



**UNIVERSITE  
JEAN LOROUGNON GUEDE**

**UFR ENVIRONNEMENT**

**REPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE**

**Union-Discipline-Travail**

-----  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et  
de la Recherche Scientifique**

**ANNEE ACADEMIQUE :  
2018-2019**

**N° D'ORDRE : 0281 / 2020**

**N° CARTE D'ETUDIANT :  
CI0414002864**

**LABORATOIRE :  
Sciences et Technologies  
de l'Environnement**

# **MASTER**

**Physique-Chimie Appliquée**

**Option : Environnement**

**THEME :**

**SENSIBILITE DES SCHEMAS DE SURFACE DANS  
LES SIMULATIONS DU MODELE CLIMATIQUE  
REGIONAL RegCM4.5 EN AFRIQUE DE L'OUEST**

**Présenté par :**

**AKAFOU Ethien Felix**

**JURY**

**Président : M. BARIMA Yao Sadaïou Sabas, Maître de Conférences,  
Université Jean LOROUGNON GUEDE**

**Directeur : M. KOUASSI Kouakou Lazare, Maître de Conférences,  
Université Jean LOROUGNON GUEDE**

**Encadreur : M. KOUASSI Adjon Anderson, Maître-Assistant,  
Université Jean LOROUGNON GUEDE**

**Examineur : M. SILUE Siélé, Maître-Assistant,  
Université Peleforo Gon COULIBALY**

**Soutenu publiquement  
le : 10 juin 2020**

## TABLE DES MATIERES

Pages

DEDICACE .....	i
REMERCIEMENTS .....	ii
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS .....	iv
LISTE DES TABLEAUX .....	v
LISTE DES FIGURES .....	vi
INTRODUCTION .....	1
PARTIE 1 : GENERALITES .....	4
1.1. Situation géographique .....	5
1.2. Topographie .....	6
1.3. Végétation.....	6
1.4. Climatologie de l'Afrique de l'Ouest.....	6
1.4.1. Circulation générale .....	6
1.4.2. Circulation atmosphérique en Afrique de l'Ouest.....	10
1.5. Modèles climatiques .....	10
1.5.1. Interactions surface atmosphère .....	12
1.5.2. Schéma de surface .....	13
1.5.3. Les réanalyses .....	13
PARTIE 2 : MATERIEL ET METHODES .....	15
2.1. Outils et Matériels .....	16
2.1.1. Présentation du Modèle climatique RegCM .....	16
2.1.2. Schéma de surface BATS.....	18
2.1.3. Schéma de surface CLM .....	18
2.2. Données initialisation et de forçage.....	20
2.3. Données d'observation.....	20

2.4. Méthode .....	22
2.4.1. Expériences numériques ou simulations .....	22
2.4.2. Méthodologie de validation.....	24
2.4.3. FERRET .....	24
<b>PARTIE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION.....</b>	<b>26</b>
3.1. Variation mensuelle moyenne des précipitations .....	27
3.2. Distribution Spatiale des Précipitations JJAS en Afrique de l'Ouest .....	28
3.3. Analyse des précipitations simulées et observées (BATS, CLM et TRMM).....	29
3.4. Cycle annuel de précipitation sur les zones de l' Afrique de l'Ouest.....	31
3.4. Statistiques des champs de précipitations simulées et observées .....	33
3.5. Distribution spatiale de température de surface .....	35
3.6. Cycle annuel de températures de surface .....	38
3.7. Analyse statistique des champs de température .....	39
<b>CONCLUSION .....</b>	<b>42</b>
<b>REFERENCES .....</b>	<b>45</b>

## **DEDICACE**

*Je dédie ce mémoire de Master à mère TANO ASSOH, pour tout son courage et sa détermination. Dans les moments difficiles de notre famille, elle a su se battre, à travers son commerce d'attiké, afin d'assurer le quotidien de ses enfants: gîte, couvert et scolarité.*

*A mon père AKAFU KOUAME MODESTE qui a su faire face à nos besoins. Il n'a jamais cessé de travailler pour le bien être de sa famille.*

*Merci, papa et maman. Que Dieu vous donne longue vie afin que vous profitiez du fruit de vos semences.*

## REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, nous voudrions tout d'abord remercier les autorités de l'Université Jean Lorougnon Guédé, avec à leur tête Professeur TIDOU Abiba Sanogo, Présidente de l'Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa, pour leur dévouement dans la formation des étudiants.

Nous tenons à adresser nos remerciements au professeur YOBOUE Véronique, responsable de l'équipe de recherche « Aérosols et Pollution » du laboratoire de Physique de l'Atmosphère et des Mécaniques des Fluides (LAPA-MF) de l'Université Felix Houphouët Boigny d'Abidjan, pour sa collaboration. Notre reconnaissance va ensuite à l'endroit du Directeur de l'UFR Environnement, Docteur KOUASSI Kouakou Lazare, pour ce privilège qu'il m'accorde d'être mon directeur scientifique, pour ses conseils, le regard porté sur l'ensemble des travaux de recherches. Merci Docteur, pour votre considération à notre égard. Nous vous réitérons notre sincère reconnaissance pour nous avoir inculqué l'amour du travail bien fait.

Nous exprimons toute notre reconnaissance au Docteur DIBI Brou, Directeur du Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement (LSTE) de l'Université Jean LOROUGNON GUEDE, pour avoir permis la réalisation de ce travail au sein du laboratoire qu'il dirige.

Nous remercions le Docteur BARIMA Yao Sadaïou Sabas qui a accepté de présider le jury de ce mémoire.

Nous adressons nos sincères remerciements au Docteur KOUASSI Adjon Anderson, encadreur de ce mémoire. Cher maître, vos conseils, vos directives et surtout votre sérieux dans le travail m'ont donné une vision claire du travail bien fait. Merci également au Docteur SILUE Siélé, qui accepte d'être l'examineur de ce travail.

Nous remercions le Docteur DIEDHIOU Arona pour la mise à disposition des données. Nos remerciements vont également à l'endroit de son doctorant, KONE Ibrahima, inscrit en physique de l'atmosphère à l'Université Félix Houphouët Boigny d'Abidjan, pour son assistance dans les techniques numériques et de simulations.

Remerciement spécial au Docteur KONAN Félix et Docteur KONAN Séraphin, qui en plus de dispenser leur savoir, apportent une aide précieuse dans l'insertion professionnelle des étudiants de l'UJLoG.

Nous remercions sincèrement tous les enseignants de l'UFR Environnement, auprès desquels nous avons appris énormément, plus particulièrement, les Docteurs TOKOU, KEZO, KEDI, KOUYATE, DOUKOURE, GBEHE, DIARRA, KOUADIO, OUSSOU, AKESSE, ADON, pour leur disponibilité et leur assistance aux étudiants du laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement. Nos remerciements vont également à l'endroit au Docteur Kouassi Bi pour l'attention particulière qu'il accorde dans le suivi de mon parcours universitaire.

Nous remercions tous les étudiants du laboratoire des Sciences et Technologie de l'Environnement (LSTE) de l'Université Jean Lorougnon Guédé, particulièrement les Doctorants OUEDE Gla Blaise et OUATTARA Gningneri Souleymane, pour leur aide précieuse tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Merci également aux étudiants, TOURE, DJE, BAMBA, AMANI Yao, KOUADJA, YAO, N'DOUA, N'GUESSAN, AMANI, COULIBALY, TIECOURA, KEITA, COULIBALY N'BAHA, KOUAKOU, OUHAMA, VROH BI, GOHOROU, KONE, pour leur soutien moral et spirituel tout au long de ce travail.

