



U.F.R Sciences et Technologies

Département de physique

Mention : Physiques et Applications

Spécialité : Sciences de l'Atmosphère et de l'Océan

Mémoire de Master 2

SUJET : POTENTIELS RISQUES CLIMATIQUES EN CASAMANCE

Présente par **ADAMA THIANDOUM**

Sous la direction de **Dr Samo DIATTA**

Et sous la supervision de **Pr Moctar CAMARA**

Soutenu publiquement le 11/07/ 2020 devant le jury composé de :

Prénoms et Noms	Grades	Qualité	Établissement
Moctar CAMARA	Professeur Titulaire	Président	UASZ
Mamadou Lamine MBAYE	Maitre-Assistant	Rapporteur	UASZ
Alioune Badara SARR	Chercheur	Examineur	UASZ
Moustapha THIAME	Maitre-Assistant	Examineur	UASZ
Samo DIATTA	Maitre-Assistant	Encadrant	UASZ

Dédicaces

Je dédie ce présent travail à ma famille, particulièrement à mon papa

Abdou Thiandoum, qui m'a toujours soutenu, et encouragé.

Ma mère Maty Séne qui m'a beaucoup encouragé.

Mes frères et sœurs, mes amis.

Mention spéciale à mon très cher papa Aliou Faye, que la terre de

Kissane lui soit légère.

Mention spéciale à mon grand frère Saliou Mansaly et toute sa famille à Belfort/Ziguinchor.

Mention spéciale à mon grand frère Mbaye Séne et sa femme.

Mention spécial à mon oncle Abdou Thiaw de Thiéo et sa famille.

Remerciements

Je remercie en premier lieu ALLAH le tout puissant qui m'a donné la force et la santé pour la réalisation ce travail.

Mes remerciements vont en premier lieu à mon directeur de mémoire Monsieur Samo Diatta, toujours là quand il faut, adepte du travail et de l'efficacité, le tout agrémenter d'excellentes qualités humaines ; M. Diatta, je cherche les superlatifs qui vous correspondent mais je n'arriverai pas à faire une liste exhaustive. Vous avez dirigé mes travaux avec beaucoup d'abnégations, me laissant une très grande liberté tout en ayant un cap bien défini et m'aidant ainsi à valoriser mes travaux. Vous vous êtes toujours mis à mon niveau pour répondre à mes questions. Pour tout cela, je vous remercie.

Je remercie également les membres du jury avec à sa tête le président, pour m'avoir fait le grand honneur d'accepter d'évaluer ce travail.

Je remercie les enseignants chercheurs du département de Physique : Pr Bamol Ali Sow, Pr Moctar Camara, Dr Mamadou Lamine Mbaye, Dr Moustapha Thiam, Dr Ababacar Ndiaye, Pr Diouma Kobor, Dr Lat Grand Ndiaye, Dr Modou Tine Dr Sérigne Thiaw, Dr Joseph Samba Séne Diatta

Je remercie aussi les chercheurs du Laboratoire d'Océanographie, des Sciences de l'Environnement et du Climat (LOSEC) en particulier Dr. Ibrahima Diba, Dr. Alioune Badara Sarr, Mr. Pierre Malan Sadio, Mr. Lamine Konté, Mr. Birane Ndom, Mr. Cheikh W Diédhiou, Mr. Jule Basse, Mr. Sérigne Mbacké Colly Mr. Cherif Hamdy Sabaly Syprien Sow, Youssouph Coly, Youssouph Badji, Aram Dieye pour l'aide qu'ils m'ont apporté.

J'adresse mes particuliers remerciements à ma famille pour m'avoir toujours poussé à poursuivre mes études. Vous m'avez encouragé et donné de la force. Je suis très reconnaissant à ma mère et à mon père pour m'avoir donné une bonne éducation. Un grand merci à ma mère qui m'a toujours fait confiance dans les études et m'a soutenu dans tous les secteurs. Je voudrais aussi remercier mes frères et sœurs qui m'ont toujours soutenu avec leurs meilleurs vœux.

Enfin je remercie toute ma promotion (Amadou Diouf, Dioumacor Faye, Assane Ndiaye David Sagna Fatou Khoulé et Jacques Daman Diouf) pour les discussions enrichissantes qu'on a eues ensemble.

Résumé

Dans ce rapport de stage, nous intéressons aux potentiels risques climatiques en Casamance. L'objectif est d'utiliser la pluie satellitaire haute résolution ($0.05^\circ \times 0.05^\circ$) du « Climate Hazards group InfraRed Precipitation with Stations » (CHIRPS) de 1982 à 2018, la température issue des ré-analyses ERA5 du Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (CEPMMT) sur la période 1979-2018 et les sorties de 4 modèles climatiques régionaux (MCR) du programme COordinated Regional climate Downscaling Experiment (CORDEX), pour évaluer les changements futurs proches (2038-2067) de précipitations et températures sous deux scénarios d'émission de gaz à effet de serre RCP4.5 et RCP8.5, et ainsi donc caractériser les niveaux de risques climatiques potentiels sur certains secteurs économiques clés telle que l'agriculture l'hydrologie et la santé en Casamance. L'analyse des changements des indices climatiques extrêmes tels que la durée maximale des séquences consécutives sèches (CDD), la quantité de précipitation cumulée sur 5 jours (RX5DAY), le pourcentage de précipitation dû à des événements pluvieux correspondant au 95^e centile (R95PTOT), montre que les modèles MPI-REMO, DMI-HIRHAM et RCA4 (excepté KNMI-RACMO) prévoient une augmentation de ces événements pluvieux exceptionnels sur la partie Sud, la Casamance à l'horizon 2067. Le modèle RCA4 et la moyenne des modèles prévoient des conditions favorables au renouvellement de l'eau des nappes sur l'ensemble de la région de Casamance avec des taux importants en basse et haute Casamance sous les scénarios RCP4.5 et RCP8.5, et donc un niveau de risque relativement faible pour les ressources en eaux. Le modèle KNMI-RACMO projette une bonne source d'infiltration sur la basse et haute Casamance et des risques de tarissement à l'est de la basse Casamance, des risques accrus de disparition des ressources en eau en basse Casamance sont révélés sous le scénario RCP8.5. Le modèle MPI-REMO présente des situations opposées sous les deux scénarios avec un tarissement des aquifères pour RCP4.5 et un renouvellement pour RCP8.5. Une caractéristique inverse est observée avec HIRHAM. L'impact des changements d'indices climatiques sur la culture du riz, montre que lors de la germination que sous le scénario RCP4.5 (RCP8.5), nous observons des risques réels de destruction des plantes de riz à cause d'une augmentation des CDD de 40% à 50% sur toute la Casamance (10% et 30% en basse et haute Casamance et à 40% en moyenne Casamance). La phase de floraison se singularise avec deux niveaux de risques potentiels une insuffisance de précipitation qui pourrait altérer la croissance du riz notamment à l'est de la haute Casamance ; ou bien un surplus de précipitations qui risquerait d'immerger et détruire les germes du riz notamment en basse Casamance. Cependant le scénario RCP8.5 ne prévoit pas de risques majeurs sauf sur la partie est de la haute Casamance. La Casamance présente un niveau de risque sanitaire élevé lié à la chaleur en AMJ et un pic de risque dangereux pour les populations de la Casamance. L'évolution de l'indice de chaleur montre une augmentation nette sur la Casamance, ce qui montre que la Casamance demeure très vulnérable aux changements du climat et sa population

vulnérable (personnes âgées et enfants) est plus que jamais exposée aux risques sanitaires liés à la chaleur.

Mots clés : Changement climatique, risques climatiques, modèles régionaux, indices extrêmes, Casamance.

Abstract

In this internship report, we are interested in the potential climate risks in Casamance. The objective is to use high resolution satellite rain ($0.05^\circ \times 0.05^\circ$) from the “Climate Hazards group InfraRed Precipitation with Stations” (CHIRPS) from 1982 to 2018, the temperature resulting from the ERA5 re-analyzes of the Center European for Medium-Term Weather Forecasts (ECMWF) over the period 1979-2018 and the outputs of 4 regional climate models (MCR) from the COordinated Regional climate Downscaling Experiment (CORDEX) program, to assess near future changes (2038-2067) of precipitation and temperature under two greenhouse gas emission scenarios RCP4.5 and RCP8.5, and thus characterize the levels of potential climatic risks on Casamance. Analysis of changes in extreme weather indices such as the maximum duration of consecutive dry sequences (CDD), the amount of cumulative precipitation over 5 days (RX5DAY), the percentage of precipitation due to rainy events corresponding to the 95 percentile (R95PTOT), shows that the RCMs (except KNMI-RACMO) predict an increase in these exceptional rainy events in the southern part, the Casamance by 2067. The RCA4 model and the average of the models provide favorable conditions for the renewal of the groundwater over the entire Casamance region with significant rates in low and high Casamance under the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios, and therefore a relatively low risk level for water resources. The KNMI-RACMO model projects a good source of infiltration on the low and high Casamance and risks of drying up east of the low Casamance, increased risks of disappearance of water resources in low Casamance are revealed under the RCP8.5 scenario. The MPI-REMO model presents opposite situations under the two scenarios with a drying up of aquifers for RCP4.5 and a pure RCP8.5 renewal. An opposite characteristic is observed with HIRHAM. The impact of changes in climatic indices on rice cultivation shows that during germination only under the RCP4.5 scenario (RCP8.5), we observe real risks of destruction of rice plants due to a increase in fixed-term contracts from 40% to 50% on all Casamance (10% and 30% in low and high Casamance and to 40% on average Casamance). The flowering phase is distinguished with two levels of potential risk: insufficient precipitation which could alter the growth of rice, especially east of the high Casamance; or a surplus of precipitation which would risk submerging and destroying the rice germs, especially in lower Casamance. However, the RCP8.5 scenario does not foresee any major risks except on the eastern part of the upper Casamance.

Casamance presents a high level of health risk linked to heat in AMJ and a dangerous peak of risk for the populations of Casamance. The evolution of the heat index shows a clear increase on Casamance, which shows that Casamance remains very vulnerable to climate change and its vulnerable population (elderly and children) is more than ever exposed to the health risks associated with the heat.

Keywords: Climate change, climate risks, regional models, CORDEX, extreme indices, Casamance.

Liste des abréviations

CORDEX : COordinated Regional climate Downscaling Experiment

CHIRPS : Climate Hazards group InfraRed Precipitation with Stations

CEPMET: Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme

CC : Changement Climatique

CA : Capacité d'Adaptation

CCNUCC : Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques

ERA5 : Ensemble de données de ré-analyse pour 5^e version

GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

GES : Gaz à Effet de Serre

IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change

MCR : Modèle Climatique Régional

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

OMM : Organisation Météorologique Mondiale

USGS-EROS: Geological Survey Earth Resources Observation and Science Center

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Description des modèles climatiques régionaux utilisés.

Tableau 2.2 : Description des 3 indices de précipitations utilisés dans l'analyse des événements climatiques extrême comme utiliser dans (Peterson et al., (2001).

Tableau 2.3 Quelques algorithmes d'indice de chaleur (Anderson et al. 2013).

Tableau 2.4 Les intervalles de supportabilité des conditions météorologiques traduisant l'IC.

Tableau 2.5: Seuils d'inconforts suivant l'indice de chaleur en fonction de la température et l'humidité relative.

Liste des figures

Fig. 1.1: Représentation schématique de la circulation atmosphérique globale. Adapté de Srinivasan (2006)

Figure 1.2. Scénarios d'émissions de GES pour la période 2000-2100 (en l'absence de politiques climatiques additionnelles) et projections relatives aux températures en surface (Source : GIEC 2007)

Figure 2.1: Situation géographique de la Casamance

Figure 3.1: Moyenne estivale (JJAS) de la pluie pour les observations chirps (1982-2005) et de quatre (4) modèles climatiques régionaux et leur moyenne en Casamance.

Figure 3.2: Biais des modèles MCR de précipitation par rapport aux observations chirps pour la période de 1982 à 2005 pour la période (JJAS) en Casamance

Figure 3.3: Distribution de la température moyenne sur la période historique 1982-2005 pendant la période DJF obtenue avec ERA5, les MCR et leur moyenne en Casamance.

Figure 3.4: Distribution de la température moyenne sur la période historique 1982-2005 pendant la période MAM obtenue avec ERA5, les MCR et leur moyenne en Casamance.

Figure 3.5: Distribution de la température moyenne sur la période historique 1982-2005 pendant la période JJA obtenue avec ERA5, les MCR et leur moyenne en Casamance.

Figure 3.6: Distribution de la température moyenne sur la période historique 1982-2005 pendant la période SON obtenue avec ERA5, les MCR et leur moyenne en Casamance.

Figure 3.7: Biais de la température moyenne sur la période historique 1982-2005 en MAM des MCR en Casamance.

Figure 3.8: Biais de la température moyenne sur la période historique 1982-2005 en JJA des MCR en Casamance.

Figure 3.9: Distribution du taux de changement de R95PTOT entre le futur proche (2038-2067) et la période historique (1976-2005) durant JJAS pour les 4 modèles climatiques régionaux et leur moyenne avec le RCP4.5 en Casamance

Figure 3.10: Distribution du taux de changement de R95PTOT entre le futur proche (2038-2067) et la période historique (1976-2005) durant JJAS pour les 4 modèles climatiques régionaux et leur moyenne avec le RCP8.5 en Casamance.

Figure 3.11: Distribution des taux de changement de la durée maximale du nombre de jours consécutifs secs (CDD) entre le futur Proche (2038-2067) et la période historique (1976-2005) durant les mois juin-juillet (JJ) pour les 4 modèles climatiques Régionaux et leur moyenne forcés par le scénario RCP4.5 en Casamance.

Figure 3.12: Distribution des taux de changement de la durée maximale du nombre de jours consécutifs secs (CDD) entre le futur Proche (2038-2067) et la période historique (1976-2005) durant les mois juin-juillet (JJ) pour les 4 modèles climatiques Régionaux et leur moyenne forcés par le scénario RCP8.5 en Casamance.

Figure 3.13: Taux de changement de RX5day entre le futur proche (2038-2067) et la période historique (1976-2005) durant le mois d'Octobre pour 4 modèles climatiques régionaux (MCR) et leur moyenne sous le scénario RCP4.5 en Casamance

Figure 3.14: Taux de changement de RX5day entre le futur proche (2038-2067) et la période historique (1976-2005) durant le mois d'Octobre pour 4 modèles climatiques régionaux (MCR) et leur moyenne sous le scénario RCP8.5 en Casamance.

Figure 3.15: Distribution de l'indice de chaleur lié à la température maximale en AMJ et pour la période historique (1976-2005) et future proche (2038-2067) sous les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 en Casamance.

Figure 3.16: Distribution de l'indice de chaleur lié à la température minimale en AMJ et pour la période historique (1976-2005) et future proche (2038-2067) sous les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 en Casamance.

Table des matières

Dédicaces	i
Remerciements	ii
Résumé	iii
Abstract	v
Liste des abréviations	vii
Liste des tableaux	viii
Liste des figures	ix
Table des matières	xi
Introduction.....	1
Chapitre I: Généralité sur le climat et les risques climatiques	3
I.1. Climat et changement climatique.	3
I.2. Notion de Risques climatiques	7
I.3.1. Risques liés à l’agriculture.	8
I.3.2. Risques liés à l’hydrologie et aux ressources en eau.....	9
I.3.3. Risques liés à la santé.....	10
I.3.4. Capacité d’adaptation.....	11
Chapitre II: Données et méthodologies	13
II.1 Zone d’étude.....	13
II.2. La climatologie de la Casamance	14
II.3. Données	15
II.4. Méthodes et outils.....	17
Chapitre 3 : Analyses des résultats et discussions.....	22
III.1. Validation des sorties de modèles.	22
III.2. Identification des risques climatiques potentiels.....	31
III.2.1 Risque potentiel sur l’hydrologie	32
III.2.2. Risque potentiel lié à l’agriculture	35
III.2.3. Risques liés à la santé	41
Conclusion	45
Bibliographie.....	47

Introduction

L'Afrique de l'Ouest est une région où les populations sont toujours confrontées à une forte variabilité climatique. En plus de cette variabilité, les changements climatiques résultant des émissions anthropiques de gaz à effet de serre viennent s'ajouter à ces conditions difficiles (Sarr et al. 2017). Les phénomènes climatiques extrêmes sont en augmentation et leur intensité a également tendance à augmenter, de même que l'impact économique et les dégâts causés par les gaz qui en résultent (GIEC, 2014).

De nombreuses régions d'Afrique ressentent déjà les effets des phénomènes climatiques extrêmes et les populations qui y habitent, sont vulnérables et courent d'énormes risques dus aux inondations, à l'érosion des sols, à la désertification, aux sécheresses et aux mauvaises récoltes (Panthou et al. 2013). Plusieurs facteurs concourent à augmenter la vulnérabilité des populations africaines (contexte économique et social, gouvernance, gestion des ressources, etc.) et des secteurs aussi essentiels pour le développement comme l'agriculture, les ressources en eau et la santé sont les premiers à subir les effets de ces changements.

La Casamance subit depuis le début des années 1970 une forte variabilité climatique aux conséquences environnementales et socio-économiques souvent désastreuses. Les principales manifestations de cette variabilité climatique portent sur les déficits pluviométriques plus ou moins importants et l'élévation des températures. Cette dégradation des conditions climatiques a pour conséquence la salinisation des sols et des eaux, l'accélération de la baisse de la production agricole en général, le recul de la riziculture de bas-fonds en particulier et la déstructuration des ressources naturelles (Sané et al. 2010).

L'agriculture en Casamance et dans ses environs, comme le Sénégal et l'Afrique de l'Ouest en général, est principalement dépendante de la pluviométrie qui reste le paramètre le plus variable au cours de l'année, ou d'une année à une autre et aussi d'un lieu à un autre. La pluviométrie est donc la cause première de la réussite ou de l'échec des cultures. Les relations entre le climat et l'agriculture sont une évidence. Au regard des perturbations climatiques que subit cette zone, les efforts pour atténuer les impacts du changement climatique impliquent de réduire la vulnérabilité dans cette zone. Il en est de même pour les ressources en eau qui restent très tributaires de la qualité de la saison de mousson. La santé des populations est égale fortement perturbée par le changement climatique avec l'émergence de maladies à vecteurs, avec les changements environnementaux et du cadre de vie.

Le présent travail a pour objectif d'étudier les risques potentiels du changement climatique sur l'agriculture, les ressources en eau, et la santé des populations, en utilisant un ensemble d'indices climatiques issus d'observations et de modèles climatiques régionaux. Il s'agit d'évaluer leur

changement à moyen terme en Casamance. Cette étude des risques climatiques potentiels tiendra compte de deux types de scénarios d'émission des gaz à effet de serre : le RCP4.5 et le RCP8.5.

Au chapitre 1, nous présentons les généralités sur les notions de climat et changement climatique, une définition des notions de risques climatiques et d'adaptation face au changement climatique est aussi faite. Nous ferons ensuite une description détaillée de la zone d'étude, de sa climatologie et par la suite les données et la méthodologie utilisées. Le chapitre 3 sera consacré à l'analyse et la discussion des résultats obtenus. Enfin la dernière partie est réservée à la conclusion et aux perspectives.

Chapitre I: Généralité sur le climat et les risques climatiques

Ce chapitre a pour but de définir et de clarifier les concepts et notions utilisés dans cette étude. L'un des problèmes majeurs est qu'aucun consensus exact n'existe au sein de la communauté scientifique internationale sur les normes de définitions pour la plupart des concepts clés. Tous ces concepts sont souvent décrits comme des concepts rhétoriques, leurs définitions étant caractérisées par le flou et leurs significations se chevauchant souvent (Hinkel, 2011).

