effet de Serre
GIEC:	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
IPS:	Indice de Pluies Standardisé
LSP:	Longueur de la Saison des Pluies
PAS-PNA:	Projet d'Appui Scientifique au processus de Plans Nationaux d'Adaptation
PSE:	Plan Sénégal Émergent
RCP:	Representative Concentration Pathway
TSM:	Température de Surface de la Mer
ZCIT:	Zone de Convergence Inter-Tropicale

1 Contexte

Selon le dernier rapport du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC), les projections futures du climat global (futur proche et lointain) prévoient une intensification du réchauffement moyen, en plus de la variabilité des précipitations et aussi une plus grande fréquence et une intensification des phénomènes extrêmes (GIEC, 2014). Les impacts de cette variabilité climatique varient d'une région du globe à une autre avec des conséquences socio-économiques particulièrement importantes dans les pays en développement (Sultan, 2015). Parmi les zones les plus affectées figure l'Afrique de l'Ouest (Dilley et al., 2005 ; GIEC, 2014), où les secteurs clés de développement des pays sahéliens, notamment l'agriculture, les ressources en eau, l'environnement sont considérés comme particulièrement vulnérables aux changements climatiques (Salack, 2016).

L'année 2017 a été la troisième année la plus chaude jamais enregistrée sur les terres continentales africaines depuis 1950, après 2010 et 2016 (ACMAD, 2017). L'Afrique de l'Ouest expérimente déjà un réchauffement des températures de 1°C depuis 1950 (Morice et al, 2012). Dans le cas du Sahel, le réchauffement moyen depuis 1950 est encore plus élevé au printemps (plus de 2°C) (Guichard et al, 2015 ; Barbier, 2018). Pour le futur, le réchauffement des températures pour l'Afrique de l'Ouest est estimé à 3°C dans le cadre du scénario RCP4.5 et à 6°C dans le cadre du scénario RCP8.5 à l'horizon 2100 (Deme et al, 2015). Cela représente un réchauffement 10% à 60% supérieur au réchauffement global moyen de la planète (Deme et al, 2015). Durant ces dernières années, le continent a expérimenté des vagues de chaleur plus longues et plus intenses que durant les deux dernières décennies du 20^{ème} siècle (Russo, 2016). Par ailleurs, 50% des projections climatiques régionales suggèrent que ces vagues de chaleur, qui sont inhabituelles dans les conditions climatiques actuelles, seront plus régulières d'ici à 2040 voire plus sévères sous le scénario RCP8.5 (Russo, 2016). Concernant les précipitations, de nombreuses incertitudes subsistent pour la région. Cependant, une diminution des précipitations est attendue dans le Sahel-Ouest tandis que le Sahel-Est devrait connaître une augmentation des précipitations (Deme et al. 2015).

Au Sénégal, les impacts du réchauffement climatique global présentent des risques sérieux pour l'agriculture qui est principalement pluviale, les ressources en eau et les zones côtières qui sont déjà fragiles. Ces trois secteurs occupent une place importante dans l'économie nationale et leur sensibilité aux impacts des changements climatiques risque de remettre en question les objectifs du Plan Sénégal Emergent (CPDN, 2015).

Le Sénégal s'est engagé depuis 2015 dans le processus de réalisation de son Plan National d'Adaptation (PNA) et bénéficie pour la période 2016-2019 du Projet d'Appui Scientifique aux processus de Plans Nationaux d'Adaptation (PAS-PNA) financé par le Ministère fédéral allemand de l'Environnement, de la Protection de la Nature et la Sûreté nucléaire (BMU), et mis en œuvre par la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) en collaboration avec Climate Analytics. Selon les Directives techniques du Groupe d'experts des pays les moins avancés (PMA), le processus PNA doit dorénavant reposer sur des connaissances scientifiques solides (CCNUCC, 2012).

La composante 2 du PAS-PNA envisage de répondre à ce défi par le renforcement des capacités scientifiques pour la planification et la programmation des mesures d'adaptation. Plus spécifiquement, il s'agit de réaliser trois études de vulnérabilité, soit une étude pour chaque secteur identifié : agriculture, ressources en eau et zones côtières dans une démarche de renforcement de la capacité.

2 Approche générale d'évaluation de la vulnérabilité au changement climatique

Dans le cadre de ce projet, les études de vulnérabilité sectorielles évaluent à la fois la vulnérabilité actuelle et future (**Figure 1**) et sont développées à travers une approche intégrée. Autrement dit, elles ont été réalisées en interaction les unes avec les autres et ainsi permettre de travailler sur les synergies entre les secteurs.

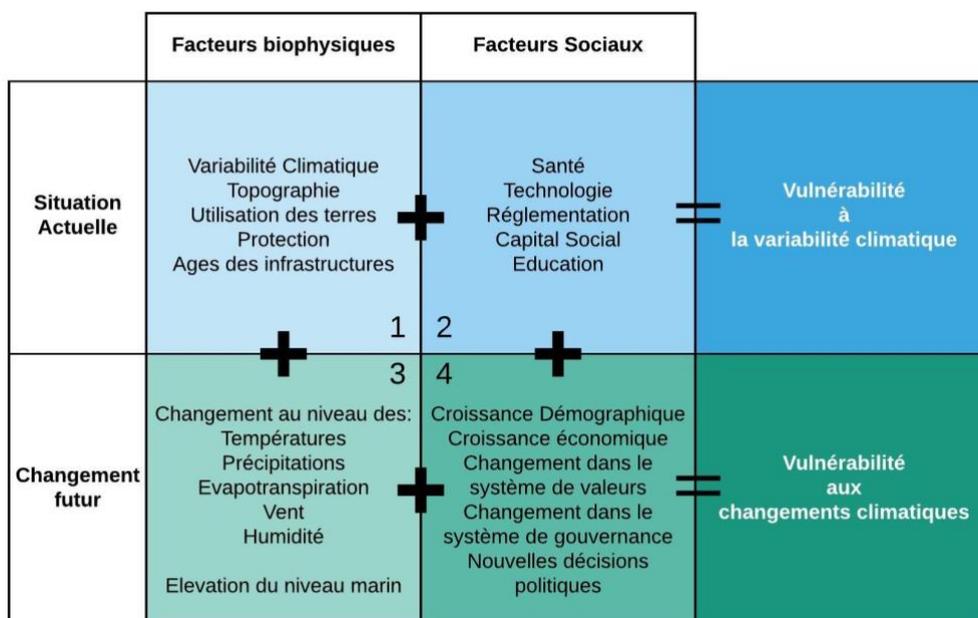


Figure 1: Déterminants actuels et futurs de la vulnérabilité à la variabilité climatique et aux changements climatiques (traduit (traduction libre de CA) de « Assessing Adaptation Knowledge in Europe: Vulnerability to Climate Change », 2017)

Par ailleurs, compte tenu de l'objectif général des études de vulnérabilité, il est approprié de combiner à la fois l'approche participative et une approche basée sur les données et les résultats issus des travaux menés à l'échelle internationale sur la modélisation du climat futur et de ses impacts (**Figure 2**). Les conditions sont réunies pour appliquer ce type d'approche car des partenariats directs sont mis en place à travers les consortia, entre les parties prenantes et les scientifiques (Mastrandrea et al., 2010).

- L'approche participative a reposé sur l'implication des communautés locales à travers l'application d'une méthodologie principalement qualitative. Elle a surtout été appliquée à l'étude des vulnérabilités passée et actuelle (**Figure 2**).
- L'approche basée sur la modélisation climatique globale a servi dans un premier temps à évaluer les tendances climatiques futures et les impacts futurs des changements climatiques en se concentrant sur les effets biophysiques (**Figure 2**). Cette étape repose sur l'utilisation des modèles climatiques globaux et des méthodes de corrélation par tendance. Dans un deuxième temps, il a été possible d'impliquer les différents acteurs afin d'élaborer des scénarios participatifs de développement socio-économique pour la région et de les confronter aux impacts biophysiques futurs des changements climatiques issus des modélisations.

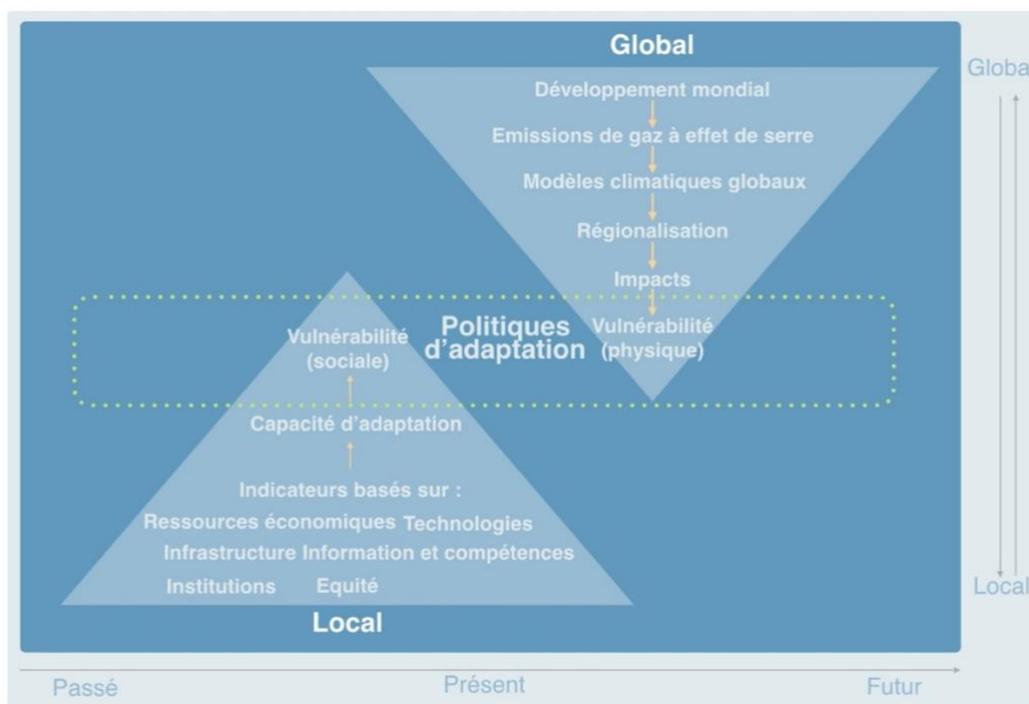


Figure 2: Approche combinée locale et globale pour gérer les impacts des changements climatiques (adapté de Dessai and Hulme (2004))

Encadré 1 : Définitions

Adaptation : ajustement des systèmes naturels et humains en réponse aux stimuli climatiques présents ou futurs ou à leurs effets afin d'atténuer les effets néfastes ou d'exploiter des opportunités bénéfiques (GIEC, 2001).