Merci à la Communauté Missionnaire Chrétienne Internationale pour la prière dans le secret, pour la réussite de ce mémoire.

Nous remercions la famille AKAFU, la famille TANO et la famille BEAT, particulièrement Madame BEAT Seki Seandjan Ange, pour leurs soutiens et conseils durant mes études. Enfin, nous remercions toutes les personnes que je n'ai pas pu citer ici, qui, de loin ou de près, ont contribué à la réalisation de ce travail.

## LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

<b>AO</b>	: Afrique de l'Ouest
<b>CFS</b>	: Système de Prévision Climatique
<b>CHIRPS</b>	: Climate Hazards group InfraRed Precipitation with Stations
<b>CPC</b>	: Centre de Prédiction Climatique
<b>CSA</b>	: Central SAhélien
<b>ESH</b>	: Energie Statique Humide
<b>ECMWF</b>	: European Center for Medium-Range Weather Forecasts
<b>FIT</b>	: Front Inter Tropicale
<b>GCM</b>	: Global Climate Model
<b>GCO</b>	: Guinea-Cost
<b>ICTP</b>	: International Center for Theoretical Physics
<b>IPCC</b>	: Intergouvernemental Panel on Climate Change
<b>JEA</b>	: Jet d'Est Africain
<b>JET</b>	: Jet d'Est Tropical
<b>JJAS</b>	: Juin Juillet Aout Septembre
<b>JOST</b>	: Jet d'Ouest Subtropical
<b>MOA</b>	: Mousson Ouest Africaine
<b>NCAR</b>	: National Center for Atmospheric Research
<b>NDVI</b>	: Indice de Végétation par Différence Normalisé
<b>RCM</b>	: Regional Climate Model
<b>RegCM</b>	: Regional Climate Model
<b>SST</b>	: Sea Surface Temperature
<b>SUBEX</b>	: SUBgrid EXplicit
<b>TRMM</b>	: Tropical Rainfall Measuring Mission
<b>WSA</b>	: West SAhel
<b>WAF</b>	: West Africa
<b>ZCIT</b>	: Zone de Convergence Inter Tropicale

## LISTE DES TABLEAUX

Pages

<b>Tableau I</b> : Tableau comparatif de BATS et CLM4 .....	19
<b>Tableau II</b> : Configuration du model RegCM4.5 .....	23
<b>Tableau III</b> : Statistiques des champs de précipitation journalière en surface, simulée (BATS et CLM) et observée (TRMM et CHIRPS), sur différentes sous régions de l'Afrique de l'Ouest. ....	33
<b>Tableau IV</b> : Statistiques des champs de Température maximale journalière en surface, simulées (BATS et CLM) et observée (CPC), sur différentes sous régions de l'Afrique de l'Ouest. ....	40

<b>LISTE DES FIGURES</b>	<b>Pages</b>
<b>Figure 1</b> : Afrique de l'Ouest.....	5
<b>Figure 2</b> : Circulation de Hadley et des régimes de vents associés.....	8
<b>Figure 3</b> : Circulation de Hadley et circulation de Walker superposée (vert) et le jet d'Est Tropical (JET). Les zones de hautes (basses) pressions sont représentées par un H (L)..	9
<b>Figure 4</b> : Modèle climatique globale et régional .....	11
<b>Figure 5</b> : Topographie du domaine modélisé : Afrique de l'Ouest .....	23
<b>Figure 6</b> : Topographie du domaine modélisé : Afrique de l'Ouest avec délimitation des zones Guinea Cost, Central Sahel et West Sahel .....	24
<b>Figure 7</b> : Variation mensuelle moyenne des précipitations journalières sur l'Afrique de l'Ouest, avec HIRPS (noir), BATS (rouge) CLM (Bleu). .....	28
<b>Figure 8</b> : Distribution spatiale des précipitations (mm/day) JJAS moyennées sur la période 2003-2004 sur l'Afrique de l'ouest avec des simulations RegCM (BATS et CLM) et observations (TRMM et CHIPS) (2003-2004).....	29
<b>Figure 9</b> : Biais des champs de précipitations simulées et observées .....	30
<b>Figure 10</b> : Cycle annuel des précipitations sur les différentes régions en Afrique de l'Ouest.....	31
<b>Figure 11</b> : Distribution spatiale de température surface Tmax (°C) de JJAS (2003–2004) sur l'Afrique de l'Ouest.....	35
<b>Figure 12</b> : Biais de température (°C) maximale journalière JJAS sur l'Afrique de l'Ouest des observations et simulations .....	37
<b>Figure 13</b> : Cycle annuel de Température en surface Tmax, sur les quatre zones. ....	39

# **INTRODUCTION**

Le changement climatique est l'une des problématiques majeures de notre temps. Tous les domaines en sont affectés. Il impacte directement les populations, leur environnement immédiat et le climat. À tous les niveaux (international, et national) les décideurs se voient contraints de traiter en priorité cette problématique du changement climatique. Elaborer et mettre en place des politiques adéquates qui devraient répondre aux problèmes du changement climatique. Ce phénomène a pour effet le réchauffement de la planète qui a augmenté de 0,74°C entre 1906 et 2005 (Rocle, 2009), la réduction de la production agricole, la détérioration de la sécurité alimentaire, la fréquence accrue des inondations et de la sécheresse, la propagation des maladies et l'augmentation des risques de conflits dus à la raréfaction des terres et de l'eau ainsi que l'avancée des mers sur les continents suite à la fonte des calottes glaciaires (Parry & IPCC, 2007). Ces changements climatiques menacent directement les vies humaines. En effet, en été 2003 en Europe, la vague de chaleur liée à la canicule a provoqué le décès de près de 30000 personnes dont 14082 en France, 7000 en Allemagne, 4000 en Italie et 2045 en Grande Bretagne (Takashima *et al.*, 2004). L'économie de l'Afrique de l'Ouest repose essentiellement sur les activités rurales dont l'agriculture et l'élevage, et est entièrement dépendant des aléas climatiques. L'Afrique de l'Ouest connaît cependant, ces dernières années, des épisodes de variabilité climatique assez marqués, favorisant des impacts significatifs sur les ressources en eau et sur la sécurité alimentaire. En effet, les impacts des variations du climat, ces trente dernières années s'avèrent alarmants au niveau des ressources en eau d'autant plus que les résultats des études menées sur les fluctuations climatiques montrent que la pluviométrie a baissé de 10% à 30% selon les zones (Ouedraogo, 2001). Des facteurs tels que la température de surface de l'océan (Giannini, 2003), les conditions de surface (Wang & Eltahir, 2000), la structure de l'atmosphère (Jenkins *et al.*, 2005) et le réchauffement climatique global (Held, 2005) sont des causes de la variabilité du climat. Il apparaît donc que le climat en Afrique de l'Ouest est déterminé par une interaction entre des répartitions globales et des mécanismes régionaux (impact du couvert végétal, orographie, etc.). De nos jours, seuls les modèles climatiques régionaux (MCR) modèles à petite résolution (Giorgi & Mearns, 1991) et les modèles globaux à grande résolution (Abiodun *et al.*, 2011) sont adaptés pour prévoir le climat. En plus des conséquences économiques de cette variabilité, une meilleure compréhension des processus qui la contrôle constitue un défi scientifique important. Ainsi prévoir le climat et en étudier les impacts serait un atout significatif pour la prévention (sécurité alimentaire, sanitaires des populations, etc.) et des économies des états en particulier ceux de l'Afrique de l'Ouest. Il