I.1. Climat et changement climatique

Le climat se définit comme l'ensemble des phénomènes (pression, température, humidité, précipitations, ensoleillement, vent, etc.), qui caractérisent l'état moyen de l'atmosphère et de son évolution en un lieu donné. Mahé (1993) et Gibbs (1987) précisent que le terme "climat" est utilisé pour indiquer la probabilité statistique d'occurrence de divers états de l'atmosphère dans un lieu ou une région donnée pendant une certaine période. Selon l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM), le climat est défini comme « la synthèse des conditions météorologiques dans une région donnée, caractérisée par des statistiques à long terme (valeurs moyennes, variances, probabilités de valeurs extrêmes, etc.) des éléments météorologiques (températures, précipitations, vents, etc) dans cette région ». Le climat à la surface de la Terre est régi par les lois du système climatique, système complexe dont les principales composantes sont l'atmosphère, la lithosphère (surface terrestre), l'hydrosphère (lacs, mers, océans et autres plans d'eau), la cryosphère (les glaces du monde entier) et la biosphère (l'ensemble des êtres vivants, en particulier la végétation, ainsi que la matière organique des sols). Ces 5 composantes sont en interaction permanente par l'intermédiaire de phénomènes physiques, chimiques et biologiques tels que le rayonnement, le cycle de l'eau, le cycle du carbone, le transfert de chaleur, etc. Le climat en tant que tel ne constitue donc que la résultante aux échelles locales/régionales de ces processus, ce qui explique la complexité et la diversité des climats existants sur Terre (Lespinas 2008 et Diédhiou 2017). La variabilité naturelle du climat se définit comme la fluctuation des valeurs saisonnières ou annuelles de ses différentes caractéristiques par rapport aux moyennes temporelles de référence.

Il est important de connaître la circulation atmosphérique afin de mieux comprendre la climatologie de la région d'étude. A l'échelle globale, la circulation atmosphérique résulte de deux mouvements combinés : une circulation zonale (Est-Ouest) et une circulation méridienne (Nord-Sud).

- La zone intertropicale, qui s'étend de 27°S à 27°N, caractérisée par l'existence de vastes cellules convectives (cellules de Hadley).

- La zone extratropicale, qui s'étend au-delà de 27°N ou 27°S en direction des pôles, caractérisée par un climat plus variable (cellules de Ferrel et cellules polaires).

C'est l'existence de ces circulations préférentielles qui explique la présence des régimes de vents dominants à la surface de la Terre (régime d'alizé d'est aux tropiques, d'ouest aux latitudes moyennes et d'est aux pôles) ainsi que la présence de zones alternées de basses et hautes pressions (Figure 1.1).

Au sein de la zone intertropicale, la circulation atmosphérique peut être décrite comme suit : le réchauffement important de l'air se situe au niveau de l'équateur thermique, bande latitudinale correspondant au maximum d'insolation et situé au centre de la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT) sur la figure 1.1, provoque une ascendance. Cette ascendance provoque la dilatation et donc le refroidissement de l'air au sein duquel la vapeur d'eau se condense. La condensation conduit progressivement à la formation de nuages qui eux-mêmes finissent par générer d'abondantes précipitations. Ce phénomène est à l'origine de la présence des vastes forêts équatoriales que l'on retrouve au centre de l'Afrique, au nord de l'Amérique du Sud et dans certaines îles des Océans Indien et Pacifique (Lespinas 2008). L'air, une fois parvenu au sommet de la troposphère, est sec et froid. Il est alors transporté soit vers le nord soit vers le sud par la branche supérieure de la cellule de Hadley. L'air étant situé à une altitude élevée, son énergie potentielle est importante: le transfert d'énergie entre les zones équatoriales et subtropicales correspond en réalité à un transfert d'énergie potentielle et non à un transfert de chaleur comme on pourrait le penser. A l'extrémité de la branche supérieure de la cellule de Hadley, l'air entame une phase de descente dans les régions subtropicales situées vers 30° de latitude (nord et sud). Les régions continentales subtropicales sont alors asséchées par cette descente d'air sec en provenance des hautes altitudes; elles connaissent ainsi un climat très aride à l'origine de la ceinture de grands déserts que l'on trouve dans les deux hémisphères vers 30° de latitude. Enfin, l'air est véhiculé au niveau des basses couches de l'atmosphère par un courant de retour vers les zones d'ascendance équatoriales, lui-même dévié vers l'ouest par la force de Coriolis. Ce phénomène est à l'origine du régime de vent d'est (alizés) dans la zone intertropicale. Les alizés en provenance de chaque hémisphère convergent alors au niveau de la ZCIT avant de subir à nouveau un mouvement d'ascendance. Cette première « boucle » constitue la cellule de Hadley, dont le rôle est de transférer l'énergie excédentaire des basses

latitudes vers les hautes latitudes. La rotation de la Terre, associée à sa sphéricité, empêche cependant l'extension des cellules de Hadley jusqu'aux pôles, (Lespinas ,2008). Au final, la circulation intertropicale a pour effet d'accumuler des masses d'air chaud en région subtropicale, donnant naissance aux anticyclones subtropicaux centrés sur les latitudes 27°N et 27°S (ex : l'Anticyclone des Açores et St Helene), mais qui peuvent s'étendre bien au-delà, en particulier dans l'hémisphère nord pendant l'été. Au sein de la zone extratropicale, le mécanisme qui assure le transfert d'énergie vers les pôles est très différent de celui des cellules tropicales. Ici, le transfert d'énergie est assuré par un mélange presque horizontal de l'air. La zone extratropicale est en fait caractérisée par un gradient méridien de température très important et, à cause de l'équilibre géostrophique (équilibre entre force de pression et force de Coriolis), le vent d'ouest devient intense, surtout en altitude: c'est le courant-jet. La cellule de Ferrel correspond en particulier à la zone où les contrastes thermiques horizontaux sont les plus marqués, du fait de la rencontre entre masses d'air chaudes tropicales et masses d'air polaires froides et sèches. Cette rencontre est à l'origine de la formation de nombreuses instabilités qui se manifestent sous forme de structures tourbillonnaires autour de zones de basses pressions (dépressions) et de zones de hautes pressions (anticyclones), à l'origine de fronts météorologiques. Le climat est donc très variable dans cette zone, notamment en fonction des saisons; on parle de climat des latitudes moyennes. Enfin, les cellules polaires coiffent les hautes latitudes. Ce sont les zones où les masses d'air froides descendent au-dessus des pôles et s'élèvent au contact avec les cellules de Ferrel, au niveau du front polaire. Dans cette zone, le climat est sec et froid. Ce schéma simpliste de la circulation générale moyenne est localement modifié par la configuration et la répartition des continents et des océans. Il évolue également au cours de l'année en fonction de la variation latitudinale du maximum d'insolation (et donc de la ZCIT), qui dépend de la position de la Terre par rapport au Soleil. Ainsi, le maximum d'insolation se situe le plus au nord au solstice d'été (tropique du cancer) tandis qu'il se situe le plus au sud au solstice d'hiver (tropique du capricorne), impliquant parallèlement une migration latitudinale du positionnement de la ZCIT. De ce fait, le schéma de circulation atmosphérique présenté sur la figure 1.2 est « décalé » vers le sud en hiver et vers le nord en été, (Lespinas, 2008)

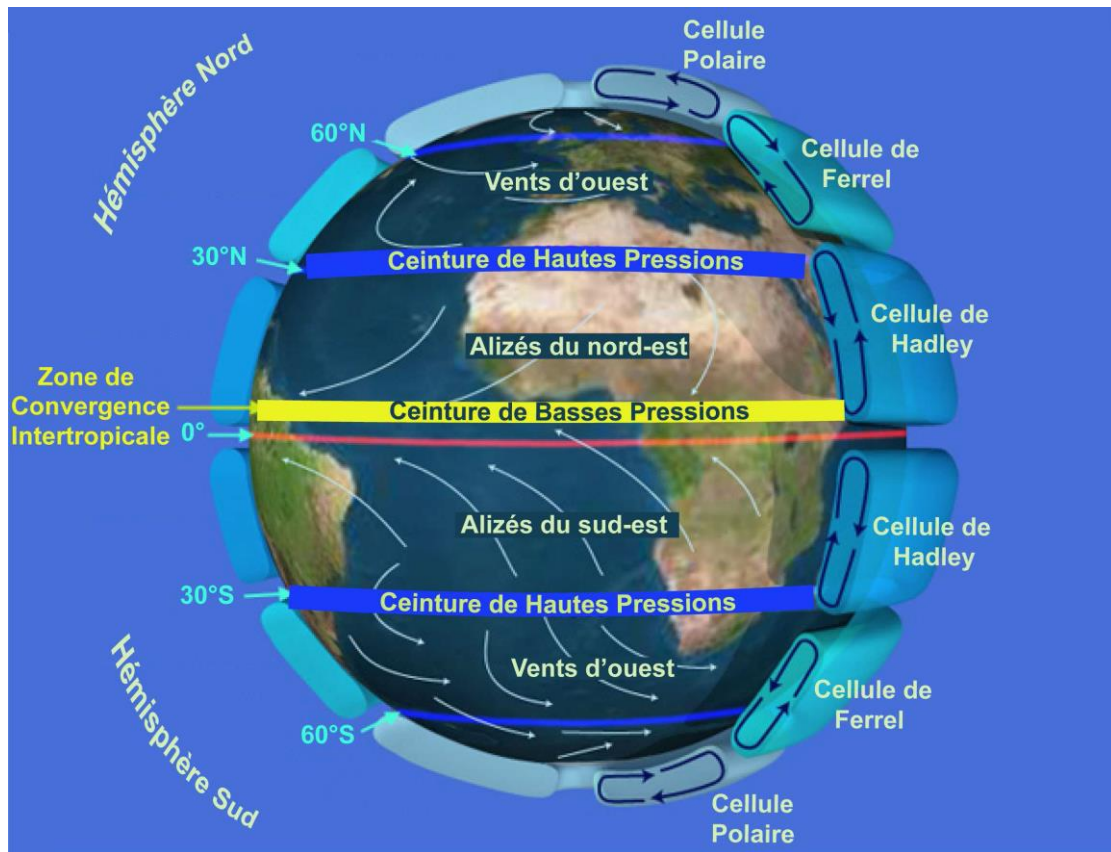


Fig. 1.1: Représentation schématique de la circulation atmosphérique globale. Adapté de Srinivasan (2006).

L'ensemble de la communauté scientifique et la population en général semblent avoir pris conscience de l'importance des enjeux environnementaux, économiques et sanitaires relatifs au changement climatique. Une confusion règne cependant quant à la définition exacte du terme changement climatique. Le Groupe Intergouvernemental d'évolution sur le Climat (GIEC) entend par changement, toute évolution du climat dans le temps, qu'elle soit due à la variabilité naturelle ou aux activités humaines. Cette définition est très différente de celle définie de la Convention-cadre de l'Organisation des Nations Unies (CCNUCC) qui définit par changement climatique toute modification du climat causée directement ou indirectement par les activités humaines qui modifient la composition de l'atmosphère, et s'ajoutent à la variabilité climatique naturelle observée sur des périodes de temps comparables (GIEC, 2007). Détecter un changement climatique consiste à démontrer que l'évolution observée d'une variable climatique est incompatible (au sens statistique du terme) avec la variabilité naturelle intrinsèque. Les causes de ce changement peuvent très bien être naturelles, c'est-à-dire résulter d'un forçage externe naturel (activité solaire, volcanisme, etc.) ou bien d'origine anthropique

(GES, aérosols, etc.). L'attribution au changement constaté d'une origine anthropique consiste alors à démontrer que le changement détecté est cohérent avec une combinaison donnée de forçages naturels et anthropiques, et non cohérent avec des explications alternatives physiquement plausibles (Hegerl et al. 2007). Cependant, le rapport du GIEC (2007-2013) ne souligne que les activités humaines, tel que l'usage des énergies fossiles qui a conduit à une hausse exceptionnelle de la concentration des gaz à effet de serre (GES) transformant le climat à un rythme jamais vu par le passé, comme illustré sur la figure 1.2. L'Afrique de l'Ouest a enregistré une augmentation de température durant ces dernières décennies due à une augmentation des GES (Sylla *et al*, 2016). Les travaux du GIEC prévoient une élévation des températures dans le Sahel supérieure à celle de la zone côtière. Concernant les précipitations, les projections indiquent une augmentation au niveau des zones côtières. Ces modifications climatiques auront des effets sans précédent sur les populations et les écosystèmes vulnérables.

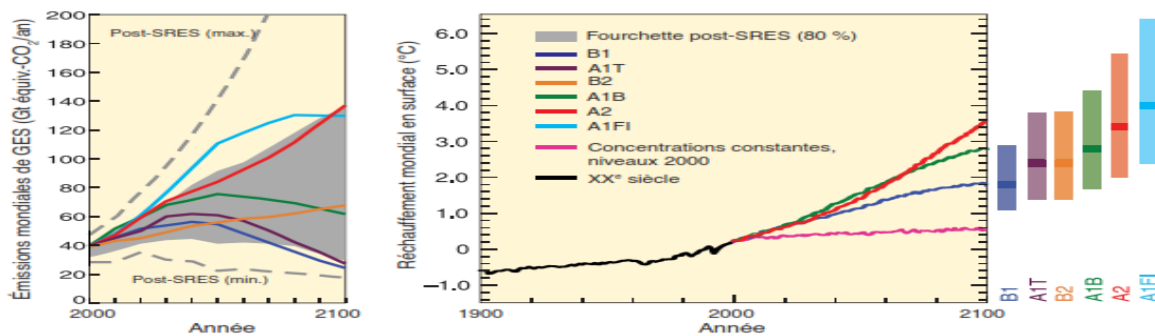


Figure 1.2 : Scénarios d'émissions de GES pour la période 2000-2100 (en l'absence de politiques climatiques additionnelles) et projections relatives aux températures en surface (Source : GIEC 2007)

Les définitions utilisées dans le cadre de ce mémoire sont celles du GIEC. Un intérêt sera davantage accordé à la variabilité des tendances de la pluviométrie et de la température qui est un phénomène intra et interannuel dans notre zones étude

I.2. Notion de risques climatiques

Le risque climatique est lié à la vulnérabilité accrue des activités souvent économiques par rapport aux variations directes des indices climatiques (températures, précipitations, vents, neiges...). Le risque climatique est donc une réalité préoccupante ; par exemple dans de nombreux secteurs économiques tel que l'agriculture, l'énergie, le textile, le tourisme. Le risque climatique est beaucoup plus important que le risque de marché traditionnel (taux d'intérêt, change, matières premières...) et peut expliquer à lui seul l'essentiel de la volatilité financière.

Un certain nombre de risques sont directement liés aux conditions climatiques : tempêtes, sécheresses, feux de forêts, inondations ou encore canicules. Le 4^e rapport du GIEC a mis en lumière pour l’Afrique la probabilité d’un réchauffement de l’ordre 1,1°C à 2,9°C dans les cinquante prochaines années (GIEC, 2007). Les impacts sur les ressources en eau pourraient conduire à des situations dramatiques sur la disponibilité des ressources en eau pour l’homme et l’environnement. L’Afrique souffre de l’un des taux de vulnérabilité au climat les plus élevés au monde. Selon l’Alliance panafricaine pour la justice climatique, plus de 50 % de la valeur totale des exportations du continent et 21 % de son PIB total dépendent de l’agriculture. Compte tenu de la fréquence croissante des événements météorologiques et climatiques extrêmes, les villes côtières d’Afrique sont exposées à un risque toujours plus grand d’inondation et de décès causés par des chaleurs extrêmes ou des maladies (Chiemi Hayashi et Thomas Kerr 2012). Cette vulnérabilité est exacerbée par les problèmes de développement tels que l’insuffisance des infrastructures et des technologies, la dégradation des écosystèmes, les catastrophes complexes et les conflits (Ahouangan et al, 2014). L’enjeu est donc de taille pour l’Afrique de l’Ouest qui doit, par conséquent, continuer à améliorer les politiques et les stratégies existantes en matière de gestion du changement climatique. Dans le sahel, les populations qui vivent dans les bidonvilles sont actuellement et resteront vulnérables au changement climatique car ils ont tendance à vivre le long des berges, sur les pentes sujettes aux glissements de terrain, près de sols pollués, sur des terres désertifiées, au sein de structures instables vulnérables aux inondations, et le long de quais dans les zones côtières. Au Sénégal, la problématique du changement climatique représente une contrainte majeure au développement du pays où l’agriculture représente le premier pourvoyeur d’emplois (Sylvestre, 2017). Depuis une trentaine d’années le climat se manifeste essentiellement par une recrudescence d’événements extrêmes climatiques comme les sécheresses et météorologiques comme les inondations, et une grande variabilité dans la longueur des saisons pluvieuses, et même des saisons thermiques. Ainsi, plusieurs secteurs socio-économiques sont exposés aux risques climatiques au Sahel (Rapport au Premier ministre et au Parlement 2018)

I.3.1. Risques liés à l’agriculture.

Le secteur agricole qui comprend l’agriculture proprement dite, l’élevage, la pêche, la foresterie, etc. n’est pas épargnée par le manque d’eau, les perturbations globales de la saison des pluies, la montée de la mer, les sécheresses, etc. L’agriculture subsaharienne est essentiellement pluviale, ce qui implique de fortes contraintes sur les productions et les modes

de vie. Dès lors, une agriculture est caractérisée par une dépendance quasi-totale envers la pluie, d'un usage faible d'apports extérieurs tels que des semences ou des fertilisants améliorés, d'une absence de mécanisation et des liens faibles aux marchés ; elle devient vulnérable et exposée. La précarité du secteur primaire sahélien s'explique au moins en partie par sa grande vulnérabilité aux effets du changement climatique. Les producteurs agricoles déplorent un bouleversement climatique qui a des conséquences sur l'irrégularité des saisons de croissance, la perturbation profonde du cycle des cultures. Les agriculteurs changent d'ores et déjà leurs pratiques en utilisant de nouvelles variétés, en associant des cultures ou transition de culture (exemple : de l'arachide à la pastèque).

La diminution de la productivité des cultures en raison du stress due à la chaleur et/ou à l'eau et à la dynamique changeante des ravageurs et des maladies peut entraîner des changements dans la demande et la disponibilité des intrants agricoles, y compris les variétés de semences, les engrais et les pesticides. Après la récolte, les produits agricoles font face à un risque de détérioration supplémentaire lié à l'augmentation des températures, de l'humidité, des parasites et des maladies. La transformation de produits nécessitant de l'eau est menacée par une qualité et/ou une quantité d'eau diminuées ou irrégulières. Pendant ce temps, le traitement, le stockage et les installations agricoles sont de plus en plus exposés aux inondations et aux tempêtes causées par l'intensification des fortes pluies et événements météorologiques. A cela s'ajoute les infrastructures routières permettant d'exploiter les produits agricoles qui sont fortement touchés pour les phénomènes météorologiques et climatiques. Dans des endroits en Casamance, certaines routes deviennent déjà impraticables pendant le pic de précipitations de la saison des pluies. Dans les zones montagneuses, y compris les hauts plateaux de Guinée, les fortes pluies augmentent le risque de glissements de terrain qui endommagent et ferment les routes et les ponts. Au Sahel, l'augmentation prévue des précipitations (centrées autour du Niger) et l'intensité des précipitations posent un défi particulier à la route trans-sahélienne ouest-est (Dakar à Ndjamena) et aux routes environnantes, car celles-ci n'ont pas été construites pour résister à de fortes pluies ou à des inondations (Ndao et al, 2012).

I.3.2. Risques liés à l'hydrologie et aux ressources en eau

L'augmentation des températures, le changement des régimes pluviométriques et l'élévation du niveau de la mer pourraient de diminuer la qualité de l'eau et de modifier la disponibilité de l'eau, ce qui pourrait avoir des répercussions sur l'agriculture, l'hydroélectricité et l'utilisation commerciale et domestique de l'eau dans la région. L'Afrique de l'Ouest est fortement

dépendante des ressources en eau transfrontalier, avec 11 grands bassins fluviaux transfrontaliers.