La vulnérabilité et ses composantes :

- **Vulnérabilité** : degré de capacité d'un système de faire face ou non aux effets néfastes du changement climatique (y compris la variabilité climatique et les extrêmes). La vulnérabilité dépend du caractère, de l'ampleur et du rythme de l'évolution climatique, des variations auxquelles le système est exposé, de sa sensibilité et de sa capacité d'adaptation (GIEC, 2007).
- **Exposition** : la nature et le degré auxquels un système est exposé à des variations et ou des aléas climatiques importants (McCarthy et al., 2001).
- **Sensibilité** : le degré auquel un système est affecté ou modifié de manière négative ou bénéfique, par des stimuli liés au climat. L'effet peut être direct (par exemple, une modification du rendement des cultures en réponse à une de la variabilité de la température) ou indirect (par exemple, des dommages causés par une augmentation de la fréquence des inondations côtières dues à l'élévation du niveau de mer) (McCarthy et al., 2001).
- **Capacité d'adaptation** : capacité d'un système à s'adapter au changement climatique - y compris la variabilité et les phénomènes climatiques extrêmes - à modérer les dommages potentiels, à tirer parti des possibilités offertes ou à faire face aux conséquences (McCarthy et al., 2001).

Dans le cadre de ces études, chaque composante de la vulnérabilité définie ci-dessus (voir encadré 1) est évaluée de manière systématique (**Figure 3**).

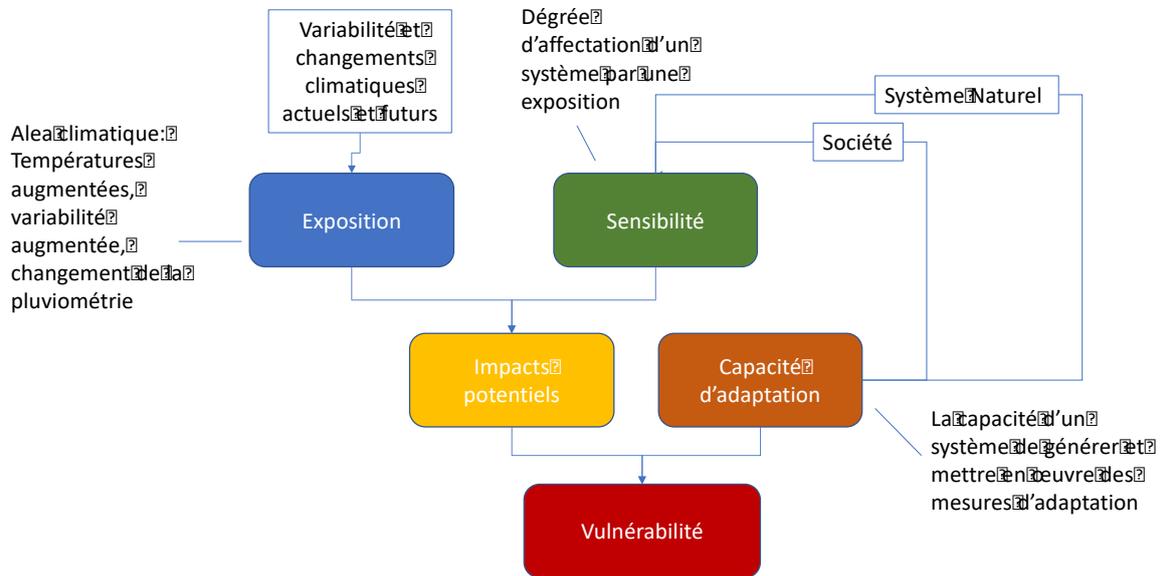


Figure 3: Les composantes de la vulnérabilité selon l'AR4 du GIEC (Climate Analytics)

3 Evaluer la composante exposition

3.1 Objectifs

La présente étude a pour objectif principal de fournir des connaissances scientifiques solides, sur la composante exposition (exposition passée et actuelle) de l'analyse de vulnérabilité (voir partie 2 et **Figure 2**). L'exposition se définit comme étant la nature et le degré auxquels un système est exposé à des variations et ou des aléas climatiques importants (McCarthy et al., 2001). Les facteurs d'exposition type comprennent les températures, les précipitations, l'évapotranspiration et le bilan hydrologique climatique, ainsi que des événements extrêmes comme les fortes pluies et la sécheresse. Dans cette étude allons analyser principalement trois paramètres climatiques : les précipitations, les températures maximales et minimales à 2 m du sol.

Suite à cette introduction notre zone d'étude sera présentée puis les données et méthodes seront abordées et enfin les résultats obtenus qui seront répartis en 3 grandes sections dont : évaluation des simulations, exposition passée puis exposition future.

3.2 Zone d'étude : Delta du Saloum / Région de Fatick

3.2.1 Position géographique

La région de Fatick (**Figure 4**) se trouve dans le bassin arachidier qui constitue la première région agricole du Sénégal (MEDD, 2016). Elle est limitée à l'Est par la région de Kaolack, à l'Ouest par l'Océan Atlantique, au Nord par la région de Diourbel, au Nord-Ouest par la région de Thiès, au Sud par la Gambie. La région compte trois départements (Fatick, Gossas, Foundiougne).

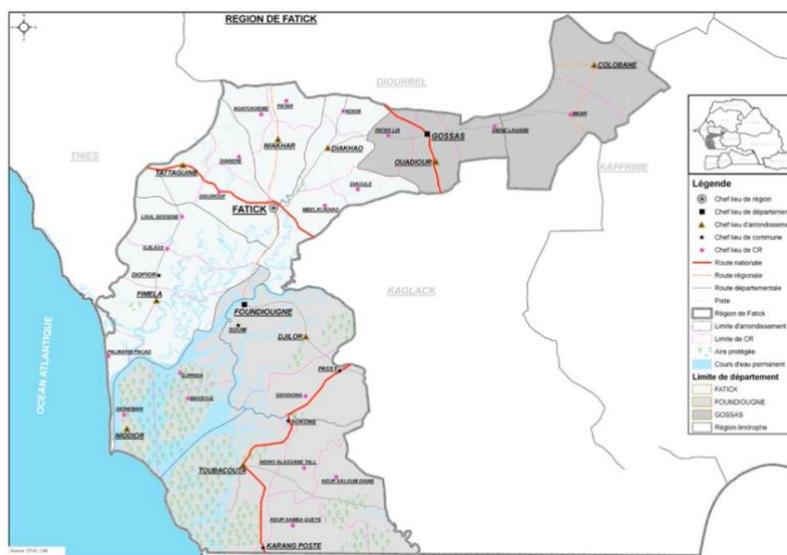


Figure 4: Localisation de la région de Fatick (source : gouvernement du Sénégal)

3.2.2 Climat

Le climat de la région de Fatick est de type soudano-sahélien. Les températures qui varient fortement d'une zone à l'autre, mais aussi d'un mois à l'autre, oscillant d'une manière générale entre 24°C au mois de janvier et 40°C au mois d'avril/mai (CRF, 2001). Les principaux vents qui balaient la région sont : l'Harmattan, chaud et sec, qui souffle sur toute la partie Nord et Nord-Est, l'Alizé maritime présent dans la zone côtière, et la Mousson soufflant entre Avril et Octobre. Les précipitations sont relativement importantes et varient entre 500 et 1000mm (Sagna et al., 2015). La région de Fatick subit également l'influence du climat maritime sur la partie côtière des départements de Foundiougne et Fatick. L'ensoleillement est d'environ 7 heures par jour.

4 Données et Méthode

4.1 Données

Dans cette étude nous avons utilisé les jeux de données suivantes :

- les données du Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS) : ce sont des données de précipitations issues de satellites recalées à l'aide de stations pluviométriques au sol (Funk et al., 2015). Elles ont une résolution horizontale de 0.05° (c'est à dire 5kmx5km) et une résolution temporelle journalière. Les données couvrent la période 1981-2015.
- Les données du Climatic Research Unit (CRU) : elles contiennent entre autres des données de précipitations, températures maximales et minimales. Ces données sont quadrillées sur une grille horizontale de 0.5° (c'est à dire 50kmx50km) (Mitchell and Jones, 2005) avec une résolution temporelle mensuelle, de 1901 jusqu'à aujourd'hui.

