

UNIVERSITE ASSANE SECK DE ZIGUINCHOR



UFR SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Département de Physique

Mémoire de Master

Mention: Physique et Applications

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

Impacts de la Grande Muraille Verte sur les extrêmes Pluviométriques au Sénégal

Présenté par **Dioumacor FAYE**

Sous la direction de **Prof Moctar CAMARA**

Soutenu publiquement le 19 juin 2020 devant le jury composé de :

M. Bamol Ali SOW	Maitre de conférences CAMES	UASZ/UFRST	Président
M. Mamadou Lamine MBAYE	Maitre-assistant CAMES	UASZ/UFRST	Rapporteur
M. Samo DIATTA	Maitre-assistant CAMES	UASZ/UFRST	Examineur
M. Ibrahima DIBA	Chercheur/LOSEC	UASZ /UFRST	Examineur
M. Moctar CAMARA	Professeur Titulaire	UASZ /UFRST	Encadrant



Dédicaces

Je dédie ce mémoire à mes chers parents

Ma mère Oumou D.F.O.U.F

Mon père Coly F.A.Y.E

*Pour leur patience, leur amour, leur soutien et leurs
encouragements.*

A mes sœurs.

A mes amis et camarades.

*Sans oublier tous mes professeurs que ce soit du primaire, du
moyen, du secondaire ou de l'enseignement supérieur.*

Remerciements

Ce mémoire a été élaboré au sein du Laboratoire d'Océanographie, des Sciences de l'Environnement et du Climat (LOSEC) de l'Université Assane SECK de Ziguinchor. Tout d'abord je remercie ALLAH sans fin pour m'avoir donné la force d'accomplir ce travail. J'exprime ma reconnaissance et mon respect au Directeur de ce mémoire, le Professeur Moctar Camara, enseignant-chercheur à l'université Assane SECK de Ziguinchor pour avoir supervisé ce travail et m'avoir permis de réaliser ce mémoire dans de bonnes conditions.

Je remercie le Docteur Ibrahima Diba pour sa disponibilité, sa capacité d'écoute, et ses précieux conseils durant ce stage.

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 : Dr. Bamol Ali Sow, Dr. Samo DIATTA, Dr. Mamadou Lamine Mbaye, Dr. Ababacar Ndiaye, Dr. Diouma Kobor, Dr. Lat Grand Ndiaye, Dr. Moustapha Thiame, Dr. Joseph Diatta, Dr. Modou Tine pour leurs encouragements.

Je remercie aussi les chercheurs du Laboratoire d'Océanographie, des Sciences de l'Environnement et du Climat (LOSEC) : Dr. Alioune Badara Sarr, M. Hamady Ngansou Sabaly, M. Jules Basse, M. Cheikh Waly Diédhiou, M. Birane Ndom, M. Pierre Malang Diédhiou, Mme Arame Diéye, M. Lamine Konté pour l'aide qu'ils m'ont apporté.

Je n'oublie pas de remercier aussi le Dr. Diène Ngom et M. Omar Kata Faye pour leur soutien durant ces deux ans.

Ma reconnaissance s'adresse à tous mes amis de promotion Assane Ndiaye, Adama Thiandoum, Amadou Diouf, Jacques Daman Diouf, David Sagna, Fatou Khoulé pour leur amitié autant pour la collaboration.

Un remerciement spécial à mes grandes sœurs Marie Kodou Fall, Khady Faye, Seynabou Faye, Marie Faye, Awa Fall, Aissatou Faye, Khane Faye qui m'ont beaucoup aidé dans ma vie que le bon Dieu protecteur des âmes vous prête une longue vie pleine de succès.

Mes remerciements vont à l'endroit de tous mes amis plus particulièrement à Aliou Diop, Fallou Diop, Ababacar Niane, Adama Diouf, Edmon Diouf, Ngor Faye, Boucar Diouf, Ndéye Béréthé Doumbouya pour le soutien et les conseils qu'ils m'ont apportés. Je vous souhaite beaucoup de courage.

Encore merci à vous tous.

Résumé

Depuis plusieurs décennies, le Sénégal comme tous les pays du sahel est confronté à un problème majeur de désertification liée à une dégradation anthropique des terres et aux changements climatiques. Des stratégies et initiatives ont été développées pour lutter contre l'avancée du désert, c'est le cas de la Grande Muraille Verte (GMV) qui est un projet visant à reboiser une bande de 15 km de largeur de Dakar à Djibouti. L'objectif de ce travail est d'évaluer les impacts potentiels de cette Grande Muraille Verte sur les extrêmes pluviométriques au Sénégal en utilisant le modèle climatique régional RegCM4. Pour atteindre cet objectif, deux simulations ont été réalisées avec le modèle RegCM4 : une avec la version de référence de ce modèle et une autre avec la version modifiée de ce même modèle tenant compte de la GMV. Les résultats montrent que la GMV modifie le signal des précipitations sur le Sénégal en l'augmentant dans tout le pays. Cette augmentation est associée à un renforcement de l'évapotranspiration et de l'humidité atmosphérique dans tout le pays. L'analyse montre que la GMV a tendance à augmenter le nombre de jours pluvieux, l'intensité des précipitations durant les jours pluvieux, les 90^{ème}, 95^{ème} et 99^{ème} centiles des pluies dans tout le pays. L'impact de la GMV se manifeste également par une hausse (une baisse) des jours consécutifs humides (secs). Cette analyse montre que la GMV peut avoir des effets positifs sur certaines activités socio-économiques des populations locales (exemple agriculture). Cependant, l'augmentation de certains indices comme le 99^{ème} centile pourrait entraîner des effets néfastes comme les inondations.

Mots clés : Grande Muraille Verte, extrêmes pluviométriques, Sénégal.

Abstract

For several decades, Senegal, like all Sahel countries has faced a major problem of desertification linked to anthropogenic land degradation and climate change. Strategies and initiatives have been developed to halt the advance of the desert such as the Great Green Wall (GGW) which is a project aimed at reforesting a wide band (15 km) from Dakar to Djibouti. The objective of this work is to assess the potential impacts of this Great Green Wall on rainfall extremes in Senegal using the regional climate model RegCM4. To achieve this objective, two simulations were carried out with the RegCM4 model: one with the reference version of this model and another with the modified version of this same model taking into account the GGW. The results show that the GGW alters the rainfall signal over Senegal by increasing it over the whole country. This increase is associated with the strengthening of the evapotranspiration and the atmospheric humidity across the country. The analysis shows that the GGW tends to increase the number of rainy days, the intensity of precipitation during rainy days and the 90th, 95th and 99th percentiles of precipitation over the whole country. The impact of the GGW is also manifested by an increase (a decrease) of the consecutive wet (dry) days.

This study shows that the GGW may result in favorable conditions for local populations' activities such as the agriculture. However, the increase in indices such as the 99th percentile may translate into increased flooding.

Keywords: Great Green Wall, extreme rainfall, Senegal.

Liste des Acronymes

GMV : Grande Muraille Verte

RegCM4 : Modèle climatique Régional version 4

JEA: Jet d'Est Africain

JET : Jet d'Est Tropical

OEA : Onde d'Est Africain

LG : Ligne de grain

RS : Rayonnement Solaire

R_{abs} : Rayonnement solaire absorbé (flux solaire absorbé)

R_N : Rayonnement net

R_{IR} : Rayonnement infra-rouge

ZCIT : Zone de Convergence InterTropicale

EM : Equateur Météorologique

MOA : Mousson Ouest Africaine

FIT : Front InterTropical

CEN-SAD : Chefs d'Etats et de Gouvernements de la Communauté des Etats Sahélo-Sahariens

CC: Changement Climatique

CHIRPS: Climate Hazards group InfraRed Precipitation with Stations;

GLCC: Global Land Cover Characterization

JAS: Juillet-Août-Septembre

RX5day : Maximum de précipitation en 5 jours consécutifs

CDD : Nombre de jours consécutifs secs

CWD : Nombre de jours consécutifs humides

Table des matières

Dédicaces.....	ii
Remerciements.....	iii
Résumé.....	iv
Abstract	v
Liste des Acronymes.....	vi
Table des matières	vii
Liste des figures.....	ix
Liste des tableaux.....	xi
Introduction.....	1
Chapitre 1	3
Généralités sur le système climatique en Afrique de l’Ouest et au Sénégal en particulier	3
1.1 Contexte climatique et circulation à grande échelle.....	3
1.2 Le système de mousson ouest africain	7
1.2.1 Le flux de mousson.....	8
1.2.2 Le Jet d’Est Africain (JEA).....	10
1.2.3 Le Jet d’Est Tropical (JET).....	10
1.2.4 Les ondes d’Est Africaines	12
1.2.5 Les systèmes convectifs.....	12
1.3 La pluviométrie en Afrique de l’Ouest	14
1.4 Les caractéristiques du climat Sénégalais	15
Chapitre 2	18
Données et méthodes	18
2.1 Domaine d’étude.....	18
2.2 Description du modèle et des simulations.....	19
2.2.1. Description du modèle	19
2.2.2. Description des simulations	21
2.3 Les données utilisées.....	24
2.4 Outils statistiques et logiciels utilisés.....	25

Chapitre 3	27
Résultats et discussions.....	27
3.1. La validation du modèle	27
3.2. Impact de la Grande Muraille Verte (GMV) sur la pluie moyenne au Sénégal	28
3.3. Impact de la GMV sur l'humidité atmosphérique et l'évapotranspiration.....	29
3.4. Impact de la GMV sur les extrêmes de précipitation	31
3.4.1. Nombre de jours pluvieux	32
3.4.2. Intensité des jours pluvieux.....	33
3.4.3. Nombre de séquences de fortes précipitations (RX5day).....	35
3.4.4. Caractérisation des jours humides, très humides et extrêmement humides	36
3.4.5. Nombre maximal de jours consécutifs humides (CWD).....	39
3.4.6. Nombre maximal de jours consécutifs secs (CDD).....	40
Conclusion et perspectives.....	41
Références bibliographiques	43

Liste des figures

<i>Figure 1-1: Bilan énergétique en moyenne globale et annuelle du système "Terre-Atmosphère". Les flèches jaunes représentent le rayonnement solaire (Ultraviolet), les flèches rouges, le rayonnement émis par la Terre et l'Atmosphère (Infrarouge), les flèches Vertes et bleues respectivement les flux de chaleur sensible et latente. Les unités sont en W/m² (Kiehl, J.T., and K.E.Trenberth, 1997).</i>	<i>4</i>
<i>Figure 1-2 : Répartition inégale de l'énergie (Beucher, 2010).....</i>	<i>5</i>
<i>Figure 1-3 : Circulation atmosphérique globale, (source Lespinas 2008).....</i>	<i>7</i>
<i>Figure 1-4 Représentation schématique en deux dimensions des structures dynamiques intervenant dans le système de la mousson d'Afrique de l'Ouest. D'Orgeval et al. (2006)....</i>	<i>12</i>
<i>Figure 1-5 : Modèle conceptuel de la ligne de grain. Source : Lafore, 2004.....</i>	<i>14</i>
<i>Figure 2-1: Topographie (m) du domaine simulé.....</i>	<i>18</i>
<i>Figure 2-2: Topographie (m) de la zone d'intérêt (le Sénégal).....</i>	<i>19</i>
<i>Figure 2-3 : Distribution des types de couverture du sol utilisés dans cette étude : (a) version de contrôle du modèle RegCM4 et (b) RegCM4_GMV. Le rectangle vert indique la zone modifiée.....</i>	<i>22</i>
<i>Figure 3-1 : Pluie (mm/jr) moyennée sur la période 2001-2010 sur l'Afrique de l'Ouest en : a) observations du CHIRPS, b) RegCM4_CTL et c) RegCM4_CTL - CHIRPS.....</i>	<i>28</i>
<i>Figure 3-2: Pluie (mm/jr) moyennée sur la période 2001-2010 sur le Sénégal en : a) RegCM4_CTL, b) RegCM4_GMV, et c) différence entre RegCM4_GMV et RegCM4_CTL.....</i>	<i>29</i>
<i>Figure 3-3: Humidité relative (%) moyennée sur la période estivale (JAS) de 2001à 2010 pour les deux versions du modèle et leur différence.....</i>	<i>30</i>
<i>Figure 3-4 : Évapotranspiration (cg / m² / s) moyennée sur la période estivale (JAS) de 2001à 2010 pour les deux versions du modèle et leur différence.....</i>	<i>31</i>
<i>Figure 3-5 : Nombre de jours pluvieux moyenné sur la période estivale (JAS) de 2001à 2010 pour les deux versions du modèle et leur différence. La différence est significative à 95% (t-test).....</i>	<i>33</i>
<i>Figure 3-6 : Intensité des jours pluvieux (mm / jour) moyennée sur la période estivale (JAS) de 2001à 2010 pour les deux versions du modèle et leur différence. La différence est significative à 95% (t-test).....</i>	<i>34</i>

Figure 3-7 : Nombre de séquences de fortes précipitations (RX5day) moyenné sur la période estivale (JAS) de 2001 à 2010 pour les deux versions du modèle et leur différence.....35

Figure 3-8 : 90^{ème} centile des précipitations journalières (jours humides) moyenné sur la période estivale (JAS) de 2001 à 2010 pour les deux versions du modèle et leur différence. La différence est significative à 95% (t-test).....37

Figure 3-9 : 95^{ème} centile des précipitations journalières (jours très humides) moyenné sur la période estivale (JAS) de 2001 à 2010 pour les deux versions du modèle et leur différence. La différence est significative à 95% (t-test)..... 38

Figure 3-10 : 99^{ème} centile des précipitations journalières (jours extrêmement humides) moyenné sur la période estivale (JAS) de 2001 à 2010 pour les deux versions du modèle et leur différence. La différence est significative à 95% (t-test). 38

Figure 3-11 : Nombre maximal de jours consécutifs humides (consecutive wet days - cwd) moyenné sur la période estivale (JAS) de 2001 à 2010 pour les deux versions du modèle et leur différence. La différence est significative à 95% (t-test).....39

Figure 3-12: Nombre maximal de jours consécutifs secs (consecutive dry days -cdd) moyenné sur la période estivale (JAS) de 2001 à 2010 pour les deux versions du modèle et leur différence .La différence est significative à 95% (t-test)..... 40

Liste des tableaux

<i>Tableau 2.1 : Types de couverture végétale ou classes de végétation utilisés dans cette étude.....</i>	<i>23</i>
<i>Tableau 2.2 : Les différents indices climatiques et leurs définitions.....</i>	<i>23</i>

Introduction

Depuis plusieurs décennies, l'homme est devenu un acteur principal de la machine climatique. Certaines de ses activités modifient le climat, c'est l'exemple des changements de la végétation qui provoquent une modification des paramètres bio-géophysiques tels que la longueur de rugosité, l'albédo, l'indice foliaire. Ces changements modifient à leur tour le bilan d'énergie, le vent, le transport d'humidité ainsi que la température. Ces changements modifient également la composition chimique de l'atmosphère et donc les propriétés d'absorption des radiations solaires ou du rayonnement terrestre en émettant des polluants (Katerina, 2007).

Beaucoup de pays de la zone dite sahélo-saharienne, le Sénégal en particulier sont confrontés à un problème majeur de désertification liée à une dégradation anthropique des terres et aux changements climatiques. Ces problèmes sont, avant tout, le résultat de l'action humaine, de la mauvaise gestion des ressources naturelles disponibles, et de la non-durabilité de leur utilisation.

Dans ce pays (Sénégal), près de 60% de la population vit et dépend des ressources tirées de l'agriculture et de l'élevage qui sont fortement influencées par le climat (Diba et al. 2017). Il existe une étroite relation de dépendance entre le bon déroulement de la saison pluvieuse et les activités agricoles dans ce pays (Dieng et al. 2008). Sané et al. (2008) ont montré que depuis trois décennies les conditions climatiques au Sénégal sont caractérisées par une irrégularité de la pluie et une mauvaise répartition des précipitations dans l'espace. Sagna (1988) et Leroux (1995) ont montré que ce pays a enregistré des épisodes de sécheresses durant la période 1968 à 1998, qui ont entraîné une mauvaise qualité de la saison pluvieuse entraînant par conséquent une forte dégradation des sols. Cette dégradation des sols et la désertification combinées aux changements climatiques constituent les principales menaces à la sécurité alimentaire et la subsistance des populations locales du pays.

Dès lors, des stratégies et initiatives ont été proposées par la communauté scientifique pour atténuer leurs effets négatifs. Le projet de la Grande Muraille Verte a été initié par les Chefs d'Etats et de Gouvernements de la Communauté des Etats Sahélo-Sahariens (CEN-SAD) et approuvé en janvier 2007 à Addis-Abeba (Ethiopie). Il est porté par l'union Africaine. Ce projet vise à reboiser une vaste zone de 15km de largeur et plus de 7000km de longueur (de Dakar à Djibouti) pour enrayer l'avancée du désert.

L'objectif de notre étude est d'évaluer l'impact potentiel de cette Grande Muraille Verte (GMV) sur les extrêmes pluviométriques au Sénégal à l'aide du modèle climatique régional RegCM4.

Pour atteindre cet objectif, nous avons subdivisé notre travail en trois chapitres : le premier est consacré aux généralités sur le système climatique en Afrique de l'ouest et au Sénégal en particulier. Le chapitre 2 est dédié à la description des données et la méthodologie utilisées. Le chapitre 3 est consacré à l'analyse et la discussion des résultats. Enfin la dernière partie du travail est réservée à la conclusion et aux perspectives.