convient donc de concevoir et maîtriser les outils de prédiction, d'analyse et d'aide aux décisions afin de mieux planifier le développement des états, face à la problématique du changement climatique. Parmi ces outils, nous avons les modèles climatiques (GCM ou RCM) qui sont aujourd'hui incontournables dans la prise de décision et la planification des politiques à mettre en place face à l'épineuse question du changement climatique à échelle globale. C'est dans ce cadre que s'inscrit la présente étude dont le thème est « Sensibilité des schémas de surface dans les simulations du modèle climatique régional RegCM4.5 en Afrique de l'Ouest ». Ce travail vise à améliorer la représentativité de la prise en compte des processus physiques en surface (tous ce qui est échange d'énergie, de flux et de matière entre l'atmosphère et la surface) dans le modèle RegCM4.5, afin de rendre ce modèle plus performant donc plus réaliste sur l'Afrique de l'Ouest. Pour qu'il soit utilisé comme outil d'aide à la décision par les gouvernants, afin de prévenir les populations des aléas climatiques (inondation, réchauffement climatique). Le modèle climatique régional RegCM4.5 (Giorgi *et al.*, 2012a), développé par la section de Physique des systèmes planétaires d'Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics ICTP, a été utilisé pour mener à bien cette étude. ICTP est un centre international de recherche de l'Unesco, pour des chercheurs du Tiers monde. Il est situé à Trieste en Italie.

Ce présent mémoire s'organise autour des trois parties ci-dessous :

**La première partie** de ce mémoire décrit le cadre géographique, la climatologie de l'Afrique de l'Ouest et une bibliographie sur la modélisation climatique.

**La seconde partie** se rapporte à la description du modèle climatique régional RegCM4.5, comme outil d'investigation. Il présente également la méthodologie de simulation du climat par le modèle RegCM4.5, ainsi que les données d'observations et les réanalyses.

**La dernière partie** est consacrée à l'évaluation des performances climatiques du modèle RegCM4.5, à travers les schémas de surfaces BATS et CLM, sur l'Afrique de l'Ouest. L'analyse portera sur les précipitations et les températures en surface, une analyse statistique a été menée afin de mieux ressortir les performances du modèle.

# **PARTIE 1 : GENERALITES**

## Introduction

La modélisation du climat bien qu'ayant des limites, reste la seule alternative de la prédiction du climat. Ainsi, améliorer les performances du modèle climatique régional RegCM4.5 sur l'Afrique de l'Ouest est un atout majeur dans l'élaboration des politiques économiques et sanitaire. Dans ce chapitre nous décrivons la région Ouest Africaine et son climat, nous abordons quelques termes clés de la modélisation climatique.

### 1.1. Situation géographique

L'Afrique de l'Ouest fait partie de la zone tropicale située entre le tropique du Cancer  $23,27^{\circ}\text{N}$  et le tropique de Capricorne  $23,27^{\circ}\text{S}$ . Elle est comprise en latitude entre le désert du Sahara au nord et le golfe de Guinée au sud ( $5^{\circ}\text{N} - 20^{\circ}\text{N}$ ) ; limitée à l'est par les montagnes Camerounaises et le lac Tchad et à l'Ouest par l'océan Atlantique ( $20^{\circ}\text{W} - 10^{\circ}\text{E}$ ). L'Afrique de l'Ouest représente un peu moins du quart des masses continentales de l'Afrique, (figure1). Sa localisation à proximité de l'équateur, lui confère un rôle déterminant dans la dynamique régionale atmosphérique et océanique, (Li & Philander, 1997).



**Figure 1** : Afrique de l'Ouest, Source (<https://www.wakatsera.com/gouvernements-dafrique-de-louest-les-moins-engages-dafrique-dans-la-reduction-des-inegalites/>).

## **1.2.Topographie**

Contrairement aux reliefs des régions d’Afrique de l’Est et du Nord, le relief ouest-africain est relativement simple et monotone. Il se compose essentiellement de cuvettes et plaines littorales de grande étendue, le long des côtes au niveau de la Sénégalie et dans la basse vallée du Niger. À l’intérieur des terres, les deux entités hydrographiques majeures sont les bassins du Niger et du Tchad. D’autre part, on constate la présence des massifs sahariens constitués de moyens et hauts plateaux tels que les massifs de l’Aïr (700 à 2000 m d’altitude moyenne), du Tibesti et du Cameroun. Les massifs camerounais, au relief plus varié, se présentent comme une chaîne en arc de cercle avec des sommets de plus de 2000 m (Mt Cameroun, 4070 m). Vers 9°N, il existe un autre groupe de plateaux et massifs dont les plus importants sont les monts de Fouta-Djallon (1537 m), les monts Guinéens (Mt Nimba, 1752 m) à l’ouest et les plateaux de Bauchi (1781 m) à l’est du Nigéria. Les premiers jouent un rôle essentiel car les grands fleuves de la région (le Niger et le Sénégal) y prennent leur source. Cette topographie explique, en grande partie, la répartition spatiale des cumuls annuels de précipitations sur l’Afrique de l’Ouest. De plus, Oettli (2008) souligne que l’influence du relief sur la distribution spatiale des précipitations varie de façon saisonnière.

## **1.3.Végétation**

La végétation ainsi que des paramètres climatiques comme l’humidité des sols, l’albédo et les températures en Afrique de l’Ouest, ont une répartition quasi zonale assez prononcée. Cette répartition de la végétation s’organise suivant le gradient pluviométrique (Le Houérou, 1989). En partance du golfe de Guinée vers le Sahara, nous avons successivement la forêt dense humide, forêt clairsemée, savane arborée, savane et steppe jusqu’au désert. La particularité de la répartition de sa végétation et sa situation géographique font de l’Afrique de l’ouest une entité climatique régionale qui est dominée par un système de circulation atmosphérique (mousson ouest africaine).