Les données des modèles climatiques globaux CMIP5 : les modèles qui sont utilisés dans cette étude sont corrigés et désagrégés sur une grille horizontale de 0.5°. Les corrections ont porté principalement sur la position de la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT), en Afrique de l'Ouest, qui est simulée trop au sud dans la plupart des modèles à cause d'une anomalie chaude des températures de surface de la mer (TSM) dans l'océan atlantique équatorial (Famien et al., 2018). Les corrections de biais ont été obtenues en se basant sur la méthode de transformation de fonction de distribution cumulative (notée CDF-t) (Michelangeli et al., 2009). Cette correction a été faite en utilisant les données d'observation EWEMBI allant de 1979 à 2005. Les modèles ont une résolution temporelle journalière et couvrent la période 1950-2005 pour l'historique et 2006-2099 pour les projections. Ils ont été obtenus grâce à une collaboration entre le projet Analyse multidisciplinaire de la mousson africaine 2050 (AMMA2050) et le Projet d'Appui Scientifique aux processus de Plans Nationaux d'Adaptation (PAS-PNA). Nous avons utilisé au total 24 simulations des modèles globaux (**Tableau 1**) qui contiennent chacune sept (7) variables climatiques corrigées (précipitations, température moyenne de surface, température maximale et minimale, rayonnement solaire, humidité relative et vent de surface). Dans cette étude sur l'exposition nous utilisons uniquement les données de précipitations et de températures maximales et minimales.

Tableau 1: Nom et résolution temporelle et spatiale des 24 modèles globaux corrigés utilisés pour cette étude, après désagrégation.

Nom	Résolution temporelle	Résolution spatiale (lonxlat)
ACCESS1-0	Journalière	50kmx50km
ACCESS1-3	-	-
CMCC-CM	-	-
CMCC-CMS	-	-
MIROC-ESM	-	-
MIROC-ESM-CHEM	-	-
MRI-CGCM3	-	-
MPI-ESM-LR	-	-
MPI-ESM-MR	-	-
bcc-csm1-1	-	-
bcc-csm1-1-m	-	-
BNU-ESM	-	-
GFDL-ESM2M	-	-
GFDL-ESM2G	-	-
GFDL-CM3	-	-
nmcm4	-	-
IPSL-CM5A-LR	-	-
IPSL-CM5A-MR	-	-
IPSL-CM5B-LR	-	-
MIROC5	-	-
NorESM1-M	-	-
HadGEM2-AO	-	-
HadGEM2-CC	-	-
HadGEM2-ES	Journalière	50kmx50km

4.2 Méthodes

L'étude de l'exposition passée et future est basée principalement sur le calcul et l'analyse d'indicateurs climatiques moyennés dans la région de Fatick (Delta du Saloum). Ces indicateurs sont :

Le cumul pluviométrique saisonnier (Juin à Septembre) ;

- l'Indice de Pluies Standardisé (IPS): Il permet de déterminer les périodes humides et arides sur une série de données. Il s'exprime comme suit : $IPS = \frac{P_i - P_{moy}}{\sigma}$ où P_i correspond à la pluie saisonnière de l'année i ; P_{moy} , la pluie saisonnière moyenne de la série ; σ , l'écart-type de la série. L'IPS sera commenté en se basant sur le guide d'interprétation de l'Organisation Mondiale de la Météorologie de l'ISP ;
- les dates de début et de fin, et la longueur de la saison des pluies : le début de la saison des pluies (noté DSP) est défini par la date après le 1^{er} Mai à laquelle on a enregistré au moins 20 mm de pluie sur 3 jours sans épisode sec excédant 7 jours dans les 30 jours qui suivent (Sivakumar 1988). La fin de la saison des pluies (FSP) est définie par la date, après le 1^{er} septembre, à laquelle on a au moins 20 jours consécutifs sans pluie (pluies inférieures à 4mm). La longueur de la saison des pluies (noté LSP) est obtenue en faisant la différence entre les dates de fin et de début de saison ($LSP = FSP - DSP$) ;
- le cumul des jours très humides entre Juin et Septembre : nous avons calculé le 95^{ème} percentile des pluies journalières de CHIRPS de 1981 à 2005. Une fois la valeur obtenue nous avons déterminé pour chaque année, entre Juin et Septembre, le nombre d'événement pluvieux supérieur ou égal au 95^{ème} percentile puis déterminer le cumul correspondant ;
- les températures maximales et minimales saisonnière (entre Juin et Septembre).

L'analyse de l'exposition passée se fera sur la période 1950-2005. Pour le cumul pluviométrique, l'IPS, les températures maximales et minimales nous utiliserons principalement les données CRU. Par contre pour les autres indicateurs climatiques (DSP, la FSP, la LSP et les événements extrêmes), les données CHIRPS et la moyenne d'ensemble des 24 simulations historiques seront utilisées parce que nous avons besoin de données journalières pour les calculer.

L'analyse de l'exposition future s'est faite dans le contexte du Plan Sénégal Émergent (PSE) en définissant deux horizons : 2035 (2006-2035) et 2050 (2036-2065). Elle s'appuie sur les évolutions temporelles d'anomalies des indicateurs climatiques cités ci-dessus en utilisant les 24 simulations de changements climatiques du **Tableau 1**. Deux scénarios (RCP4.5 et RCP8.5) parmi les 4 du 5^{ème} rapport du GIEC (2013) décrits par Moss et al. (2010) ont été utilisés pour caractériser les changements futurs par rapport à la période historique de référence (1976-2005). En effet, au rythme actuel des émissions, le seuil de réchauffement global de +1,5°C par rapport à la période pré-industrielle sera atteint entre 2030-2052 (**Figure 5**; IPCC, 2018). Les voies reflétant l'ambition actuelle d'atténuation au niveau national jusqu'en 2030 sont globalement cohérentes avec des voies rentables qui entraînent un réchauffement climatique d'environ 3 °C d'ici à 2100, avec un réchauffement se poursuivant ensuite (confiance moyenne). Ces réchauffements de 1.5 °C vers 2040 et 3 °C vers 2099 justifient le choix de nos deux scénarios. Le scénario RCP4.5, dit scénario moyen bas, correspond au cas où les émissions de CO₂ atteignent un maximum peu avant 2050. Le scénario RCP8.5, dit scénario pessimiste (business as

usual), correspond au cas où les émissions de gaz à effet de serre s'intensifient au long du XXI^{ème} siècle. Tous les changements potentiels des différents indicateurs ont été calculés par rapport à la période de référence.

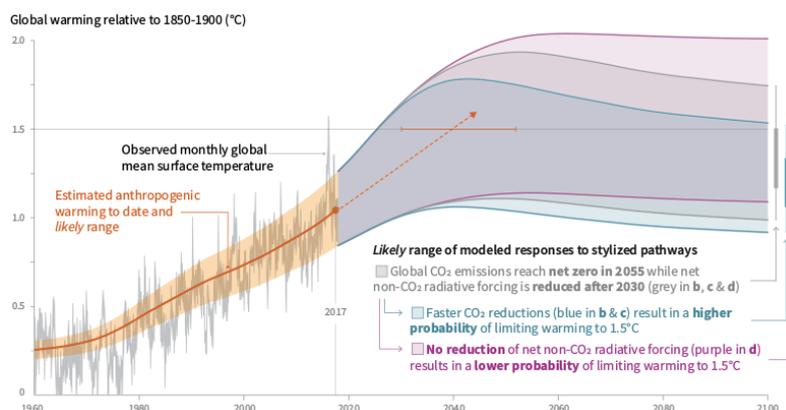


Figure 5: La température de surface globale moyenne mensuelle observée (GMST, ligne grise jusqu'en 2017, de HadCRUT4, GISTEMP, Cowtan – Way et Données de la NOAA) et estimation du réchauffement climatique anthropique (ligne orange continue jusqu'en 2017, avec un ombrage orange indiquant la fourchette probable estimée). Orange La flèche en pointillé et la barre d'erreur orange horizontale indiquent respectivement l'estimation centrale et la plage probable de l'heure à laquelle 1,5 °C est atteinte si le taux actuel de réchauffement continue. Le panache gris à droite du panneau a montre la gamme probable de réponses au réchauffement, calculées avec un modèle climatique simple, à un voie (future hypothétique) dans laquelle les émissions nettes de CO₂ (ligne grise dans les panneaux b et c) diminuent en ligne droite de 2020 à atteindre le zéro net en 2055 et les Le forçage radiatif du CO₂ (ligne grise dans le panneau d) augmente jusqu'en 2030 puis diminue. Le panache bleu du panneau a) montre la réponse à une réduction plus rapide des émissions de CO₂ (ligne bleue dans le panneau b), atteignant zéro net en 2040, réduisant les émissions cumulatives de CO₂ (panneau c). Le panache violet montre que la réaction aux émissions nettes de CO₂ diminue à zéro en 2055, le forçage net sans CO₂ restant constant après 2030. Les barres d'erreur verticales à droite du panneau a) indiquent les plages probables (traits fins) et les zones centrales, terciles (33e au 66e centiles, lignes épaisses) de la distribution estimée du réchauffement de 2100 selon ces trois filières stylisées. Source (IPCC, 2018).