Les changements prévus sur les régimes pluviométriques auront des impacts visibles sur les principaux bassins fluviaux de l'Afrique de l'Ouest qui devraient voir leur débit diminuer. D'ici 2050, le débit des fleuves au Sénégal et en Gambie diminuera de 8% et 22% respectivement. Les impacts projetés pour le fleuve Niger varient, mais la plupart des modèles suggèrent une baisse des apports annuels moyens d'ici les années 2050. Les hauts plateaux du Fouta Djallon, le «château d'eau» de l'Afrique de l'Ouest, devraient connaître une réduction des précipitations pouvant atteindre 26% d'ici 2100. Des études approfondies, Malou et Dacosta (1999) classent la gestion des ressources en eau au Sénégal parmi les secteurs les plus sensibles aux mutations du climat et ceci malgré le potentiel de ressources hydriques relativement important de l'ordre de 35 milliards de m³/an dont dispose le pays. De plus, les recherches menées, au Sénégal, sur la base de scénarios d'émission de GES prédisent un réchauffement de l'ordre de 2 à 4 °C, une baisse de la couverture nuageuse de 5 à 10 % et, corrélativement, une baisse de la pluviométrie de 5 à 25 % (Gaye 1986, Malou et Dacosta 1999). Les changements de précipitations se caractérisent par une distribution méridienne, des diminutions relatives de la pluviométrie. Le Sud s'asséchera plus que le Nord quel que soit la sensibilité. Cette réduction des précipitations est plus sensible au Sud-Ouest (-17 % avec la sensibilité 2.5°C) tandis qu'elle est moins perceptible au Nord-Ouest.

I.3.3. Risques liés à la santé

Le changement climatique constitue une nouvelle menace importante pour la santé publique et modifie la façon dont nous devons envisager la protection des populations vulnérables.

Le dernier rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2014) a confirmé qu'il existait des preuves palpables que l'activité humaine agissait sur le climat de la planète et a souligné que cela avait de multiples incidences sur la santé humaine. La variabilité et la modification du climat sont des causes de décès et de maladies à travers les catastrophes naturelles qu'elles entraînent – telles que les vagues de chaleur, les inondations et les sécheresses. En outre, de nombreuses maladies importantes sont hautement sensibles au changement des températures et du régime des précipitations. Ce sont par exemple des maladies à transmission vectorielle courantes comme le paludisme et la dengue ainsi que d'autres grandes tueuses comme la malnutrition et les maladies diarrhéiques. Le changement climatique contribue déjà à alourdir la charge mondiale de morbidité et ce phénomène devrait s'accroître

à l'avenir. Les effets du climat sur la santé humaine ne seront pas également ressentis sur toute la planète (GIEC 2007). Les populations des pays en développement, notamment celles des petits états insulaires, des zones arides ou de haute montagne, et des zones côtières densément peuplées sont considérées comme particulièrement vulnérables. Heureusement, une grande partie de ces risques pour la santé peuvent être évités grâce aux programmes et interventions sanitaires existants. Une action concertée pour renforcer les composantes clés des systèmes de santé et promouvoir des choix de développement sains peut permettre d'améliorer dès à présent la santé publique tout en réduisant la vulnérabilité au futur changement climatique. L'organisation mondiale de la santé (OMS) soutient dans ce sens les états membres dans leur action visant à protéger la santé publique contre les effets du changement climatique et est le porte-parole du secteur de la santé dans la riposte globale du système des Nations Unies à ce défi planétaire.

I.3.4. Capacité d'adaptation

La perception de la notion d'adaptation varie d'une société à une autre et dépend des moyens d'existence des populations et du niveau de développement du pays. Elle se réfère à tout ajustement dans les systèmes naturels ou humains pour répondre aux impacts réels ou prévus du changement climatique (GIEC, 2001). Dans le contexte des changements climatiques, l'adaptation a lieu au moyen d'ajustements visant à réduire la vulnérabilité ou à améliorer la résilience face à des changements observés ou prévus au niveau du climat. Elle comporte des modifications des processus, des perceptions, des pratiques et des fonctions (Brown, et al. 2007). L'adaptation aux changements climatiques ou au dérèglement climatique désigne les stratégies, initiatives et mesures individuelles ou collectives (État, entreprises, associations, collectivités, etc.) visant, par des mesures adaptées, à réduire la vulnérabilité des systèmes naturels et humains contre les effets réels ou attendus des changements climatiques (GIEC, 2007). Ces stratégies sont complémentaires des stratégies d'atténuation, qui visent à émettre moins de gaz à effet de serre et à restaurer ou protéger les capacités de puits de carbone des écosystèmes ou agroécosystèmes. Généralement, et en écartant de la discussion les incertitudes sur les impacts du changement climatique, la vulnérabilité (V) et la capacité d'adaptation (CA) sont deux caractéristiques considérées comme inversement proportionnelles, un faible niveau de V engageant de bonnes CA, et *vice versa*. Beaucoup d'auteurs (Kundzewicz et al. 2007 ; Parry et al. 2007 ; WHO 2009) ont montré le besoin réel d'un renforcement de la capacité d'adaptation des populations africaines pour faire face aux changements climatiques. Ainsi, la

prise en compte des connaissances populaires occupe une place importante dans les stratégies de gestion des risques liés au changement climatique (Yohannes, 2012).

Les scientifiques (IPCC, 1995; Kelly et Adger, 2000) ont ainsi établi que la vulnérabilité était une fonction à la fois de l'exposition du système aux aléas naturels et de sa capacité d'adaptation. Parfois, la sensibilité du système est également intégrée, mais la distinction capacité d'adaptation/sensibilité reste assez floue. On peut malgré tout trouver diverses définitions de la capacité d'adaptation, qui se rapprochent plus ou moins de celle proposée par le GIEC (2001): si l'adaptation au changement climatique (CC) «indique l'ajustement des systèmes naturels ou humains en réponse à des stimuli climatiques présents ou futurs ou à leurs effets, afin d'atténuer les effets néfastes ou d'exploiter des opportunités bénéfiques», la CA représente «la capacité d'ajustement face aux changements climatiques (y compris à la variabilité climatique et aux extrêmes climatiques)». En effet, l'ultime finalité de l'adaptation au CC, si elle passe par la réduction de la sensibilité du système aux risques naturels et par l'accroissement de sa résilience (Adger et al. 2005), est bien l'amélioration ou le maintien de la qualité de la vie des êtres humains. Cette dernière passe cependant aussi, par exemple, par la préservation de la biodiversité et de l'environnement en général. C'est donc au travers d'un regard large, celui de la soutenabilité, que doit être pensée l'adaptation. Ainsi, les auteurs s'appliquent dans leur très grande majorité à rappeler que la CA dépend des facteurs sociaux, politiques, économiques, culturels, institutionnels, environnementaux..., et qu'elle relève de différentes échelles territoriales, communautaires et temporelles.

Chapitre II: Données et méthodes

Ce chapitre est consacré d'une part à la présentation et à la description de la climatologie du domaine d'étude et d'autre part à la description des différentes données et méthodes utilisées au cours du stage.

II.1 Zone d'étude

La **Casamance** («Kasa») (en portugais: *Casamansa*) est une région historique et naturelle du Sénégal située au sud du pays et bordant le fleuve Casamance (Figure 2.2). Elle s'étend d'est en ouest, de part et d'autre du fleuve qui lui a donné son nom. Celui-ci, long de 300 km, prend sa source à l'est de Kolda, près de Fafakourou, en haute Casamance (Sané et al. 2010). La Casamance est limitée à l'ouest par l'Océan Atlantique, à l'est par le Koulountou, affluent du fleuve Gambie, au nord par la République de Gambie, au sud par la République de Guinée Bissau et au sud-est par la république de Guinée. La Casamance est divisée en trois zones géographiques : la haute Casamance (HC), la moyenne Casamance (MC) et la basse Casamance (BC). La basse Casamance : actuelle région administrative de Ziguinchor, s'étend de part et d'autre du fleuve, de l'Océan Atlantique au fleuve Soungrougrou. Très arrosée, elle présente deux formations végétales distinctes: la forêt aux essences hautes et puissantes sur les plateaux, la mangrove sur les rives du fleuve et des marigots. La moyenne Casamance : actuel région administrative de Sédhiou, se situe entre la haute et la moyenne Casamance, encore assez humide mais où la forêt demi-sèche ne se limite qu'aux abords des rivières. La haute Casamance : actuel région administrative de Kolda, moins arrosée que la basse et moyenne Casamance, caractérisée par des forêts claires trouées par des étendues herbeuses.

Situation géographique de la Casamance

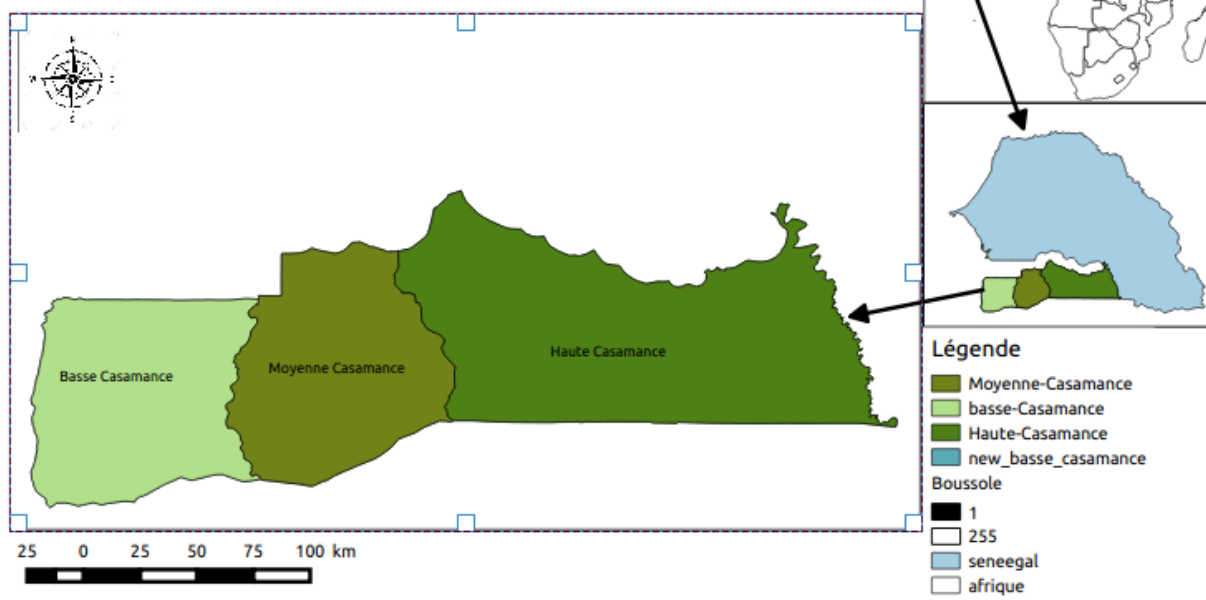


Figure 2.1: Situation géographique de la Casamance

II.2. La climatologie de la Casamance

Situé au du Sénégal, la région de la Casamance a un climat tropical de type soudano-guinéen : chaud et humide avec une température moyenne annuelle de 27°C. Les températures sont en permanence assez élevées de jour et descendent rarement en dessous de 20° C la nuit, les mois de décembre et janvier sont les plus frais. Le climat de cette région est caractérisé par une alternance entre une saison sèche de Novembre à Mai et une saison humide qui dure presque cinq mois : de juin à octobre, les apports des mois de mai et novembre étant presque négligeables dans le total moyen annuelle qui est défini par des précipitations supérieurs à 1000mm dans la région (Malou et al. 1992). La végétation est tropicale, composée majoritairement de forêt. D'immenses forêts parcourues par des crues d'eau « bolongs » couvrant 62% de la superficie (Faye et al. 2013).

Avec un relief plat et peu élevé dans l'ensemble, la Casamance dispose d'une gamme variée de sols. On y retrouve, en général, des sols ferrugineux tropicaux et ferralitiques sableux ou argilo-sableux sur les plateaux et terrasses, exploités essentiellement en cultures pluviales (arachide, niébé, riziculture); des sol de versants caractérisés par une bonne aptitude à

l'arboriculture et le maraîchage; des sols hydro-morphes propices au développement des cultures de contre-saison et de la riziculture et enfin des sols acidifiés ou salés (les tannes), impropres à l'agriculture généralement localisées sur les parties basses du fleuve Casamance.

Ces sols riches et variés dans l'ensemble sont emboîtés dans un paysage de plateaux qui s'abaissent vers la côte parsemée par un réseau hydrographique de plus en plus dense fait de vallées alluviales et de marigots permanents (Sané et al. 2010).

II.3. Données

Dans cette étude, nous avons utilisé trois types de jeux de données : des données de ré-analyses, des données d'observation satellitaires et des sorties de modèles climatiques régionaux. Des paramètres comme la température, la précipitation et l'humidité relative obtenues à partir de ces données, ont été utilisés pour calculer des indices climatiques permettant d'évaluer les risques climatiques.

❖ Les données de ré-analyses

Les données de températures qui vont nous servir de références, sont des données de ré-analyses issu du Centre Européen Pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (CEPMMT). Les projets de ré-analyses du CEPMMT sont des projets météorologiques qui combinent des observations et simulations qui sont destinées à ré-analyser objectivement les données globales de surface et d'altitude prises sur une période s'étendant sur des décennies dans les modèles de prévision numérique du temps. Ces ré-analyses font partie des ensembles de données, les plus utilisés en science climatique et géophysiques et fournissent une description complète du climat observé sur des grilles à trois dimensions de l'état de l'atmosphère passé à des intervalles infra quotidiens. Les ré-analyses permettent donc d'augmenter la quantité des séries de données en offrant une couverture spatiale continue (Duclot 2009). Il existe différentes séries de ré-analyses, il faut donc sélectionner le modèle qui correspond le mieux aux conditions météorologiques de la zone étudiées. Le CEPMMT a récemment publié un nouveau produit de ré-analyses appelés, ERA5, dans le cadre des services Copernicus Climate Change. Ce produit a une résolution spatiale plus élevée (30 km) avec une grille de 0.03 x 0.03 et couvre la période de 1979 à aujourd'hui. Dans notre étude, nous allons utiliser les ré-analyses ERA5 (1979 -2018) car elles reproduisent bien le cycle saisonnier et la variabilité interannuelle des températures, de plus elles sont récentes et actuellement les plus fiables sur de longues périodes (Sira, 2018).

Ce sont des observations quotidiennes de température de l'air à 2m et de la température du point de rosée (Sira 018).

❖ Les données d'observation satellitaire

L'estimation des variations des précipitations dans l'espace et dans le temps est un aspect important pour l'évaluation de la sécheresse et l'analyse des événements extrêmes. L'évolution de la saison doit être placée dans le contexte historique pour évaluer l'ampleur du déficit ou du surplus des précipitations par rapport à la normale. Les experts de « l'U.S. Geological Survey Earth Resources Observation and Science Center (USGS-EROS) » en collaboration avec le « Climate Hazards Group » de l'Université de Santa Barbara en Californie, ont développé un jeu de données de précipitations estimées avec une couverture quasi-globale (50°S–50°N, 180°E– 180°W), et une résolution de 0.05°x0.05° allant de 1981 à nos jours : le «Climate Hazards group InfraRed Precipitation with Stations » ou CHIRPS (Funk et al. 2014).

Le grand avantage d'utiliser des figures CHIRPS dans notre étude est d'avoir une couverture complète de la basse, moyenne et haute Casamance avec une haute résolution et une couverture temporelle (1982-2018) assez longue pour permettre des évaluations par rapport à la climatologie. Les données CHIRPS sont disponibles gratuitement et elles sont fournies en format Network Common Data Form (NetCDF). Tous les calculs effectués dans ce travail ont été faits avec l'opérateur «Climate Data Operators » appelé CDO. Les figures et graphiques ont été faits avec le logiciel Grads

❖ Les sorties de modèles climatiques régionaux

L'objectif de cette étude est d'utiliser des simulations haute résolution (0.44°) de précipitation et de températures issues de 4 modèles climatiques régionaux (MCR) du programme CORDEX (COordinated Regional climate Downscaling Experiment) (Georgi 2009 et Nuckliens 2012) pour caractériser les événements extrêmes en Casamance. Ces MCR ainsi que leurs forçages par des modèles climatiques globaux (MCG) sont présentés dans le tableau 2.1. Les simulations des modèles climatiques régionaux du programme CORDEX peuvent être téléchargées sur le site: <https://www.cordex.org/output.html>

Tableau 2.1 : Description des modèles climatiques régionaux utilisés

Nom	Institution	Forçage par un MCG	Références
-----	-------------	--------------------	------------

RACMO22T	Royal Netherlands Meteorological Institute, De Bilt, The Netherlands	EC-EARTH	Meijgard et al. 2008
RCA4	Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Rossby Centre	CNRM-CM5	Samuelsson et al. 2011
DMI-HIRHAM	Danish Meteorological Institute	EC-EARTH	Christensen et al. (2006)
MPI-REMO	Max Planck Institute	EC-EARTH	Jacob et al 2007

II.4. Méthodes et outils

II.4.1 Indice d'extrêmes précipitation

La distribution spatiale de la pluie durant l'été (Juin à Septembre) est analysée de même que certains indices climatiques recommandés par l'organisation météorologique mondiale (OMM) et qui reflètent l'occurrence et l'intensité des événements extrêmes. Ces indices climatiques basés sur des données journalières de précipitation permettent de caractériser les événements pluvieux au Sénégal et particulièrement en Casamance. Dans cette étude, quatre (4) indices climatiques ont été considérés car pouvant potentiellement impacter sur la disponibilité des ressources en eau et la productivité agricole dans notre zone. Ces indices sont présentés dans le tableau 2.2 et sont utilisés dans beaucoup d'études (Peterson et al. 2001).

Tableau 2.2 : Description des 3 indices de précipitations utilisés dans l'analyse des événements climatiques extrême comme utiliser dans (Peterson et al., (2001).

Indices	Signification
L'intensité totale des précipitations des jours très pluvieux par rapport au 95 ^e percentile:R95PTOT	Précipitation causées par des jours très humides (> 95 ^e me centile)
Durée maximale des séquences sèches : cdd	Nombre maximal de jours consécutifs présentant un cumul pluviométrique journalier inférieur à 1mm

cumuls de précipitations sur cinq jours : Rx5day	Le plus grand cumul pluviométrique enregistré sur cinq jours par rapport au seuil
--	---

II.4.2. Indice relatif aux risques sanitaires pour l'homme : l'indice de chaleur ou « heat index »

La chaleur a un impact certain sur la société et présente de graves risques sanitaires pour l'homme. Plusieurs indices de chaleur relatifs (Anderson et al. 2013) à ces risques ont été établis et reposent sur les variables météorologiques, qui conditionnent la température ressentie par l'homme et donc lie à l'intensité de la chaleur. La température de l'air, l'humidité atmosphérique, la vitesse du vent ainsi que la température radiante sont les variables météorologiques les plus déterminants. En effet, les populations qui vivent dans un climat chaud supportent le plus la température car leur corps s'est adapté ; cela ne veut pas dire que ses populations ne sont pas aussi vulnérables aux vagues et pics de chaleur car la température du corps est la même pour tous les hommes (Rome et al, 2014). Parmi les indices de chaleur existants, l'indice de chaleur apparente de Steadman (1979) converti en degrés Celsius et qui est assimilé à la température ressentie est le plus utilisé (Heat Index) notamment par la NOAA. Cet indice combine à la fois la température de l'air et l'humidité relative et fournit des niveaux d'inconfort thermique voire de danger pour l'homme. Anderson et al. (2013) a répertorié tous les indices connus de la littérature et qui sont au nombre de 21 indices. Le tableau 2.3 donne quelques indices utilisés dans la littérature ainsi que les auteurs qui les ont utilisés. Dans le cadre de notre étude nous avons utilisé l'indice de chaleur (IC).

Tableau 2.3 Quelques algorithmes d'indice de chaleur (Anderson et al. 2013).