## **1.4. Climatologie de l’Afrique de l’Ouest**

### **1.4.1. Circulation générale**

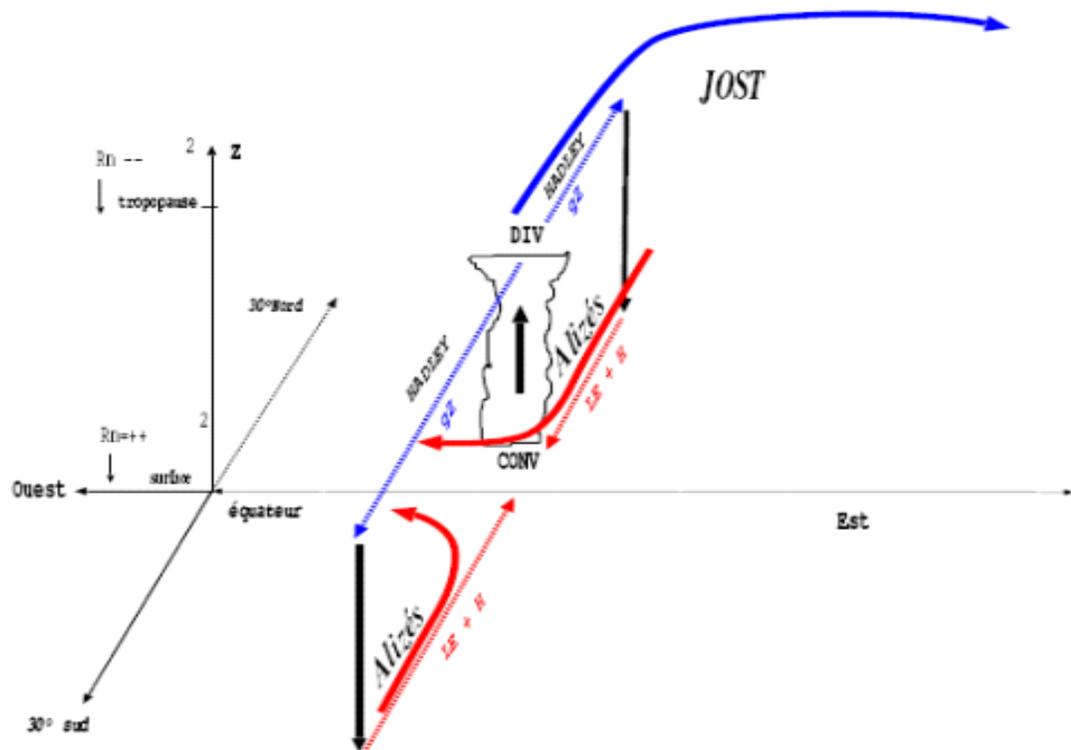
Des échanges d’énergie sont à la base des mouvements de l’atmosphère et des océans, globalement ceux-ci transportent l’énergie excédentaire des zones tropicales vers les zones polaires entre 45 et 50°N (régions déficitaires). En effet si, en considérant le système climatique, comme composé des océans, des masses glaciales (terrestres et océaniques), de l’atmosphère, de la végétation et une couche de sol, ses différents éléments échangent entre eux de l’énergie et de l’eau sous différentes

formes. L'atmosphère et les océans sont les seules composantes fluides de ce système, donc les seules qui puissent transporter de l'énergie. Ces échanges d'énergies sont les sources des mouvements de l'atmosphère et des océans, qui transportent l'énergie des régions excédentaires vers les régions déficitaires. La principale source énergétique de ce système est le rayonnement solaire. La quantité d'énergie absorbée par le système climatique dépend de la sphéricité du globe et du rayon solaire incident par rapport au zénith de la position considérée. Ainsi l'énergie solaire est maximale au niveau des tropiques, et minimale aux pôles, l'atmosphère par exemple, a trois sources d'énergie :

- le rayonnement solaire qui irradie le haut de l'atmosphère par absorption de l'ozone stratosphérique;
- le rayonnement infrarouge qui chauffe la troposphère par absorption des nuages et des gaz à effet de serre. Ce rayonnement infrarouge est ensuite réémis par l'atmosphère vers le bas, ce qui induit l'effet de serre;
- le chauffage par la surface (flux sensible) afin d'équilibrer le bilan énergétique du système climatique, des régions tropicales vers les régions polaires, il s'effectue un transfert sous forme de chaleur sensible et latente au sein des différentes composantes du système climatique, dont l'atmosphère et les océans.

Ces déséquilibres radiatifs sont à l'origine de la mise en circulation du fluide atmosphérique. Une circulation méridienne verticale, appelée cellule de Hadley, s'établit afin de réduire ces gradients. Cet équilibre est représenté par deux cellules, une dans l'hémisphère nord, l'autre dans le sud, constituant la circulation de Hadley. Dans la circulation de Hadley, (figure 2), l'air chaud et humide s'élève et se condense au-dessus de l'équateur météorologique et est transporté en altitude vers 30° de latitude de part et d'autre de l'équateur, approximativement le lieu d'équilibre de la force du gradient de pression et de la force centrifuge. On observe, également à cette latitude, un jet d'Ouest, appelé Jet d'Ouest Subtropical (JOST). Une subsidence se met en place pour évacuer l'air accumulé à ce niveau, provoquant un réchauffement et un assèchement des particules d'air par compression adiabatique, elle correspond en surface à la localisation des anticyclones et des principales zones désertiques. Un air plus sec et froid redescend au niveau des grands anticyclones subtropicaux. Ainsi dans chaque hémisphère s'établit en altitude une circulation entre une zone d'ascendance, correspondant à l'équateur météorologique et une zone de subsidence de 30° latitude de part et d'autre de l'équateur. Cette circulation est fermée dans les basses couches, par un flux

de retour vers l'équateur, qui dévié par la rotation de la terre donne naissance aux alizés. La figure 2 en donne les principales caractéristiques. L'énergie est apportée dans les basses couches vers les zones équatoriales sous forme de chaleur latente (LE) et sensible (H) (en pointillé rouge), augmentant la quantité d'énergie statique humide (ESH1). Les branches supérieures de la cellule de Hadley (en bleu) transportent de l'énergie des tropiques vers les moyennes latitudes sous forme d'énergie potentielle ( $gZ$ , pointillé bleu) pour combler le déficit énergétique méridien.

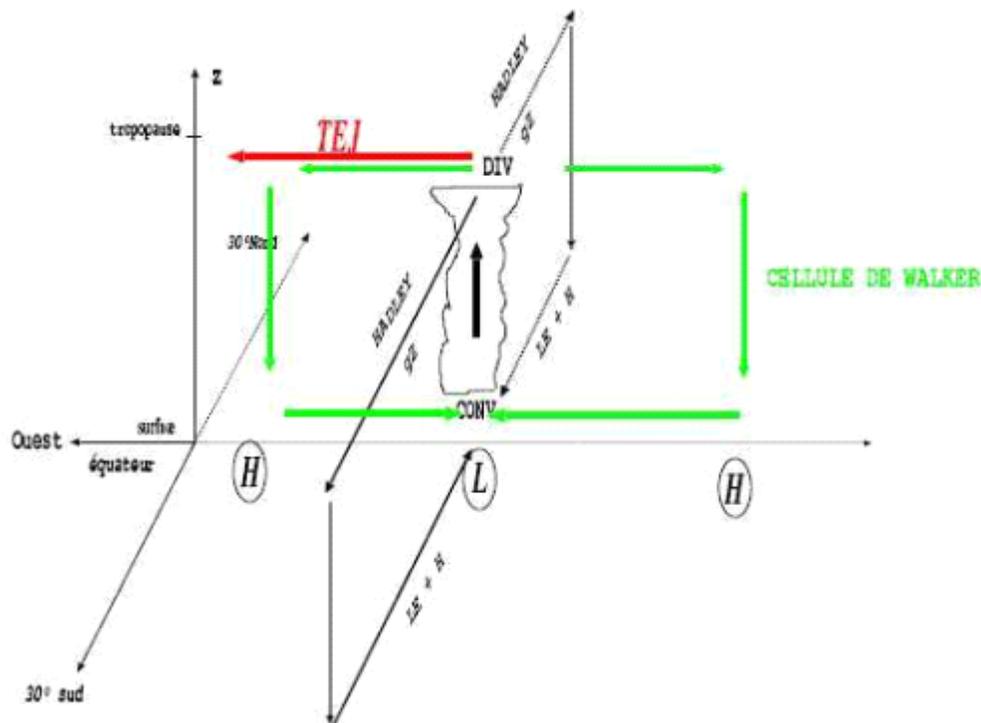


**Figure 2 :** Circulation de Hadley et des régimes de vents associés (Peyrillé *et al.*, 2007)

$R_n$  représente le rayonnement net, JOST le jet d'Ouest Sub Tropical. Les flèches en bleu représentent la circulation d'altitude et en rouge la circulation de basses couches. Les transports d'énergie sont en pointillés bleus pour l'énergie potentielle ( $gZ$ ), en rouge pour les transferts de chaleur latente (LE) et sensible (H).