5 Résultats

5.1 Évaluation de la moyenne d'ensembles des modèles

Dans cette partie nous allons évaluer principalement le cumul pluviométrique et le début de la saison des pluies moyens. L'analyse du cumul pluviométrique (**Figure 6**) montre que la moyenne d'ensemble des 24 simulations arrive à reproduire le gradient pluviométrique Sud-Nord avec des précipitations plus importantes au Sud qu'au Nord. La moyenne d'ensemble (**Figure 6**, droite) montre que la zone d'étude est comprise entre les isohyètes 500 et 700 mm. Ceci est légèrement supérieur aux observations mais est en accord avec l'étude de Sagna et al (2015) qui place le Delta du Saloum dans la zone Nord-soudanienne où le cumul varie entre 500 et 1000 mm. En ce qui concerne le début de la saison des pluies, comme dans les observations la moyenne d'ensemble montre que l'hivernage (saison des pluies) commence d'abord au Sud du Sénégal (**Figure 7**). Dans notre zone d'étude, les données satellitaires montrent que le démarrage de la saison est situé entre le 29 Juin et le 19 Juillet de même que la moyenne d'ensemble avec un léger retard au sud du département de Fatick (**Figure 7**).

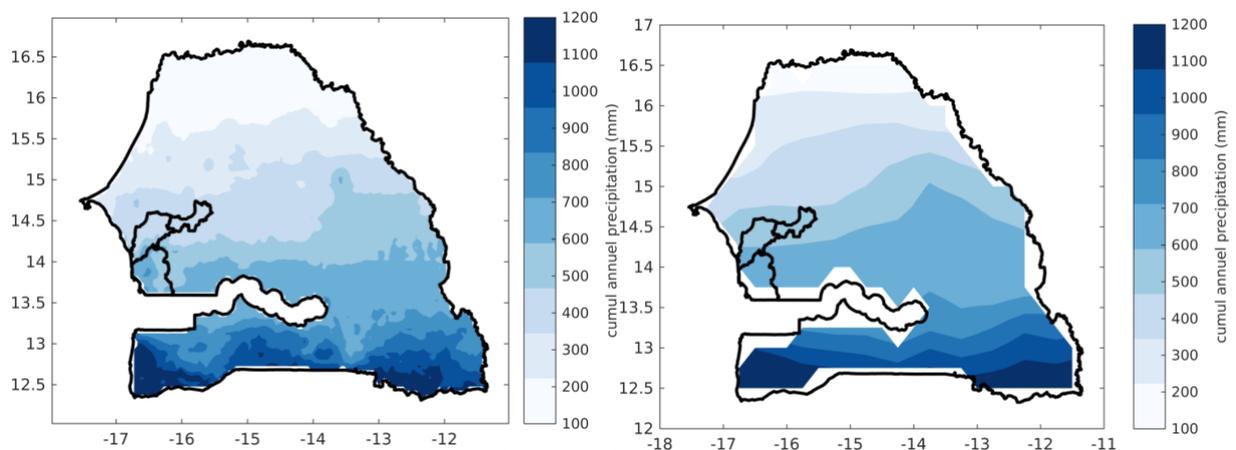


Figure 6: Cumul pluviométrique saisonnier moyen (1981-2005) observé (carte de gauche) et simulé (carte de droite). Les données utilisées sont celles de CHIRPS (figure gauche) et CMIP5 (figure droite).

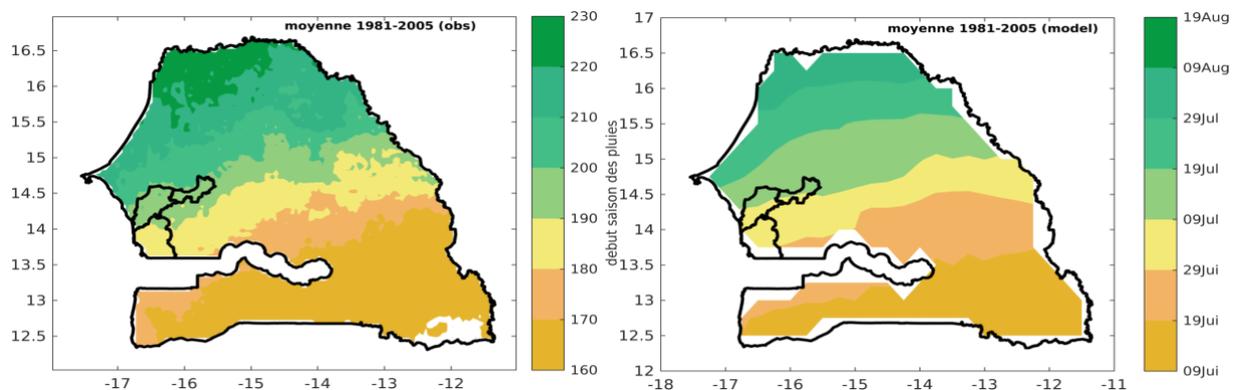


Figure 7: Début de saison des pluies moyen (1981-2005) observé (carte de gauche) et simulé (carte de droite). Les données utilisées sont celles de CHIRPS (figure gauche) et CMIP5 (figure droite).

5.2 Exposition climatique passée

5.2.1 Cumul pluviométrique et Indices de Pluies Standardisés

L'analyse des précipitations au Sénégal montrent une forte variabilité interannuelle à décennale avec principalement une période humide allant de 1921 à 1967 et une période sèche allant de 1968 à 2014 (Gaye et al., 2015 ; Sagna et al., 2015). La période pluvieuse renferme sept années déficitaires : 1921, 1931, 1941, 1942, 1944, 1945 et 1959. La période sèche renferme huit années excédentaires : 1969, 1975, 1999, 2003, 2005, 2009, 2010 et 2012. Cette forte variabilité a aussi affecté la région de Fatick dont le cumul annuel montre principalement deux tendances :

- une tendance à la baisse des précipitations allant de 1967 à 1987 (**Figure 8**, trait rouge) et ;
- une tendance à la hausse allant de 1988 à 1998 (**Figure 8**, trait bleu).

Pour mieux appréhender ces tendances en termes de climat humide ou aride, l'Indice Standardisé des Précipitations (ISP) saisonnier a été calculé (**Figure 9**). La figure montre principalement trois périodes :

- **1950 à 1976** : période où les précipitations sont proches de la normale ($-0.99 \leq ISP \leq 0.99$) avec des occurrences d'années modérément humides ($1 \leq ISP \leq 1.49$) à très humides ($ISP \geq 2$). Ces années humides à très humides sont principalement situées dans la période 1950-1968 qui correspond à une période excédentaire selon plusieurs études (Descroix et al., 2015 ; Sagna et al., 2015) ;
- **1977 à 1984** : période très sèche ($-1.99 \leq ISP \leq -1.5$) à extrêmement sèche ($ISP \leq -2$) où les précipitations sont largement inférieures à la normale ;
- **1985 à 2005** : période où les précipitations sont proches de la normale avec des occurrences d'années modérément sèches ($-1.49 \leq ISP \leq -1$).

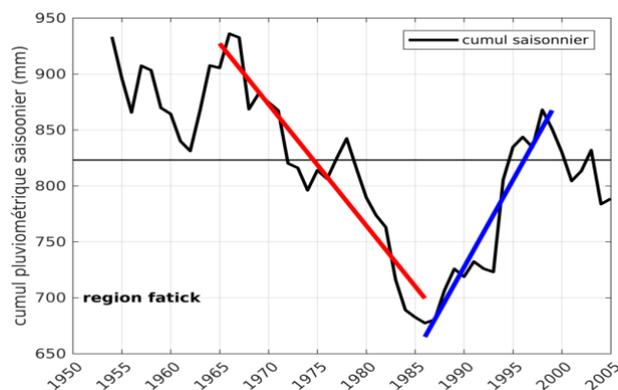


Figure 8: Evolution de la moyenne mobile sur 5 ans du cumul pluviométrique annuel dans la région de Fatick. Les données utilisées sont celles du Climatic Research Unit (CRU).

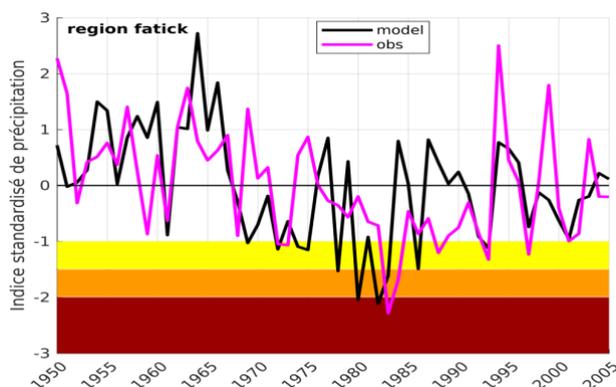


Figure 9: Evolution de l'Indice standardisé des précipitations moyenné sur la région de Fatick. En noir la moyenne d'ensemble des modèles utilisés, en magenta les données CRU. D'après le guide de l'OMM, lorsque l'indice est dans la zone jaune on a une sécheresse modérément sèche, dans la zone orange on a une sécheresse très sèche et dans la zone rouge foncé on a une sécheresse extrêmement sèche.

5.2.2 Début et longueur de la saison des pluies

L'analyse du début de la saison des pluies (DSP) montre de façon générale que la saison des pluies commence de plus en plus tard. Le début de la saison varie entre mi-juin et fin juillet avec une forte variabilité interannuelle. Ce démarrage tardif de l'hivernage est marqué dans la moyenne d'ensemble des modèles CMIP5 (**Figure 10**). Cependant les résultats des modèles sont plus en accord avec la perception des populations de Niakhar et de Toubacouta qui affirment que le début de la saison des pluies est compris entre fin Juin et début Juillet (**Figure 11**).

On peut distinguer deux périodes (**Figure 10**) :

- **1950-1980** : période à laquelle le DSP est situé en fin Juin donc en avance par rapport au début de la période de référence (1^{er} Juillet).
- **1981-2005** : période à laquelle l'hivernage démarre dans la première décade de Juillet. Ici le début est en retard par rapport à la période de référence.