No.	Algorithme	Références
1	$HI_C = 1.3 + 0.92T_C + 2.2e_s$	Gaffen and Ross 1999 Steadman 1984
2	$HI = C_1 + C_2T + C_3R + C_4TR + C_5T^2 + C_6R^2 + C_7T^2R + C_8TR^2 + C_9T^2R^2$	Patricola and cock 2010
2	humidex = (air température in Celsius) + h $h = (0.5555)*(e - 10.0)$	(Masterton et Richardson 1979)

	$e = 6.11 * \exp [5417.7530 * ((1/273.16) - (1/\text{dewpoint in kelvins}))]$	
--	---	--

L'indice de chaleur est développé par le National Weather Service, aux Etats-Unis. Il représente l'effet de l'humidité sur un organisme soumis à de fortes chaleurs. Cet indice est basé sur la capacité de production de sueur du corps humain qui, en s'évaporant permet de refroidir la peau. Si la température de l'air est inférieure à la température de la peau, la perte de chaleur vers l'extérieur est favorisée. Et, si la température externe est supérieure à celle du corps et/ou que l'humidité est élevée, il est plus difficile de transpirer et donc de refroidir sa température corporelle, donnant une sensation subjective de chaleur intense. Il va permettre d'indiquer le seuil d'inconfort thermique, voire de danger pour l'homme d'une vague de chaleur. Cet indice de chaleur est calculé par la formule suivante :

$$HI = C_1 + C_2T + C_3R + C_4TR + C_5T^2 + C_6R^2 + C_7T^2R + C_8TR^2 + C_9T^2R^2$$

$$C_1 = -42,379 ; C_2 = 2,04901523 ; C_3 = 10,14333127 ; C_4 = -0,22475541$$

$$C_5 = -6,83783 \cdot 10^{-3} ; C_6 = -5.481717 \cdot 10^{-2} ; C_7 = 1.22874 \cdot 10^{-3} ; C_8 = 8.5282 \cdot 10^{-4} ;$$

$$C_9 = 1.22874 \cdot 10^{-3}$$

HI est l'indice de chaleur en °F, R l'humidité relative noté de 0 à 100 et T la température atmosphérique en °F.

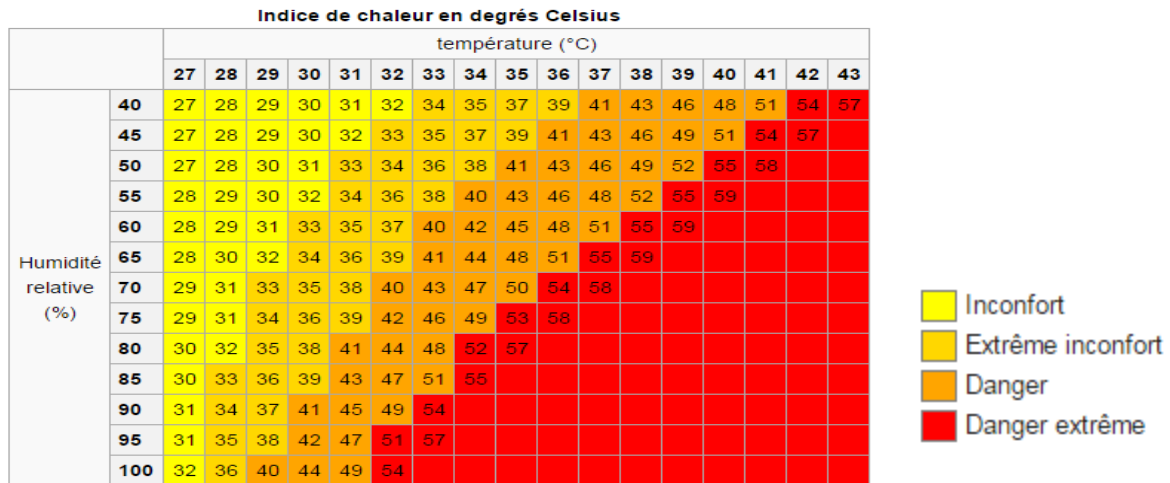
Suivant les différentes valeurs de l'indice de chaleur, nous pourrions interpréter les risques sanitaires ou non sur l'homme. Le tableau 2.4 présente les différents niveaux d'inconfort et risques sanitaires sur l'homme (extrait de Diouf, 2018). Le tableau 2.5 présente les niveaux d'inconfort lié à l'index de chaleur en fonction de la température et pour une humidité correspondante.

Tableau 2.4 Les quatre intervalles de supportabilité des conditions météorologiques traduisant l'IC.

Degré C	Degré F	Notes
27-32	80-90	Inconfort: Fatigue possible après une exposition prolongée et la pratique d'une activité physique
32-41	90-105	Extrême inconfort: Insolation, Crampes musculaires et épuisement physique

41-54	105-130	Danger: Insolation, crampes et épuisement probables et coup de chaleur possible
54+	130+	Danger Extrême: Risque élevé de coup de chaleur/coup de soleil, étouffement, déshydratation

Figure 2.5: Seuils d'inconforts suivant l'indice de chaleur en fonction de la température et l'humidité relative (Sira 2018).



II.4.3. Outils statistiques

❖ La moyenne

La moyenne est égale à la somme des données (température/précipitation) divisée par la longueur de la série. Elle est donnée par la formule suivante :

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_i$$

où x_i représente la température maximale (minimale ou moyenne) d'une année (i) donnée de la série et N la longueur de la série.

❖ L'anomalie standardisée

L'anomalie représente l'écart par rapport à une normale et elle est calculée par la formule suivante :

$$Y = (x_i - \bar{x})$$

où x_i représente la température/précipitation maximale d'une année (i) donnée de la série et \bar{x} la moyenne climatologique.

❖ Le biais

La formule ci-dessous est utilisée pour le calcul du biais :

$$B = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)}{N}$$

où N est le nombre de jours. Le biais est calculé sur les bases annuelle et saisonnière.

➤ Le taux ou pourcentage de changement

Pour calculer le pourcentage de changement des précipitations, on fait la différence entre les données des scénarios de gaz à effet de serre (représentant le futur) moins les données historiques (représentant le présent) le tout diviser par les données historiques :

$$\text{Taux de changement} = ((Y2 - Y1)/Y1) * 100$$

Y2 est égale aux données des scénarios de gaz à effet de serre

Y1 est égale aux données historiques

II.4.4. Outils de calcul et graphique

Pour le traitement des données et les calculs statistiques nous avons utilisé le logiciel « Climate Data Operators » (CDO). CDO est une suite d'utilitaires pour manipuler directement les fichiers NetCDF, permet d'appliquer différentes fonctions de calcul arithmétique et statistique et la sélection de données. Il offre aussi la possibilité d'utiliser des outils d'échantillonnage et d'interpolation spatiale et une collection d'un grand nombre d'opérateurs pour les sorties de modèles climatiques.

QGIS est un logiciel SIG (système d'information géographique) libre multiplateforme publié sous licence GPL. Le développement a débuté en mai 2002 et est sorti en tant que projet sur source Forge en juin 2002³. Il était également appelé *Quantum GIS* jusqu'en septembre 2013. Il permet de faire la topographie de la zone d'étude.

Le « Grid Analysis and Display System » (Grads) est l'outil graphique utilisé dans ce travail. Il a été conçu pour accéder, manipuler et visualiser facilement les données climatiques. GrADS dispose de deux modèles de données pour la gestion des données maillées et de la station. Il prend en charge de nombreux formats de fichiers de données, notamment binaire (flux ou séquentiel), GRIB (versions 1 et 2), NetCDF, HDF (versions 4 et 5) et BUFR (pour les données de station).

Chapitre 3 : Analyses des résultats et discussions

Ce chapitre est consacré à l'analyse des résultats obtenus ainsi qu'à leurs discussions. Nous analysons la distribution de la précipitation et la température en Casamance, ainsi que certains indices tels que : l'intensité des jours pluvieux, la durée maximale des séquences humides, la durée maximale des séquences sèches, le maximum de précipitations cumulé sur cinq jours, et l'indice de chaleur. Nous évaluerons aussi les changements futurs de ces indices extrêmes et qui suit la base de notre analyse des risques potentiels sur l'agriculture, l'hydrologie et la santé.

III.1. Validation des sorties de modèles.

La validation des jeux de données simulées se fait traditionnellement en comparant directement les variables des modèles avec celles observées. Un des problèmes de cette approche est qu'aucun des jeux de données ne peut être considéré comme parfait puisqu'ils ont tous des erreurs. Ceci est notamment le cas pour les données sur grilles interpolées à partir des observations, produits à partir desquels les sorties de modèles. Dans ce paragraphe, nous montrons la validation effectuée sur la précipitation et la température moyenne simulée, étant donné que les indices utilisés sont soit liés à l'intensité soit à l'occurrence des précipitations.

III.1.1. Distribution saisonnière des précipitations

La période correspondant à l'établissement de la mousson ouest africaine est considérée dans cette partie, donc notre période saisonnière est les mois de Juin-Juillet-Aout-Septembre (JJAS). La figure 3.1 représente respectivement la pluie moyenne JJAS des observations chirps et de quatre (4) modèles régionaux de CORDEX (KNMI-RACMO22T, DMI-HIRHAM5, MPI-CSC-REMO, SMHI-RCA4) ainsi que leur moyenne sur une période allant de 1982 à 2005 sur la Casamance. Des différences importantes sur la distribution des précipitations en Casamance sont notées entre les observations et les MCR ainsi que la moyenne des modèles. Les observations satellitaires de CHIRPS (Figure : 1a) montrent deux zones où la précipitation journalière moyenne est égale ou supérieure à 20mm/jr, il s'agit de la basse Casamance (BC) et de la haute Casamance (HC). La moyenne Casamance (MC) quant à elle, est caractérisée par des moyennes de précipitation relativement faibles avec des valeurs de moins de 8 mm/jour. Le modèle KNMI-RACMO (Figure : 1b) contrairement aux observations montre une distribution quasi uniforme avec de faibles valeurs de précipitation sur presque toute la Casamance, même si une légère hausse est notée en moyenne Casamance (MC). Le modèle DMI-HIRHAM5 (Figure 1.c) simule relativement bien la distribution des précipitations en MC et sur la partie est

de la HC, avec des valeurs de précipitations dans le même ordre de grandeur que les observations. Cependant, il présente des valeurs de précipitations faibles sur la basse Casamance (BC), notamment sa partie côtière. Les modèles MPI-REMO (Figure 1.d) et SMHI-RCA4 (Figure 1.e) présentent les mêmes caractéristiques, avec des valeurs de précipitations plus élevées en moyenne Casamance qu'en basse et haute Casamance (HC). Cette distribution est à l'opposé de ce qui est montrée par les observations, et donc ces modèles ne parviennent pas à bien capturer la distribution spatiale des précipitations en Casamance. Il faut noter que le modèle MPI-REMO présente une intensité de précipitation relativement plus grande en moyenne Casamance (MC). L'analyse de la moyenne des précipitations (figure 3.1. f) obtenues à partir de la moyenne des modèles, montre un faible intense de précipitation sur presque toute la Casamance avec des valeurs de précipitations plus faibles observées sur la côte et près de la Gambie.

Ces résultats mettent en évidence l'importance de la dispersion des MCR qui s'exprime par le fait que les modèles tendent à simuler des champs de pluie différents de ceux des données d'observations. Ces résultats sont en phase avec ceux de Laprise et al. (2012) qui ont étudié l'influence de la taille du domaine de simulation sur la variabilité interne des MCR et ont conclu que l'utilisation d'un grand domaine de simulation (cas des expériences CORDEX) conduit à une forte variabilité interne des modèles, cette dernière (la variabilité interne) étant l'une des causes de la dispersion des modèles et la paramétrisation.

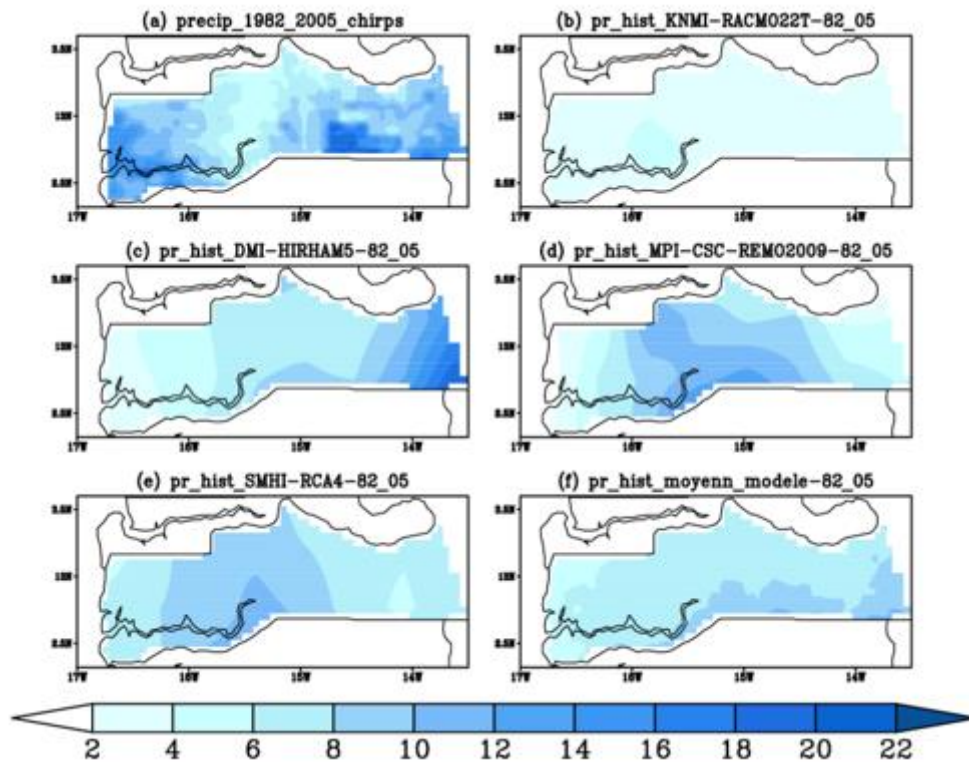


Figure 3.1: Moyenne estivale (JJAS) de la pluie pour les observations chirps (1982-2005) et de quatre (4) modèles climatiques régionaux et leur moyenne en Casamance.

III.1.2. Analyse des biais de précipitation

Les cartes de biais de précipitation des modèles pendant la période historique par rapport aux observations satellitaires de chirps sont représentées la figure 3.2 pour la période JJAS. Le modèle KNMI-RACMO présente un biais négatif sur toute la Casamance avec des valeurs plus faibles vers le centre de la moyenne Casamance; donc globalement ce modèle sous-estime la précipitation surtout sur la face maritime. Le modèle DMI-HIRHAM présente un biais négatif en basse Casamance et sur une petite partie (ouest) de la haute Casamance, par contre un biais positif est observé sur la moyenne Casamance et sur partie est de la haute Casamance. Il sous-estime donc la précipitation en basse Casamance et à l'ouest de la haute Casamance tandis qu'il a tendance à surestimer la précipitation sur la moyenne Casamance et la partie est de la haute Casamance. La distribution du biais en Casamance présente alors deux dipôles placés côte à côte. Les autres modèles MPI-REMO, SMHI-RCA4 et la moyenne des modèles présentent des caractéristiques similaires, avec des biais négatifs dans la basse Casamance et en haute Casamance traduisant une sous-estimation de la précipitation par ces modèles dans ces zones.

Cependant, sur la moyenne Casamance, nous notons une surestimation de la précipitation par les modèles avec un biais positif par rapport aux observations.

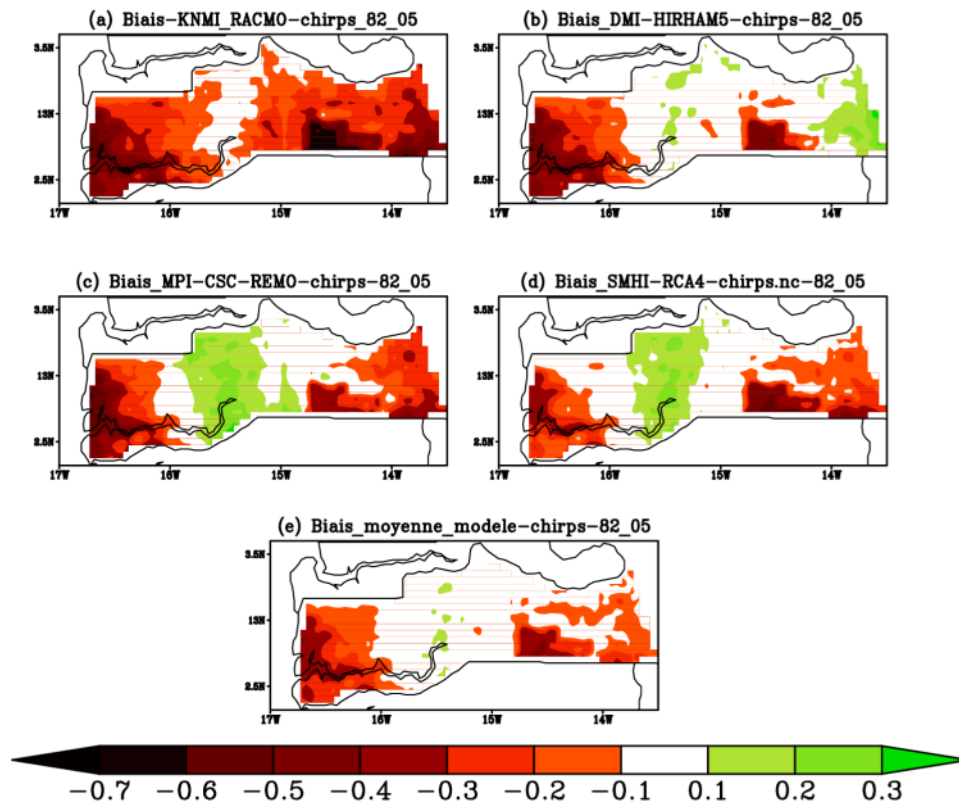


Figure 3.2: Biais des modèles MCR de précipitation par rapport aux observations chirps pour la période de 1982 à 2005 pour la période (JJAS) en Casamance.