Chapitre 1

Généralités sur le système climatique en Afrique de l'Ouest et au Sénégal en particulier

Ce chapitre traite d'abord le climat et ses principaux mécanismes. Les principales caractéristiques du système climatique ouest africain en été boréal sont ensuite présentées. Ce système est composé du flux de mousson dans les basses couches, du Jet d'Est Africain (JEA) dans les couches moyennes, du Jet d'Est Tropical (JET) dans les hautes couches, des Ondes d'Est Africaines (OEA) et des systèmes précipitants tels que les lignes de grains (LG). La dernière partie du chapitre aborde le système climatique du Sénégal.

1.1 Contexte climatique et circulation à grande échelle

➤ Contexte climatique

Le climat correspond aux conditions météorologiques moyennes (températures, précipitations, ensoleillement, humidité de l'air, vitesse des vents, etc.) qui règnent sur une région donnée durant une longue période. Pour l'organisation météorologique mondiale, cette période doit être au minimum 30 ans.

Le système climatique est l'ensemble des interactions entre l'atmosphère (air sec, vapeur d'eau, impureté, ozone et le gaz carbonique, etc.), l'hydrosphère (ensemble de toutes les étendues d'eau liquide), la lithosphère (surface terrestre), la cryosphère (calotte glaciaire, montagneuse ou polaire) et la biosphère de la terre (couvert végétale, monde animale et activité humaine), qui sous l'effet du rayonnement solaire, détermine le climat de la planète. Ces cinq (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, de mouvement, 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).

➤ La circulation générale

Le moteur du système climatique est le rayonnement solaire. Un corps exposé au soleil s'échauffe car il reçoit le rayonnement électromagnétique dit "thermique" émis par cet astre. Ce rayonnement se propage à travers le vide interplanétaire, puis à travers l'atmosphère avant d'être en partie absorbé par le corps qui à son tour émet un rayonnement propre. La Terre reçoit sous la forme de rayonnement thermique de courte longueur d'onde l'énergie rayonnée par le soleil. L'énergie absorbée par la surface terrestre est, par la suite, réémise en direction de l'espace. L'absorption, puis la réémission par la surface terrestre, vont engendrer une modification de la gamme de fréquence du rayonnement électromagnétique par rapport au rayonnement solaire incident (Beucher, 2010). La fréquence du rayonnement issu de la surface est principalement comprise dans les grandes longueurs d'onde (infrarouge thermique et infrarouge lointain) (figure 1.1) (Kiehl et Trenberth, 1997).

Bilan radiatif

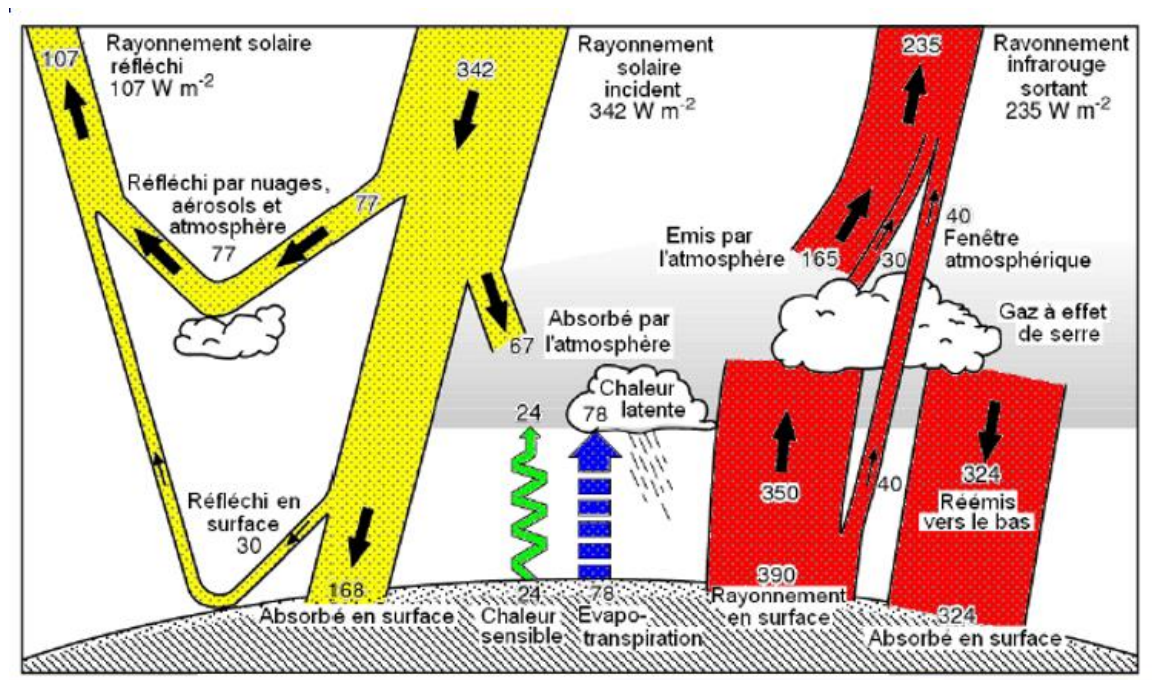


Figure 1-1 : Bilan énergétique en moyenne globale et annuelle du système "Terre-Atmosphère". Les flèches jaunes représentent le rayonnement solaire (ultraviolet), les flèches rouges le rayonnement émis par la Terre et l'Atmosphère (infrarouge), les flèches vertes et bleues respectivement les flux de chaleur sensible et latente. Les unités sont en W/m^2 (Kiehl et Trenberth, 1997).

Le flux solaire absorbé Terre-Atmosphère est la résultante du rayonnement solaire incident modulé par l'albédo (A) du système Terre-Atmosphère. Un corps possédant un albédo de 0.3, réémet 30% du rayonnement solaire (RS) vers l'espace. Le flux solaire absorbé R_{sabs} , dont la répartition varie en fonction des saisons, est plus élevé en moyenne annuelle à l'équateur (jusqu'à 360W/m^2) qu'aux pôles 0W/m^2 (pendant la nuit polaire) (Beucher, 2010). Le rayonnement net est maximal dans la zone équatoriale (figure 1.2).

$$R_{sabs} = RS \cdot (1 - A) \cdot \cos\theta$$

$$R_N = R_{sabs} \cdot (1 - A) - R_{IR}$$

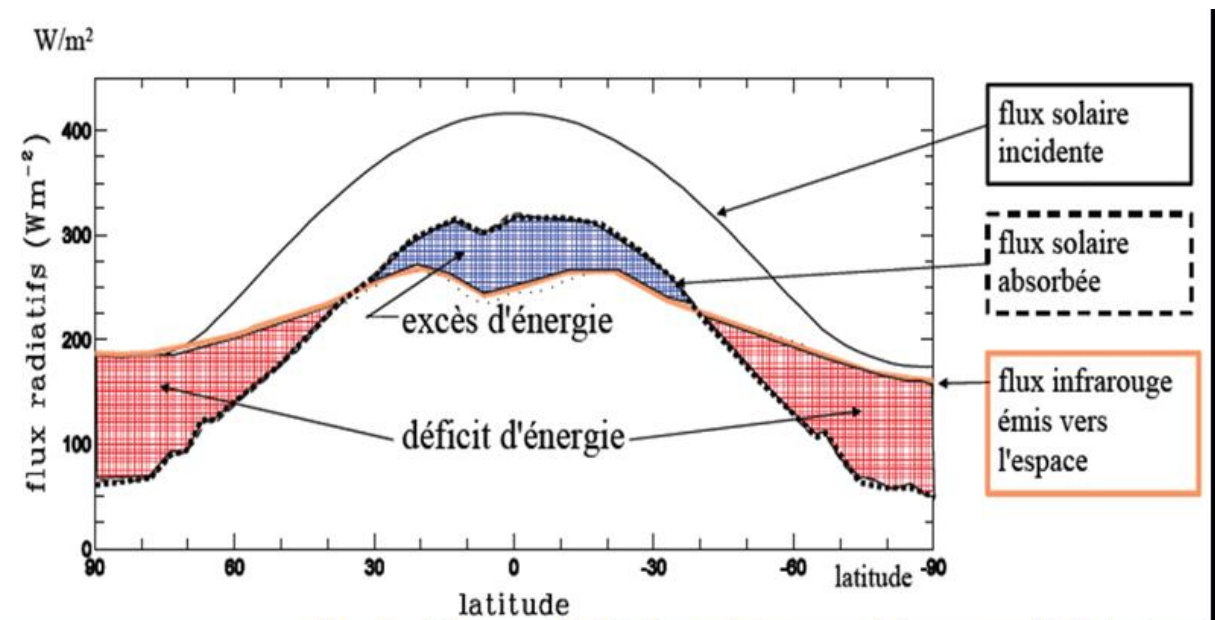


Figure 1-2 : Répartition inégale de l'énergie (Source : Beucher, 2010)

En moyenne annuelle, le bilan radiatif des régions polaires est déficitaire et celui des régions équatoriales et tropicales est excédentaire. Comme aucune région ne se réchauffe ni se refroidit perpétuellement, il se produit un transport de l'excédent d'énergie vers les hautes latitudes. Cette différence de température provoque des déplacements d'air selon le principe fondamental que l'air chaud a tendance à monter en altitude car il est moins dense (plus léger) que l'air froid. La différence de température dans l'air est une des clés de tout mouvement dans l'atmosphère.

La circulation atmosphérique est le mouvement à l'échelle planétaire de la couche d'air entourant la Terre qui redistribue la chaleur provenant du Soleil en conjonction avec la circulation océanique (Kuster, 2020). En effet, comme la Terre est un sphéroïde, la radiation solaire incidente au sol varie entre « un maximum aux régions faisant face directement au Soleil, situé selon les saisons plus ou moins loin de l'équateur, et un minimum à celles très inclinés par rapport à ce dernier, proches des Pôles. La radiation réémise par le sol est liée à la quantité d'énergie reçue. Il s'en suit un réchauffement différentiel entre les deux régions. Le déséquilibre ainsi créé a pour conséquence des différences de pression, qui sont à l'origine de la circulation atmosphérique. Le soleil qui est le moteur principal des mouvements atmosphériques réchauffe la surface de la Terre, qui réchauffe à son tour l'air ambiant. Des mouvements ascendants se créent, mais en s'élevant, l'air se refroidit, environ 1°C tous les 100 m dans la troposphère, couche de l'atmosphère où se déroule la quasi-totalité des phénomènes météorologiques (Kuster, 2020). L'air redescend alors vers le sol. Cette circulation constitue un courant de convection, classique dans tous les fluides que l'on chauffe. De telles boucles de circulation porte le nom de cellule. Les différentes cellules sont disposées en bandes selon les latitudes : c'est une organisation zonale. On distingue trois zones de circulation des vents entre l'équateur et les Pôles. La première zone est celle de Hadley qui se situe entre l'équateur et 30°N et 30°S où l'on retrouve des vents réguliers soufflant du nord-est dans l'hémisphère nord et du sud-est dans celui du sud : les alizés. La seconde se situe aux latitudes moyennes et est caractérisée par des systèmes dépressionnaires transitoires sous une circulation d'altitude généralement d'ouest, c'est la cellule de Ferrel (figure 1.3) (Lespinas, 2008). Finalement, la cellule polaire se retrouve au nord et au sud du 60^{ème} parallèle avec une circulation de surface généralement d'est. Entre ces trois zones, on retrouve les courants-jets circulant autour de la planète à une altitude variant entre 10 et 15 km.

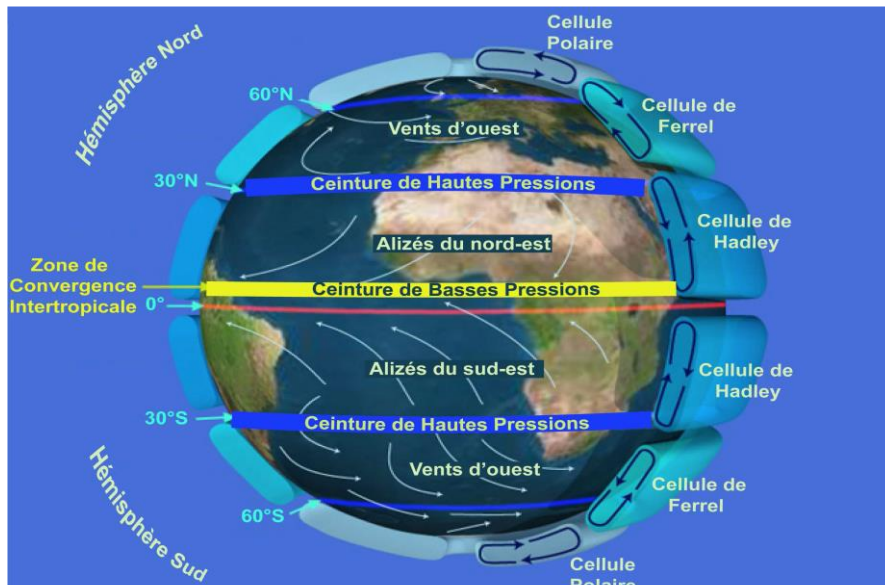


Figure 1-3 : Circulations atmosphériques globales. (Source : Lespinas, 2008).

La circulation atmosphérique générale ainsi définie (figure 1.3) (Lespinas, 2008), assure 70 à 80% du transfert de l'énergie entre les régions à bilan radiatif positif et celles à bilan radiatif négatif. Elle joue un rôle considérable dans le cycle de l'eau, assurant le transport d'énormes quantités de vapeur d'eau. Le déplacement des masses d'air conditionne le climat des diverses régions de la planète en particulier le climat de l'Afrique de l'Ouest caractérisé par le flux de mousson dans les basses couches, le jet d'Est Africain en moyenne troposphère, le jet d'Est tropical en haute troposphère et les systèmes convectifs.

1.2 Le système de mousson ouest africain

La mousson Ouest Africaine (MOA) est une réponse dynamique et hydrique de l'atmosphère au différentiel énergétique entre l'océan et le continent (Beucher, 2010). La circulation dans le système de mousson ouest africain s'organise autour des anticyclones de Sainte-Hélène et des Açores, situés respectivement sur l'Atlantique tropical sud et nord, l'anticyclone de Libye sur l'Afrique du Nord et la dépression thermique saharienne centrée vers 20°N sur l'Afrique de l'Ouest, soit environ 10° plus au nord que la Zone de Convergence InterTropicale (ZCIT). Cette ZCIT, aussi appelée Équateur Météorologique (EM), est également le lieu où la vapeur d'eau est advectée par les alizés des deux hémisphères, cette vapeur d'eau se condense en libérant la chaleur latente dans la convection. La conversion de chaleurs (latente et sensible) donne de l'énergie potentielle à l'air humide. Elle est typiquement marquée par beaucoup de nuages à fort développement vertical (cumulonimbus), une tropopause élevée (entre 16 et 18 km) et des

précipitations orageuses abondantes. La mousson ouest africaine est caractérisée par les fluctuations des masses d'air de la mer tropicale (vent du sud-ouest) et des masses d'air du continent tropical (vent du nord-est). La mousson, souvent définie comme un changement de la direction des vents, peut être causée par une variété de facteurs (Webster et al.1998), y compris :

- Les différences de température de la terre et de l'océan dues aux variations saisonnières des radiations solaires et les capacités calorifiques de la terre et de l'océan ;
- La rotation planétaire relative à la géographie ;
- La distribution et l'apparition de processus humides.

Le gradient horizontal (Nord-Sud) de température est un des mécanismes de base qui pilote la circulation de mousson (Plumb et Hou, 1992). Cependant, les effets de la rotation de la terre et les processus convectifs humides doivent être pris en compte pour expliquer la structure et le cycle saisonnier de la mousson. Ainsi, le continent est plus froid que l'océan en hiver boréal, le vent de surface engendré par le gradient de pression souffle du continent vers l'océan. En été dans l'hémisphère nord (été boréal), le continent se réchauffe plus vite que l'océan ce qui provoque un renversement du gradient de pression. Le vent souffle alors de l'océan vers le continent : c'est la circulation de mousson.

1.2.1 Le flux de mousson

Les alizés de l'hémisphère sud (sud-est) issus de l'anticyclone de Sainte-Hélène sont alors suffisamment renforcés pour changer d'hémisphère. Une fois l'équateur franchi, ces vents chargés d'humidité sont déviés par la composante horizontale de la force de Coriolis pour former le « flux de mousson » (vent du sud-ouest). Ce flux de mousson amène sur le continent un air chargé d'humidité, nécessaire à la convection nuageuse. L'intensité du flux de mousson et son contenu énergétique vont donc être déterminants pour son positionnement sur le continent. Ce flux de mousson rencontre sur le continent un vent du nord-est chaud et sec en provenance du Sahara, qui correspond aux alizés de l'hémisphère Nord. Ce vent d'harmattan règne lorsque les cellules des Açores et de Libye sont soudées, il est alors de direction zonale, très chaud et très sec, à cause de son long trajet continental. L'humidité relative peut chuter à moins de 10%, ce qui ne permet pas le développement et la formation des nuages. Le ciel est clair et l'amplitude diurne très forte, avec des températures basses la nuit, dues à l'absence de couverture nuageuse, et très élevées le jour. Quand il est fort, le vent d'harmattan, est accompagné de brumes sèches dont l'origine peut être lointaine.