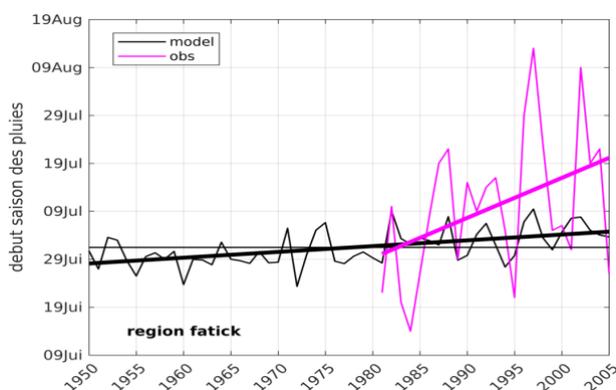


Figure 10: Evolution du début de la saison des pluies moyenné sur la région de Fatick. En noir la moyenne d'ensemble des modèles utilisés, en magenta les données CHIRPS. Le trait fin noir horizontal représente la valeur de la période de référence (1976-2005). Les traits gris obliques noir et magenta montrent les tendances simulées et observées respectivement.

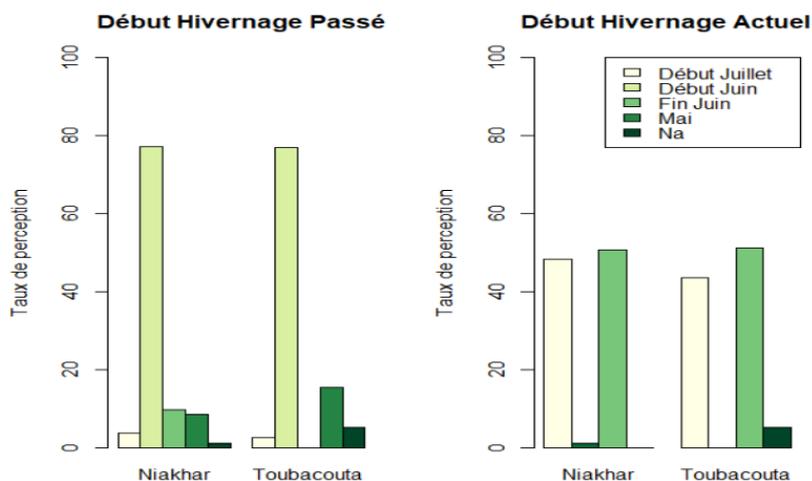


Figure 11: Perception des populations sur l'évolution du début de la saison des pluies actuelle et dans le passé (il y'a 30 ans), A gauche : Début de la saison des pluies dans le passé, A droite : Début de la saison des pluies actuelle. Source : Faye et al., Evaluation de la vulnérabilité du secteur agricole à la variabilité et aux changements climatiques dans la région de Fatick, PAS-PNA Sénégal, Climate Analytics, 2019.

Concernant la longueur de la saison des pluies (LSP), elle varie entre 80 et 110 jours sur la période 1950-2005 (**Figure 12**, courbe noire). La moyenne d'ensemble capte bien les tendances observées. On distingue principalement trois longues phases (**Figure 12**) qui contiennent une forte variabilité interannuelle :

- **1957-1967** : Période où la longueur de la saison augmente progressivement pour atteindre un maximum d'environ 104 jours en 1967.
- **1968- 1996** : la LSP diminue progressivement avec un minimum d'environ 80 jours atteint en 1983 qui correspond à une année extrêmement sèche (**Figure 7**). Cette diminution de la LSP est en phase avec la diminution du cumul pluviométrique notée sur la **Figure 4**.
- **1997-2005** : la LSP amorce une nouvelle phase d'augmentation qui correspond aussi partiellement à la hausse du cumul pluviométrique (**Figure 4**).

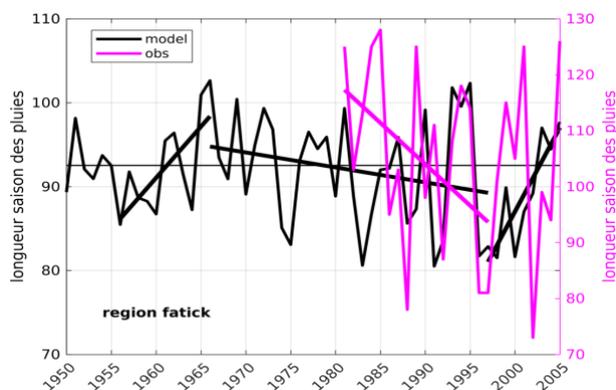


Figure 12: Evolution de la longueur moyenne de la saison des pluies pour la région du Fatick. Ici nous avons mis un axe pour chaque jeu de données.

5.2.3 Cumul des jours très humides (95^{ème} percentile)

L'analyse du cumul des jours très humides (**Figure 13**) ne montre pas une tendance claire sur le long terme (période d'au moins 20 ans). Par contre, sur des périodes plus courtes, on note une diminution de leur intensité entre 1988-1997 pour atteindre des valeurs inférieures à 50 mm. A partir de 1999, période de retour des pluies au Sahel (Panthou et al., 2014 ; Sanogo et al., 2015 ; Dong et Sutton, 2015), il y a une augmentation de l'intensité des pluies induites par des jours très humides avec des valeurs pouvant dépasser 200 mm.

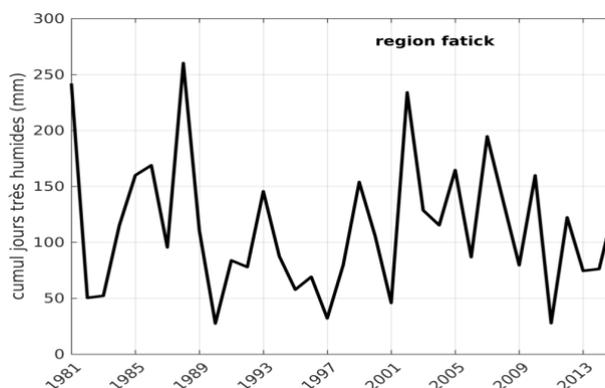


Figure 13: Cumul saisonnier des jours très humides (95ème percentile). Les données utilisées sont celles de CHIRPS.

5.2.4 Températures maximale et minimale

L'évolution moyenne, dans la région de Fatick, des températures maximale et minimale montre une tendance à la hausse de 1957 à 1987 avec une longue période de stabilisation apparente allant de 1963 à 1976. Durant cette période de hausse, les températures maximales (minimales) ont augmenté de 1.3°C (1°C ; **Figure 14** et **Figure 15**). Ainsi, dans la région de Fatick nous notons deux périodes de hausse progressive (1957-1962 et 1977-1987) et une période de baisse (1988-1997 ; **Figure 14** et **Figure 15**).

- **1957-1962** : Période où les températures maximale et minimale augmentent progressivement pour atteindre un premier maximum en 1962. A noter que l'augmentation est plus marquée sur les températures minimales.
- **1977-1987** : Cette période correspond à la sécheresse des années 1970-1980, donc l'augmentation des températures pourraient être due en partie à la baisse des pluies observée sur la **Figure 8**. L'augmentation est plus marquée sur les températures maximales.

- **1988-1997** : Période où les températures maximales diminuent progressivement. Cette diminution plus marquée sur les températures maximales est en phase avec l'augmentation du cumul pluviométrique (**Figure 8**).

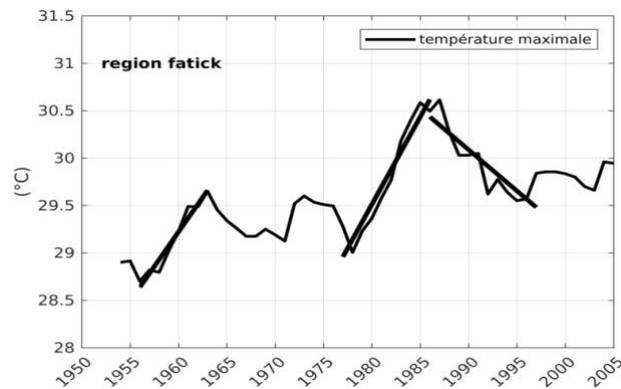


Figure 14: Evolution de la moyenne mobile de la température maximale dans la région de Fatick. Les traits noirs obliques montrent les tendances. Les données utilisées sont celles du Climatic Research Unit (CRU).

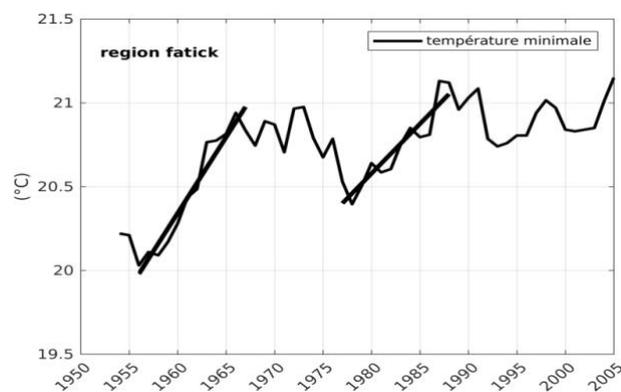


Figure 15: Evolution de la moyenne mobile de la température minimale dans la région de Fatick. Les traits noirs obliques montrent les tendances. Les données utilisées sont celles du Climatic Research Unit (CRU).