La circulation atmosphérique tropicale ne se limite, cependant pas à la seule circulation de Hadley. On observe également une forte variabilité zonale et temporelle due aux gradients zonaux de températures de surface de la mer (SST) et de chauffage diabatique. Ces gradients sont à l'origine des circulations de Walker, qui peuvent dominer localement celle de Hadley.

La figure 3 illustre le principe de la circulation de Walker associée à une zone de convection profonde (en vert). Elles sont organisées avec une forte ascendance au niveau des maxima de relâchement de chaleur latente et par des branches zonales dans les basses couches pilotées par les gradients zonaux de pression. Ceux-ci sont orientés des fortes pressions (H) vers les basses pressions (L). La circulation divergente en altitude alimente une circulation zonale, qui va renforcer les vents d'est et intensifier le Jet d'Est Tropical (JET).



**Figure 3 :** Circulation de Hadley et circulation de Walker superposée (vert) et le jet d'Est Tropical (JET). Les zones de hautes (basses) pressions sont représentées par un H (L) (Peyrillé *et al.*, 2007).

Des zones de subsidence sont observées de part et d'autre de la zone de convection profonde pouvant avoir des intensités suffisamment fortes pour dominer localement la circulation de Hadley. La convergence en surface et le profil vertical de température instable en zone équatoriale favorisent la formation de zone de convection nuageuse profonde transportant de l'énergie des basses couches vers la tropopause. Cette région correspondant à la zone d'ascendance et de convection intense, dans la ceinture intertropicale est appelée Zone de Convergence Inter Tropicale (ZCIT) en raison de la forte convergence de basses couches qui la caractérise et de la nébulosité permanente au long de l'année. Sur l'Afrique occidentale, la ZCIT se situe, en

moyenne annuelle, le long de l'équateur, entre 5°S en hiver (Janvier, Février, Mars) et 10°N en Juillet - Août. A l'échelle régionale, les contrastes terre-océan, le relief et les hétérogénéités de surfaces continentales influentes sur la circulation générale lui donnent une particularité sur l'Afrique de l'Ouest, où la circulation régionale est marquée par l'installation des flux de mousson, d'harmattan, des jets et ondes d'Est dans la moyenne et haute troposphère.

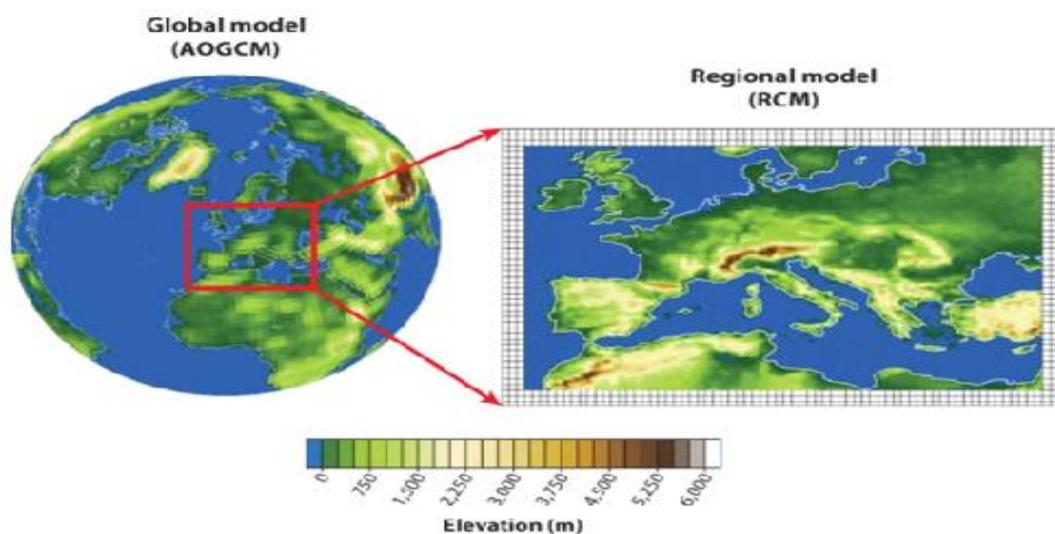
#### **1.4.2. Circulation atmosphérique en Afrique de l'Ouest**

Une des caractéristiques du climat ouest africain est son régime pluviométrique déterminé par son cycle de mousson. La mousson ouest africaine, peut être définie comme la réponse dynamique et hydrique de l'atmosphère au différentiel énergétique existant entre l'océan Atlantique et le continent ouest africain. Selon Gong & Eltahir (1996), c'est un phénomène climatique saisonnier et régional conduit par le gradient méridien d'énergie statique humide entre le sous-continent ouest africain et l'Océan Atlantique. Le renforcement des intensités de gradients des flux d'énergie a lieu durant le printemps boréal et conduit à la migration du flux d'humidité sur le continent, les alizés de l'Atlantique Sud dus aux hautes pressions de l'anticyclone de Sainte Hélène se chargent d'humidité au-dessus de l'Océan. Sous l'effet de la force de Coriolis, ceux-ci prennent une orientation Sud-ouest en traversant l'équateur et apportent sur le continent l'humidité nécessaire à la formation de zones de convection nuageuse. Le flux de mousson dans les basses couches est contre balancé dans sa migration par le flux d'harmattan qui est un vent sec et chaud, de Nord-est provenant du Sahara et circulant toute l'année sur l'Afrique du Nord. Il est lié à la circulation cyclonique dans le Sahara à partir du printemps et correspond aux alizés de l'hémisphère nord d'origine continentale. Ces flux de basses couches se rencontrent au niveau de la Zone de Convergence Intertropicale ZCIT dont la trace au sol est appelée Front Intertropical (FIT).

#### **1.5. Modèles climatiques**

Les modèles climatiques se classent généralement en deux catégories, (figure 4). Les modèles de circulation générale (GCM ou modèles globaux) et les modèles climatiques régionaux (RCM). Les premiers offrent la possibilité de simuler le climat à l'échelle de la planète alors que les seconds ne simulent qu'une région du globe, en prenant en comptes les spécificités climatiques de la zone. Les RCM sont pour la plupart des modèles à aire limitée et imbriqués dans les champs de grandes échelles issues des sorties de modèles globaux ou des réanalyses. Les modèles globaux sont utilisés

dans l'étude du changement climatique, permettant de faire des projections climatiques sur plusieurs années avec différents scénarios (IPCC, 2014). Bien qu'utiles dans ce type d'applications, ils n'offrent pas la possibilité d'étudier correctement les climats régionaux. En effet, leur résolution spatiale grossière (de l'ordre de la centaine de kilomètres) ne permettent pas de prendre en compte les phénomènes de petites échelles comme les nuages convectifs, les brises de mer ou les effets locaux de la topographie (Xu *et al.*, 2015). En Afrique, Par exemple les GCM représentent correctement la tendance des précipitations lors de la deuxième moitié du XX<sup>ème</sup> siècle mais affichent des difficultés à simuler des phénomènes complexes comme la Mousson Ouest Africaine MOA (Laprise *et al.*, 2013). Les RCM, avec leur résolution bien plus fine (jusqu'à la dizaine Km), sont quant à eux capables de résoudre les phénomènes de petites échelles, avec une meilleure prise en compte des spécificités climatiques de la zone à étudier. Les modèles régionaux à aires limitées ou modèles imbriqués sont initialisés et forcés avec les sorties des modèles globaux.