La convergence entre Harmattan et flux de mousson marque l'emplacement du Front InterTropical (FIT, Adefolalu 1983) qui représente la trace au sol de la ZCIT. Le FIT représente aussi le lieu des pressions minimales dans la dépression thermique continentale (figure 1.4).

Le flux de mousson ouest africain a lieu de mai à septembre et apparait entre 1000 et 850hPa, elle suit le mouvement de la ZCIT et se répartie en trois phases :

- Début mai, la ZCIT migre brusquement de 2°N à 5°N : c'est la phase de pré-mousson appelée 'pré-onset' correspondant à l'installation de la ZCIT sur la zone Guinéenne et au début de la saison pluvieuse sur cette zone.
- Fin juin, la ZCIT migre brusquement de 5°N à 10°N : c'est la phase de début de mousson appelée 'onset' correspond au début des pluies sur le sahel.
- Le retrait de la ZCIT vers l'équateur est linéaire entre fin août et octobre : c'est la phase de fin de mousson d'été, qui correspond à la fin de la saison des pluies au sahel et à la seconde saison des pluies en zone Guinéenne.

La circulation de mousson est un processus sensible aux états de surfaces océaniques et continentales. Plusieurs études ont montré que les températures de surface marines jouent un rôle important dans la circulation de mousson (Lamb 1978; Lough 1986). Un réchauffement de l'Atlantique Sud associé à un refroidissement de l'Atlantique Nord limite la pénétration de l'humidité sur le continent. Beaucoup d'études ont souligné la sensibilité de la dynamique de la mousson et des précipitations aux processus de surface continentaux (albédo de surface, végétation, humidité des sols et évaporation). Charney (1975), dans un travail pionnier, a montré que l'albédo avait une rétroaction positive sur la sécheresse, à l'échelle pluriannuelle. Quant à l'humidité des sols, sa baisse limite la convergence des flux d'humidité en réduisant les gradients verticaux et horizontaux d'énergie, suite à une réduction de l'évaporation (Eltahir, 1998). La sensibilité de la circulation de mousson à la végétation a été étudiée par Xue et Shukla (1993) qui ont conclu que la désertification au Sahel réduit la convergence des flux d'humidité et de précipitation. Plus tard, Zheng et Eltahir (1998) ont montré que la dégradation des forêts en zone guinéenne a des conséquences encore plus dramatiques sur la circulation de mousson en réduisant l'énergie statique humide dans les basses couches. Ceci diminue l'intensité de la mousson et son potentiel pluviométrique sur le Sahel. Pour résumer, la circulation de mousson induite par le différentiel énergétique entre le continent et l'océan est sensible aux gradients méridiens d'énergie, eux-mêmes sensibles aux conditions de surfaces océaniques et continentales.

Les précipitations en Afrique de l'ouest sont essentiellement dépendantes de la mousson ouest Africaine. Ces pluies jouent un rôle capital dans l'agriculture. Les gradients d'énergie entre l'océan et l'atmosphère jouent un rôle non seulement dans la circulation de basses couches mais également dans la circulation de la moyenne troposphère marquée par la présence du Jet d'Est Africain (JEA).

1.2.2 Le Jet d'Est Africain (JEA)

C'est un jet d'échelle régionale observé pendant l'été boréal en moyenne troposphère entre 500 et 700 hPa dont le maximum de vitesse est situé vers 15°N. Il s'étend en moyenne du lac Tchad au Cap-Vert, avec des intensités maximales de l'ordre de 15 m/s. Il résulte du fort gradient thermique existant dans les basses couches entre la convection sèche près de la dépression thermique située sur le Sahara et la convection humide sur le Golfe de Guinée et du renversement de ce gradient méridien en altitude. Ce jet joue un rôle important dans le climat Sahélien. Selon Cadet et Nnoli (1987), le JEA transporte l'humidité au-dessus des régions Sahéliennes. Des études de simulations numériques (Lafore et Moncrief, 1989 ; Weisman et Rotunno, 2004) ont permis de montrer que le JEA organise la convection et, notamment, les systèmes convectifs les plus développés (les lignes de grains), soit en orientant le système, soit en augmentant le cisaillement vertical du vent dans les basses couches. Plusieurs auteurs ont cherché à comprendre l'origine et le maintien de ce jet. Thorncroft et Blackburn (1999), en analysant les processus physiques qui sont à l'origine de ce jet avec un modèle à symétrie zonale, ont montré l'importance des différents types de convection observés de part et d'autre du JEA dans son maintien. C'est la présence de la convection humide au sud du jet dans la ZCIT et de la convection sèche au nord sur le Sahara, qui entretient le jet. Chang (1993) avec un modèle linéaire, Karyampudi et Carlson (1988) avec un modèle à aire limitée sur l'Afrique de l'Ouest et l'Atlantique Nord confirment que la prise en compte de la couche limite Saharienne est essentielle pour représenter le JEA. Xue et Shukla (1996) ont montré que l'afforestation se traduit par un affaiblissement du JEA et un renforcement du jet d'est tropical qui apparaît vers 200hPa durant l'été boréal.

1.2.3 Le Jet d'Est Tropical (JET)

Ce courant jet qui a plus d'extension spatiale que le précédent (JEA), s'installe en été boréal dans la troposphère entre les plateaux tibétains et les côtes ouest africaines. Son origine est liée à l'établissement de la mousson indienne notamment aux contrastes thermiques existant en été

entre les hauts plateaux du Tibet et les régions océaniques dans le sud-est asiatique. Le JET est observé en Afrique de l'Ouest entre 100 et 200hPa autour de 10°N avec une intensité maximale de l'ordre de 20 m/s. Kanamitsu et Krishnamurti (1978) ont remarqué une tendance à l'affaiblissement du JET (vitesse moyenne et extension spatiale) pendant les années sèches. Ce flux d'Est s'étend ainsi de l'Est de l'Océan Indien jusqu'en Afrique où il se maintient par le dégagement de chaleur latente au sein de la ZCIT (Chen, 1982). Selon Fontaine (1989) et Janicot (1990) le JET représente en fait la branche haute de la cellule de Walker sur l'Afrique. Le gradient méridien de tourbillon potentiel change de signe vers 100-200 hPa (Burpee 1972), c'est-à-dire que le JET satisfait le critère d'instabilité de Charney et Stern (1962) et pourrait être à l'origine d'une activité synoptique vers 100-200 hPa. Thorncroft et Hodges (1997) ont montré que la bande de latitude comprise entre le JET et le JEA est une zone favorable au développement de la convection profonde. Le JET se renforce sur l'Afrique en raison du gradient thermique entre les zones continentale et océanique. Il disparaît ensuite sur l'Océan Atlantique à cause de la relative uniformité des températures. La figure 1.4 montre l'organisation des flux en Afrique de l'Ouest avec le flux de mousson dans les basses couches, le JEA et le JET dans les moyennes et hautes couches respectivement.

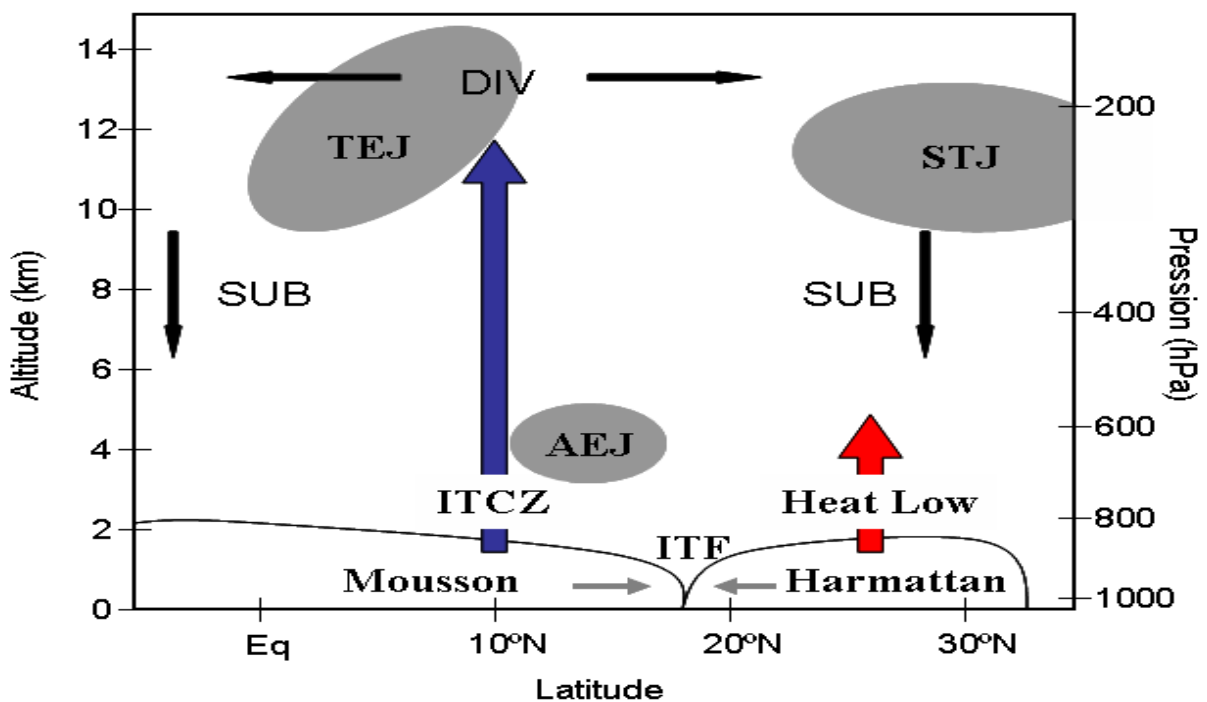


Figure 1-4 : Représentation schématique en deux dimensions des structures dynamiques intervenant dans le système de mousson ouest africain. (Source, D'Orgeval et al. 2006)

1.2.4 Les ondes d'Est Africaines

Les ondes d'Est Africaines sont actuellement de deux types : les ondes d'est de période 3-5 jours (Reed et al. 1977) et de longueur d'onde 2000 à 3500 km liées aux instabilités barotropes et baroclines du JEA et les ondes de période 6-9 jours (de Félice et al. 1990 ; Diédhiou et al. 1998) qui se développent de manière intermittente au nord du JEA. Ces ondes modulent à la fois la convection et les précipitations en Afrique de l'Ouest pendant l'été boréal.

Les Ondes d'Est Africaines de période 3-5 jours sont des perturbations d'échelle synoptique observées sur l'Afrique centrale et occidentale, se déplaçant d'est en ouest dans la moyenne troposphère entre Juin et Octobre. Une onde d'est africaine prend naissance tous les 3-5 jours entre juin et octobre sur la Corne de l'Afrique (13°N/30°E), s'intensifie à l'ouest de cette longitude (Tchad/ Centrafrique) et devient maximale vers 15°W avant de s'affaiblir au milieu de l'Atlantique (40°W). Certaines ondes atteignent les Caraïbes où elles se réintensifient (à l'origine de 50 % des dépressions tropicales). Elles sont particulièrement importantes sur l'Atlantique car elles peuvent se transformer en cyclones selon Avila et Clark (1989). Il semble que sur le continent, elles peuvent initier un environnement favorable à l'apparition et au développement des lignes de grains (Chen et Ogura, 1982).

1.2.5 Les systèmes convectifs

Les systèmes convectifs en Afrique de l'ouest peuvent être divisés en 3 grandes parties sur la base de leurs capacités à s'alimenter continuellement en masses d'air instable et humide. Ces trois grandes parties sont : les systèmes unicellulaires (ou isolés) qui sont des nuages constitués d'une cellule unique avec des précipitations au sol limitées, l'orage multicellulaire qui est un système composé de plusieurs cellules convectives à différents stades de développement et enfin les systèmes convectifs de méso-échelles qui sont les systèmes convectifs les plus développés. Ces systèmes convectifs sont constitués d'orages qui se répartissent avec le temps, en lignes ou en zones, pour former des entités qui peuvent occuper plusieurs dizaines à quelques centaines de kilomètres de longueur ou de diamètre (méso-échelle). Ces systèmes regroupent les lignes de grains qui sont responsables de la majeure partie de la pluviométrie annuelle en Afrique de l'ouest (Beucher, 2010). Ces lignes de grains sont les phénomènes météorologiques les plus violents en Afrique de l'Ouest. Une ligne de grain (LG) est formée d'un système nuageux s'étendant horizontalement sur quelques centaines de kilomètres et associé à de fortes pluies qui se déplacent très rapidement (50km/h). Sa trajectoire est plus souvent rectiligne. Elle est constituée de cumulus et de cumulo-nimbus orientés Sud-Nord à l'avant et d'une traîne diffuse à l'arrière. Au sein de la mousson africaine, ces systèmes se déplacent d'Est en Ouest à

une vitesse de l'ordre de 12 à 15° de longitude par jour, soit plus vite que le vent ambiant. Ce système nuageux est constitué de deux parties (figure 1.5). A l'avant du système, se présente une zone dite convective (avec de forts mouvements verticaux) constituée des nuages précipitants. Ces cellules sont le plus souvent alignées, d'où le nom de « ligne de grains ». L'extension horizontale de la zone convective peut aller jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres dans la direction perpendiculaire à la trajectoire et jusqu'à quelques dizaines de kilomètres dans la direction parallèle à la trajectoire. A l'arrière du système, se trouve une étendue nuageuse dite zone stratiforme (présentant de très faibles mouvements verticaux de l'air), s'étendant horizontalement sur des milliers de kilomètres.

Le passage d'une LG se manifeste par un changement brusque de la direction du vent : à l'avant de la perturbation, le vent est de Sud-Ouest, puis tourne rapidement à l'Est en atteignant 15 à 20 m/s pendant quelques minutes. Il y a une hausse brusque de la pression au moment du coup de vent, puis une baisse progressive. La température au moment du coup de vent, peut passer de 26°C à 17°C en quelques minutes. Cette chute est due à l'évaporation des gouttelettes de pluie.

La pluie est plus intense sous le cumulonimbus; elle est moins intense sous la partie stratiforme mais de plus longue durée. Au cours de sa vie, la LG fournit en moyenne en un point 25 mm, dont la moitié durant les premières minutes. Les pluies apportées par les LG représentent une part importante des précipitations totales pendant l'hivernage. Comme tous les systèmes convectifs, la LG influe sur l'environnement et modifie l'atmosphère. Elle a notamment pour effet un assèchement des basses couches et une humidification des couches supérieures découlant du transfert d'une partie de l'humidité des basses couches vers les couches supérieures (Aspliden, 1976). La plupart des LG meurt en arrivant sur la côte. Deux facteurs semblent jouer un rôle important dans la dissipation de ces systèmes convectifs: d'une part, la présence d'air plus stable dans les basses couches lorsqu'elles atteignent la côte Atlantique ne permet plus l'alimentation de l'intense convection à l'avant des LG ; d'autre part, la comparaison des vitesses de propagation des LG et des ondes d'Est montre qu'une LG une fois formée peut rattraper le thalweg de l'onde et se trouver ensuite dans des conditions moins favorables. L'initiation du phénomène semble plus importante au cours de l'après-midi, montrant l'importance du cycle diurne (Gaye, 2002 ; Gaye et al. 2005).

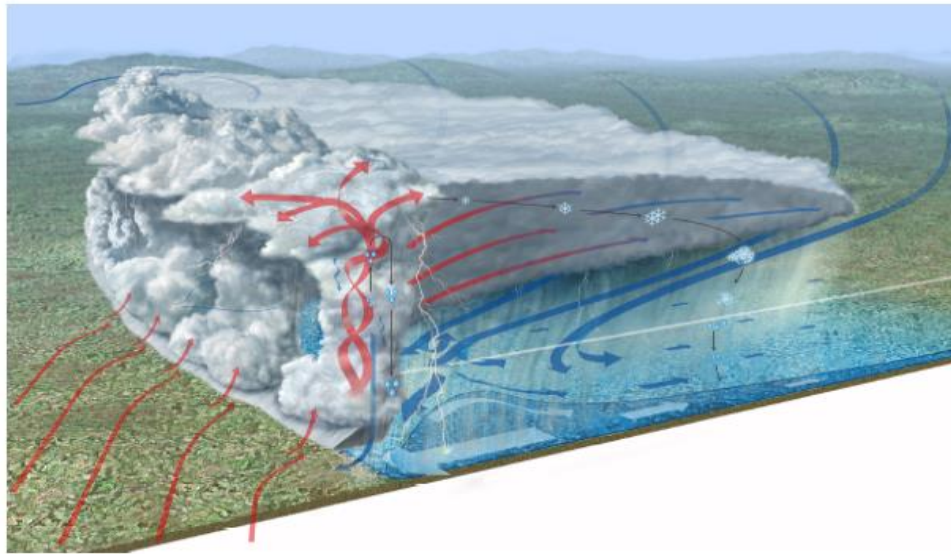


Figure 1-5 : Modèle conceptuel de la ligne de grain. (Source : Lafore, 2004).