5.3 Exposition climatique future

5.3.1 Les indices climatiques liés aux précipitations

L'analyse du **Tableau 2** montre que quels que soient les horizons (2035 ou 2050) et les deux scénarios considérés (RCP 4.5 et RCP 8.5), le cumul pluviométrique et la longueur de la saison des pluies pourraient diminuer. De manière générale, ces diminutions à l'horizon 2050 sont plus importantes que celles simulées pour l'horizon 2035. Pour le cumul, la diminution est plus importante pour le scénario RCP8.5 que pour le RCP4.5 (**Tableau 2**). Cette diminution du cumul est en accord avec les résultats de Deme et al (2015). Pour la longueur de la saison, à l'horizon 2035, le RCP4.5 projette une baisse un peu plus importante, que celle de RCP8.5. En ce qui concerne le début de la saison des pluies, les scénarios projettent des démarrages de plus en plus tardifs. A l'horizon 2035 les deux scénarios prévoient un changement presque identique alors qu'à l'horizon 2050, le RCP8.5 projette un changement un peu plus important (**Tableau 2**, 3^{ème} ligne). Concernant les pluies extrêmes, à l'horizon 2035, leurs occurrences pourraient diminuer. Par contre, à l'horizon 2050, la fréquence des pluies extrêmes pourraient augmenter. Les changements pour les caractéristiques de la saison des pluies (début et longueur de la saison) sont significatifs avec un degré de confiance de 95%. Par contre, les changements sur le cumul et les pluies extrêmes ne sont pas statistiquement significatifs.

Indicateurs climatiques	Scénarios	Horizon 2035 (2006-2035)	Horizon 2050 (2036-2065)
Cumul pluviométrique (mm)	RCP4.5	-9.40 (11)	-14.00 (16)
	RCP8.5	-21.86 (17)	-24.21 (18)
Intensité pluies extrêmes (95 ^{ème} percentile) (mm)	RCP4.5	1.43(13)	8.79 (11)
	RCP8.5	2.39(8)	15.50(8)
Début de la saison des pluies	RCP4.5	4.99±3.34 (22)	6.22±3.61 (20)
	RCP8.5	4.30±3.56 (20)	8.70±4.99 (21)
Longueur de la saison des pluies	RCP4.5	-8.33±4.46(18)	-11.56±7.11(20)
	RCP8.5	-6.10±5.18 (15)	-14.99±7.77 (18)

Tableau 2: Changement absolu moyen du cumul pluviométrique, des pluies extrêmes (95^{ème} percentile), du début de la saison des pluies et de la longueur de la saison des pluies pour les horizons 2035 et 2050 des deux scénarios (RCP4.5 et RCP8.5). Les valeurs entre-parenthèses indiquent le nombre de modèles montrant un changement en accord avec celui indiqué par la moyenne d'ensemble des modèles.

Pour le début de la saison des pluies, pour les deux horizons, les saisons vont commencer de plus en plus tard par rapport au début moyen de la période de référence (2 Juillet). A l'horizon 2035, nous pourrions avoir un retard d'environ 4.5±3 jours alors qu'à l'horizon 2050, ce retard pourrait s'accroître pour atteindre au moins 6,5±3,5 jours selon le RCP4.5. Notons que la différence entre les deux scénarios est légère mais significative.

Concernant la longueur de la saison des pluies, elle connaîtra une diminution aux horizons 2035 et 2050. A l'horizon 2035, la diminution est plus importante pour le scénario RCP4.5 que le RCP8.5. A

l'horizon 2050, la diminution sera plus importante pour le RCP8.5, avec une valeur d'environ 13 ± 7 jours par rapport à la longueur moyenne de la saison sur notre période de référence (92 jours).

L'analyse de l'évolution temporelle du cumul pluviométrique (**Figure 16**) montre pour les projections une tendance à la baisse. Cette tendance à la baisse est plus importante avec le scénario RCP8.5 (**Figure 16**, courbe rouge) avec une valeur presque constante de 2006 à 2060. Cette faible diminution doit être prise avec beaucoup de précaution à cause de la forte dispersion des modèles.

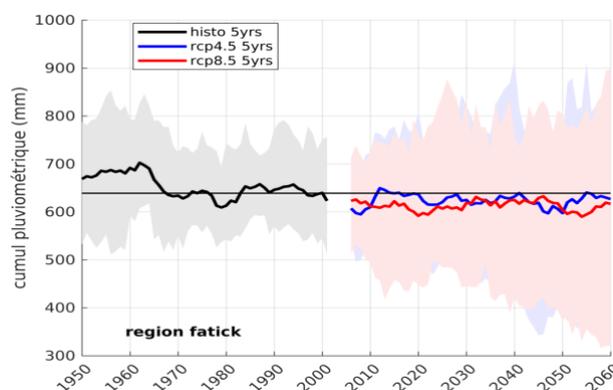


Figure 16: Evolution de la moyenne mobile sur 5 ans du cumul pluviométrique pour l'historique (noire), le scénario RCP4.5 (bleue) et le scénario RCP8.5 (rouge). Le trait noir fin horizontal donne la valeur du cumul pluviométrique de la période de référence. Les données utilisées sont celles de la moyenne d'ensemble des 24 simulations des modèles CMIP5 du **Tableau 1**. La dispersion des modèles est donnée en teinte grise, bleue claire et rouge claire pour l'historique, le scénario RCP4.5 et le scénario RCP 8.5 respectivement. Ces dispersions sont visualisées par le 10^{ème} et le 90^{ème} percentile de l'ensemble des simulations considérées.

Pour ce qui concerne l'évolution de l'IPS agronomique (**Figure 17**), entre les années 2020 et 2035 les précipitations pourraient être proches de la normale. Par contre, les années 2040 pourraient enregistrer des sécheresses modérément importantes. Au-delà de 2045, les projections montrent une recrudescence des événements de sécheresse qui pourraient être extrêmement secs comme en 1983. Il faut noter aussi la forte variabilité interannuelle de l'IPS qui pourra entraîner l'apparition d'années modérément humides à l'intérieur des périodes très sèches, voire extrêmement sèches.

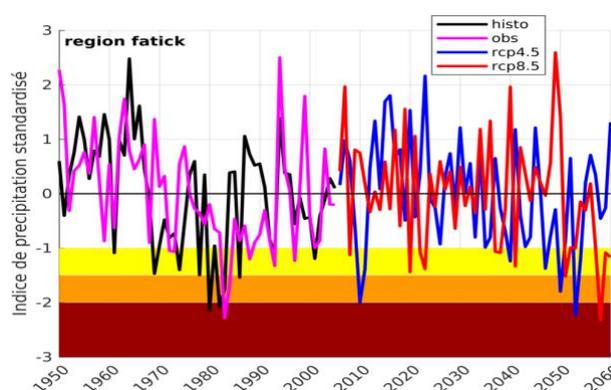


Figure 17: Evolution de l'indice de pluie standardisé de l'historique (noire), de l'observation (magenta), du scénario RCP4.5 (bleue) et du scénario RCP8.5 (rouge). Les données utilisées sont celles de la moyenne d'ensemble des 24 simulations des modèles CMIP5 du **Tableau 1**.

L'analyse de l'évolution temporelle du cumul de précipitations lors des jours très humides (i.e. lors desquels les précipitations dépassent le 95^{ème} percentile des totaux journaliers sur la période 1981-

2005, voir **Figure 18**) montre pour les projections une légère tendance à la hausse. Cette tendance à la hausse sera plus visible à l'horizon 2050 avec le scénario RCP8.5 (**Figure 18** courbe rouge). Nous notons aussi une forte dispersion des modèles ce qui montre i) leurs difficultés à reproduire ces événements extrêmes (Crétat et al., 2013) ainsi que ii) les incertitudes sur les projections, comme l'indique également le faible nombre de modèles indiquant les changements du cumul des jours très humides du même signe que pour la moyenne des modèles (**Tableau 2**).

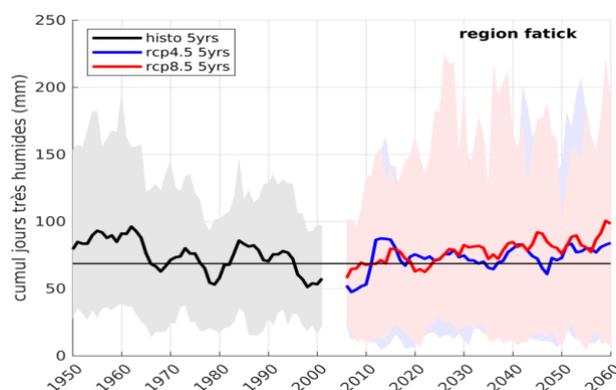


Figure 18: Evolution de la moyenne mobile sur 5 ans du cumul des jours très humides (95^{ème} percentile) de l'historique (noire), du scénario RCP 4.5 (bleue) et du scénario RCP8.5 (rouge). Le trait noir fin horizontal donne la valeur du cumul des jours très humides de la période de référence. Les données utilisées sont celles de la moyenne d'ensemble des 24 simulations des modèles CMIP5 du **Tableau 1**. La dispersion des modèles est donnée en teinte grise, bleue claire et rouge claire pour l'historique, le scénario RCP4.5 et le scénario RCP8.5 respectivement. Ces dispersions sont obtenues en utilisant le 10^{ème} et le 90^{ème} percentile.

L'analyse de la variation temporelle, de 1950 à 2060, du début de la saison des pluies (DSP) montre que de 1950 à 1995 le début de la saison était en avance par rapport au début de la période de référence sauf en 1983. Les projections montrent une forte variabilité plus marquée sur le scénario RCP4.5 (**Figure 19**, courbe bleue) dans les trente (30) première année (2006-2035). Le reste de la période (2036-2060) la variabilité est plus importante avec le scénario RCP8.5 (**Figure 19**, courbe rouge) avec un retard qui s'accroît entre 2035-2048 puis diminue jusqu'en 2060.