**Figure 4 :** Modèle climatique globale et régional (Giorgi & Gutowski, 2015).

C'est-à-dire qu'il faudrait fournir les champs de grandes échelles (humidité, température et vents) aux frontières du domaine d'intégration. Ces données d'initialisation et de forçage, sont des sorties de modèle de grandes échelles et donc des modèles globaux. On passe ainsi, d'une résolution spatiale grossière des GCM vers la fine résolution caractérisant les RCM. Au final, les RCM permettront une meilleure prise en compte des phénomènes de méso-échelles et les améliorer.

### 1.5.1. Interactions surface atmosphère

La conception des modèles climatique a progressé depuis les années 1970 où les modèles climatiques se limitaient aux sous schémas atmosphériques. Aujourd'hui les modèles climatiques comprennent des sous schémas de surface (Moufouma-Okia & Rowell, 2010). Dans le système climatique, la surface continentale représente la limite inférieure d'environ 30% de l'atmosphère du globe. Cette surface échange avec l'atmosphère de la chaleur, de l'humidité et de la matière. Dickinson (2010) a montré que la différence entre surface continentale et océanique en ce qui concerne leur rôle dans le système climatique, est assez nette. La capacité thermique de la surface continentale est nettement moins élevée que celle des océans. Par conséquent, elle fournit beaucoup moins d'énergie dans les échanges climatiques. Le transport horizontal d'énergie est également négligeable par rapport aux océans. Le continent est plus sensible aux variations intervenant dans les processus de couplage avec l'atmosphère comparativement à la surface océanique. La surface continentale reste plus sensible à toute variation du rayonnement net à travers l'atmosphère que les océans. A la différence de ces derniers, la surface continentale peut être mouillée, humide ou sèche. Le système continental se compose d'une large hétérogénéité, avec de grandes différences dans les propriétés de sol et la distribution du couvert végétal. L'albédo de surface continentale varie en fonction de la végétation et du type de sols. D'importantes interactions entre la surface terrestre et l'atmosphère s'établissent à travers des échanges de rayonnement, de matière, de chaleur sensible et latente. Les radiations solaires sont majoritairement absorbées, non pas par l'atmosphère, mais par la surface sous-jacente (la surface terrestre). Cette énergie sert à l'évaporation et au réchauffement en surface. Une grande partie de celle-ci est retournée sous forme de chaleur latente et sensible vers l'atmosphère. La surface terrestre échange également de la matière avec l'atmosphère par les flux turbulents à la limite inférieure de l'atmosphère. Les vents en surface sont un facteur de détermination de la contribution des processus d'échange turbulent surface atmosphère. Il semble important de prendre en compte tous ces processus physiques gouvernant les échanges entre l'atmosphère et la surface. Ces échanges interactifs d'énergie, de matière et de flux sont tout aussi déterminants pour une meilleure modélisation climatique couple modèle d'atmosphère et schéma de surface.

### 1.5.2. Schéma de surface

Les modèles numériques de surface (MNS) permettent de modéliser la surface du sol et du sursol. Ils permettent donc d'identifier les objets du sursol comme les bâtiments, la végétation, etc. Cette description du territoire peut être utilisée dans de nombreux domaines, en tant que donnée de calcul ou comme premier niveau de modélisation 3D.

### 1.5.3. Les réanalyses

À l'instar d'une prévision météorologique classique (utilisée par exemple dans un bulletin météo), une réanalyse est un jeu de données représentant l'état de l'atmosphère, ainsi que de sa surface sous-jacente. Le domaine spatial couvert par une réanalyse peut s'étendre sur la totalité du globe ou se focaliser sur une région particulière. Les variables de sortie sont représentées sur une grille régulière en 3 dimensions, et ce, sur une durée temporelle déterminée. Par exemple, les réanalyses récentes couvrent une période commençant en 1979 jusqu'au présent. Les réanalyses sont générées par un modèle de prévision météorologique produisant une prévision à court terme, à un pas de temps (cycle de prévision) propre à chaque réanalyse. De plus, à chaque début de cycle de prévision, un processus d'assimilation de données d'observation permet de créer un nouvel état initial de l'atmosphère plus cohérent avec les observations pour le cycle suivant de prévision. Ce processus d'assimilation de données, commun aux réanalyses et aux prévisions météorologiques classiques, est appelé analyse. Le terme "réanalyse" vient de "rétrospective analysis", car l'analyse est réalisée sur une période du passé. D'autre part, le modèle météorologique, la méthode d'analyse et tous les algorithmes d'une réanalyse restent inchangés lors du processus de génération des données, ceci constitue la majeure différence entre les données de réanalyses et les produits de prévisions météo classiques. Les données d'observation assimilées peuvent provenir de différentes sources: satellites, bateaux, ballons sondes, avions, bouées ou stations météo entre autres. Les réanalyses du CEPMMT sont des projets du (CEPMMT/ECMWF) qui combinent des observations passées à plusieurs variables. Ces réanalyses font partie des ensembles de données les plus utilisés en sciences et fournissent une description complète du climat observé sur des grilles à trois dimensions de l'état de l'atmosphère passée à des intervalles infra quotidiens. En plus de la réanalyse de toutes les données anciennes dans un système cohérent, les réanalyses rendent possible l'utilisation de données archivées qui n'étaient pas accessibles lors des analyses originales. Cela

permet la correction de plusieurs ajustements manuels dans les zones de données manquantes, où l'estimation de scénarios était habituelle. Le premier produit de réanalyse, ERA-15, a généré des réanalyses sur environ 15 ans, de décembre 1978 à février 1994 (Uppala *et al.*, 2005). Le second produit, ERA-40 (originellement voulu comme une réanalyse de 40 ans) commence en 1957 et couvre 45 ans, jusqu'en 2002 (Uppala *et al.*, 2005). En tant que précurseur à un produit de réanalyse étendu destiné à remplacer ERA-40, le CEPMMT a sorti ERA-Intérim qui couvre la période de 1979 à aujourd'hui et est continuellement mis à jour (Fiddian-Green & Silen, 1975). Le CEPMMT a récemment publié un nouveau produit de réanalyse, ERA-5, dans le cadre des services Copernicus Climate Change. Ce produit a une résolution spatiale plus élevée (31 km) et couvre la période de 1979 à aujourd'hui. Les extensions jusqu'en 1950 sont disponibles depuis 2019 (Marniemi & Parkki, 1975). Les variables fournies par les réanalyses sont nombreuses, et représentent de manière assez complète les processus physiques de l'atmosphère et de la surface: direction et intensité du vent, température, humidité, précipitation, évaporation, ruissellement, flux radiatifs, enneigement, etc.