1.3 La pluviométrie en Afrique de l'Ouest

Les précipitations en Afrique de l'Ouest ont une distribution zonale et décroissante des côtes vers l'intérieur du continent (Dacosta et al. 2002). Les zones de maxima de pluies sont localisées au sud-ouest, sur les côtes du Golfe de Guinée et les principaux reliefs (Nicholson, 1983. La répartition géographique du cumul de ces précipitations met en évidence deux zones principales distinctes:

- le Sahel habituellement défini comme la zone comprise entre le désert du Sahara et le domaine soudanais.
- une zone Guinéenne qui s'étend en longitude, de la côte Atlantique jusqu'à l'est du Tchad, et en latitude de la marge sud du Sahel au Golf de Guinée.

La mousson ouest Africaine représente la principale source de pluie pour la population locale. Ainsi, le total des cumuls annuels des précipitations au Sahel se concentre seulement aux mois de Juin, Juillet, Août et Septembre. Le régime pluviométrique sur cette région est lié directement au mouvement saisonnier de la zone de convergence intertropicale (ZCIT) et au développement de la circulation de la mousson ouest africaine entre le printemps et l'automne boréale (Bouali, 2009).

- ✓ En hiver boréal : (décembre à mars) : c'est la grande saison sèche en Afrique de l'ouest, les cumuls de pluie sont très faibles (50 mm sur la côte sud), voire nuls sur l'ensemble

de la région. Cette répartition est due à la présence de la ZCIT sur l'Océan puisque c'est à cette période de l'année qu'elle occupe sa position la plus méridionale (vers 2°N) ;

- ✓ En printemps boréal (avril à juin) : cette saison est caractérisée par une nette augmentation des précipitations au sud de 11°N (entre 100 et 250mm), surtout entre mai et juin, c'est la première saison des pluies en région guinéenne. Au Nord de 11°N (le Sahel) la saison sèche se prolonge. Cette opposition entre les deux zones (Guinée et Sahel) peut être due essentiellement aux sauts méridiens successifs de la ZCIT vers le Nord.
- ✓ En été boréal (de juillet à septembre) : cette période correspond à un saut rapide de la ZCIT de 5°N à 10°N en début d'été lors de la mise en place de la mousson sur la zone Soudano-Sahélienne. Ce saut s'accompagne d'un accroissement des précipitations de (100 à 500 mm) sur le Sahel. C'est la saison des pluies au Sahel, contrairement à la zone guinéenne qui connaît sa petite saison sèche.
- ✓ En automne boréal (d'octobre à novembre) : cette période correspond au retrait progressif de la ZCIT vers le sud 5°N, la seconde saison des pluies en zone guinéenne et donc une forte diminution de la pluie sur le Sahel.

1.4 Les caractéristiques du climat Sénégalais

Le Sénégal situé dans la zone Soudano-Sahélienne dispose de deux bandes climatiques tropicales réparties de part et d'autre de la latitude de Dakar, avec au nord un domaine Sahélien et au sud un domaine Soudanien. Ces bandes climatiques à disposition latitudinale sont altérées, sur le littoral, par des variantes azonales dues à l'influence de l'alizé maritime en provenance de l'anticyclone des Açores (Leroux, 1983). Hors du littoral, le pays est sous l'influence de deux masses d'air: d'une part l'alizé continental (harmattan) qui souffle sur le pays pendant la saison sèche, et d'autre part la mousson issue de l'anticyclone de Saint Hélène (dans l'Atlantique sud) et qui apporte la pluie entre les mois de mai et octobre. Ce climat est modulé principalement par les variations méridiennes de la position de la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT). Le climat Sénégalais est caractérisé par une saison humide comprise en moyenne entre les mois de mai et octobre, et une saison sèche durant laquelle les précipitations sont quasiment nulles et sont comprises entre les mois de Novembre et Avril. La période la plus chaude de l'année est juste avant le début de la saison des pluies lorsque l'angle zénithal s'approche de zéro et que

l'absence de nébulosité permet au rayonnement solaire de réchauffer au maximum la surface continentale.

Dans ce pays, la pluviosité est très variable dans le temps et dans l'espace. Il est à cheval sur trois domaines climatiques (Diatta, 2008) :

- le domaine climatique Sahélien au nord avec une pluviométrie moyenne de 300 à 600mm par an;
- le climat Soudanien au centre avec une pluviométrie moyenne qui varie entre 600 et 800mm suivant le secteur nord Soudanien et entre 800 à 1000 mm suivant le sud Soudanien;
- le climat sub-guinéen au sud où on enregistre plus de 1000mm de pluie en moyenne par an.

En d'autres termes, la répartition zonale des précipitations augmente suivant un gradient nord-sud (méridien), ainsi que la longueur des saisons des pluies. Cette dernière varie de deux à trois mois au nord dans la région de Saint-Louis à quatre ou cinq mois en Basse Casamance (région de Ziguinchor) à l'extrême sud-ouest du pays.

En effet, au Sénégal, la pluviométrie subit une double influence qui s'explique par des facteurs géographiques: d'une part, l'influence de l'Atlantique dont l'inertie thermique a pour conséquence un début tardif de la saison des pluies sur le littoral mais avec des totaux annuels plus importants par rapport à l'intérieur du pays; et d'autre part, son extension en latitude entraîne une réduction progressive de la pluviométrie du sud vers le nord. Il en résulte donc deux gradients: un gradient océanique (ouest-est) et un gradient méridien (sud-nord) (Dacosta et al. 2002). Depuis trois décennies les conditions climatiques au Sénégal sont caractérisées par une irrégularité pluviométrique et une mauvaise répartition des précipitations dans l'espace (Sané et al. 2008). Sagna (1988) et Leroux (1995) ont montré que ce pays a enregistré des sécheresses plus ou moins profondes durant la période 1968 à 1998, qui ont entraîné une mauvaise qualité de la saison pluvieuse entraînant par conséquent une forte dégradation des sols. Dacosta (2002) a montré qu'au Sénégal, après plus d'un siècle d'observations, l'analyse des séries chronologiques de pluies annuelles montre, au plan temporel, des fluctuations constantes avec une rupture à la fin des années 1960. Au plan spatial, on note une migration des isohyètes vers le sud avec une nette différence entre zone côtière et domaine continental. Une analyse de la composante méridienne sur trois transects (17° correspondant à la côte; 15°

et 12°) indique une zonation de la distribution des précipitations et une différenciation entre zones climatiques.

Chapitre 2

Données et méthodes

Dans ce chapitre, il sera tout d'abord question de la présentation du domaine d'étude qui sera suivie de la description du modèle climatique régional RegCM4 et des simulations réalisées ainsi que des données utilisées. Enfin, les différentes méthodes employées afin d'évaluer la performance du modèle et d'étudier l'impact de la GMV seront illustrées dans la dernière section du chapitre.

2.1 Domaine d'étude

Le territoire Sénégalais est situé entre $12^{\circ}8$ et $16^{\circ}41$ de latitude nord, $11^{\circ}21$ et $17^{\circ}32$ de longitude Ouest (figure 2.2). Il est bordé par l'Océan Atlantique à l'Ouest, la Mauritanie au nord, à l'est par le Mali, la Guinée et la Guinée-Bissau au sud. Le climat est tropical et sec avec deux saisons : la saison sèche et la saison des pluies. La figure 2.1 présente le domaine simulé ainsi que la zone d'intérêt (le Sénégal en rectangle) (figure 2.2).

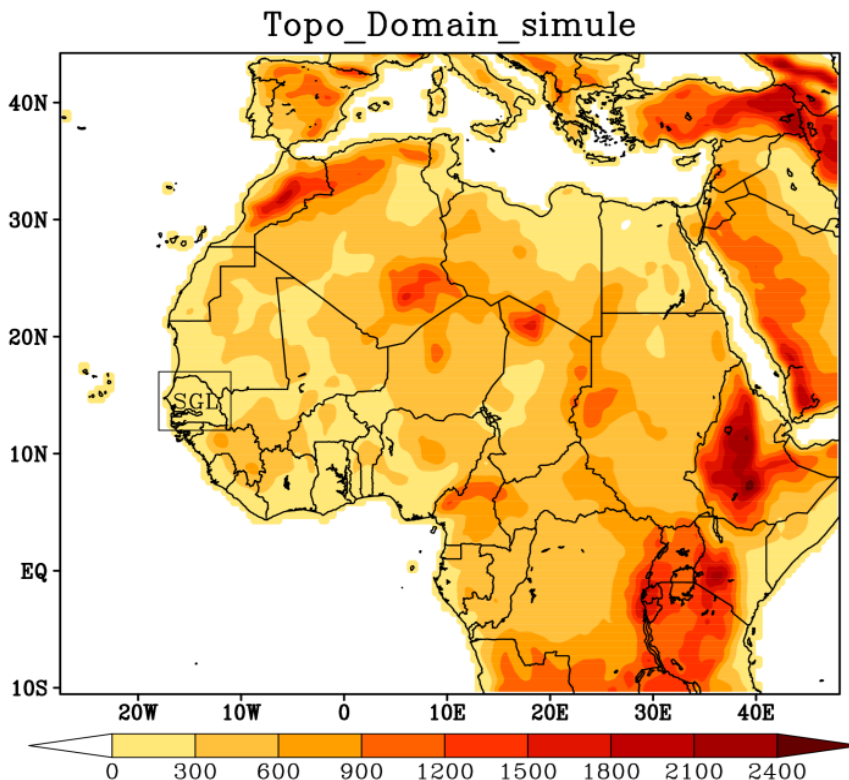


Figure 2-1: Topographie (m) du domaine simulé.

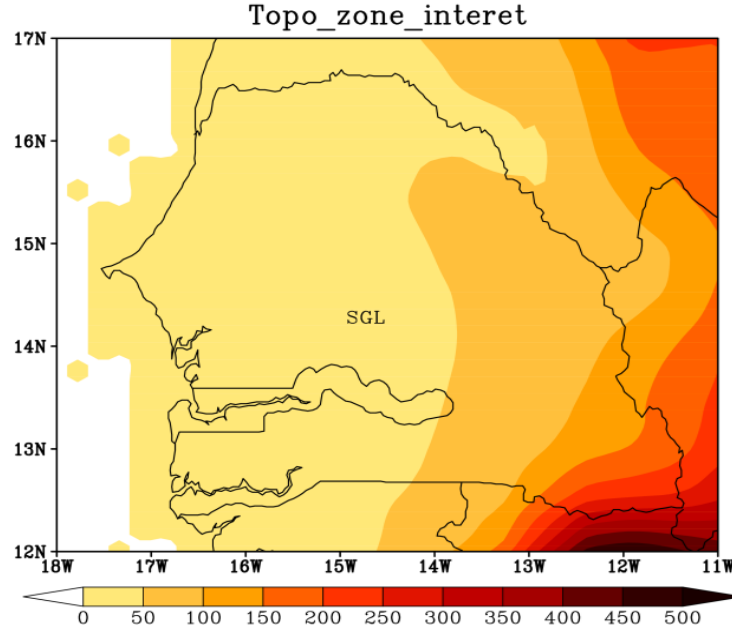


Figure 2-2: Topographie (m) de la zone d'intérêt (le Sénégal).

2.2 Description du modèle et des simulations

2.2.1. Description du modèle

Comme les modèles climatiques globaux (MCG), les modèles climatiques régionaux (MCR) résolvent numériquement l'évolution des variables climatiques. Ces modèles sont constitués de deux cœurs de calculs communiquant à chaque pas de temps de l'intégration. Le cœur dynamique résout explicitement les mécanismes de large échelle en se basant sur les lois de la mécanique des fluides. Ce cœur permet de simuler les variables dites pronostiques telles que la température, la pression, le vent, et l'humidité (Cretat et al. 2011). Les processus sous maille, c'est-à-dire d'échelle inférieure à la résolution du modèle, sont quant à eux résolus implicitement par le cœur physique, au moyen de paramétrisations empiriques. Ce cœur permet de calculer l'évolution des variables dites historiques ou diagnostiques, dont l'évaporation, les nuages ou encore la convection atmosphérique. Ces modèles sont basés sur les équations primitives ci-dessous qui sont des versions simplifiées des équations de Navier-Stokes:

- Equation de conservation de la masse

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{V} \cdot \vec{\nabla} \rho = -\rho \vec{\nabla} \cdot \vec{V} \quad (2.1)$$

- Equation de conservation de la quantité de mouvement

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \vec{\nabla} \vec{v} = \frac{-\vec{\nabla} P}{\rho} - 2\vec{\Omega} \wedge \vec{v} + \vec{g} + \vec{F}_V \quad (2.2)$$

- Equation de conservation de l'énergie

$$C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{V} \cdot \vec{\nabla} T \right) = \frac{1}{\rho} \frac{dP}{dt} + Q + F_T \quad (2.3)$$

- Equation de conservation de l'eau ou traceur chimique

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \vec{V} \cdot \vec{\nabla} q = \frac{Sq}{\rho} + F_q \quad (2.4)$$

- Equation d'état du gaz parfait pour l'air

$$P = \rho RT \quad (2.5)$$

Avec :

T (K) est la température, R ($\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$) est la constante universelle des gaz parfaits, g (ms^{-2}) est l'accélération de la pesanteur, ρ (kg m^{-3}) est la masse volumique, P (Pa) est le niveau de pression.

F_v (N m^{-2}) est une force de frottement : elle représente le transfert de moments qui se passe à une échelle plus petite que la grille.

Q et F_T : représentent les transferts d'énergie (réchauffement ou refroidissement non adiabatique) par les processus de sous-maille.

$\frac{Sq}{\rho}$ et F_q : sont les termes correspondant aux échanges d'eau (sources et pertes d'eau) par les processus de sous-maille.

\vec{V} (m s^{-1}) est la vitesse du vent et elle a trois composantes : vent horizontal (zonal et méridien) et le vent vertical.

Ω (rad s^{-1}) représente la vitesse de rotation de la terre.

$\frac{-\vec{\nabla} P}{\rho}$: est la force de gradient de pression.

$2\vec{\Omega} \wedge \vec{V}$: est la force de Coriolis.

$C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{V} \cdot \vec{\nabla} T \right)$: est l'énergie interne du système considéré.

$\frac{1}{\rho} \frac{dP}{dt}$: est le travail échangé par le système considéré avec le milieu extérieur.

$-\rho \vec{\nabla} \cdot \vec{V}$: correspond au terme de compressibilité.

La partie en bleue des équations correspond au noyau physique du modèle et celle en noire au noyau dynamique.

➤ **Le modèle climatique régional RegCM**

Le modèle climatique régional RegCM a été initialement développé par le National Center for Atmospheric Research (NCAR) et actuellement maintenu par le Centre International de Physique Théorique Abdus Salam (ICTP, Trieste, Italie). La première version du modèle, RegCM1, a été développée en 1989 et depuis lors, elle a fait l'objet de mises à jour majeures en 1993 (RegCM2), 1999 (RegCM2.5), 2006 (RegCM3) et plus récemment en 2010 (RegCM4). Cette dernière version du modèle (RegCM4) inclut des mises à niveau majeures de la structure du code et de ses pré- et post-processeurs, ainsi que l'inclusion de nouveaux paramètres physiques. Plusieurs études ont montré la capacité de ce modèle à reproduire les principales caractéristiques du climat de l'Afrique de l'Ouest (Giorgi et al. 2012). Les processus de surface terrestre sont simulés en utilisant le schéma de transfert biosphère-atmosphère version 1E (BATS1E) décrit dans Dickinson et al. (1993). Ce schéma comporte 20 types de végétations et couvertures du sol, 12 types de textures et couleurs du sol. Il est basé sur les données du Global Land Cover Characterization (GLCC). Pour le paramétrage de la couche limite planétaire le modèle de Holtslag et al. (1990) est utilisé. La pluie à grande échelle est paramétrée avec le Schéma explicite d'humidité et de nuages du SUBEX développé par Pal et al. (2000). Les schémas de convection utilisés sont ceux de Grell (1993) avec la fermeture de Fritsch et Chappell (1980) pour la terre et Emanuel (1991) pour l'océan.

2.2.2. Description des simulations

Deux simulations ont été réalisées à 50 km de résolution horizontale et 18 niveaux verticaux. Le domaine simulé couvre l'Afrique de l'Ouest en particulier le Sénégal et les simulations sont effectuées sur la période 2001-2010 à l'aide de deux différents schémas de couverture du sol (figure 2.3). Ces différents types de couverture terrestre sont présentés dans le tableau 2.1. A part la végétation, les conditions initiales et aux limites du domaine d'étude restent identiques pour les deux simulations qui sont : la simulation de contrôle (RegCM4_CTL) et celle tenant compte de la grande muraille verte (RegCM4_GMV).

➤ **Simulation de contrôle (RegCM4_CTL)**

La première expérience (figure 2.3a) qui est la simulation de contrôle (RegCM4_CTL) consiste à utiliser les paramètres du schéma de surface continental du modèle RegCM4 sans les modifier.

Cela veut dire que chaque maille conserve par défaut les caractéristiques du sol et de la végétation en Afrique de l'Ouest tels que prédéfinis dans le module BATS.