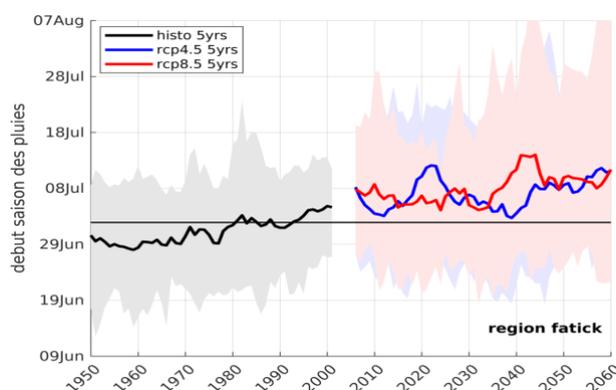


Figure 19 : Evolution de la moyenne mobile sur 5 ans du début de la saison des pluies de l'historique (noire), du scénario RCP4.5 (bleue) et du scénario RCP8.5 (rouge). Le trait noir fin horizontal donne la valeur du début de la saison des pluies de la période de référence. Les données utilisées sont celles de la moyenne d'ensemble des 24 simulations des modèles CMIP5 du **Tableau 1**. La dispersion des modèles est donnée en teinte grise, bleue claire et rouge claire pour l'historique, le scénario RCP4.5 et le scénario RCP8.5 respectivement. Ces dispersions sont obtenues en utilisant le 10^{ème} et le 90^{ème} percentile.

Pour ce qui est de la LSP nous notons une forte variabilité dans les projections de 2006 à 2060 avec les deux scénarios (**Figure 20**, courbes bleue et rouge). Cette variabilité est plus forte que celle observée sur le démarrage de la saison pendant la période historique. Ceci montre l'existence d'une forte variabilité sur la fin de la saison.

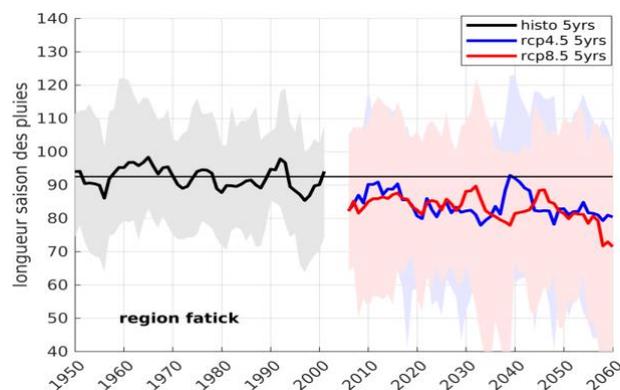


Figure 20 : Evolution de la moyenne mobile sur 5 ans de la longueur de la saison des pluies de l'historique (noire), du scénario RCP4.5 (bleue) et du scénario RCP8.5 (rouge). Le trait noir fin horizontal donne la valeur de la longueur de la saison des pluies de la période de référence. Les données utilisées sont celles de la moyenne d'ensemble des 24 simulations des modèles CMIP5 du **Tableau 1**. La dispersion des modèles est donnée en teinte grise, bleue claire et rouge claire pour l'historique, le scénario RCP4.5 et le scénario RCP8.5 respectivement. Ces dispersions sont obtenues en utilisant le 10^{ème} et le 90^{ème} percentile.

5.3.2 Les températures maximales et minimales

Variabes climatiques	Scénarios	Horizon 2035 (2006-2035)	Horizon 2050 (2036-2065)
Températures maximales	Rcp4.5	0.61±0.06	1.26±0.14
	Rcp8.5	0.69±0.08	1.78±0.17
Températures minimales	Rcp4.5	0.71±0.06	1.46±0.12
	Rcp8.5	0.77±0.08	1.99±0.16

Tableau 3: Changement absolu moyen des températures maximales et minimales pour les horizons 2035 et 2050 des deux scénarios (RCP4.5 et RCP8.5). Toutes les simulations montrent une augmentation.

Aux horizons 2035 et 2050, les températures maximales et minimales vont connaître, une augmentation par rapport aux valeurs de la période de référence (1976-2005) quel que soit le scénario. L'augmentation est plus forte pour les températures minimales que pour les maximales (**Tableau 3**). A l'horizon 2035 la différence de changement entre les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 est très faible (de l'ordre de 0.07°C). A l'horizon 2050 le changement induit avec le scénario RCP8.5 est plus important que celui avec le RCP4.5 de l'ordre de 0.5°C.

L'analyse de l'évolution des températures maximales et minimales de 1950 à 2060 (**Figure 21** et **Figure 22**) montre que de 1950 jusque dans les années 1990 les températures maximales et minimales sont inférieures aux valeurs de la période de référence. Jusqu'en 2035 les deux scénarios (**Figure 21** et **Figure 22**, courbes bleue et rouge) sont proches entre eux ce qui explique la faible différence obtenue dans le **Tableau 3** à l'horizon 2035.

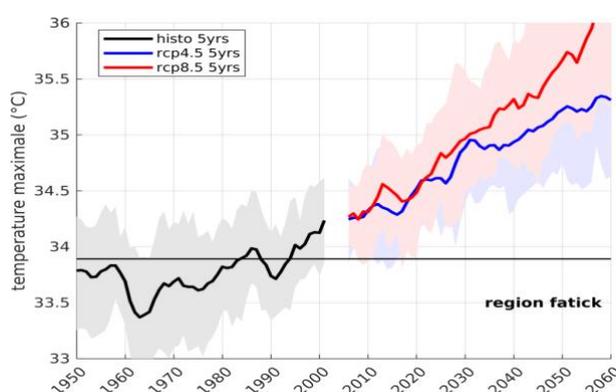


Figure 21: Evolution de la moyenne mobile sur 5 ans de la température maximale saisonnière de l'historique (noire), du scénario rcp4.5 (bleue) et du scénario rcp8.5 (rouge). Le trait noir fin horizontal donne la valeur de la température maximale saisonnière de la période de référence. Les données utilisées sont celles de la moyenne d'ensemble des 24 simulations des modèles CMIP5 du **Tableau 1**. La dispersion des modèles est donnée en teinte grise, bleue claire et rouge claire pour l'historique, le scénario rcp4.5 et le scénario rcp8.5 respectivement. Ces dispersions sont obtenues en utilisant le 10^{ème} et le 90^{ème} percentile.

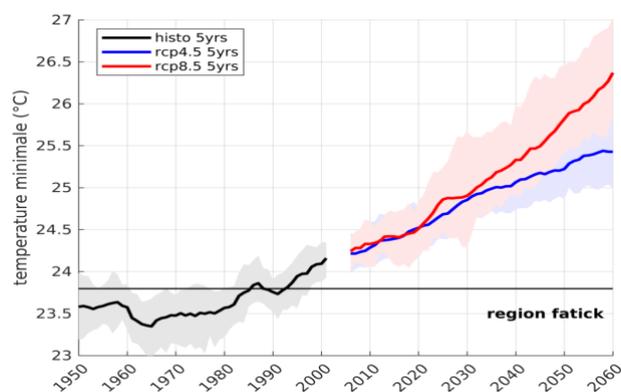


Figure 22: Evolution de la moyenne mobile sur 5ans des températures minimales de l'historique (noire), du scénario rcp4.5 (bleue) et du scénario rcp8.5 (rouge). Le trait noir fin horizontal donne la valeur de la température minimale saisonnière de la période de référence. Les données utilisées sont celles de la moyenne d'ensemble des 24 simulations des modèles CMIP5 du **Tableau 1**. La dispersion des modèles est donnée en teinte grise, bleue claire et rouge claire pour l'historique, le scénario rcp4.5 et le scénario rcp8.5 respectivement. Ces dispersions sont obtenues en utilisant le 10^{ème} et le 90^{ème} percentile.

6 Conclusion

Dans cette étude, l'exposition passée et future ont été analysées dans le delta du Saloum. Pour cela, des indicateurs climatiques ont été calculés et analysés à l'aide de différents jeux de données.

Les résultats montrent une diminution probable du cumul pluviométrique saisonnier dans le futur (horizon 2035 et 2050) qui pourrait être inférieur à 600mm.

Pour ce qui est du début de la saison des pluies, les modèles projettent un retard par rapport au début de la période de référence (1^{er} Juillet). Ce retard probable pourrait entraîner un démarrage de l'hivernage dans la deuxième moitié du mois de Juillet. Le début tardif de la saison des pluies va influencer la longueur de la saison des pluies. Cette dernière connaîtrait une diminution probable dans le futur et, pourrait être de l'ordre de 80 jours.

Les températures maximales et minimales connaîtraient une augmentation vers les horizons 2035 et 2050. A l'horizon 2050 les températures maximale et minimale pourraient augmenter au moins de 1.3°C et 1.5°C respectivement.

Nos résultats confirment et renforcent plusieurs études faites sur le Sénégal. Néanmoins, ils comportent des limites notamment sur le cumul pluviométrique. Ce dernier est sous-estimé par la moyenne d'ensemble des 24 simulations utilisées. Cette sous-estimation pourrait influencer le cumul projeté à nos deux horizons. Cette sous-estimation n'est probablement pas due à la résolution horizontale car des études faites avec des modèles régionaux montrent aussi une sous-estimation (Dieng et al., 2016). Il serait bien dans des études futures d'affiner les méthodes de correction de biais.