### **Conclusion partielle**

De cette partie nous sommes arrivés par la recherche bibliographique à situer l'Afrique de l'Ouest, présenter sa surface, son climat, faire connaissance de quelques termes de modélisation climatique. On retient de cette étude que de par sa localisation entre le tropique du Cancer 23,27°N et le tropique de Capricorne 23,27°S, l'Afrique de l'Ouest possède des atouts forestiers et fluviaux favorables à l'agriculture, l'élevage, le commerce, etc. Cependant l'Afrique de l'Ouest ces dernières décennies connaît des sécheresses prolongées et graves, notamment dans sa région sahélienne semi-aride. La sécheresse qui a débuté à la fin des années 1960 est reconnue comme le signal climatique le plus fort depuis le début des mesures météorologiques. Il est de plus en plus évident que le climat à long terme de l'Afrique de l'Ouest est en train de changer, mais des changements climatiques peuvent entraîner des inondations et des sécheresses (extrêmes hydrologiques). Ainsi performer les modèles climatiques régionaux pour prévoir le climat avec plus de précision serait favorable pour les habitants.

## **PARTIE 2 : MATERIEL ET METHODES**

**Introduction :**

Le but est d'étudier les performances ou le réalisme des simulations du modèle RegCM4.5 sur l'Afrique de l'Ouest, à partir de la prise en compte des propriétés de surface. En effet, l'Afrique de l'ouest a des propriétés continentales particulières (zone tropicale, épaisseur de la couche limite variable, distribution de zonal du couvert végétal et des paramètres climatiques, etc.). Il est important que toutes ces particularités soient correctement prises en compte, à travers les schémas de surface, pour une meilleure restitution de la climatologie de l'Afrique de l'Ouest par des modèles climatiques régionaux. Pour ce faire nous avons mené une étude comparative entre deux simulations du même modèle régional RegCM4.5, utilisant des schémas de surface différents. Nous évaluerons les performances du RegCM4.5 par rapport aux observations. La meilleure configuration du modèle régional, sera celle dont les simulations sont plus proches de la réalité climatique de l'Afrique de l'Ouest

**2.1. Outils et Matériels****2.1.1. Présentation du Modèle climatique RegCM4.5**

Le modèle climatique régionale version 4.5 (RegCM4.5) est la version actuelle, développée et améliorée du RegCM (Giorgi *et al.*, 2012b) du Centre International «Abdus Salam international Center for Theoretical physics » ICPT, qui est un centre de recherche de l'UNESCO situé à Trieste en Italie. RegCM4.5 est un modèle atmosphérique tridimensionnel à aire limitée, qui utilise l'hypothèse hydrostatique. Le modèle possède le système de grille horizontale Arakawa B, le système de coordonnées verticales sigma pour une meilleure prise en compte de la topographie, il inclut différents schémas. La dynamique du modèle est basée sur la version hydrostatique du Modèle méso échelle MM5 de l'Université de Pennsylvanie. Le schéma radiatif est issue de la version du NCAR global model CCM3 (Ohshima & Kiehl, 1996), il inclut une représentations des aérosols (Zakey *et al.*, 2006). La turbulence, les flux turbulents en surface et dans la couche limites sont basées sur les travaux de Holtslag *et al.* (1990). Le Schéma de précipitations grandes échelles est celui de Pal *et al.* (2007). La paramétrisation du schéma de convection est basée sur les travaux des schémas de Emanuel (1991) et Grell (1993). Comparativement aux versions précédentes, de nombreux processus physiques ont été mis à jour dans le modèle RegCM4.5. Par exemple, de nouveaux schémas de surface, de couche limite planétaire et un schéma de flux air-oécan ont été implémentés. Une modification du schéma de transfert radiatif et de la couche limite ont été ajoutées (Giorgi *et al.*, 2012a). Dans l'ensemble, le RegCM4.5 montre une amélioration des

performances à plusieurs égards par rapport aux versions précédentes. La plus grande innovation est l'implémentation du nouveau schéma de surface Community Land Model (CLM), version 4.5 a été couplé au RegCM4. Le schéma de surface Biosphere Atmosphere Transfert Schéma BATS, qui a servi les versions précédentes de RegCM reste également d'actualité.

La quatrième génération du ICTP RegCM (ci-après RegCM4) est utilisée dans cette étude. RegCM est un modèle à aire limitée utilisant un système de coordonnées verticales à pression  $\sigma$  en fonction du terrain et un algorithme de différentiation finie (équation de différentiation, on dit aussi son gradient) Arakawa B-grid (Giorgi *et al.*, 2012a). La composante dynamique du modèle est dérivée de la version hydrostatique du modèle méso-échelle de la Pennsylvania State University version 5 avec des améliorations sur le couplage, un modèle de surface terrestre avancé et complexe (CLM3.5 et CLM4.5) (Oleson *et al.*, 2008). Dans la version utilisée ici, le schéma de rayonnement est dérivé du modèle global NCAR CCM3 (Ohshima & Kiehl, 1996) et comprend une représentation des aérosols selon Solomon *et al.* (2007). Les transports turbulents de quantité de mouvement, de vapeur d'eau et de chaleur sensible dans la couche limite planétaire au-dessus de la terre et de l'océan sont calculés selon (Holtslag *et al.*, 1990), qui autorise le transport non local en zone convective, couche limite. Le schéma de précipitation à grande échelle de Pal *et al.* (2007), appelé schéma d'humidité SUBgrid EXplicit (SUBEX), inclut la variabilité de la sous-grille dans les nuages (Sundqvist *et al.*, 1989) et les processus d'évaporation et d'accumulation pour des précipitations stables. Les flux à la surface des océans de quantité de mouvement, de chaleur et d'humidité sont représentés en utilisant le schéma de Zeng *et al.* (1998) avec un coefficient de traînée basé sur la procédure aérodynamique globale et en tenant compte de l'influence de la vitesse de frottement de surface sur la longueur de rugosité calculée d'après Smith (1988) et Brutsaert (1982), respectivement, pour la quantité de mouvement et la chaleur (et aussi l'humidité). Les processus d'interaction sol-végétation-atmosphère sont paramétrés à l'aide du modèle de terrain communautaire, version CLM 4,5 (Olson *et al.*, 2014). CLM4.5 présente dans chaque cellule de la grille la possibilité d'avoir 15 couches de sol, jusqu'à cinq couches de neige, cinq types d'unités terrestres différents et 16 unités fonctionnelles de différents types (Lawrence *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2016). RegCM4- CLM4.5 propose cinq schémas convectifs différents (Im *et al.*, 2008; Giorgi *et al.*, 2012a) dont le schéma de Kuo modifié (Anthes *et al.*, 2003), le schéma de Tiedtke (Tiedtke & Rasmussen, 1989), le schéma Emanuel (Emanuel, 1991), le schéma Grell (Grell, 1993) et le

schéma de Kain-Fritsch (Kain & Fritsch, 1989; Kain, 2004) avec la possibilité de combiner différents schémas sur l'océan et la terre (appelée convection «mixte»).