➤ **Simulation tenant compte de la grande muraille verte (RegCM4_GMV)**

Dans la seconde expérience (figure 2.3b), la végétation sur la région comprise entre 14°N et 16°N a été modifiée pour représenter la GMV. Sur cette bande, les zones à herbes courtes et hautes sont remplacées par des arbres à feuilles larges et persistantes. Suite à ces modifications du couvert végétal, plusieurs paramètres physiques, tels que l'albédo, l'indice foliaire, la hauteur de déplacement ont été modifiés. Les impacts de la Grande Muraille Verte sur les événements de pluie extrêmes ont été étudiés en utilisant huit (8) indices hydroclimatiques recommandés par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM, 2013). Ces indices climatiques sont connus pour leurs grands impacts sur la disponibilité des ressources en eau et la productivité agricole (tableau 2.2).

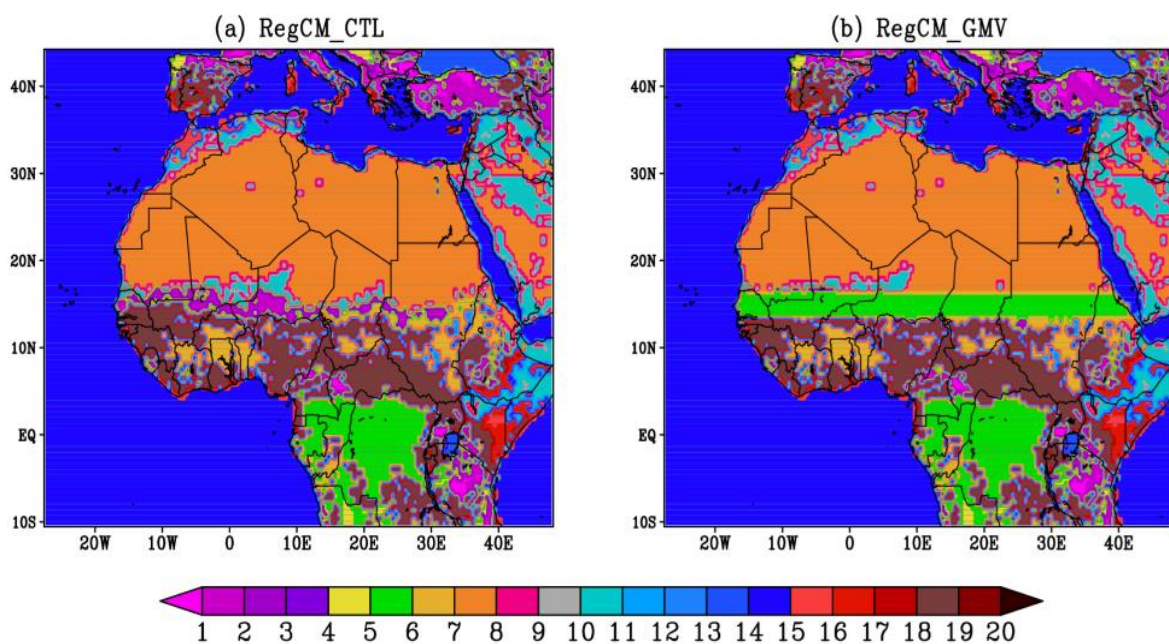


Figure 2-3 : Distribution des types de couverture du sol utilisés dans cette étude : (a) version de contrôle du modèle RegCM4 et (b) RegCM4_GMV. Le rectangle vert indique la zone modifiée.

Tableau 2.1 : Types de couverture végétale ou classes de végétation utilisés dans cette étude.

Chiffres	Types de couverture végétale
1	Culture/agriculture mixte
2	Savanes herbes courtes
3	Arbre résineux à feuilles persistantes
4	Arbres résineux à feuilles caduques
5	Arbre à feuilles larges et caduques
6	Arbre à feuilles larges et persistantes
7	Savanes hautes herbes
8	Désert
9	Toundra
10	Cultures irriguées
11	Semi-désert
12	Bouchon de glace/glacier
13	La tourbière/marais
14	Eaux intérieures
15	Océan
16	Arbuste
17	Arbuste à feuilles caduques
18	Région boisée mixte
19	Forêt / Champ mosaïque
20	Mélange de l'eau et de terres.

Tableau 2.2 : Les différents indices climatiques et leurs définitions (Peterson et al. 2001).

Indices	Définitions	Unités
Fréquence des jours pluvieux (R1mm)	Nombre de jours présentant un cumul pluviométrique journalier > 1 mm/j	jour
Intensité des jours pluvieux (SDII en anglais)	Intensité moyenne de précipitation enregistrée pendant un jour pluvieux	mm/jour
Nombre de séquences de fortes précipitations (RX5day)	Nombre de séquences de 5 jours consécutifs présentant un cumul pluviométrique > 50 mm	jour

90 ^{ème} centile (journées humides)	La valeur en dessous de laquelle 90% des données sont trouvées	mm/jour
95 ^{ème} centile (journées très humides)	La valeur en dessous de laquelle 95% des données sont trouvées	mm/jour
99 ^{ème} centile (journées extrêmement humides)	La valeur en dessous de laquelle 99% des données sont trouvées	mm/jour
Durée maximale des séquences humides (CWD)	Nombre maximal de jours consécutifs présentant un cumul pluviométrique journalier supérieur à 1mm/j	Jour
Durée maximale des séquences sèches (CDD)	Nombre maximal de jours consécutifs présentant un cumul pluviométrique journalier inférieur à 1mm/j	Jour

2.3 Les données utilisées

Les données de précipitation du Climate Hazards group InfraRed Precipitation with Stations (CHIRPS) ont été utilisées pour la validation du modèle avec une résolution spatiale de 0.05 ° X 0.05 ° en longitude et en latitude (Funk et al, 2014). Ces données sont fournies par USGS (United States Geological Survey) à FEWSNET (Famine Early Warning Systems Network) au niveau du Centre Régional AGRHYMET (Agronomie, Hydrologie, Météorologie). CHIRPS est un ensemble de données qui combine des données provenant d'observations au sol et les observations par satellite pour produire des estimations journalières et mensuelles de la pluviométrie dans le monde de 1981 à nos jours. Le jeu de données CHIRPS (groupe des risques climatiques sur les précipitations infrarouges avec stations) s'appuie sur des approches antérieures des techniques d'interpolation «intelligentes» et sur une longue période d'estimations de précipitations record basées sur des observations infrarouges de durée de nuage froid. Les images CHIRPS sont disponibles gratuitement et elles sont fournies en format Network Common Data Form (NetCDF). CHIRPS a été validé à l'aide de diverses données d'observation des précipitations, et les résultats indiquent de bonnes performances pour le suivi de la sécheresse (Badr et al. 2016, Herold et al. 2017) et c'est la raison pour laquelle nous l'avons choisi comme données d'observation de référence. Les simulations du modèle sont initialisées et pilotées par les réanalyses ERA-Interim de résolution spatiale de 1,5°× 1,5° (Uppala et al. 2008). Ces données de réanalyses résultent de la combinaison des sorties d'un modèle météorologique avec toutes les données d'observation et sont disponibles de 1979 à nos jours. Elles ont été utilisées pour diverses études en raison de leur bonne capacité à reproduire

les principaux composants du système de mousson ouest africain (Diallo et al. 2014). Dans les zones où les données d'observation sont insuffisantes comme en Afrique de l'Ouest, les réanalyses sont actuellement les meilleurs moyens de décrire l'état physique de l'atmosphère.

2.4 Outil statistique et logiciels utilisés

2.4.1. Outil statistique

Nous avons utilisé comme outil statistique(ou métrique) le biais pour évaluer la qualité des simulations. Le biais est l'écart entre les valeurs obtenues par la version standard du modèle MS_i et les valeurs observées O_i . Son signe et son intensité rendent compte de la qualité du modèle. Si le signe est positif, le modèle surestime les observations, lorsqu'il est négatif, le modèle sous-estime les observations et quand il est quasi nul, le modèle reproduit bien les observations. Le biais est calculé grâce à la relation suivante:

$$Biais = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (MS_i - O_i) \quad (2.6)$$

Avec :

n : le pas de temps

MS_i : les valeurs obtenues par la version standard du modèle

O_i : les valeurs observées

2.4.2. Logiciels utilisés

➤ CDO (Climate Data Operators) et NCO (NetCdf Operators)

Pour le traitement des données, nous avons utilisé les logiciels CDO et NCO. Ces deux outils sont des applications qui permettent de manipuler le contenu de fichiers au format NetCDF. Ils permettent d'accéder aux données et de les modifier ainsi que d'interagir entre plusieurs fichiers (opérations, concaténation, ajout de variables ...). L'outil CDO est très puissant car il permet de faire entre autres des régressions, des interpolations, de la statistique descriptive, etc.

➤ GrADS (Grid Analysis and Display System)

Pour la visualisation des sorties du modèle, nous avons utilisé le logiciel GrADS. Le Grid Analysis and Display System (GrADS) est un outil utilisé pour accéder, manipuler et visualiser facilement les données des sciences de la Terre. Ce logiciel gère des grilles qui sont régulières, non linéairement espacées, gaussiennes ou de résolutions variables. Il permet également de

superposer graphiquement différents ensembles de données avec un enregistrement spatial et temporel correct. Les opérations sont exécutées de manière interactive en entrant des expressions de type FORTRAN sur la ligne de commande. Il permet également d'afficher des données à l'aide de diverses techniques graphiques: graphiques en barres, diagrammes de dispersion, contours lissés, contours ombrés, lignes de courant, vecteurs de vent, boîtes de grille, boîtes de grille ombrées et tracés de modèle de station. Les graphiques peuvent être sortis au format PostScript ou image. GrADS fournit des paramètres par défaut géophysiquement intuitifs, mais l'utilisateur a la possibilité de contrôler tous les aspects de la sortie graphique. GrADS possède une interface programmable (langage de script) qui permet des applications sophistiquées d'analyse et d'affichage.

Notre travail se focalise sur la saison des pluies (de Juillet à Septembre, JAS) et sur la période 2001-2010 (10 ans).

Chapitre 3

Résultats et discussions

Dans ce chapitre, nous allons valider la version standard du modèle RegCM4 puis analyser, interpréter et discuter les résultats des simulations effectuées en nous focalisant sur l'impact de la GMV sur les extrêmes pluviométriques au Sénégal.

3.1.La validation du modèle

➤ **Climatologie des précipitations**

Bien que le modèle ait déjà été validé dans plusieurs études sur l'Afrique de l'Ouest par exemple dans Diba et al. (2016), Inoussa et al. (2016), nous avons comparé les précipitations moyennes de notre configuration du modèle avec celles des données d'observations du CHIRPS. La figure 3.1 représente la pluie moyennée en été (juillet-septembre : JAS) sur la période 2001-2010 pour la climatologie du CHIRPS, la version standard du modèle RegCM4 et leur différence. La climatologie du CHIRPS montre une structure zonale des précipitations avec les maxima de pluies sur les zones côtières et montagneuses: les montagnes du Fouta Jallon, le plateau de Jos et le mont Cameroun. Cette distribution zonale des précipitations ainsi que la position des maxima est assez bien reproduite par la version standard du modèle RegCM4. La différence entre la version standard du modèle et la climatologie du CHIRPS montre que le modèle sous-estime les précipitations sur le Sahel et les surestime sur la côte guinéenne et le mont Cameroun. Les faibles différences entre le modèle et les observations montrent sa bonne capacité à simuler la pluviométrie en Afrique de l'Ouest. Cela signifie que la configuration (paramétrisation physique) du modèle utilisée est bien adaptée au climat ouest africain. L'étape suivante consiste à évaluer les impacts de la GMV sur les extrêmes pluviométriques au Sénégal.

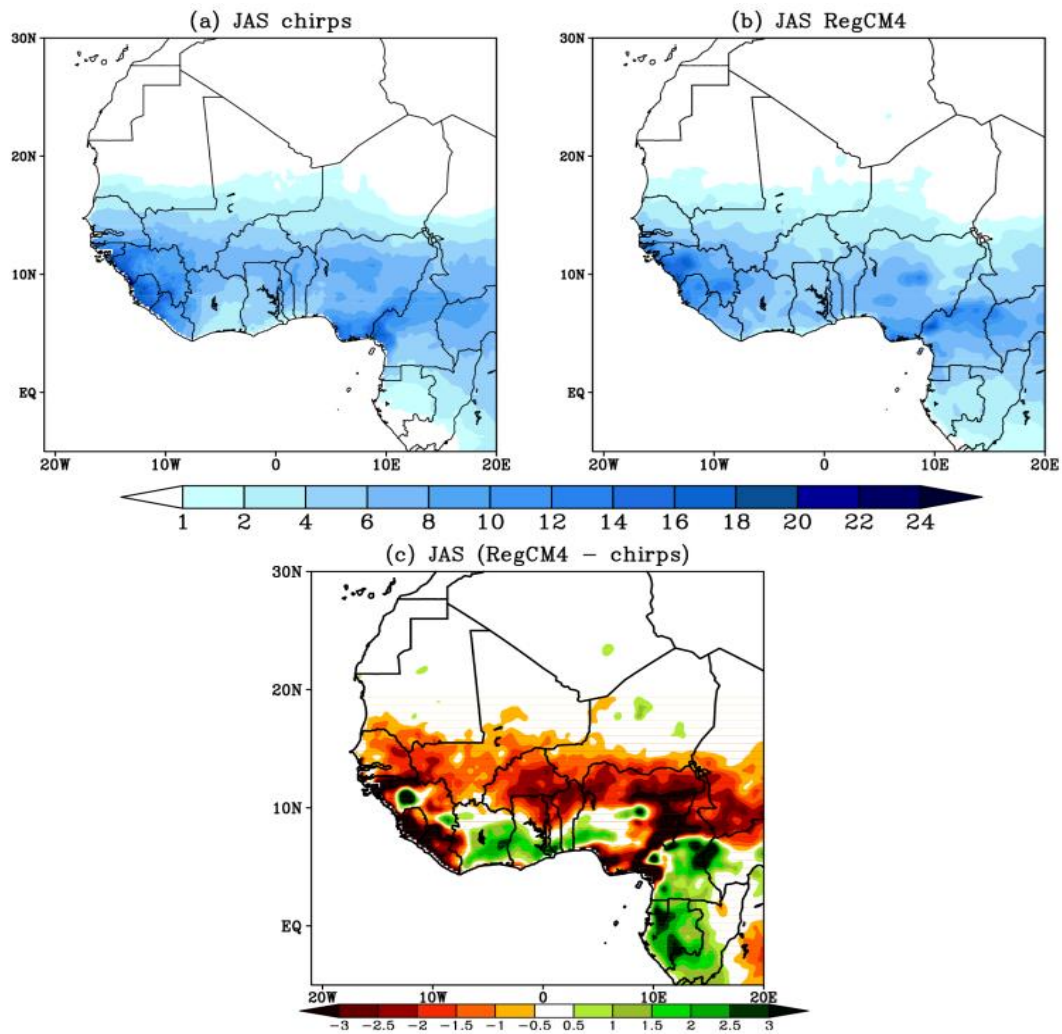


Figure 3-1: Pluie (mm/jr) moyennée sur la période 2001-2010 sur l’Afrique de l’Ouest en : a) observations du CHIRPS, b) RegCM4_CTL et c) RegCM4_CTL - CHIRPS.

3.2. Impact de la Grande Muraille Verte (GMV) sur la pluie moyenne au Sénégal

Au Sénégal, les précipitations sont au cœur des préoccupations environnementales et sociétales. La figure 3.2 représente la distribution spatiale des précipitations estivales (JAS) moyennées de 2001 à 2010 pour les deux versions du modèle et leur différence. La version de contrôle du modèle (figure 3.2a) simule une structure zonale de la pluie (gradient océanique) qui diminue du Sud vers le Nord (gradient méridien). Cette distribution est assez identique à celle de la version tenant compte de la GMV (figure 3.2b). L’analyse de l’écart entre la version de la GMV et celle de contrôle (figure 3.2c) montre que la GMV augmente la pluie sur presque tout le Sénégal. Les fortes augmentations sont obtenues au sud et sud-est du pays. Les résultats montrent que le reboisement (GMV) augmente les précipitations dans les régions reboisées et lointaines (comme le sud du pays). Ce résultat est cohérent avec les travaux d’Abiodun et al. (2012), Zaroug et al. (2013), Diba et al. (2016), et Abdou Saley et al. (2016) qui ont montré

que la reforestation dans une zone peut impacter les précipitations aussi bien localement que dans les régions lointaines.