7 Références

- BODIAN A., 2014 : Caractérisation de la variabilité temporelle récente des précipitations annuelles au Sénégal (Afrique de l'Ouest). *Physio-Géo* [En ligne], Volume 8 : 297-312 | 2014, DOI : 10.4000/physio-geo.4243.
- CPDN, 2015. Contribution Prévue Déterminée au niveau National au changements climatique climatique.
- Deme, A., Gaye, A.T., Hourdin, F. (2015). Les projections du climat en Afrique de l'Ouest, Évidences et incertitudes. Dans *Les sociétés rurales face aux changements climatiques et environnementaux en Afrique de l'Ouest* (IRD Éditions, pp. 61–87).
- Descroix, L., Diongue Niang, A., Panthou, G., Bodian, A., Sane, Y., Dacosta, H., ... Quantin, G. (2015). Évolution récente de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest à travers deux régions : La sénégalie et le bassin du Niger moyen. *Climatologie*, 12, 25–43.
- Dieng, D., Smiatek, G., Heinzeller, D., & Kunstmann, H. (2016). Simulation of the Rain Belt of the West African Monsoon (WAM) in High Resolution CCLM Simulation. In *High Performance Computing in Science and Engineering '16* (pp. 547-558). Springer, Cham.
- DONG B.-W. et SUTTON R., 2015 : Dominant role of greenhouse gas forcing in the recovery of Sahel rainfall. *Nature Climate Change*, DOI:10.1038/nclimate2664.
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., ... & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific data*, 2, 150066.
- GIEC, Report Of The Coastal Zone Management Subgroup, Strategies for adaptation to sea level rise, Intergovernmental Panel On Climate Change Response Strategies Working Group November, 1990.
- GIEC, G. (2014). Les éléments scientifiques.
- Giec, B. (2001). des changements climatiques: Les éléments scientifiques. *Contribution du groupe de travail I au troisième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, OMM/PNUC*.
- Giorgi, F., Hewitson, B., Christensen, J., Hulme, M., Von Storch, H., Whetton, P., ... & Bates, B. (2001). Regional climate information—evaluation and projections.
- Hansen, J. W. (2002). Realizing the potential benefits of climate prediction to agriculture: Issues, approaches, challenges. *Agricultural Systems*, 74(3), 309–330.
- IPCC, 2018: *Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds.)]. In Press.

MEDD, 2016. Contributions Déterminées au niveau National (CDN)- volet adaptation secteur de l'agriculture.

Mitchell, T. D., & Jones, P. D. (2005). An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *International journal of climatology*, 25(6), 693-712.

Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., Van Vuuren, D. P., ... & Meehl, G. A. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282), 747.

PANTHOU G., VISCHEL T., LEBEL T., 2014 : Recent trends in the regime of extreme rainfall in the Central Sahel. *International Journal of Climatology*, 34, 3998-4006.

SANOGO S., FINK A.H., OMOTOSHO J.A., BA A., REDL R. et ERMERT V., 2015 :
Spatio-temporal characteristics of the recent rainfall recovery in West Africa. *Int. J. Climatol.*
DOI: 10.1002/joc.4309.

SIVAKUMAR M.V.K., 1988 : Predicting rainy season potential from the onset of rains in southern Sahelian and Sudanian climatic zones of West Africa. *Agric. For. Meteorol.*, 42, 295-305.

SULTAN B., ROUDIER P., TRAORE S., 2015 : Les impacts des changements climatiques sur les rendements agricoles en Afrique de l'Ouest. In Sultan, B., Lalou, R., Sanni, M.A., Oumarou, A. et Soumaré, M.A. (Eds), « Les sociétés rurales face aux changements climatiques et environnementaux en Afrique de l'Ouest », Ed. IRD, 209-224.

8 Annexes

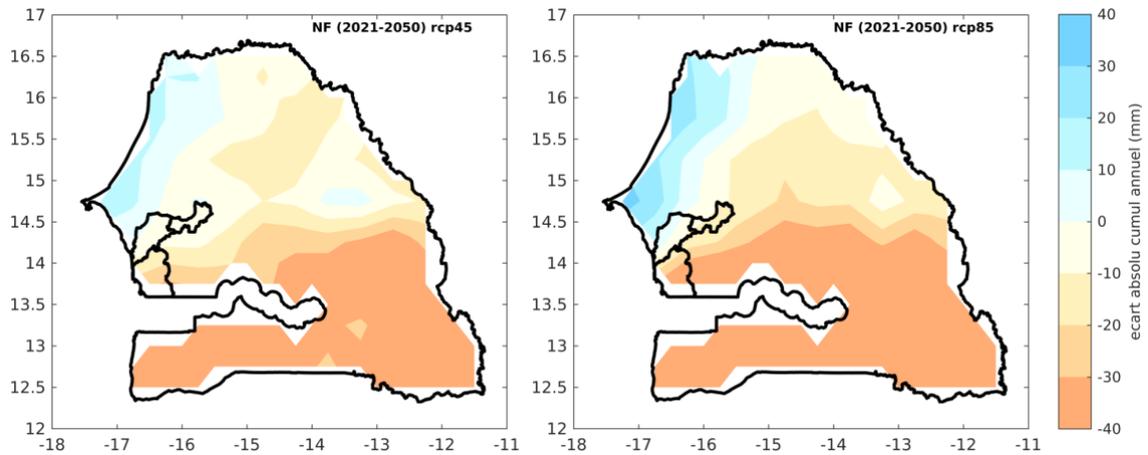


Figure 1: Écart absolu entre futur proche (2021-2050) et période de référence sur le cumul pluviométrique. A gauche rcp4.5, à droite rcp8.5

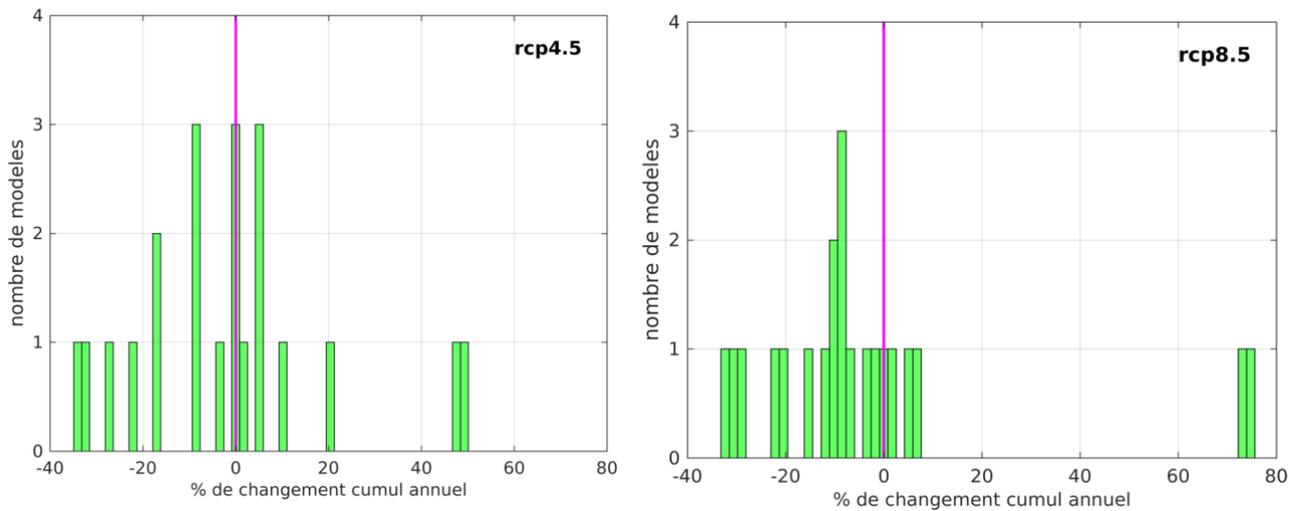


Figure 2: Fréquence des modèles induisant un changement donné

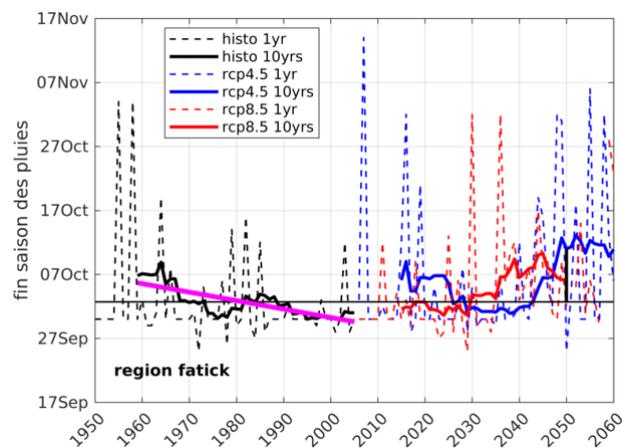


Figure 3: Evolution temporelle de la fin de la saison des pluies

Climate Analytics gGmbH
Ritterstr. 3
10969 Berlin
Germany

T / +49 302 5922 9520
E / contact@climateanalytics.org

Climate Analytics Inc. New York
115 E 23rd St, 3rd Floor, Office #319
New York, NY, 10010
USA

T / + 1 718 618 5847
E / info.ny@climateanalytics.org

Climate Analytics Lomé
61, ru 195 Quartier Agbalépédogan
s/c BP 81 555 Lomé
Togo

T / +228 22 25 65 38 / 22 25 74 74
E / togooffice@climateanalytics.org

Mis en oeuvre par :



Mandaté par :



de la République fédérale d'Allemagne

Sous la tutelle de :



En coopération avec :