III.1.3. Distribution saisonnière des températures

La distribution spatiale de la température est analysée et présentée dans cette partie. Notre analyse est faite en se basant sur quatre périodes qui constituent les cycles saisonniers généralement utilisés dans la littérature. Il s'agit des périodes Décembre-Janvier-Février (DJF), Mars-Avril-Mai (MAM), Juin-Juillet-Aout (JJA), et Septembre-Octobre-Novembre (SON). La distribution saisonnière des températures simulées par les modèles précédents est analysée et comparée avec celle obtenue à partir des données de ré-analyses d'ERA5. La Figure 3.3 représente la distribution de températures moyennes de la saison DJF obtenue à partir des données de ré-analyse ERA5 et de quatre (4) modèles climatiques régionaux (MCR) en plus de leur moyenne de 1982 à 2005. L'analyse révèle que les ré-analyses ERA5 montrent des températures relativement faibles variant entre 25°C et 27,5°C sur toute la Casamance sauf sur l'extrême est de la haute Casamance où nous observons des températures de plus de 30°C. Le

modèle KNMI-RACMO (figure 3.3a) montre des températures moyennes sur la partie ouest de la basse Casamance, de la moyenne et haute Casamance entre 26 et 27°C sauf sur la face maritime de la basse Casamance où la température est de 28°C. Le modèle DMI-HIRHAM montre des températures assez mince sur la face maritime de la basse Casamance alors que sur tout le reste de la région, le modèle simule de fortes températures dépassant les 30°C. Le modèle MPI-REMO (figure 3.3b) montre des températures un peu faibles sur presque toute la Casamance entre 21 et 23°C mais ces températures sont moyennes sur la face maritime de la BC avec 24°C. Les modèles RCA et la moyenne des modèles (figure 3.3d et 3.3e) quant à eux, montrent une distribution de température similaire aux ré-analyses sur la basse Casamance ; alors que sur la moyenne et haute Casamance, il présente des températures supérieures à celles obtenues sur les analyses sauf sur l'extrême est de la haute Casamance

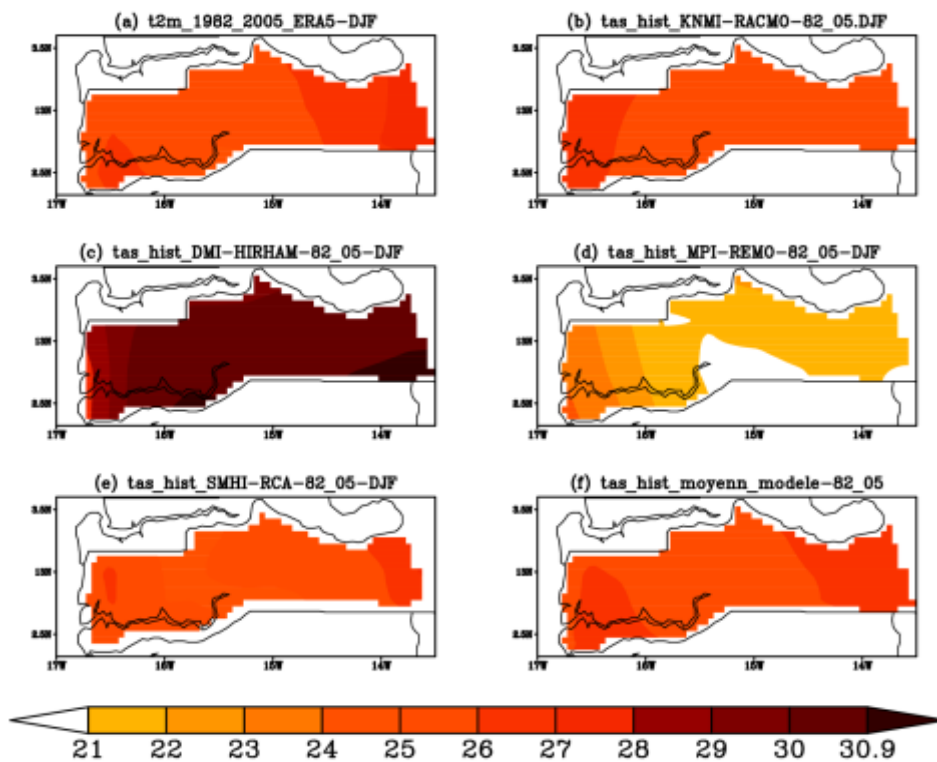


Figure 3.3: Distribution de la température moyenne sur la période historique 1982-2005 pendant la période DJF obtenue avec ERA5, les MCR et leur moyenne en Casamance.

La distribution moyenne de la température pendant la saison MAM est présentée sur la figure 3.4. Les ré-analyses (figure 3.4.a) montrent un gradient net entre la basse Casamance et la moyenne et haute Casamance. En effet, les températures moyennes sont généralement inférieures à 28°C en basse Casamance alors qu'elles varient de 29°C à 32°C dans la moyenne

Casamance et haute Casamance. Le modèle KNMI-RACMO (figure 3.4.b) montre des températures moyenne de 27 à 29°C sur toute la Casamance sauf au nord de la moyenne et haute Casamance, où les températures sont beaucoup plus élevées. L'analyse de la distribution des températures moyennes simulées par le modèle DMI-HIRHAM (figure 3.4.c) montre des températures élevées sur presque toute la Casamance qui varient de 32°C à 36°C, cependant des températures de 29°C à 30°C sont notées en basse Casamance. Le modèle MPI-REMO quant à lui (figure 3.4b) simule des températures qui varient entre 29°C et 30°C sur la Casamance excepté en basse Casamance où elles sont beaucoup plus importantes. Le modèle RCA et la moyenne des modèles (figure 3.4d et 3.4e) montrent des similitudes avec les ré-analyses surtout en moyenne et haute Casamance. Par contre sur les côtes de la basse Casamance, le modèle RCA et la moyenne des modèles présentent des températures supérieures à celle obtenue avec les ré-analyses.

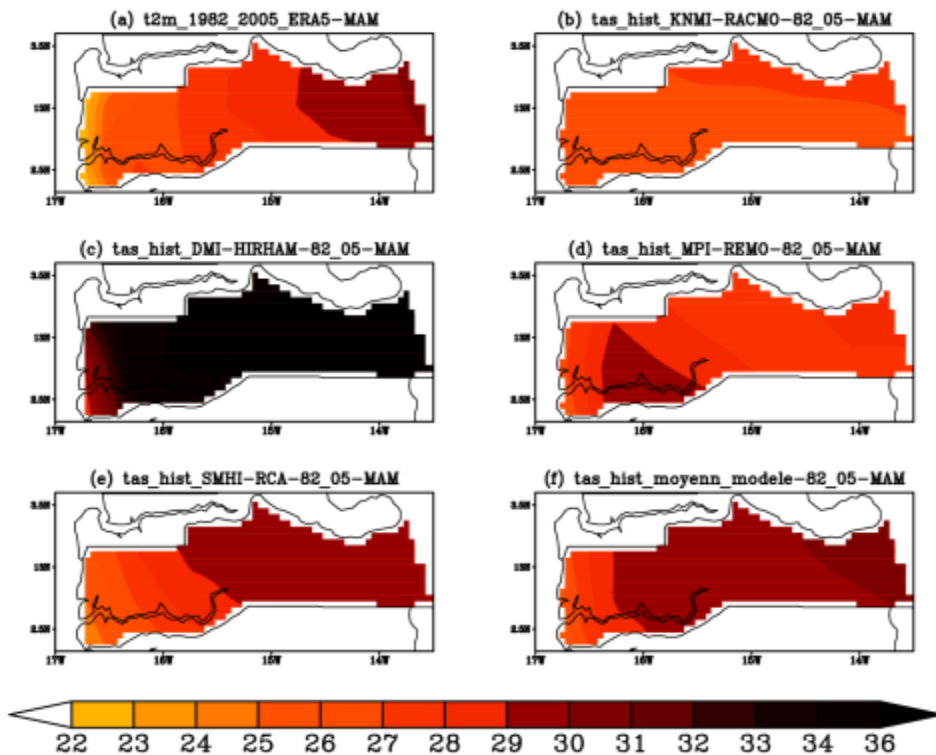


Figure 3.4: Distribution de la température moyenne sur la période historique 1982-2005 pendant la période MAM obtenue avec ERA5, les MCR et leur moyenne en Casamance.

La distribution moyenne de la température pendant la saison JJA est montrée sur la figure 3.5, nous remarquons une distribution assez similaire entre les ré-analyses et les modèles DMI-HIRHAM, RCA (figures 3.5c-d) et la moyenne des modèles avec un gradient croissant allant

de la basse à la haute Casamance, mais avec des valeurs de températures plus importantes. Les modèles simulent bien la variation de température sur la toute la Casamance sauf pour MPI-REMO (figure 3.5b) qui montre des valeurs de températures plus faible en haute Casamance entre 23.5°C à 24.5°C et en basse et moyenne Casamance, la température varie de 25°C à 26°C. Quant à KNMI-RACMO (figure 3.5a), un gradient de température croissant est noté allant de la basse au nord de la haute Casamance.

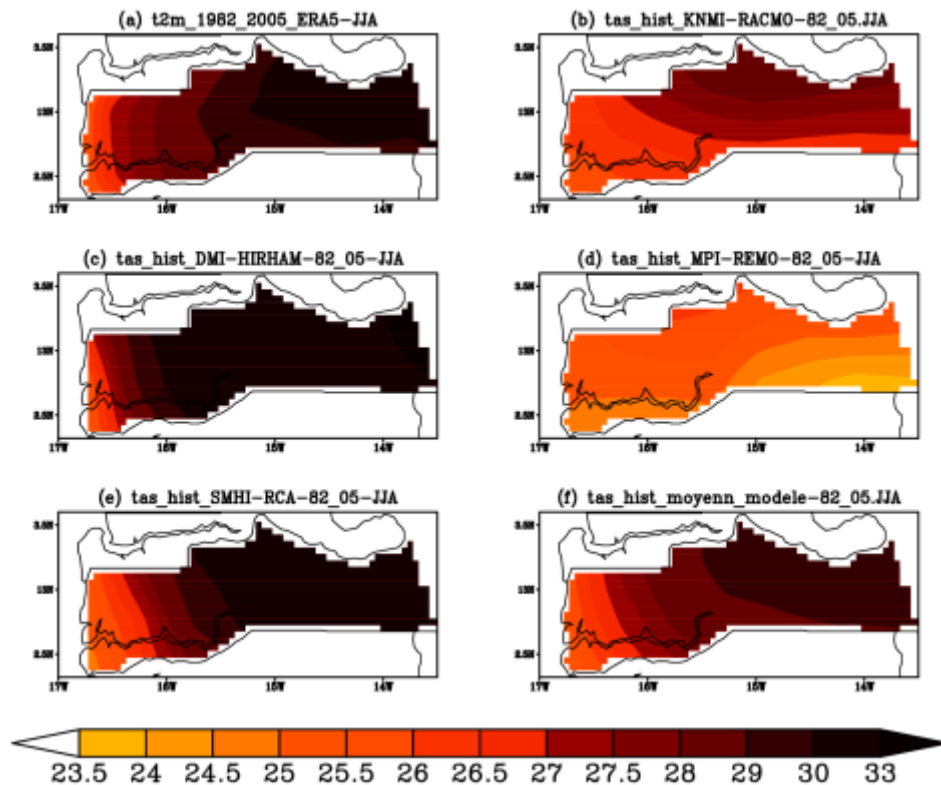


Figure 3.5: Distribution de la température moyenne sur la période historique 1982-2005 pendant la période JJA obtenue avec ERA5, les MCR et leur moyenne en Casamance.

Pendant la période SON, les ré-analyses présentent une distribution de température uniforme en Casamance avec une température égale à environ 28°C sauf sur la partie sud-est de la HC où elle est plus faible et égale à 26°C (Figure 3.6). Les modèles KNMI-RACMO et MPI-REMO (figure 3.6a, 3.6.b) montrent de températures assez faibles qui varient de 24°C à 26°C sur toute la Casamance mais elles sont plus marquées en basse et haute Casamance. Le modèle DMI-HIRHAM (figure 3.6.c) montre un gradient de température croissant allant de la basse Casamance à la haute Casamance avec des températures plus élevés en haute Casamance. La distribution des températures moyennes simulées par SMHI-RCA4 (figure 3.6.d) présente

également un gradient de température croissant d'ouest en est avec une intensité moyenne. Une situation identique est obtenue aussi avec la moyenne des modèles, nous constatons que le gradient est bien marqué contrairement aux ré-analyses.

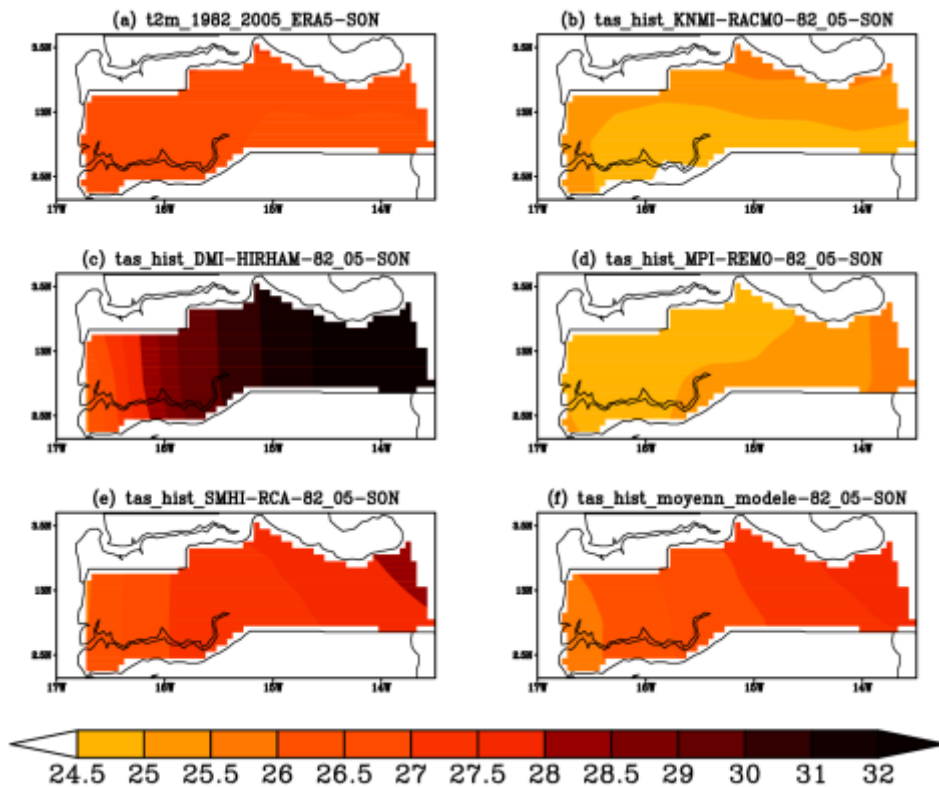


Figure 3.6: Distribution de la température moyenne sur la période historique 1982-2005 pendant la période SON obtenue avec ERA5, les MCR et leur moyenne en Casamance.

III.1.4. Analyse des biais de températures

Les cartes de biais de température entre les modèles et les données de ré-analyse ERA5 suivant les deux saisons seulement sont analysées dans cette partie. Il s'agit des périodes MAM et JJA, le choix est motivé par le fait que ces saisons encadrent la période où on observe les maxima de température, qui correspond à la période avril-mai-juin (AMJ). La saison MAM se caractérise par une distribution de biais dipolaire entre l'ouest et l'est, comme montré sur la figure 3.7. Les modèles KNMI-RACMO, MPI-REMO et RCA (figures 3.7.a, 3.7.b et 3.7.d) ont des similitudes avec un biais positif en basse et à l'ouest de la moyenne Casamance suivis d'un biais négatif à l'est de moyenne Casamance et en haute Casamance. Quant aux modèles DMI-HIRHAM et la moyenne des modèles (figures 3.7.c et 3.7.e), ils présentent une distribution uniforme avec un biais positif sur toute la Casamance. En effet, les modèles KNMI-RACMO,

MPI-REMO et RCA surestiment la température en basse et une partie de la moyenne Casamance et sous-estiment la température sur l'autre partie de la moyenne Casamance et la haute Casamance. Pour les modèles DMI-HIRHAM et la moyenne des modèles, ils surestiment la température en Casamance.

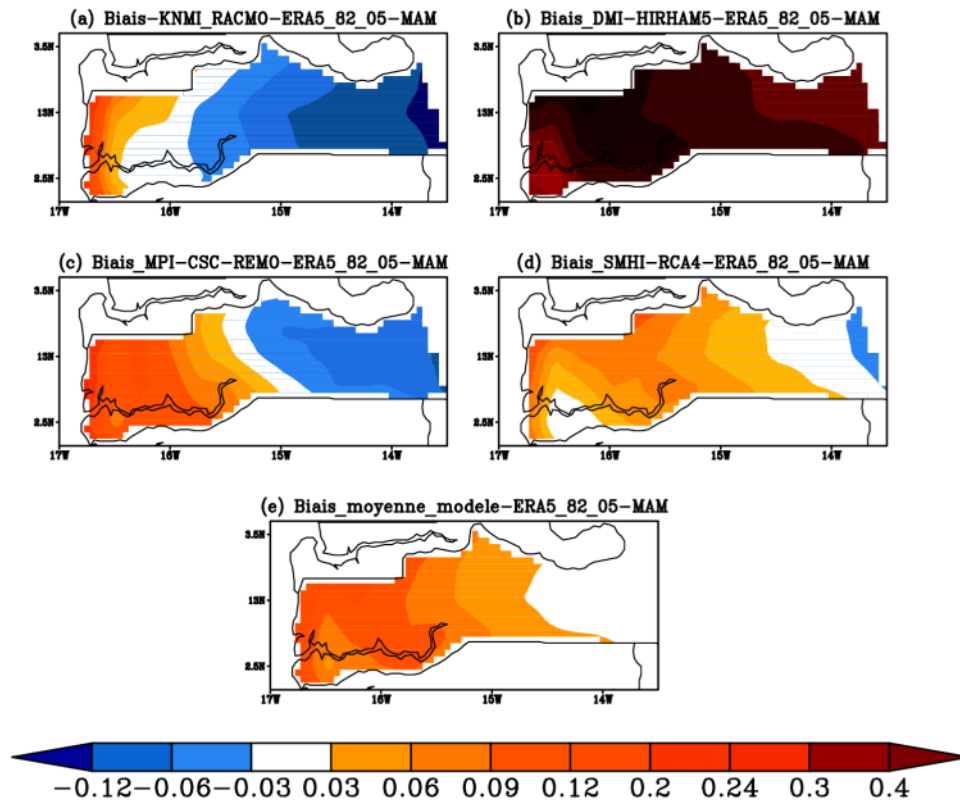


Figure 3.7: Biases de la température moyenne sur la période historique 1982-2005 en MAM des MCR en Casamance.

La saison JJA quant à se caractérise également par une distribution de biais uniforme et dipolaire. Les modèles KNMI-RACMO, MPI-REMO (figures 3.8.a et 3.8.b) et la moyenne des modèles présentent une distribution presque uniforme avec un biais négatif sur presque toute la Casamance sauf une petite partie sur la face maritime de la basse Casamance où on observe un biais positif. Les modèles DMI-HIRHAM et RCA (figures 3.8.c et 3.8.d) se caractérisent par une distribution dipolaire avec un biais positif en moyenne et haute Casamance suivis d'un biais négatif en basse Casamance. En effet les modèles KNMI-RACMO, MPI-REMO, DMI-HIRHAM et RCA et la moyenne des modèles sous-estiment la température sur presque toute la Casamance et surestiment la température en basse Casamance. Cette surestimation est aussi notée en moyenne et haute Casamance sur les modèles DMI-HIRHAM et RCA.

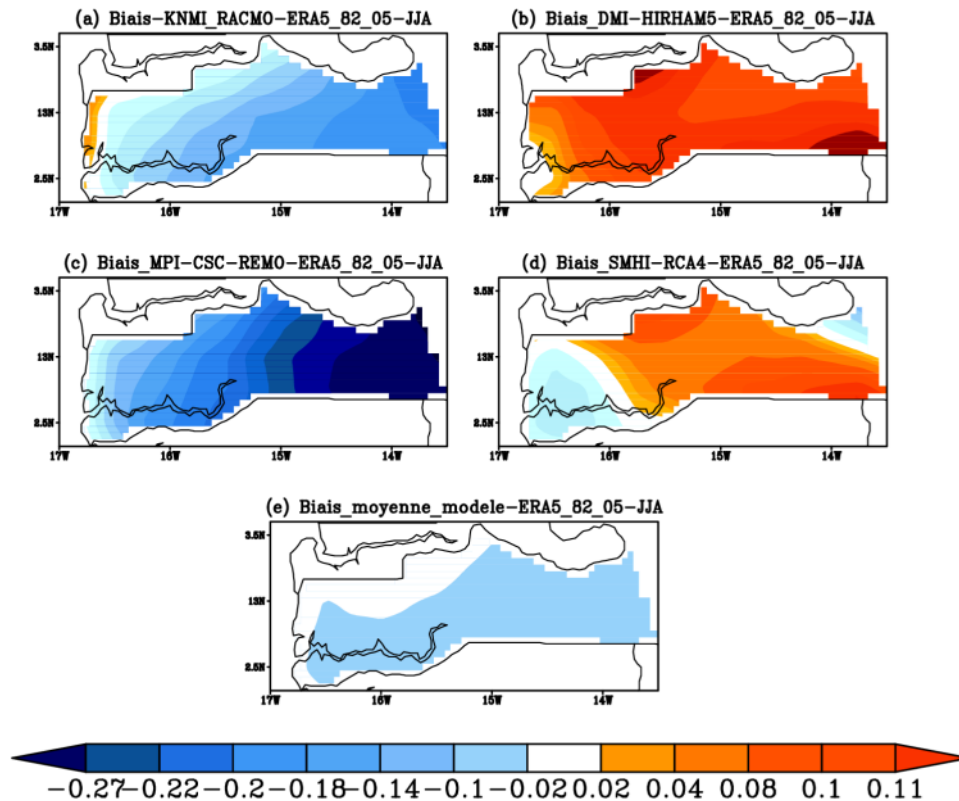


Figure 3.8: Biais de la température moyenne sur la période historique 1982-2005 en JJA des MCR en Casamance.