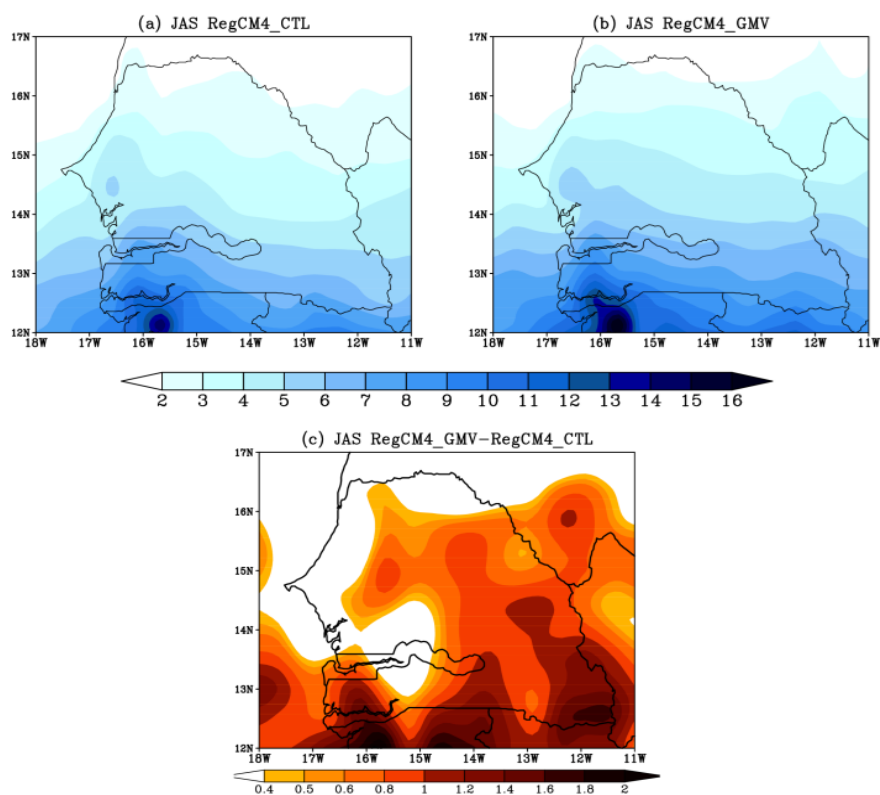


Figure 3-2: Pluie (mm/jr) moyennée sur la période 2001-2010 sur le Sénégal en : a) RegCM4_CTL, b) RegCM4_GMV, et c) différence entre RegCM4_GMV et RegCM4_CTL. La différence est significative à 95% (t-test).

La pluie est un paramètre qui dépend en partie de l'humidité et de l'évapotranspiration, dans le but de bien interpréter le changement sur les précipitations, une analyse de l'humidité et de l'évapotranspiration est faite dans la section suivante.

3.3. Impact de la GMV sur l'humidité atmosphérique et l'évapotranspiration

La variation de la pluie dépend en grande partie de l'humidité atmosphérique et de l'évapotranspiration. La figure 3.3 représente la distribution spatiale de l'humidité relative moyennée sur la période 2001-2010 pour les deux versions du modèle et leur différence. La version standard du modèle (figure 3.3a) simule de fortes valeurs d'humidité à l'ouest et au sud du pays et de faibles valeurs au nord-est du pays. La version reforestée du modèle (RegCM4_GMV) reproduit bien cette distribution de l'humidité relative (figure 3.3b). Les deux versions du modèle simulent un gradient zonal et méridien de l'humidité qui diminue de l'ouest

vers l'est et du sud vers le nord. L'impact de la GMV se manifeste par une augmentation de l'humidité sur presque l'ensemble du pays (figure 3.3c). L'augmentation est moins importante dans la zone côtière et à la frontière avec la Mauritanie. Cette augmentation de l'humidité peut être due à l'augmentation de la longueur de rugosité (due à la GMV). En effet un renforcement de la longueur de rugosité entraîne une augmentation de la turbulence dans la couche limite et par conséquent une augmentation du transport de l'humidité dans l'atmosphère.

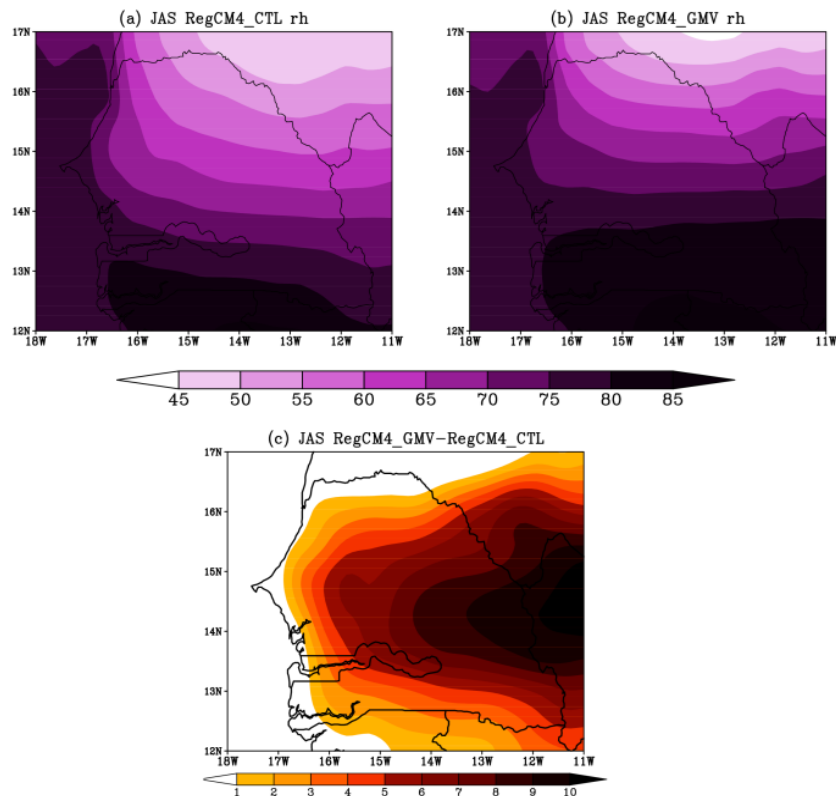


Figure 3-3:Humidité relative (%) moyennée sur la période estivale (JAS) de 2001 à 2010 pour les deux versions du modèle et leur différence.

L'évapotranspiration moyennée sur la période 2001-2010 pour les deux versions du modèle et leur différence est représentée sur la figure 3.4. Les deux versions du modèle (RegCM4_CTL et RegCM4_GMV) simulent une structure zonale de l'évapotranspiration avec des maxima situés au sud et à l'ouest du pays et sur la façade de l'Océan Atlantique. Les valeurs minimales de l'évapotranspiration sont enregistrées au nord-est du pays (figure 3.4a, b). Cette structure zonale de l'évapotranspiration suit deux gradients : un gradient zonal encore appelé gradient océanique (augmentation de l'est vers l'ouest) et un gradient méridien (diminution du sud vers le nord). La GMV tend à augmenter l'évapotranspiration presque dans tout le pays, surtout dans les

parties centre-est et est du pays (figure 3.4c). L'augmentation de l'évapotranspiration peut être due à l'augmentation de l'indice foliaire sous l'effet de la GMV. En effet, l'indice foliaire contribue positivement aux rétroactions dynamiques en recyclant l'humidité (Giannini et al.2010), et l'augmentation de la convergence d'humidité contribuent à l'augmentation des pluies.

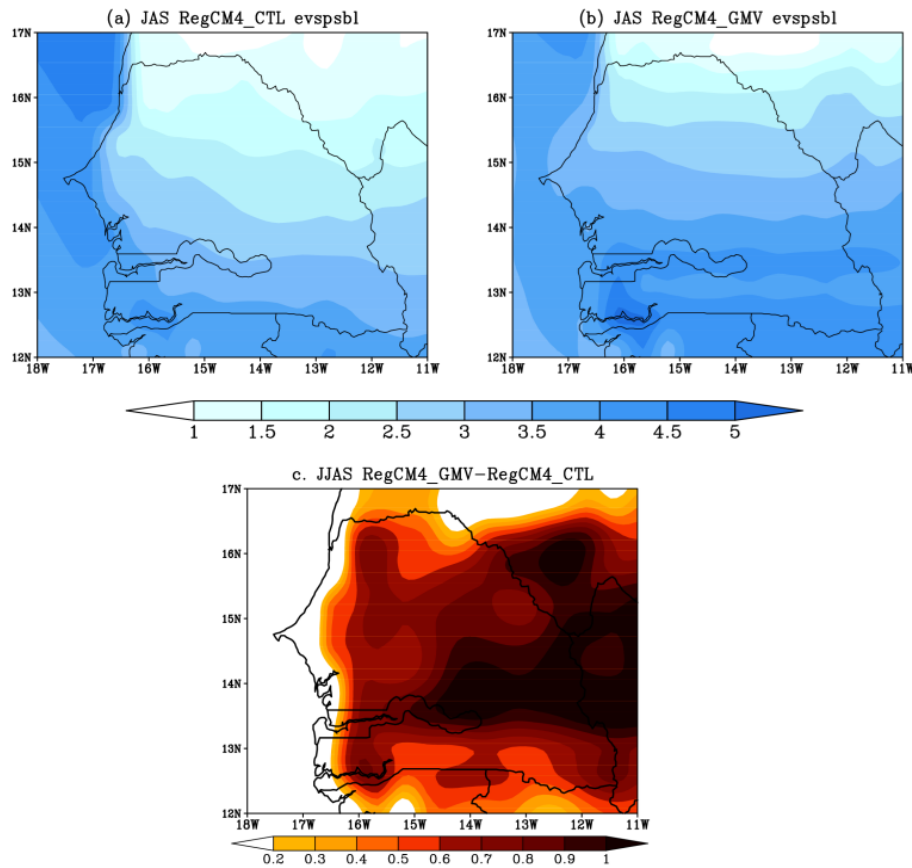


Figure 3-4 : Évapotranspiration ($\text{cg} / \text{m}^2 / \text{s}$) moyennée sur la période estivale (JAS) de 2001 à 2010 pour les deux versions du modèle et leur différence.

L'augmentation de la pluie sur le Sénégal (figure 3.2) peut s'expliquer en partie par l'augmentation de l'humidité relative et de l'évapotranspiration dans la zone couverte par la GMV.

3.4.Impact de la GMV sur les extrêmes de précipitation

Les extrêmes de pluies sont caractérisés par l'apport d'une importante quantité d'eau sur une courte durée (d'une heure à une journée par exemple). Cette quantité peut égaler à celle reçue

habituellement en un mois, voire en plusieurs mois. Ces pluies extrêmes sont des aléas météorologiques qui causent beaucoup de dégâts matériels et de nombreuses pertes en vies humaines en particulier dans les pays à faible revenu tels que ceux de l’Afrique de l’Ouest et le Sénégal en particulier. L’estimation des extrêmes de pluies est d’un grand intérêt pour anticiper des catastrophes telles que des inondations, afin de permettre un aménagement réfléchi du territoire. Dans les sections suivantes, les impacts de la GMV ont été étudiés en utilisant huit (8) indices hydroclimatiques recommandés par l’Organisation Météorologique Mondiale (OMM). Ces indices climatiques sont connus pour leurs grands impacts sur la disponibilité des ressources en eau et la productivité agricole.

3.4.1. Nombre de jours pluvieux

Au Sénégal, la qualité et la quantité des produits agricoles sont étroitement liées au nombre de jours de pluie. Pour mieux caractériser la pluviométrie dans ce pays, on s’est intéressé à l’étude des nombres de jours pluvieux. La figure 3.5 montre le nombre de jours pluvieux moyenné sur la période 2001-2010 pour les deux versions du modèle et leur différence. Les deux versions du modèle simulent une forte fréquence des jours pluvieux au sud-est et au centre du pays et des valeurs moyennes au nord-ouest (figure 3.5a, b). On observe également un gradient nord-sud avec une diminution du nombre d’événements pluvieux du sud vers le nord (figure 3.5a, b). L’analyse de la différence entre les versions reboisée (RegCM4_GMV) et standard (RegCM4_CTL) montre que la GMV tend à augmenter le nombre de jours pluvieux dans presque tout le Sénégal (figure 3.5c). Cette augmentation est associée en partie au renforcement de l’évapotranspiration et de l’humidité relative sur la zone reboisée.

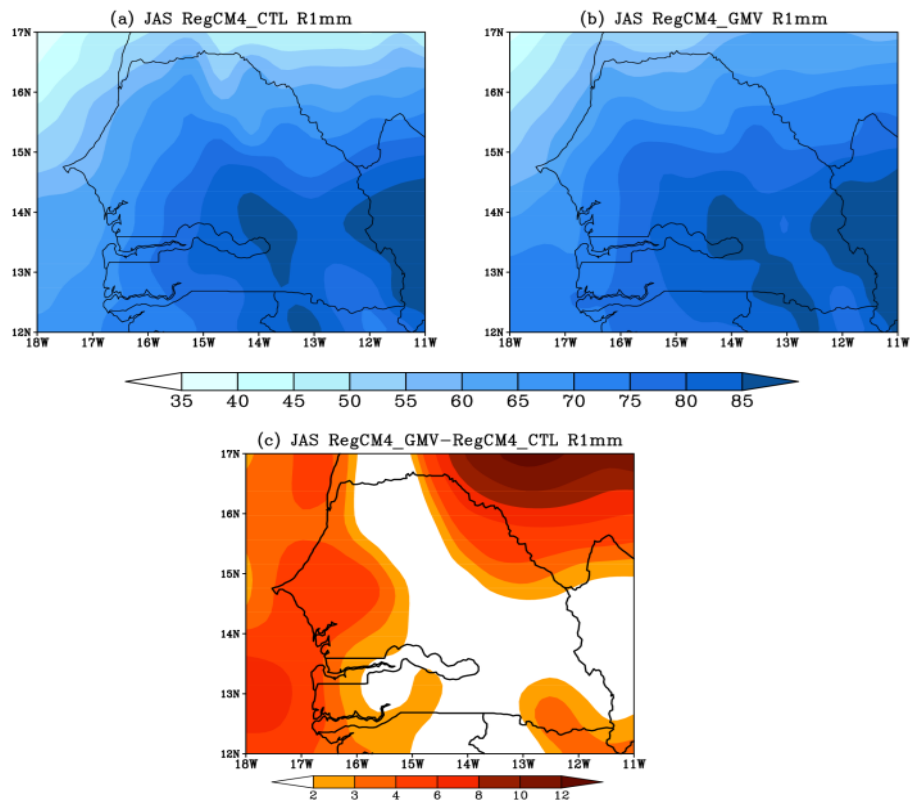


Figure 3-5 : Nombre de jours pluvieux moyenné sur la période estivale (JAS) de 2001 à 2010 pour les deux versions du modèle et leur différence. La différence est significative à 95% (t-test).

3.4.2. Intensité des jours pluvieux

La figure 3.6 présente la distribution spatiale de l'intensité des jours pluvieux moyennée sur la période estivale (JAS) de 2001 à 2010 pour les deux versions du modèle et leur différence. La version standard du modèle simule des intensités de précipitations élevées entre les latitudes 12°N et 13.6°N et dans quelques régions du sud-est du pays (figure 3.6a). Les faibles intensités sont simulées presque au nord-ouest du pays (figure 3.6a). La version reforestée (RegCM4_GMV) reproduit une distribution assez similaire (figure 3.6b). L'analyse de la différence entre les deux versions du modèle montre une augmentation de l'intensité des jours pluvieux sur presque l'ensemble du Sénégal, surtout dans les parties sud et sud-est du pays (figure 3.6c).

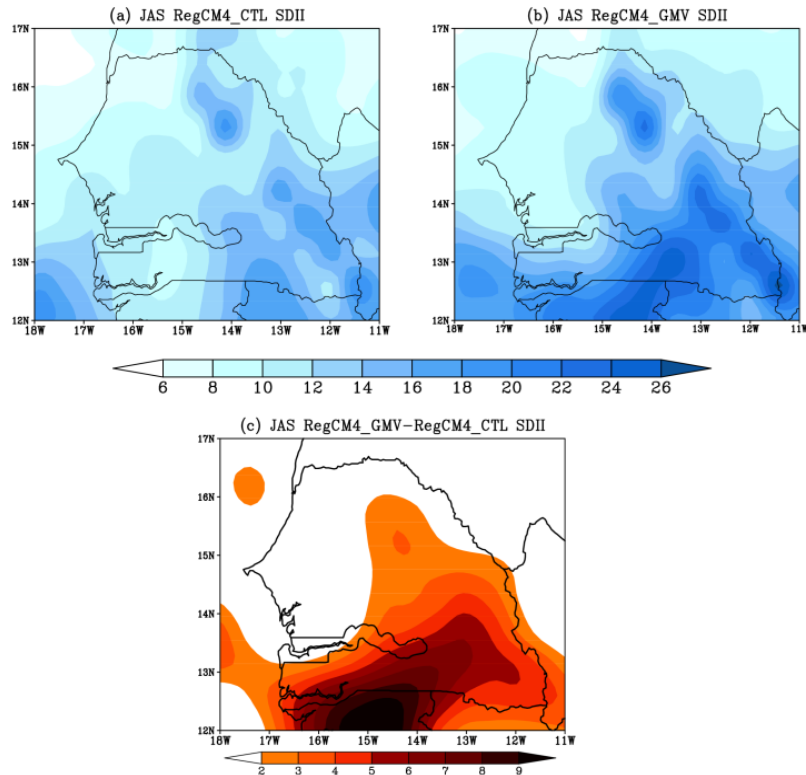


Figure 3-6 : Intensité des jours pluvieux (mm / jour) moyennée sur la période estivale (JAS) de 2001 à 2010 pour les deux versions du modèle et leur différence. La différence est significative à 95% (t-test).

L'étape suivante consiste à diagnostiquer l'impact de la GMV sur la distribution spatiale des événements pluvieux extrêmes tels que le nombre de séquences de fortes précipitations (RX5day), le 90^{ème} centile des précipitations journalières (jours humides), le 95^{ème} centile des précipitations journalières (jours très humides), le 99^{ème} centile des précipitations journalières (jours extrêmement humides) ainsi que la durée maximale des séquences humides (CWD) et celle des séquences sèches (CDD).