III.2. Identification des risques climatiques potentiels

Les changements climatiques et l'évolution des précipitations et des températures extrêmes constituent une grave menace pour les ressources en eau, les activités socio-économiques mais également pour la santé et le bien-être de l'homme, en particulier dans les pays à faible revenu tels que ceux de l'Afrique de l'Ouest. En effet, le dernier rapport du GIEC (2013) montre que le réchauffement de la planète entraînera une multiplication des phénomènes météorologiques extrêmes qui affecteront les populations avec une vulnérabilité accrue (Diba et al. 2016). Pour caractériser les risques liés aux événements extrêmes, nous avons analysé les taux de changements quelques indices climatiques édictées par l'OMM suivants pour le futur proche (2038-2067) et la période historique (1976-2005) des modèles climatiques régionaux (MCR). Les périodes de vulnérabilité pour la ressource en eau, l'agriculture et la santé étant différentes, l'évaluation des taux changements des indices extrêmes utilisés est sur des périodes bien définies.

III.2.1 Risque potentiel sur l'hydrologie

L'établissement de la mousson ouest africaine est considéré dans cette partie, donc notre période saisonnière sera les mois de Juin-Juillet-Aout-Septembre (JJAS). En effet, cette période correspond à l'apport maximal d'eau pour le renouvellement de la ressource en eau. Bien que d'autres indices puissent être utilisés pour décrire les risques sur les ressources en eaux, nous avons choisi d'utiliser la fraction des précipitations des jours très pluvieux par rapport au 95^e centile (R95PTOT). Les taux de changement sont calculés entre le futur proche sous les scénarios de gaz à effet de serre RCP4.5 et RCP8.5 (2038-2067) et la période historique (1976-2005).

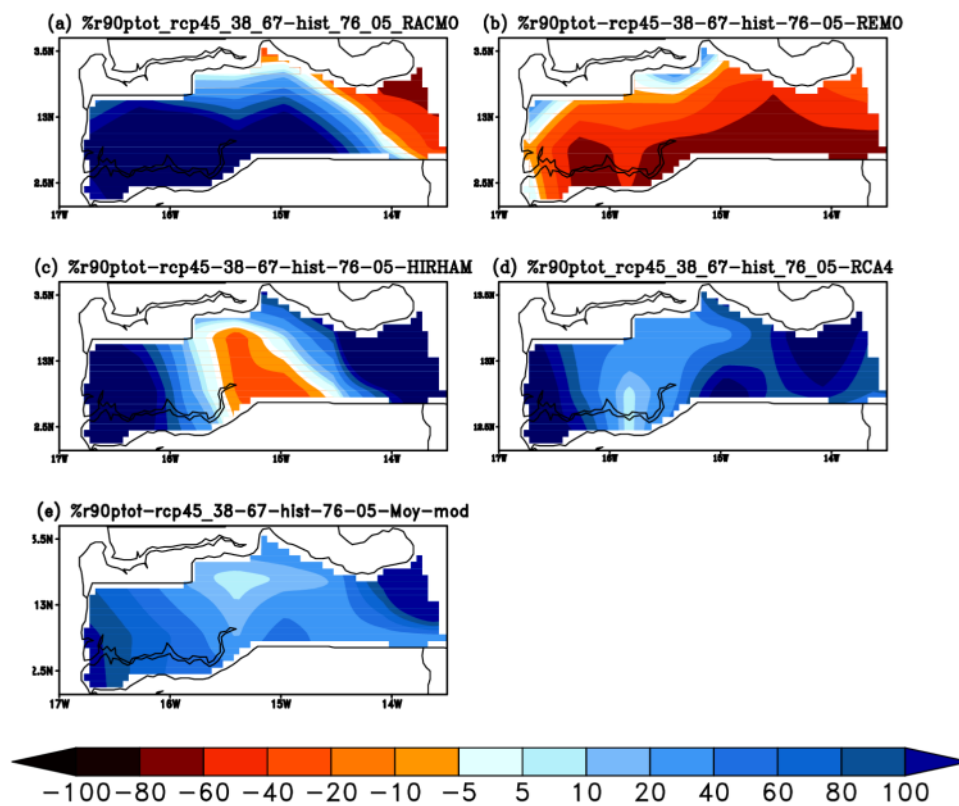


Figure 3.9: Distribution du taux de changement de R95PTOT entre le futur proche (2038-2067) et la période historique (1976-2005) durant JJAS pour les 4 modèles climatiques régionaux et leur moyenne avec le RCP4.5 en Casamance.

La figure 3.9 représente le taux de changement de l'indice R95PTOT obtenus sur la Casamance à partir des MRC suivant les scénarios RCP4.5 et RCP8.5. Pour rappel, l'intensité totale des précipitations des jours très pluvieux (R95PTOT) est la fraction des précipitations expliquée

par les jours très pluvieux (jours humides au-dessus du 95^e centile) (Sylla et al, 2016). L'intensité totale des précipitations des jours très pluvieux indique des précipitations de forte intensité pouvant provoquer des inondations généralisées (OMM, 1989). L'indice R95PTOT présente des distributions de taux de changement différentes suivant les modèles et les scénarios. Dans le premier scénario (RCP4.5), le modèle KNMI-RACMO (figure 3.9.a) prévoit une augmentation importante sur presque toute la Casamance à part la partie est de la haute Casamance. Le modèle MPI-REMO (figure 3.9.b) montre une diminution de 40 à 90 % de l'intensité totale des précipitations des jours très pluvieux sur toute la Casamance, avec une petite augmentation à la frontière avec la Gambie. Quant à DMI-HIRHAM (figure 3.9.c), il présente une structure dipolaire avec une augmentation en basse Casamance suivie d'une diminution notée en moyenne Casamance et de nouveau d'une augmentation en haute Casamance. Le modèle RCA4 (figure 3.9.d) comme la moyenne des modèles prévoit une augmentation de l'intensité des jours très pluvieux sur toute la Casamance, avec un taux maximal en basse Casamance et à l'est de la haute Casamance.

L'analyse de la diminution de la fraction de pluie intense sur toute la Casamance avec le scénario RCP8.5, montre que le modèle KNMI-RACMO prévoit une diminution drastique de cette fraction avec un maximum observé en moyenne Casamance et à l'est de la haute Casamance (Figure 3.10.a), ce qui est contraire à ce qui est observé avec le scénario 4.5 sauf sur l'est de la haute Casamance. Contrairement au scénario RCP4.5, le modèle MPI-REMO prédit une structure dipolaire avec le RCP8.5, qui se manifeste par une diminution sur une partie est de la haute Casamance et une augmentation de 20 à 60% en basse et moyenne Casamance comme montré sur la figure 3.10.b. Le comportement bipolaire constaté avec le modèle DMI-HIRHAM sous le scénario RCP4.5, n'est plus constaté avec le scénario RCP8.5. Nous observons une diminution remarquable qui couvre une bonne partie de la Casamance à part une fine partie de la haute Casamance. Cette diminution est plus marquée en basse Casamance avec un pourcentage de 70% (Figure 3.10.c). Le modèle RCA4 présente les mêmes comportements que précédemment, mais le scénario RCP8.5 présente une distribution plus importante de l'intensité des précipitations totales des jours très pluvieux sauf quelques petites zones en basse, moyenne et haute Casamance. La distribution du taux de changement obtenue avec la moyenne des modèles avec le scénario RCP8.5 présente un comportement plus mitigé par rapport au scénario RCP4.5, avec tantôt de petites zones d'augmentation (nord de la basse Casamance vers la Gambie) et tantôt de diminution (sud de la basse Casamance, de la haute Casamance et au

centre de la moyenne Casamance). Il faut noter que le taux de changement dans ce cas de figure est relative faible.

Ces résultats montrent les différents niveaux de risques obtenus par les figures des MCR sur les ressources eau. Une diminution des taux de changement entrainera intrinsèquement un tarissement à long terme de l'eau des aquifères et donc une augmentation significative entrainera à court terme une saturation du sous-sol et donc une absence d'infiltration. Cette absence d'infiltration est une condition favorable à long terme au ruissellement et à l'inondation. Nous pouvons ainsi affirmer avec le scénario RCP4.5, le modèle RCA4 et la moyenne des modèles prévoient des conditions favorables à la recharge des nappes sur l'ensemble de la région de Casamance avec des taux importants en basse et haute Casamance. RCA4 montre des conditions beaucoup plus favorables avec le scénario RCP8.5, alors la moyenne des modèles présente des niveaux de risques relativement faibles. Avec le scénario RCP4.5, le modèle KNMI-RACMO projette une infiltration sur la basse et haute Casamance et des risques de tarissement à l'est de la basse Casamance, mais présente une situation très prometteuse avec le RCP8.5, où il projette des risques accrus de disparition des ressources en eau en basse Casamance. Le MPI-REMO quant à lui prévoit un risque de tarissement des ressources en eaux plus important avec le RCP4.5 au sud de la Casamance, mais le scénario 8.5 suggère le contraire avec des apports en eau en basse Casamance et un faible risque de manque d'eau de renouvellement. S'agissant du modèle HIRHAM, une absence de recharge faible des eaux dans les couches profondes en moyenne Casamance et un risque accru de saturation des sols ou inondation en basse et haute Casamance est attendue lorsqu'on utilise le scénario RCP4.5. Une dégradation totale des conditions de recharge des ressources en eaux est observée avec le scénario RCP8.5 sur en basse Casamance.

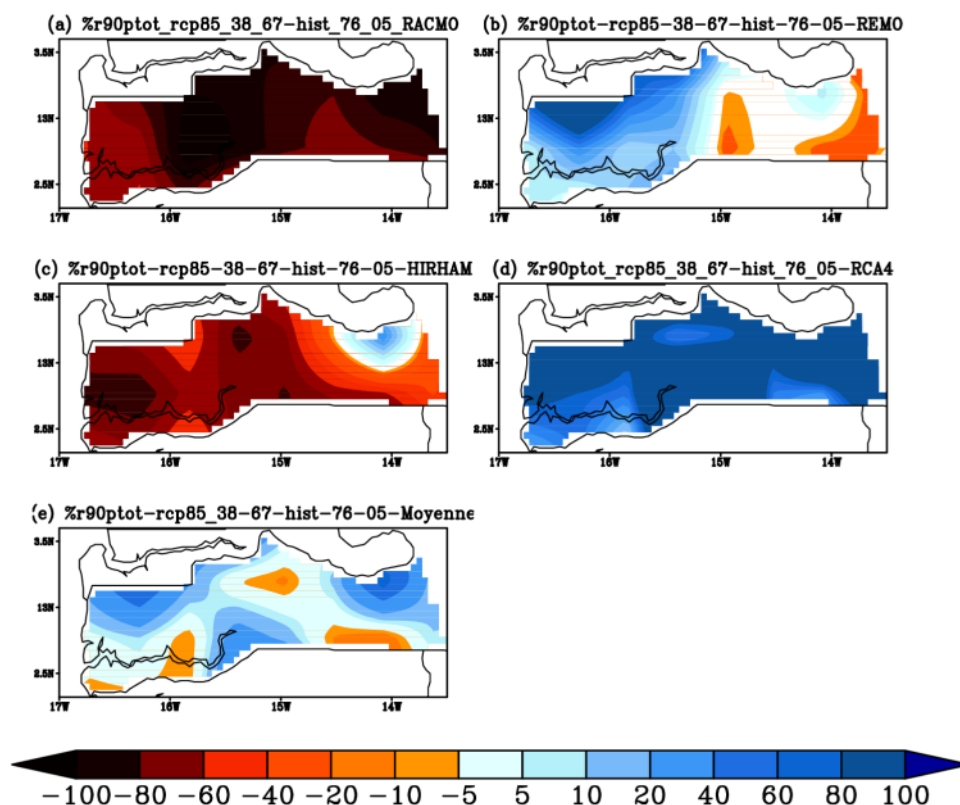


Figure 3.10: Distribution du taux de changement de R95PTOT entre le futur proche (2038-2067) et la période historique (1976-2005) durant JJAS pour les 4 modèles climatiques régionaux et leur moyenne sous le scénario RCP8.5 en Casamance

III.2.2. Risque potentiel lié à l'agriculture

La suite de ce travail est consacrée au diagnostic des conditions extrêmes exceptionnelles qui jouent un rôle important sur l'agriculture qui demeurent le pilier de l'économie de cette région. Notre analyse sera consacrée aux risques liés à la culture du riz pendant les périodes de germination et de floraison qui sont les deux périodes où la plante est vulnérable aux conditions climatiques (Roudier et al. 2011, Sultan et al. 2005). Les dates de plantation et les périodes de culture du riz pluvial dépendent entièrement du régime des pluies. L'indice correspondant au nombre de jours successivement secs (CDD) est utilisé dans cette étude ainsi que l'indice Rx5day.

a. La germination

La germination est le début de développement d'un nouvel individu, d'une nouvelle plante, à partir d'une graine ou d'une spore. Elle désigne plus spécifiquement la reprise du développement et du métabolisme d'un embryon de spermatophyte, jusqu'à émergence de la racine. Dans le cas du riz, la germination correspond au mois de juin à juillet, et donc pour la suite c'est cette période qui sera considérée. La germination est une phase si sensible, que le manque d'une

quantité d'eau suffisante aux besoins physiologiques de la plante pourrait conduire à la mort des semences.

L'analyse de la distribution des jours consécutifs secs moyennés de Juin à Juillet (JJ) pour chaque modèle permet de caractériser les risques potentiels que les cultures ont subis pendant les phases de semis et germination des plantes. La figure 3.11 représente le taux de changement en JJ de la durée maximale du nombre de jours consécutifs secs (CDD) obtenu à partir de quatre MCR de CORDEX (KNMI-RACMO, DMI-HIRHAM5, MPI-REMO, SMHI-RCA4) ainsi que leur moyenne sur une période allant de 2038 à 2067 et sous les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 sur la Casamance. En se basant du scénario RCP4.5, les modèles KNMI-RACMO, DMI-HIRHAM (Figures 3.11.a, 3.11.c) indiquent une diminution du nombre de jours consécutifs secs avec des taux de diminution plus importants observés en basse Casamance pendant la phase de germination. Ces modèles ne suggèrent donc pas de risques potentiels pour la culture du riz dans cette zone. Par contre les modèles MPI-REMO, RCA4 et la moyenne des modèles prévoient une augmentation des CDD sur toute la Casamance comme illustré sur les Figures 3.11.b, 3.11.d et 3.11.e. Les taux d'augmentation sont très importants avec le modèle MPI-REMO (entre 60% et 90%) et suggère ainsi un potentiel risque accru à la disparition de la culture du riz dans cette zone dans le futur. Les mêmes observations sont notées pour le cas du modèle RCA4 surtout à l'est de la basse Casamance. La moyenne des modèles quant à elle, montre des risques potentiels certains mais qui seront plus liés à une faible productivité du riz sauf à l'ouest de la haute Casamance où nous n'avons pas observé de changements. Les simulations forcées avec le scénario RCP8.5 présentent une situation différente avec une augmentation importante des CDD observés avec le modèle KNMI-RACMO surtout en moyenne Casamance où elle est de 80% à 90% (Figure 3.12.a) ; et prévoit donc de grands risques de disparition ou de très faible production de la culture du riz dans cette zone. Le modèle DMI-HIRHAM prévoit une diminution sur presque toute la Casamance avec une légère augmentation sur une petite zone au nord-ouest de la basse Casamance et au nord de la moyenne Casamance (Figure 3.12.c). Une caractéristique presque similaire est observée avec la moyenne des modèles mais avec des taux de changement relativement faibles ou nuls. Contrairement au modèle DMI-HIRHAM, le modèle MPI-REMO présente seulement une diminution de CDD en haute Casamance et un peu au nord de la moyenne Casamance vers la frontière gambienne ; mais il montre une augmentation des CDD dans le futur sur le sud de la basse et moyenne Casamance, le nord de la basse Casamance étant caractérisé par une situation neutre de non changement (Figure 3.12.b). Le modèle RCA4 lui projette une diminution très remarquée sur

toute la Casamance avec le scénario RCP8.5 (Figure 3.12.d), ce qui n'était pas le cas avec le scénario RCP4.5. Il faut noter que la moyenne des modèles (figures 3.11.e) avec le RCP4.5 prévoit une augmentation de la durée maximale du nombre de jours consécutifs secs (CDD) entre 40 et 50% sur toute la Casamance alors qu'une diminution de cette durée est estimée à 10% et 30% en basse et haute Casamance et à 40% en moyenne Casamance avec le scénario RCP8.5 (figure 3.12.e). Cette diminution (respectivement augmentation) séquences sèches correspond aux mêmes phénomènes observés sur le Sahel Ouest et est attribué à une réponse au réchauffement climatique global (Mariotti et al. 2014 ; Sylla et al. 2016). Le rapport du PAPSEN (N°9 Avril 2015) indique qu'au cours des dernières années, on enregistre une modification de la tendance avec des périodes de sécheresse plus importantes. Si cette tendance est confirmée, on pourrait s'attendre à une incertitude générale dans la phase d'installation de la mousson africaine avec un risque majeur de pertes dues aux échecs de semis et à des retards dans l'installation de la campagne agricole.

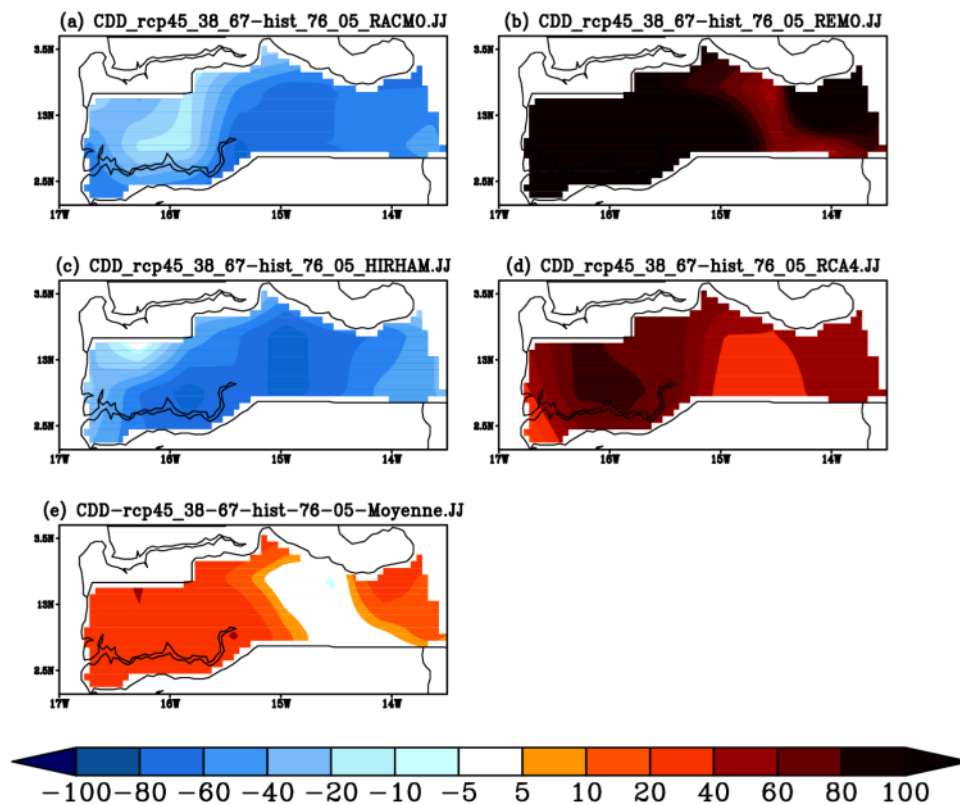


Figure 3.11: Distribution des taux de changement de la durée maximale du nombre de jours consécutifs secs (CDD) entre le futur Proche (2038-2067) et la période historique (1976-2005) durant les mois juin-juillet (JJ) pour les 4 modèles climatiques Régionaux et leur moyenne sous le scénario RCP4.5 en Casamance

La remarque globale que nous faisons, est que les modèles prévoient différemment la durée maximale du nombre de jours consécutifs secs (CDD). Cette différence pourrait être due au type de forçage ou au schéma de convection utilisé sur l’Afrique de l’Ouest (Mariotti et al. 2014 ; Sylla et al. 2011; Klutse et al. 2015) mais également à la différence des scénarios de GES. Cette divergence des modèles montre aussi que les projections climatiques sur les précipitations en Afrique de l’Ouest sont encore incertaines (GIEC 2013 ; Sylla et al. 2016). Une telle situation au Sahel Ouest et particulièrement au Sénégal pourrait avoir des conséquences néfastes sur certaines activités humaines qui dépendent fortement de la pluie estivale telle que l’agriculture pluviale et l’élevage (Salack et al. 2012)

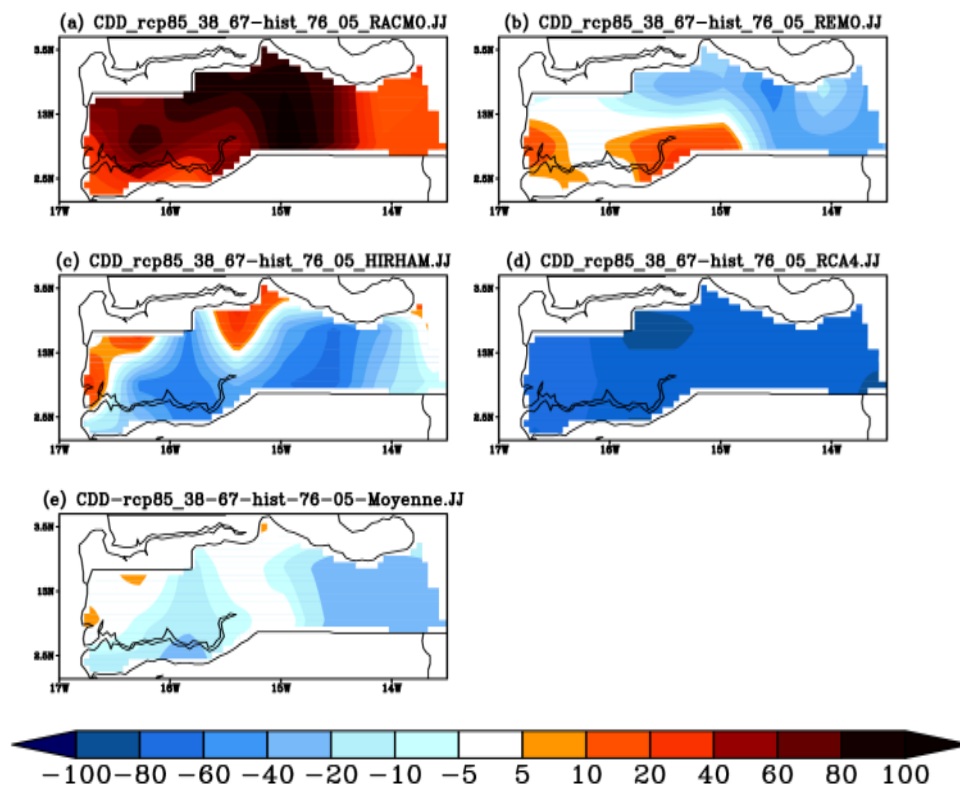


Figure 3.12: Distribution des taux de changement de la durée maximale du nombre de jours consécutifs secs (CDD) entre le futur Proche (2038-2067) et la période historique (1976-2005) durant les mois juin-juillet (JJ) pour les 4 modèles climatiques Régionaux et leur moyenne sous le scénario RCP8.5 en Casamance

Le mois de juillet est normalement en Casamance la période durant laquelle les jeunes plantes vont émerger. Cette phase pour le riz, et pour toutes les cultures céréalières pluviales, représente une phase critique pour l’état de développement de la petite plante. Les racines sont peu développées et elles ne sont pas capables d’absorber l’humidité dans la partie plus profonde du sol en cas de nécessité. En plus les fortes pluies durant cette période peuvent engendrer la

submersion prolongée des petites plantes et des phénomènes d'érosion. A ce stade très vulnérable de la plante on observe les aspects climatiques qui pourraient engendrer les risques pour la riziculture (Rapport PAPSEN N°9 Avril 2015) et les risques majeurs pour les jeunes plantes sont liés surtout aux pluies intenses. Nous avons délibérément choisi de ne pas aborder les risques dus aux pluies intenses dans la phase de germination mais plutôt dans la phase de floraison où le risque dû aux pluies intenses est aussi réel.

b. La floraison

La floraison est le processus biologique de développement des fleurs. Elle est contrôlée par l'environnement et les phytohormones. Dans la nature, la floraison est contrôlée par le phénomène d'induction florale. Elle est une des périodes les plus sensibles de la culture du riz en Casamance et correspond au mois d'octobre. Les conditions de sécheresse aux stades de floraison et maturation sont fréquentes lorsque la saison des pluies est en avance. Les pertes causées par une période de sécheresse prolongée pour plus de 10 jours peuvent causer à une perte de rendement d'1 T/ha (Kanyarukiga, 1998). De la même façon des pluies diluviennes trop importantes peuvent entraîner l'immersion des germes florales et altérer ainsi la productivité de la plante où même sa détérioration.

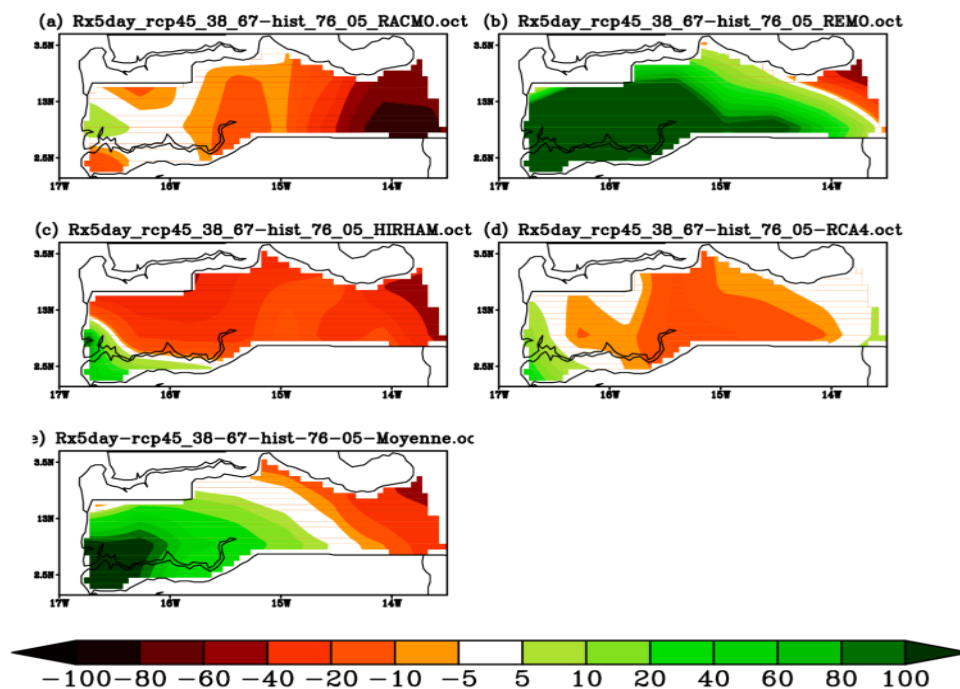


Figure 3.13: Taux de changement de RX5day entre le futur proche (2038-2067) et la période historique (1976-2005) durant le mois d'Octobre pour 4 modèles climatiques régionaux (MCR) et leur moyenne sous le scénario RCP4.5 en Casamance

Les taux changements de la quantité de pluies enregistrées sur 5 jours consécutifs (RX5day) sont analysés dans cette partie et nous focalisons uniquement sur le mois d'octobre. La figure 3.13 montre la distribution du taux de changement des quantités de pluies cumulées pendant 5 jours consécutifs entre futur proche et le présent en Casamance avec le scénario RCP4.5. La distribution du changement de RX5day présente une variabilité d'un modèle à un autre. Les modèles KNMI-RACMO et DMI-HIRHAM et RCA4 présentent des caractéristiques assez similaires avec une tendance future à la diminution de Rx5day sur toute la Casamance (10% à au maximum 90%) sauf une petite zone où ce taux est positif et situé au nord-ouest de la basse Casamance pour le KNMI-RACMO, au sud-ouest de la basse Casamance pour le HIRHAM et le RCA4 (Figures 3.13.a, 3.13.c, 3.13.d). Cependant, il faut noter qu'il y a des zones où le taux est très faible c'est le cas de la haute Casamance avec le modèle RCA4. Contrairement aux modèles précédents, le modèle MPI-REMO et la moyenne des modèles prévoient une augmentation de RX5day sur la Casamance sauf à l'est de la haute Casamance. Les forts taux de changement positifs sont observés en basse Casamance avec environ 90%, mais il faut noter que le modèle MPI-REMO présente une zone plus grande où la valeur du taux de changement est assez importante et s'étale sur toute la basse Casamance et une partie de la moyenne Casamance. Deux niveaux de risques potentiels peuvent alors être répertoriés, une insuffisance de précipitation pourrait altérer la croissance des tiges de riz, c'est le cas de la tendance projetée par le modèle KNMI-RACMO à l'est de la haute Casamance ; ou bien un surplus de précipitation comme le cas de MPI-REMO en basse Casamance qui pourrait immerger et par la même occasion détruire les germes de riz. Il paraît évident donc que la haute et basse Casamance présente des risques potentiels de nature différente. L'analyse des taux de changement avec le scénario RCP8.5 montre que le KNMI-RACMO montre une diminution de RX5day sur toute la Casamance avec un taux maximal observé à l'est de la haute Casamance avec un taux de 90% (Figure 3.14.a). Les modèles MPI-REMO et RCA4 présentent des caractéristiques similaires avec des comportements bipolaires (Figures 3.14.b., 3.14.d) c'est à dire une augmentation de RX5day au futur dans une bonne partie de la basse, moyenne et haute Casamance et une diminution dans deux petites zones situées l'une à l'ouest de de la basse Casamance sur la façade maritime et l'autre à l'est de la haute Casamance surtout pour le modèle MPI-REMO. Le modèle DMI-HIRHAM de même que la moyenne des modèles montrent une augmentation de RX5day sur un noyau situé sur la moyenne Casamance et une diminution de part et d'autre sur la basse et haute Casamance (Figures 3.14.c, 3.14.e). Il faut noter que la moyenne des modèles présente des zones où le taux de changement est très faible. L'analyse de l'ensemble des modèles montre qu'avec le scénario RCP8.5, la basse Casamance

ne présente pas de risques majeurs pour la culture du riz arrivé au stade de floraison, les risques potentiels sont plutôt observés en haute Casamance surtout sur sa partie est. La moyenne Casamance ne présente pas de risque élevé sur l'évolution de la croissance des plants de riz. L'absence de fortes pluies en fin de saison est un bon signal pour ce qui concerne le risque de la verse. Conjointement aux informations enregistrés sur la diminution des périodes secs et la tendance du déplacement de la fin de la saison vers le mois de novembre il semble que la période de l'arrêt des pluies, dans les dernières années, est plus stable en fournissant de garanties majeurs pour les productrices de compléter le cycle de la plante soit s'il y a un semis en retard.

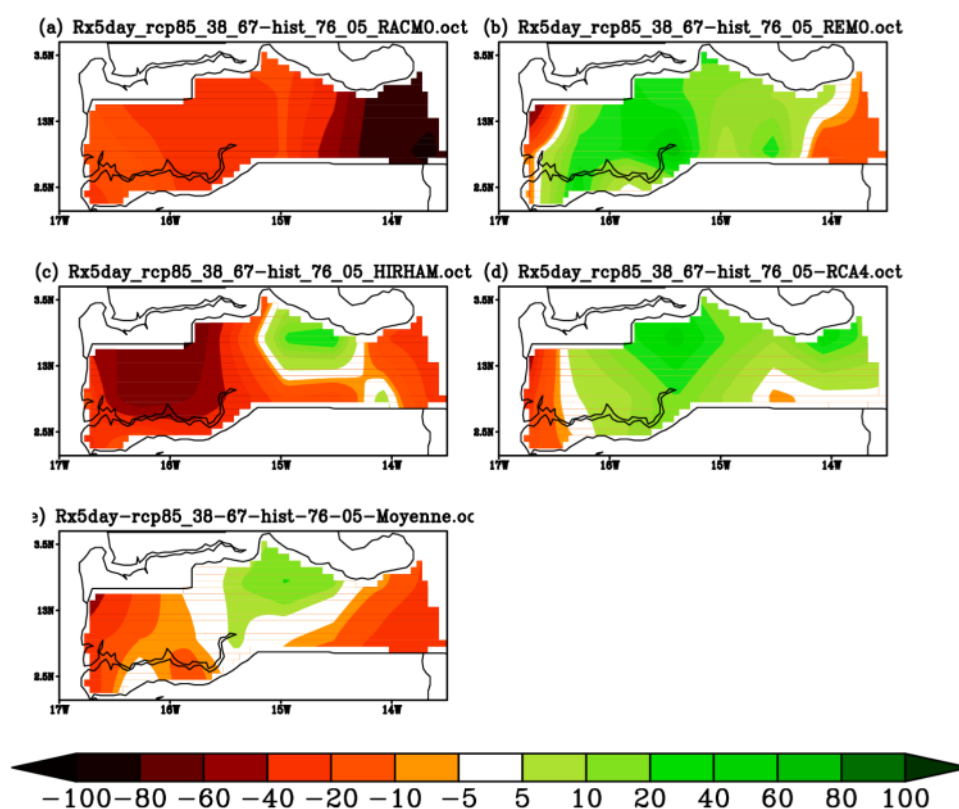


Figure 3.14: Taux de changement de RX5day entre le futur proche (2038-2067) et la période historique (1976-2005) durant le mois d'Octobre pour 4 modèles climatiques régionaux (MCR) et leur moyenne sous le scénario RCP8.5 en Casamance

III.2.3. Risques liés à la santé

L'évolution spatiale et temporelle de l'indice de chaleur (IC) et leurs risques sanitaires sont abordés dans cette partie. Nous présentons sur la période saisonnière constituée par les mois avril, mai et juin (AMJ). Le choix de cette période est motivé par le fait que le maximum de température dans notre zone est obtenu en AMJ. L'indice de chaleur traduit quatre niveaux de supportabilité des conditions météorologiques selon sa valeur : l'inconfort, l'extrême inconfort,

le danger et le danger extrême indique (Tableau 2.4). Nous analysons la distribution de l'indice de chaleur suivant la saison (AMJ) projetée par les différents (MCR) sur le futur proche comparé avec celle obtenue sur la période historique. La figure 3.15 représente l'IC maximal saisonnier en Casamance moyenné entre la période historique (1976-2005) et le futur proche (2038-2067) pour trois MCR sous les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 obtenue avec la température maximale. Durant la période historique, les modèles KNMI-RACMO et MPI-REMO (figures 3.15.a, 3.15.b) simulent sur presque toute la Casamance des valeurs d'IC comprises entre 33°C à 50 °C et un gradient croissant d'ouest à est; ce qui traduit un risque d'inconfort sanitaire pouvant aboutir à une insolation, crampes musculaires et épuisement physique. En effet, les zones situées à l'ouest de la basse Casamance montrent des IC simulés entre 31°C à 32°C traduisant ainsi un risque peut élever qui traduit une fatigue possible après une exposition prolongée et la pratique d'une activité physique. Le KNMI-RACMO présente des valeurs d'IC maximales sur la haute Casamance avec des valeurs comprises entre 45 à 50° C, ce qui n'est pas le cas pour le MPI-REMO. Le modèle RCA4 simule des valeurs d'IC beaucoup plus élevée en basse et moyenne Casamance qu'en basse Casamance. Ce gradient de température croissant d'ouest- en est, est noté avec les deux scénarios mais elle est beaucoup plus remarquable qui va jusqu'à 51 °C en moyenne Casamance et un peu en basse Casamance pour le scénario RCP4.5 qui se traduit un risque d'extrême inconfort qui aboutit à une insolation, crampes musculaires et épuisement physique. Le modèle MPI-RACMO (figure 3.15.d) de la période historique montre en haute Casamance une petite partie subisse un IC compris entre 36 à 39 °C qui est un moyen risque sanitaire. Le même constat est observé pour le scénario RCP4.5 seulement ce model montre de valeurs de IC compris entre 48 à 49 °C qui traduit un danger qui aboutit à une insolation, crampes épuisement probables et cout de chaleur possible ce qui n'est pas le cas avec le scénario RCP8.5 qui montre d'IC comprises entre 51 et 57 °C qui traduit un danger extrême traduisant un risque élevé de coup de chaleur/coup de soleil. Quant au model RCA4 (figures 3.15.g 3.15i), de fortes similitudes sont observés pour les scénarios par rapport à l'historique qui prévoit des valeurs d'IC compris entre 30 à 45 °C qui traduit un danger aboutissant à un risque d'extrême inconfort traduisant à une insolation, crampes musculaires et épuisement physique. Mais de faibles valeurs d'IC sont notées au niveau de la côte Casamançaise. Cela peut être expliqué par l'influence de l'océan qui régule le climat dans cette partie.