3.4.3. Nombre de séquences de fortes précipitations (RX5day)

Le nombre de séquences de 5 jours consécutifs présentant un cumul pluviométrique > 50 mm (RX5day) est représenté sur la figure 3.7 pour les deux versions du modèle et leur différence. Les deux versions du modèle simulent les fortes valeurs de RX5day au sud et sud-est du pays, sur l'Océan Atlantique (12°N et 13°N environ) et les faibles valeurs au nord-ouest du pays (au-delà de 14°N) (figure 3.7a, b). L'impact de la GMV se traduit par une augmentation du nombre de séquences de 5 jours consécutifs avec un cumul pluviométrique supérieur à 50 mm sur une bonne partie du Sénégal (figure 3.7c). Cette augmentation est plus importante dans les régions de Ziguinchor, Kolda et une partie de la frontière Est du pays (figure 3.7c).

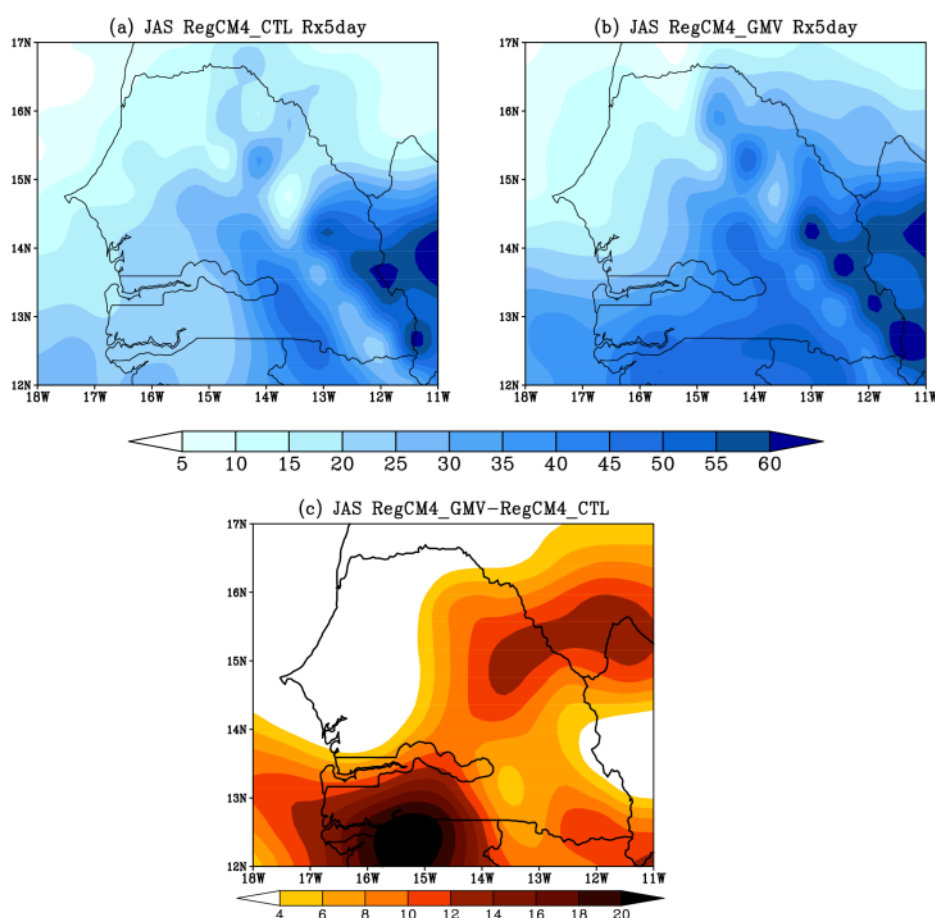


Figure 3-7: Nombre de séquences de fortes précipitations (RX5day) moyenné sur la période estivale (JAS) de 2001 à 2010 pour les deux versions du modèle et leur différence. La différence est significative à 95% (t-test).

Les fortes pluies consécutives sont d'une part les facteurs à l'origine d'un fort taux d'écoulement et des inondations. Nka et al. (2015) ont montré que l'indice RX5day semble suivre la tendance des inondations dans la région Soudano-Sahélienne.

3.4.4. Caractérisation des jours humides, très humides et extrêmement humides

L'événement de pluie extrême basé sur le 90^{ème} centile des précipitations journalières (seuil de pluie correspondant aux jours humides) est présenté à la figure 3.8. La version standard du modèle présente les fortes valeurs de cet indice (90^{ème} centile) au sud-est du pays en particulier dans les régions de Kédougou, Kolda et Tambacounda (figure 3.8a). Les faibles valeurs sont simulées au Nord-Ouest du pays. La version reboisée (RegCM4_GMV) montre une distribution du 90^{ème} centile assez similaire à celle de la version de contrôle du modèle (figure 3.8b). La différence entre les deux versions du modèle montre que la GMV augmente le 90^{ème} centile des précipitations journalières dans presque tout le Sénégal en particulier dans les régions de Ziguinchor, Kolda et une partie de Tambacounda et Kédougou (figure 3.8c). On note une faible augmentation du 90^{ème} centile au nord-ouest du pays et à la frontière avec la Mauritanie (figure 3.8c).

Pour caractériser les jours très humides, le 95^{ème} centile des précipitations journalières a été calculé et présenté à la figure 3.9. Les deux versions du modèle simulent une structure zonale du 95^{ème} centile avec les maxima situés au sud-est du pays en particulier dans les régions de Kolda, Kédougou et Tambacounda (figure 3.9a, b). L'analyse de la différence entre les versions reboisée et standard montre une augmentation du 95^{ème} centile des précipitations journalières sur presque tout le pays (figure 3.9c). Cette augmentation est plus importante dans les régions de Ziguinchor, Kolda, Kédougou et une partie de Tambacounda (figure 3.9c).

La figure 3.10 présente le 99^{ème} centile des précipitations journalières (seuil de pluie correspondant aux jours extrêmement humides). La version standard du modèle présente une distribution presque identique à celle du 90^{ème} centile avec des maxima localisés sur les latitudes inférieures à 14.5°N (au sud de la GMV) (figure 3.10a). La différence entre les versions GMV et standard montre une augmentation du 99^{ème} centile des précipitations journalières sur presque tout le Sénégal (figure 3.10c). Cette augmentation du 99^{ème} centile reste modeste sur quelques régions du centre ouest et à la frontière avec la Mauritanie. L'impact de la GMV est plus fort sur le 99^{ème} centile comparé aux 90^{ème} et 95^{ème} centiles. Ce résultat est cohérent avec les travaux

de Diba et al. (2016) qui ont montré que l'analyse des centiles met en évidence le fait que l'impact du reboisement est plus fort lorsque le seuil du centile augmente, ce qui suggère encore une fois que le changement de la couverture végétale influe fortement sur les événements pluvieux extrêmes.

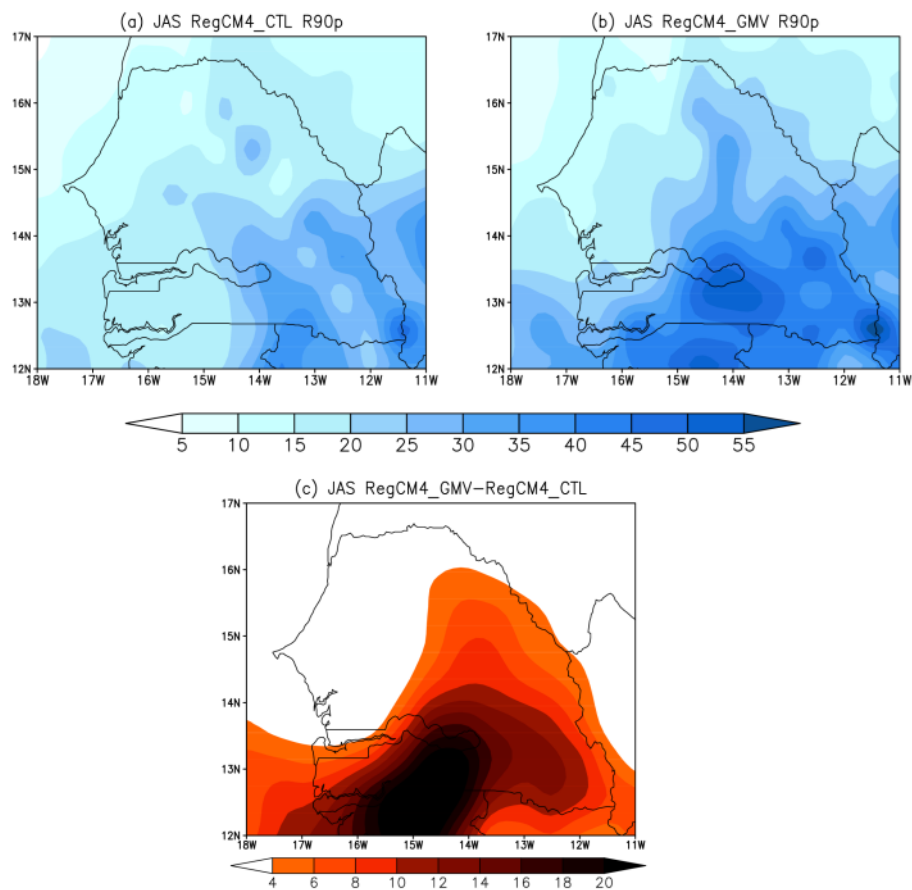


Figure 3-8 : 90^{ème} centile des précipitations journalières (jours humides) moyenné sur la période estivale (JAS) de 2001 à 2010 pour les deux versions du modèle et leur différence. La différence est significative à 95% (t-test).

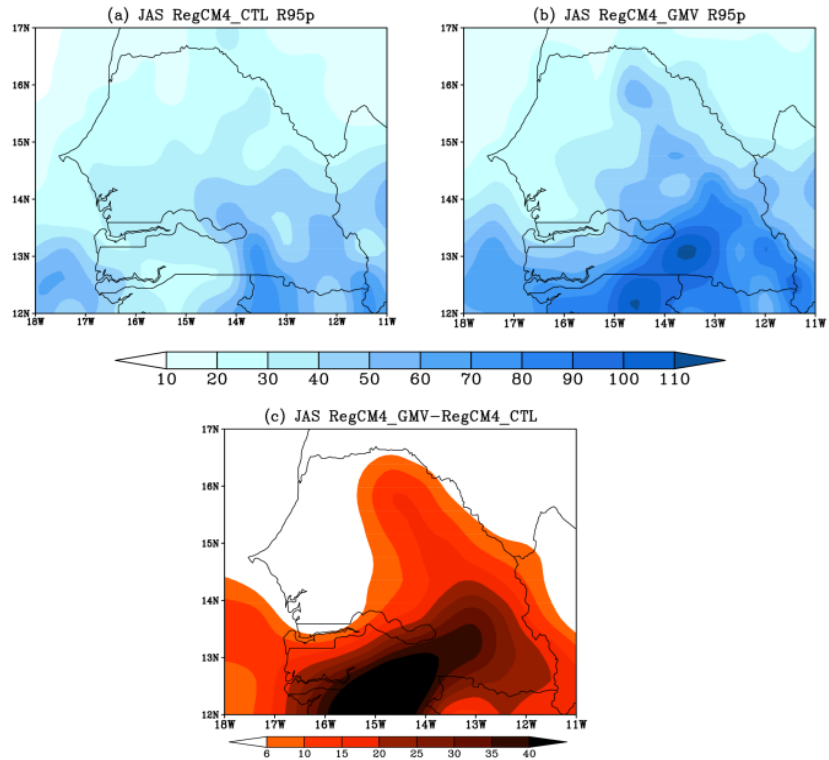


Figure 3-9 : 95^{ème} centile des précipitations journalières (jours très humides) moyenné sur la période estivale (JAS) de 2001à 2010 pour les deux versions du modèle et leur différence. La différence est significative à 95% (t-test).

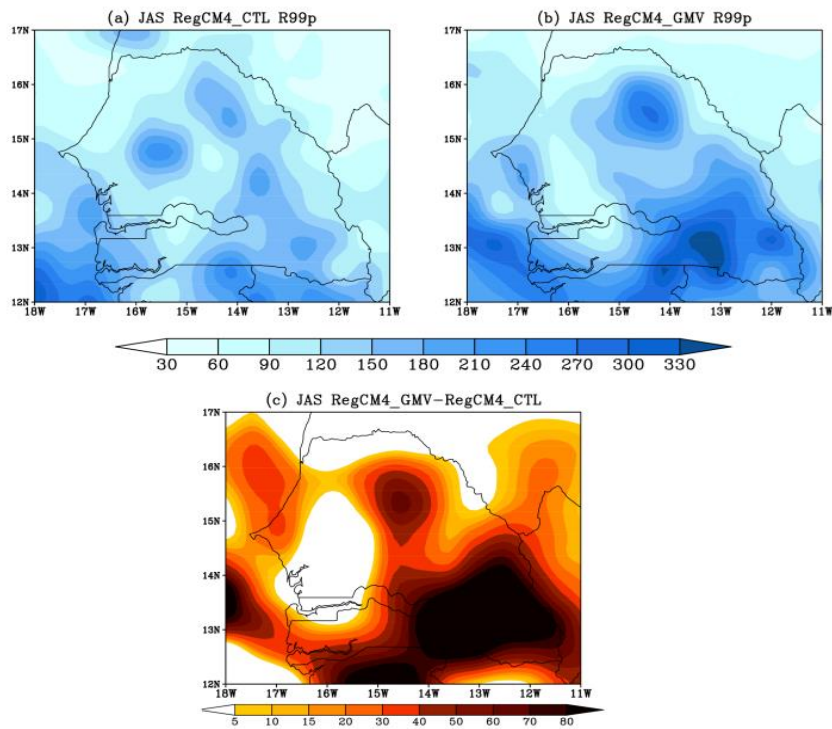


Figure 3-10 : 99^{ème} centile des précipitations journalières (jours extrêmement humides) moyenné sur la période estivale (JAS) de 2001à 2010 pour les deux versions du modèle et leur différence. La différence est significative à 95% (t-test).

Il ressort de cette analyse que la GMV conduit à un régime pluviométrique agressif sur le Sénégal, marqué d'une part par l'augmentation des jours pluvieux et d'autre part de leur intensité. De plus, en raison de l'augmentation des 95^{ème} et 99^{ème} centiles des précipitations journalières, le pays pourrait être vulnérable au risque d'inondation.

3.4.5. Nombre maximal de jours consécutifs humides (CWD)

La distribution spatiale des jours consécutifs humides est présentée sur la figure 3.11 pour les deux versions du modèle et leur différence. Les deux versions du modèle simulent les maxima de jours consécutifs humides au Sud-est et au centre du pays (figure 3.11a, b). L'analyse de la différence entre les deux versions montre que la GMV augmente le nombre de jours consécutifs humides presque sur l'ensemble du territoire sénégalais (figure 3.11c). Ce résultat est cohérent avec l'augmentation de la pluie moyenne (figure 3.2c) ainsi que la fréquence des jours pluvieux (figure 3.5c).

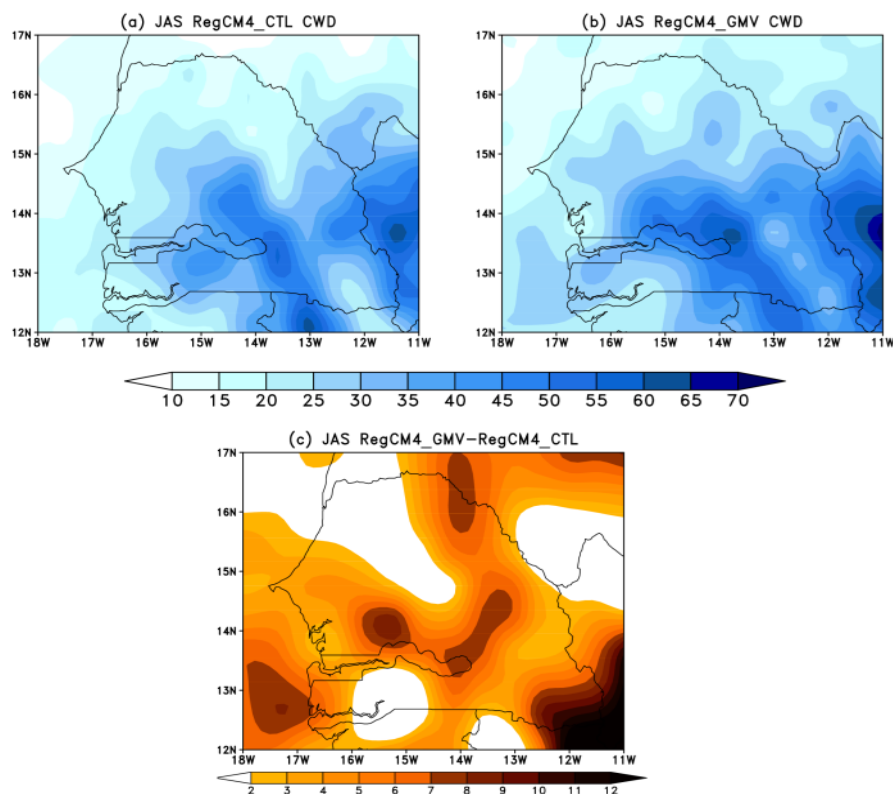


Figure 3-11 : Nombre maximal de jours consécutifs humides (consecutive wet days - cwd) moyenné sur la période estivale (JAS) de 2001 à 2010 pour les deux versions du modèle et leur différence. La différence est significative à 95% (t-test).