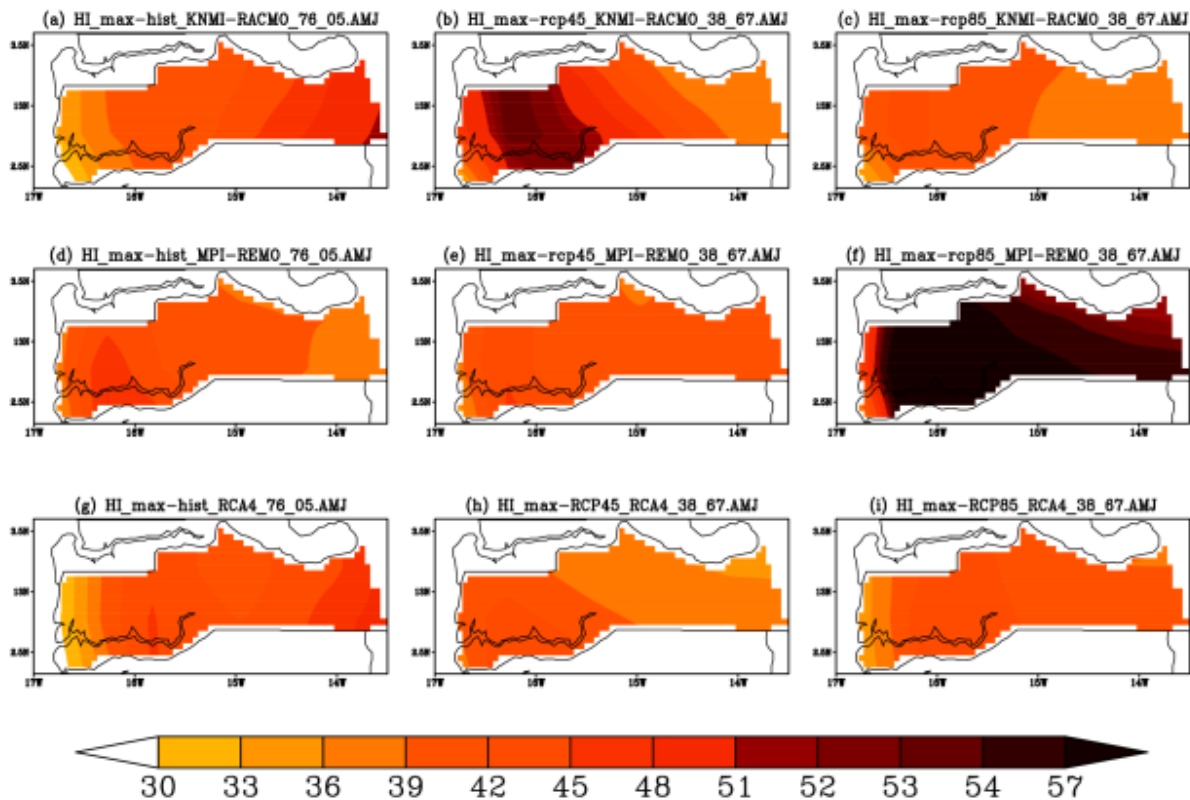


Figure 3.15: Distribution de l'indice de chaleur lié à la température maximale en AMJ et pour la période historique (1976-2005) et future proche (2038-2067) sous les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 en Casamance

La figure 3.16 représente l'IC minimal saisonnier en Casamance moyenné sur la période historique (1976-2005) et le futur proche (2038-2067) pour trois MCR sous le RCP4.5 et RCP8.5 obtenu avec la température minimale. Le rapport de 2011 de la fondation MAIF, indiquait que la chaleur nocturne (T_{min}) est plus néfaste que la chaleur diurne dans ce sens qu'elle empêche à l'organisme de récupérer. Durant la période historique, les modèles KNMI-RACMO et MPI-REMO ont montrés un faible risque sanitaire de 22 à 26.5 °C en Casamance pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 et traduit un inconfort qui aboutit à une fatigue possible après une exposition prolongée et la pratique d'une activité physique. Une légère hausse de température de 25 à 26.5 °C est observée avec RCP8.5 en haute Casamance. Un faible risque est plus noté en basse Casamance sous l'influence de la côte pour les modèles SMHI-RCA4 et MPI-REMO (figure 3.16.g 3.16h 3.16d 3.16e). Mais en basse et moyenne Casamance la valeur d'IC de 25.5 à 26.5 °C traduit un extrême inconfort dans ses zones qui aboutit à l'insolation, crampes musculaires et épuisement physique. D'après les analyses faites sur les températures minimales (T_{min}), certaines zones de la Casamance courent des risques sanitaires assez nets (extrême inconfort et danger) par rapport aux autres

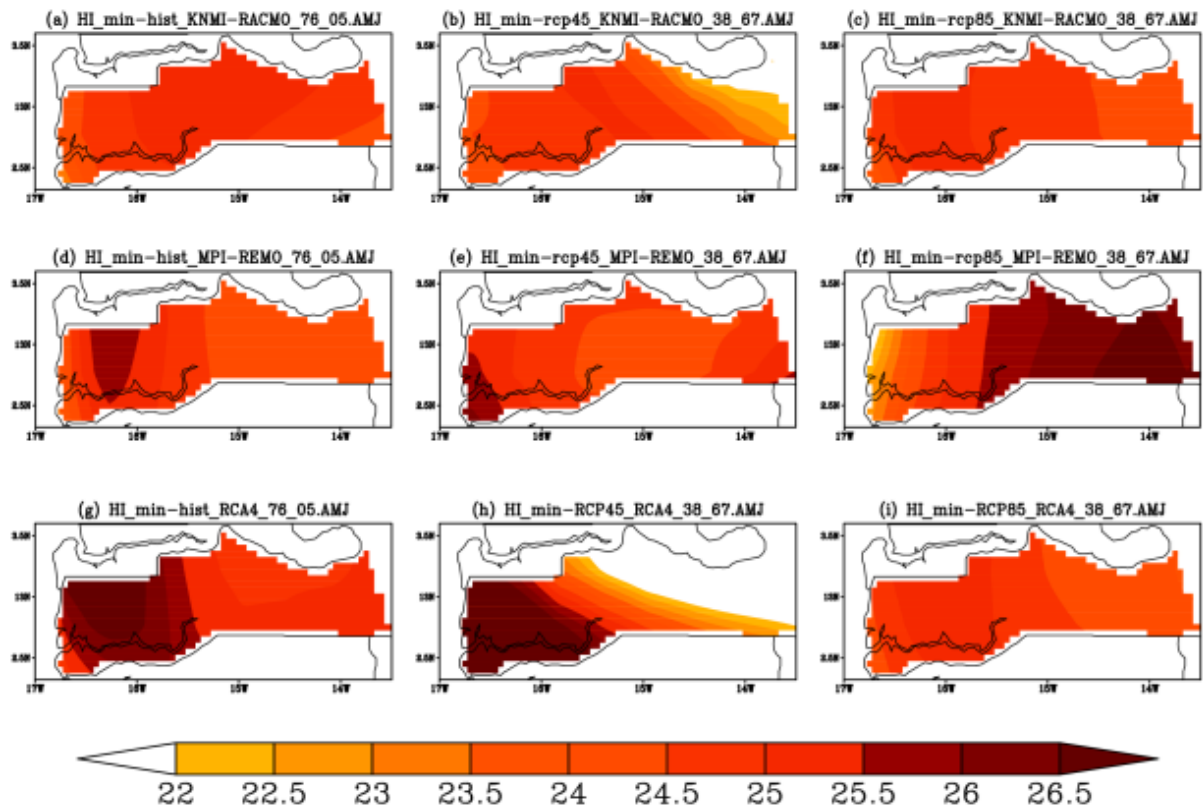


Figure 3.16: Distribution de l'indice de chaleur lié à la température minimale en AMJ et pour la période historique (1976-2005) et future proche (2038-2067) sous les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 en Casamance.

Conclusion

Cette étude vise à caractériser les risques climatiques potentiels en Casamance en se basant sur les changements du futur proche. Ainsi des données satellitaires de chirps, des ré-analyse ERA5 et des sorties de simulations de modèles climatiques régionaux (MCR) du programme CORDEX ont été utilisées afin d'évaluer d'abord la performance des MCR utilisés et ensuite estimer le taux de changement d'un ensemble d'indices. La nature des changements induit à l'identification de niveaux potentiels de risques climatiques dans différents secteurs en Casamance. Les MCR utilisés simulent différemment la distribution des précipitations et des températures, avec des tendances à la surestimation où à la sous-estimation mais dans certaines zones, les simulations avec la réalité sont visibles. Des températures assez élevées ont été notées en moyenne et haute Casamance pendant le mois de (AMJ).

L'analyse des changements des indices climatiques extrêmes tels que la durée maximale des séquences consécutives sèches (CDD), la quantité de précipitation cumulée sur 5 jours (RX5DAY), le pourcentage de précipitation dû à des événements pluvieux correspondant au 95^e percentile (R95PTOT), montre que les MCR (excepté KNMI-RACMO) prévoient une augmentation de ces événements pluvieux exceptionnels sur la Casamance à l'horizon 2067. Le modèle RCA4 et la moyenne des modèles prévoient des conditions favorables à la recharge de l'eau des nappes sur l'ensemble de la région de Casamance avec des taux importants en basse et haute Casamance sous les scénarios RCP4.5 et RCP8.5, et donc un niveau de risque relativement faible pour les ressources en eaux. Le modèle KNMI-RACMO projette une bonne source d'infiltration sur la basse et haute Casamance et des risques de tarissement à l'est de la basse Casamance, des risques accrus de disparition des ressources en eau en basse Casamance sont révélés sous le scénario RCP8.5. Le modèle MPI-REMO présente des situations opposées sous les deux scénarios avec un tarissement des aquifères pour RCP4.5 et un recharge pour RCP8.5. Une caractéristique inverse est observée avec HIRHAM. L'impact des changements d'indices climatiques sur la culture du riz, montre que lors de la germination sous le scénario RCP4.5 (RCP8.5), nous observons des risques réels de destruction des plantes de riz à cause d'une augmentation des CDD de 40% à 50% sur toute la Casamance (10% et 30% en basse et haute Casamance et à 40% en moyenne Casamance). La phase de floraison se singularise avec deux niveaux de risques potentiels : une insuffisance de précipitation qui pourrait altérer la croissance du riz notamment à l'est de la haute Casamance ; ou bien un surplus de précipitations qui risquerait d'immerger et détruire les germes du riz notamment en basse Casamance.

Cependant pour le scénario RCP8.5 les MCR ne prévoient pas de risques majeurs sauf sur la partie est de la haute Casamance.

La Casamance présente un niveau de risque sanitaire élevé lié aux IC en (AMJ) et un pic de risque dangereux pour les populations de la Casamance. L'évolution de l'indice de chaleur montre une augmentation nette sur la Casamance, ce qui montre que la Casamance demeure très vulnérable aux changements du climat et sa population vulnérable (personnes âgées et enfants) est plus que jamais exposée aux risques sanitaires liés à la chaleur. Le niveau de risque sanitaire est peu élevé pour KNMI-RACMO, RCA et la moyenne et traduisent un inconfort et extrême inconfort qui aboutissent à une insolation, crampes musculaires et épuisement physique. Les personnes vulnérables comme les personnes âgées et les enfants sont donc toujours exposé à des risques pouvant aboutir à des coups de chaleurs, des crampes et une fatigue musculaire intense. En définitif, il est nécessaire d'approfondir ce travail dans le but d'améliorer les études sur la résilience et la capacité d'adaptation face au changement climatique en Casamance.

Bibliographie

Ali A., (2011): Climate variability and change in the Sahel. Understanding the current

Alhassane A., Ly M., Traoré S. B., Sarr B., (2013): Evolution of Some Observed Climate Extremes in the West African Sahel. *Weather and Climate Extreme*, 19–25, <http://dx.doi.org/10.1016/j.>

Anderson, G. B. Bell, Peng M. L., R. D., (2013). Methods to Calculate the Heat Index as an Exposure Metric in Environmental Health Research. *Environnemental Health Perspectives*, 121 ,1113. <http://dx.doi.org/10.1289/ehp.1206273>.

Aguilar E., Alexander L. V., Burn J., Brunet M., Caesar J., Collins D., Gleason B., Griffiths G., Haylock M., New M., Klein Tank A. M. G., Kumar K., Peterson T. C., Rahimzadeh F., Rupa Revadekar J., Rusticucci M., Stephenson D. B., Trewin B., Tagipour A., Vincent L., Taylor M., Zhang X., Zhai P., Vazquez-Aguirre J. L., (2006). Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *J. Geophys. Res.*, 111, D05109

AZARNIA S., (2017) : Évaluation hydrologique de jeu de données de précipitations et températures journalières issues du modèle régional de climat "CROQ" Soudabeh Azarnia mémoire p.94

Bodian A., Dezetter A., Dacosta H. (2011) : « Caractérisation spatio-temporelle du régime pluviométrique du haut bassin du fleuve Sénégal dans un contexte de variabilité climatique », *Physio-Géo*, Volume 5 | -1, 107-124

Brunet-Morey Y., (1970). Etude hydrologique en Casamance., ORSTOM/Paris: 52 p., 102 fig., 104 table thèse p 132.

Babiker M., Brinkman S, Calvo E., Moss R., (2007): Towards new scenarios for analysis of emissions, climate change, impacts and response strategies. IPCC expert meeting report, Noordwijkerhout, The Netherlands <https://www.researchgate.net/publication/236487152>

Bodian A., Bacci M., Diop M., (2015) : fleuve Casamance impact potentiels du changement climatique sur les ressources en eau de surface du bassin de la Casamance à partir des scenarios du cmip5 Rapport n° 16 Octobre 2015 p. 49

Bacci M., Diop M., Pasqui M. (2013) Climat - Encadrement climatique et évaluation du changement climatique dans les régions d'étude - Rapport n°6 Décembre 2013 - Programme

d'Appui au Programme National d'Investissement en Agriculture du Sénégal (PAPSEN) p.152
http://www.papsen.org/data/files/PAPSEN_Climat_MB_low.pdf

Bacci M., Manzelli M., Seppoloni I., Tarchiani V., Fiorillo E., Zucchini E. 2015 Analyse socio-économique et agrotechnique de la riziculture de vallée. Le cas des vallées Samiron et Djimbana Rapport n° 7 Février 2015 - Programme d'Appui au Programme National d'Investissement en Agriculture du Sénégal (PAPSEN) <https://www.researchgate.net/publication/311263865>

Camara M., Sarr B. (2017) : Evolution Des Indices Pluviométriques Extrêmes Par L'analyse De Modèles Climatiques Régionaux Du Programme CORDEX: Les Projections Climatiques Sur LeSénégal10.19044/esj.2017.v13n17p206
[URL:http://dx.doi.org/10.19044/esj.2017.v13n17p206](http://dx.doi.org/10.19044/esj.2017.v13n17p206)

Camara M., Diédhiou A., Sow B., Diallo MD, Diatta S., Mbaye I., Diallo I., (2013): Analyse de la pluie simulée par les modèles climatiques régionaux de CORDEX en Afrique de l'Ouest. Sécheresse, 2013, Volume 24, N°1.

Coppola E., Giorgi F., Mariotti L., and Sylla M. B., (2013): Uncertainties in daily rainfall over Africa: assessment of gridded observation products and evaluation of a regional climate model simulation, "International Journal of Climatology", vol. 33, no. 7, and p. 1805–1817.

Coppola E., Giorgi F., Solmon F., et al., (2012): RegCM4: model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains," *Climate Research*, vol. 52, no. 1, pp. 7–29.

CEDEAO-CSAO/OCDE/ CILSS. (2008): Climate and Climate Change. The Atlas on Regional Integration in West Africa Environment Series Available <https://www.oecd.org/swac/publications/40121025>

Diallo I., Sylla M. B., Camara M., and A. Gaye T., (2013): Interannual variability of rainfall over the Sahel based on multiple regional climate models simulations, *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 113, no. 1-2, pp. 351–362.

Diallo I., N.A., Klutse B., Sylla M. B., (2016) : Daily characteristics of West African summer monsoon precipitation in CORDEX simulations, *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 123, no.1-2, pp. 369–386.

Diba I., Camara M. and A.B Sarr, (2016): Impacts of the Sahel-Sahara Interface Reforestation on West African Climate: Intra-seasonal Variability and Extreme Precipitation Events. *Advances in Meteorology*, vol. 2016, Article ID 3262451.

Diouf, A. (2014). « Rapport de l'étude portant diagnostic et analyse du document du Plan Sénégal Émergent par rapport à la dimension changement climatique », Plateforme National de Dialogue Science- Politique pour l'adaptation de l'agriculture et de la sécurité alimentaire au changement climatique, Dakar, p. 40

Diallo I., Giorgi F, Deme A., Tall M, Mariotti L, and Gaye AT (2016): Projected changes of summer monsoon extremes and hydroclimatic regimes over West Africa for the twenty-first century,” *Climate Dynamics* <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3052-4>

Sylvestre Da, Omonlola Nadine Worou, Safiétou Sanfo, Kangbéni Dimobé, Benewindé J-B.Zoungrana (2017) : etat de l'art sur la vulnerabilite des ecosystemes et des populations aux changements climatiques en afrique de l'ouest: une revue bibliographique et cartographique Centre de compétence revue bibliographique p.70.

Dacosta H., Diène M., Gaye A., Malou R., Tandia A.A., (1999) : Etude de la vulnérabilité des ressources en eau aux changements climatiques dans la deuxième Communication Nationale du Sénégal. Dakar. (DEEC):89.

GIEC, Résumé à l'intention des décideurs, Changements climatiques (2013): Les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [sous la direction de Stocker TF, Qin D, Plattner GK, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V et Midgley PM]. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York (État de New York), États-Unis d'Amérique. (www.climatechange2013.org).

GIEC, (2007) : Bilan des changements climatiques. Contribution des groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du climat, équipe de rédaction principale, Pachauri R. K. et Reisinger A., GIEC, Genève.

Goula Bi TA., Kouakou KE., Kouadio ZA, Kouassi FW., Savané I., (2014) : Modélisation de la température et de la pluviométrie dans uncontexte de changement climatique : cas de l'Afrique de l'Ouest. *Afrique Sciences*. 10(1) (2014) 145 – 160

Goubanova, K., (2007). Une étude des événements climatiques extrêmes sur l'Europe et le bassin Méditerranéen et de leur évolution future. Thèse de Doctorat de l'université Paris 6 :

université Pierre et Marie Curie, 121p, URL: [http:// www.Lind.jussieu.fr/ ~ li/a_telier_cc/these_katerina.pdf](http://www.Lind.jussieu.fr/~li/a_telier_cc/these_katerina.pdf)

Kanyarukiga, S. G., & Ngarambe, V. (1998). Wetland Characterization and Classification for Sustainable Agricultural Development. Food and Agriculture Organization. <http://www.fao.org/docrep/003/x6611e/x6611e00.htm>

Klein Tank A. M. G., Konnen GP., (2003). Trend in indices of daily température and précipitation extrêmes in Europe, 1946-99. *Journal of climate*, 16, 3665-3680.

Koné, B., Kouressy, M., Reynier, F.N., Traoré, S.B., Vaskman, M., Sidibé, A., Yorote, A., Yattara, K., (2000) : Adaptation à la sécheresse des écotypes locaux de sorgho du Mali. *Sécheresse* 11,227–237.

Laprise R. (2012) : Potential for added value in precipitation simulated by high-resolution nested Regional Climate Models and observations. *Clim Dyn* (2012) 38:1229–1247 DOI 10.1007/s00382-011-1068-3

Lepinas F, (2008) : Impacts du changement climatique sur l'hydrologie des fleuves côtiers en région Languedoc-Roussillon. Thèse de Doctorat, Université de Perpignan, pp. 334.

Mbaye I., Sané T., (2007) : état des lieux et étude diagnostique de l'environnement de la Casamance. <https://www.researchgate.net/publication/321529418>

Nikulin G, Jones C, Samuelson P, Giorgi F, Sylla MB, Asrar G, Büchner M, Cerezo-Mota R, Christensen OB, Déqué M, Fernandez M, Hänsler A, van Meijgaard E, Sushama L (2012): Precipitation climatology in an ensemble of CORDEX-Africa regional climate simulations. *Journal of climate*. doi 10.1174/JCLI-D-11-00375.1.

ONERC (2018) : Les événements météorologiques extrêmes dans un contexte de changement climatique Rapport au Premier ministre et au Parlement p. 200

Roudier, P., B. Sultan, P. Quirion, and A. Berg. (2011) : The impact of future climate change on West African crop yields: What does the recent literature say? *Symposium on Social theory and the environment in the new world (dis)Order. Global Environmental Change* 21 (3): 1073–1083. doi:[10.1016/j.gloenvcha.2011.04.007](https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.04.007)

Salack S, Muller B, Gaye AT, Hourdin F, Cisse N (2012) : Analyses multi-échelles des pauses pluviométriques au Niger et au Sénégal. *Sécheresse* 23; 3-13. doi: 10.1684/sec.2012.0335

Sylla M. B. (2016) : Climate Change over West Africa: Recent Trends and Future Projections
<https://www.researchgate.net/publication/301338612>

Sultan, B., C. Baron, M. Dingkuhn, B. Sarr, and S. Janicot. (2005): Agricultural impacts of large-scale variability of the West African monsoon. *Agricultural and Forest Meteorology* 128 (1): 93–110. doi:[10.1016/j.agrformet.2004.08.005](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2004.08.005).

Steadman R. G., (1979): The assessment of sultriness. Part I: A temperature-humidity index based on human physiology and clothing science. *J. Appl Meteor.*, 18, 861-873.

Stephenson, D. B., (2008): Definition, diagnosis, and origin of extreme weather and climate events. *Climate Extremes and Society*, 384p. Cambridge University Press: new York.