3.4.6. Nombre maximal de jours consécutifs secs (CDD)

Les séquences sèches créent un manque d'eau au niveau de la plante. Quand elles interviennent au début de la saison ou en pleine saison de croissance, elles peuvent être à l'origine d'un faux démarrage de la saison (au début de la saison) ou encore à l'origine de la destruction de toute une campagne agricole (en pleine saison de croissance). La figure 3.12 représente la durée maximale des jours consécutifs secs pour les deux versions du modèle et leur différence. Les deux versions du modèle simulent les fortes valeurs de jours consécutifs secs au nord-ouest du pays (figure 3.12a, b). L'occurrence de fortes valeurs de jours consécutifs secs durant la saison des pluies peut avoir des impacts négatifs sur la production agricole. Les séquences de jours consécutifs secs les plus courtes sont simulées au sud-est du pays (le long de la zone des maxima de pluies) et au centre du pays (figure 3.12a, b). L'analyse de la différence entre les deux versions du modèle montre que la GMV diminue le nombre de jours consécutifs secs dans presque tout le pays (figure 3.12c), ce qui constitue un facteur favorable à l'agriculture dans le pays.

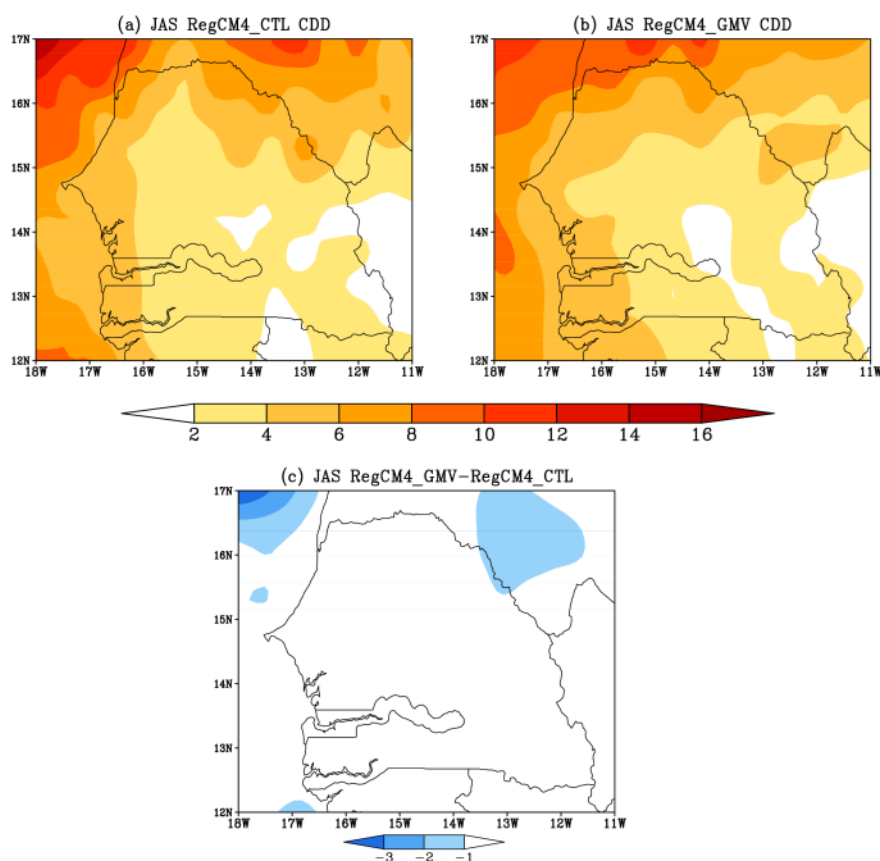


Figure 3-12 : Nombre maximal de jours consécutifs secs (consecutive dry days -cdd) moyenné sur la période estivale (JAS) de 2001 à 2010 pour les deux versions du modèle et leur différence. La différence est significative à 95% (t-test).

Conclusion et perspectives

Ce travail est une étude de sensibilité de l'impact de la Grande Muraille Verte sur les extrêmes pluviométriques au Sénégal. Pour atteindre cet objectif, nous avons réalisé deux simulations (une avec la version standard du modèle et une autre qui intègre la Grande Muraille Verte) avec le modèle climatique régional RegCM4 sur une durée de 10 ans (2001-2010) à une résolution spatiale de 50 km. Les deux simulations sont forcées par la dernière version de réanalyses ERA-Interim du Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (CEPMMT). Les résultats montrent que la plantation de la Grande Muraille verte modifie le signal des précipitations au Sénégal en l'augmentant sur l'ensemble du pays. Ce résultat montre aussi que la GMV affecte les précipitations localement (zone reboisée) mais aussi sur les régions éloignées (sud du pays). Cette augmentation de la pluie est en partie liée au renforcement de l'humidité relative et de l'évapotranspiration dans le pays. Les résultats montrent également que la Grande Muraille Verte a tendance à renforcer les extrêmes pluviométriques au Sénégal à l'exception du nombre de jours consécutifs secs. Elle induit les résultats suivants:

- ✓ Une augmentation du nombre de jours pluvieux ($R > 1$ mm/j) dans presque tout le Sénégal, plus particulièrement au sud-est.
- ✓ Une augmentation de l'intensité moyenne des jours pluvieux (SDII) sur presque l'ensemble du pays, surtout dans les parties sud et sud-est du pays.
- ✓ Une augmentation du nombre de séquences de 5 jours consécutifs présentant un cumul pluviométrique > 50 mm sur la quasi-totalité du pays. Cette augmentation est plus forte dans les régions de Ziguinchor, Kolda et une partie de la frontière Est du pays.
- ✓ Une augmentation du 95^{ème} centile des précipitations journalières (jours très humides) sur presque l'ensemble du pays. Cette augmentation est plus importante dans les régions de Ziguinchor, Kolda, Kédougou et une partie de Tambacounda,
- ✓ Une augmentation du 99^{ème} centile des précipitations journalières (jours extrêmement humides) dans presque tout le Sénégal.
- ✓ Une augmentation généralisée du nombre de jours consécutifs humides, plus particulièrement au centre et au sud.
- ✓ Une diminution du nombre de jours consécutifs secs particulièrement au nord-ouest et au centre-ouest du Sénégal.

Ces résultats suggèrent que la Grande Muraille Verte peut avoir des impacts positifs sur certaines activités socio-économiques (agriculture) au Sénégal. Cependant, l'augmentation des fortes précipitations peut entraîner des effets néfastes, au titre desquels il y'a la recrudescence des inondations. Les résultats de cette étude pourraient permettre aux décideurs politiques de mettre en place des stratégies d'adaptations nécessaires pour une meilleure gestion des ressources en eau et des catastrophes naturelles comme les inondations ainsi que l'élaboration d'un système agricole résilient face aux extrêmes de précipitations.

En perspectives, il serait intéressant d'étudier les impacts potentiels de la Grande Muraille Verte sur la distribution spatiale des événements de précipitations extrêmes et des vagues de chaleur au Sénégal aux horizons 2050 (futur proche) et 2100 (futur lointain) en utilisant des scénarios de changement climatique tels que les RCP4.5 et RCP8.5.

Références bibliographiques

Abiodun. B. J, Pal. J. S, Afiesimama. E. A, Gutowski. W. J, & Adedoyin. A, (2008): Simulation of West African monsoon using RegCM3 Part II: impacts of deforestation and desertification. *Theor. Appl. Climatol*; 93; 245–261.

Abiodun B. J., Adeyewa Z. D., Oguntunde P. G., Salami A. T., and Ajayi V.O., (2012): Modeling the impacts of reforestation on future climate in West Africa. *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 110, no. 1-2, pp. 77–96.

Adefolalu, D.O. (1983): Monsoon Onset in West Africa Application of Satellite Imagery. *Archives for Meteorology, Geophysics, and Bioclimatology, Series B*, 32, 219-230.

Alan Plumb R., and Hou Y., (1992): The Response of a Zonally Symmetric Atmosphere to Subtropical Thermal Forcing: Threshold Behavior. *J. Atmos. Sci.*, 49, 1790–1799.

Badr H, Dezfuli A, Zaitchik B, Peters-Lidard CD (2016) Regionalizing Africa: patterns of precipitation variability in observations and global climate models. *J Clim* 29: 9027–9043

Beucher F, (2010) : Manuel de météorologie tropicale : des alizés au cyclone. Tome 1, Paris, Météo-France, 25 mai 2010, 897 p. ISBN 978-2-11-099391-5.

Camara M., Diedhiou A., Sow B. A., Diatta S., (2013): Analyse de la pluie simulée par les modèles climatiques régionaux de CORDEX en Afrique de l’Ouest. *Sécheresse*, vol. 24, no. 1, pp. 14–28.

Charney J. G., (1975): Dynamics of deserts and drought in the Sahel. *Q. J. R. Meteorol. Soc*; 101; 193–202.

Cretat J., Pohl B., Richard Y., (2012) : Les modèles climatiques régionaux : outils de décomposition des échelles spatio-temporelles. *Dixièmes Rencontres de Théo Quant*. ISSN 1769-6895. Article accepté le 4 janvier 2012.

David O, and James Ford, (2014): Increasing the Effectiveness of the “Great Green Wall” as an Adaptation to the Effects of Climate Change and Desertification in the Sahel. *Sustainability*, 6, 7142-7154; Doi: 10.3390/su6107142.

Diallo I., Bain C. L., Gaye A. T., (2014): Simulation of the West African monsoon onset using the HadGEM3-RA regional climate model. *Climate Dynamics*, vol. 43, no. 3-4, pp. 575–594.

Diallo I., Giorgi F., Deme A., Tall M., Mariotti L., and Gaye A. T., (2016): Projected changes of summer monsoon extremes and hydro climatic regimes over West Africa for the twenty-first century. *Climate Dynamics*. DOI: 10.1007/s00382-016-3052-4.

- Diatta I, (2008) : Impact des fluctuations pluviométriques sur la production agricole dans la région de Thionck-Essyl en Basse Casamance. Mémoire, Université Cheikh Anta Diop de Dakar – juin 2007.
- Diba I., and Camara M., (2017) : Analyse De L'impact Du Changement De La Couverture Végétale Sur La Pluie Et La Température De Surface Au Sénégal. *European Scientific Journal*. vol.13, No.29. *Doi: 10.19044/esj.2017.v13n29p270*.
- 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.
- Dickinson R. E., Henderson S. A., and P. J. Kennedy, (1993): Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) version 1E as coupled to the NCAR Community Climate Model. *NCAR Tech. rep. TN-387+STR*, 72 pp.
- Dieng O., Roucou P., Louvet S., (2008) : Variabilité intra-saisonnière des précipitations au Sénégal (1951-1996). *Sécheresse*; 19 (2): 87-93.
- Dirmeyer P., Niyogi D., NOBLET N., and Dickinson R., (2010): Impacts of land use change on climate. *International Journal of Climatology*, DOI: 10.1002/joc.2157
- Emanuel K.A., (1991): A scheme for representing cumulus convection in large-scale models. *J. Atmos. Sci.*, 48, 2313-2335.
- Fritsch, J. M, and C. F. Chappell, (1980): Numerical prediction of convectively driven mesoscale pressure systems. Part I: Convective parameterization. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 37, 1722- 1733.
- Funk, C.C., Peterson, P.J., Landsfeld, M.F., Pedreros, D.H., Verdin, J.P., Rowland, D., Romero, B.E., Husak, G.J., Michaelsen, J.C., and Verdin, A.P., (2014). A quasi -global precipitation time series for drought monitoring: U.S. Geological Survey Data Series 832, 4 p., <http://dx.doi.org/10.3133/ds832>.
- Gbode. I. E., Akinsanola. A. A., and Ajayi. V. O., 2015: Recent Changes of Some Observed Climate Extreme Events in Kano. *International Journal of Atmospheric Sciences*, Volume 2015, Article ID 298046, 6 pages.
- Giorgi F., Coppola E., Raffaele F., (2014): Changes in extremes and hydroclimatic regimes in the CREMA ensemble projections. *Climatic Change*, vol. 125, no. 1, pp. 39–51.
- Grell, G. A, (1993): Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations. *Monthly Weather Review*, 121, 764-787.
- Herold N, Behrangi A, Alexander LV (2017) large uncertainties in observed daily precipitation extremes over land. *J Geophys Res Atmos* 122: 668–681
- Holtslag A.A.M., Bruijn de E.I.F and Pan H.L., (1990): A high resolution air mass transformation model for short-range weather forecasting. *Mon. Wea. Rev.*, 118, 1561-1575.

- Katerina G., (2007) : Une étude des événements climatiques extrêmes sur l'Europe et le bassin Méditerranéen et de leur évolution future. THÈSE DE DOCTORAT /UNIVERSITÉ PARIS 6, pp.3-5.
- Karyampudi, V. M., and T. N. Carlson, (1988): Analysis and numerical simulations of the Saharan air layer and its effects on easterly wave disturbances. *J. Atmos. Sci.*, 45, 3102–3136.
- Kiehl J. T., and Kevin E. T., (1997): Earth's Annual Global Mean Energy Budget. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78, 197-208.
- Kuster, Y. (2020) : La dynamique des masses atmosphériques; L'atmosphère, enveloppe gazeuse de la Terre. Consulté le 18/01/2020. Disponible sur : <http://eduscol.education.fr/obter/appliped/circula/therme/atmos22.html>.
- Lafore, J.P and M. W. Moncrieff, (1989): A numerical investigation of organization and interaction of the convective and mesoscale regions of squall line. *J. Atmos. Sci.*, 46, 521-544.
- Leroux, M. (1983) : Le climat de l'Afrique tropicale. 1983. In: Cahiers d'outre-mer. N° 149 - 38e année, Janvier-mars 1985. pp. 94-95.
- Leroux M, (1995): La dynamique de la Grande sécheresse sahélienne. *Rev Geogr Lyon*;70:223-32.
- Lespinas F, (2008) : Impacts du changement climatique sur l'hydrologie des fleuves côtiers en région Languedoc-Roussillon. Thèse de Doctorat, Université de Perpignan, pp. 334.
- Nicholson S. E., (2008): The intensity, location and structure of the tropical rainbelt over West Africa as factors in interannual variability. *International Journal of Climatology*, vol. 28, no. 13, pp. 1775–1785.
- Pal, J. S., Small, E. and EAB. Eltahir, (2000): Simulation of regional-scale water and energy budgets: representation of subgrid cloud and precipitation processes within RegCM. *Journal of Geophysical Research*, 105, 29579-29594.
- Peterson, T.C.; Folland, C.; Gruza, G.; Hogg, W.; Mokssit, A.; Plummer, N., (2001): Report on the Activities of the Working Group on Climate Change Detection and Related Rapporteurs 1998-2001; *WMO: Geneva, Switzerland*.
- Reed, R. J., D. Norquist, and E. E. Recker, (1977): The structure and properties of African Wave disturbances as observed during Phase III of GATE. *Mon. Wea. Rev.*, 105, 317-333.
- Sagna P, (1988): Étude des lignes de grains en Afrique de l'Ouest. Thèse de doctorat de 3e cycle de géographie. Dakar, Ucad, 1988.
- Salack S, Muller B, Gaye AT, Hourdin F, Cisse N, (2012):Analyses multi-échelles des pauses pluviométriques au Niger et au Sénégal. *Sècheresse* 23 : 3-13. Doi : 10.1684/ sec.2012.0335
- Saley I. A., Sanda S. I., Bell J. P., Ly M., Salack S., Fode M., and A. Diedhiou, (2016) : Impacts potentiels de la Grande Muraille Verte sur le climat du Sahel et de l'Afrique de l'Ouest. *Annales de l'Université Abdou Moumouni, Volume 1, Tome XXI-A*.

- Sané T., Diop M., Sagna P., (2008) : Étude de la qualité de la saison pluvieuse en Haute Casamance (Sud Sénégal). *Sécheresse*; 19 (1): 23-8
- Thorncroft. C. D., and M. Blackburn, (1999): Maintenance of the African Easterly Jet. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 125, 763-786.
- Uppala S., D. Dee, S. Kobayashi, P. Berrisford and A. Simmons, (2008): Towards a climate data assimilation system: status update of ERA-Interim. *ECMWF Newsletter 115: 12-8*.
- Webster P. J, (1998) : Moussons: processus, prévisibilité et perspectives de prédiction. *Journal of Geophysical Research*, Volume 103, C7, 14,451--14,510.
- Xue. Y & Shukla. J, (1993): The influence of land surface properties on Sahel climate. Part I: desertification *J. Clim*; 6, 2232–2245.
- Xue. Y& Shukla. J, (1996): The influence of land surface properties on Sahel climate. Part II. Afforestation *J. Clim*; 9; 3260–3275.
- Zaroug MAH, Sylla MB, Giorgi F, Eltahir EAB, Aggarwal PK, (2013): A sensitivity study on the role of the Swamps of Southern Sudan in the summer climate of North Africa using a regional climate model. *Theor Appl Climatol*, 113:63–81 DOI 10.1007/s00704-012-0751-6
- Zheng, X., and E.A.B Eltahir, (1998): The role of vegetation in the dynamics of West African monsoons. *J.Climate*, 11, 2078-2096.