### **2.1.2. Schéma de surface BATS**

Le Schéma de surface BATS a été développé par Dickinson *et al.* (1989). La version utilisée dans la présente étude décrit les effets de la végétation sur les échanges air-terre (de quantité de mouvement, d'énergie et de vapeur d'eau). Le bilan hydrologique est calculé avec une zone racinaire de 1 à 2 m de profondeur, qui constitue la couche de sol la plus importante pour le processus biologique. Le schéma comprend une couche de végétation, une couche de neige, une couche de sol en surface de 10 cm de profondeur et une couche de sol profonde (ou zone racinaire), qui est de 1 m de profondeur pour la végétation courte et de 2 m pour les surfaces boisées. Pour chaque point de grille, une fraction saisonnièrement dépendante de la surface couverte ou indice NDVI est attribuée à la végétation, la fraction restante est spécifiée comme étant un sol nu. Le schéma de surface BATS décrit 15 types de végétation. Les équations pronostiques sont résolues pour la température de la couche superficielle du sol et de la zone racinaire en utilisant une généralisation de la méthode force-restore de Deardorff (1978). La représentation BATS de l'hydrologie de surface comprend des équations prédictives pour la teneur en eau de la couche superficielle du sol et de la zone racinaire. Ces équations tiennent compte des précipitations, de la fonte des neiges, de l'évapotranspiration, du ruissellement de surface, de l'infiltration (ou du drainage) en dessous de la zone racinaire et des échanges diffusifs d'eau entre les couches du sol. Dans notre étude, le code BATS a été utilisé comme modèle standard piloté par des observations au niveau du sol (température de 2 m, humidité relative de 2 m, vent de 10 m, pression au niveau de la mer, précipitations et couverture nuageuse) comme conditions aux limites supérieures, disponibles dans une station synoptique.

### **2.1.3. Schéma de surface CLM**

Le Schéma de surface CLM ou Modèle de terrain communautaire, est un modèle open source des processus de surface terrestre (Lawrence *et al.*, 2019), développé pour être utilisé comme composante terrestre dans le CESM entièrement couplé (Hurrell *et al.*, 2013). La bibliographie CLM répertorie actuellement plus de 450 publications utilisant le modèle depuis 2001 (Lauritzen *et al.*, 2018). Il s'agit d'un modèle entièrement pronostique, et à chaque pas de temps (30 min), le modèle calcule le cycle de l'énergie, de l'eau, du carbone et de l'azote et met à jour les variables

d'état pour chaque cellule de la grille. CLM représente les milliers d'espèces végétales comme un ensemble limité de types fonctionnels de plantes (PFT) au niveau du sous-réseau (Bonan *et al.*, 2002), permettant au modèle de prescrire des paramètres qui contrôlent les interactions terre-atmosphère et dynamique internes du modèle pour chaque point de l'espace. Les sensibilités climatiques des processus écosystémiques sont contrôlées par les états initiaux et les ensembles de paramètres du modèle. Le CLM est régi par un ensemble limité de variables atmosphériques (température de l'air, rayonnement à ondes courtes et à ondes longues, humidité spécifique, précipitations, vitesse du vent et pression barométrique), qui peuvent provenir d'observations de sites, d'ensembles de données de réanalyse ou d'un modèle atmosphérique couplé. Une brève comparaison des paramètres et des attributs des schémas de surface terrestre BATS et CLM4.5 sont présentés dans le tableau 2. BATS est le régime, utilisé depuis de nombreuses années, il comprend une couche de végétation, une couche de neige, un modèle de restauration des températures du sol et un schéma de sol à 3 couches. La couverture terrestre de description de la base de données GLCC (Caractérisation de la couverture terrestre mondiale) comprend 20 surfaces, 12 types couleurs de sol et différentes textures de sol, selon la carte des sols du monde de la FAO. Une paramétrisation de type mosaïque de la topographie à l'échelle du sous-réseau et l'utilisation des terres ont été mise en œuvre.

**Tableau I :** Tableau comparatif de BATS et CLM4.5 (Wang *et al.*, 2015a).

Schéma de surface	BATS	CLM4.5
Nombre de couches de sol	3	10
Calcul température du sol	Méthode de restauration forcée	Équation de diffusion de chaleur
Congélation/décongélation du sol	Oui	Oui Un nouveau modèle de sol gelé (eau du sol surfondue)
Nombre de couches de neige	1	5
Paramètre d'utilisation des terres	20	5 unités terrestres, 17 types représentent la végétation
Jeu de données de surface	Indice de la zone guide (leader)	Produits MODIS
Texture du sol	FAO, carte des sols du monde	Ensemble de données sur les sols

Le paramétrage utilisé est une sous-grille de surface à échelle normale pour chaque cellule de grille de modèle grossier. Ce schéma a montré une amélioration remarquable sur surface de simulation du cycle hydrologique dans les régions montagneuses (Giorgi *et al.*, 2012a). Comparativement à

BATS, CLM4.5 est un schéma plus avancé, comme décrit en détail par Oleson *et al.* (2008), CLM4.5 utilise une succession de paramétrisation biogéophysiques pour décrire les échanges d'énergie, d'élan, d'eau et de carbone entre terre et atmosphère. CLM4.5 divise la grille en cellules dans une première hiérarchie de sous-grille composée de plusieurs terres d'unités (glaciers, zones humides, végétation, lacs et zones urbaines), la deuxième et la troisième hiérarchies de sous-réseaux pour les unités de terres végétalisées, y compris les colonnes neige / sol et les types de plante. Le pourcentage de sable et d'argile varie en fonction de la profondeur, basé sur ensembles données du sol IGBP (International Geosphere-Biosphere Programme) de résolution de 5 minutes pour développer un ensemble de données sur la texture du sol (Bonan *et al.*, 2002). Les processus biogéophysiques sont calculés pour chaque unité terrestre, colonne et PFT, puis moyennés avant de revenir au modèle atmosphérique. Température du sol et la teneur en eau sont calculées avec un modèle à couches multiples. La colonne de sol est discrétisée en dix couches, où les profondeurs minimale et maximale de la couche de sol sont de 1,75 cm et 3,43 m, respectivement. Le manteau neigeux sus-jacent est modélisé avec jusqu'à cinq couches, selon l'épaisseur totale de la neige. CLM4.5 a été mis à jour à partir de CLM3.5.

## **2.2. Données initialisation et de forçage**

Le modèle RegCM4.5 a été initialisé et forcé toutes les 03 heures par les données ERA-Intérim de l'ECMWF du centre Européen. ERA-Intérim est la version améliorée ERA-40, il est constitué d'une nouvelle analyse de troisième génération. Les limites présentées par l'ERA-40, telles que des précipitations trop fortes sur les océans à partir du début des années 1990 et une circulation trop forte de Brewer-Dobson dans la stratosphère, ont été éliminées ou considérablement réduites. ERA-Intérim s'étend de 1979 jusqu'à la fin de 2018. Le système d'assimilation de données utilisé pour produire ERA-Intérim est basé sur une version 2006 de l'IFS (Cy31r2). Le système comprend une analyse variationnelle en 4 dimensions (4D-Var) avec une fenêtre d'analyse de 12 heures. La résolution spatiale de l'ensemble de données est d'environ 80 km sur 60 niveaux dans la verticale de la surface jusqu'à 0,1 hPa (Berrisford *et al.*, 2011).

## **2.3. Données d'observation**

- **Précipitations TRMM**

La plateforme TRMM a été lancée en 1997 (Jobard, 2001), construite conjointement par les Etats Unis et le Japon. Ce projet a pour objectif de fournir des estimations de précipitations et d'émissions

de chaleur latente à l'échelle tropicale, données particulièrement importantes pour la compréhension du climat terrestre. Puisque les tropiques sont couverts à 75% par les océans, les précipitations dans cette région ne peuvent être mesurées indirectement que par satellite (Simpson *et al.*, 1996). Au début des recherches dans ce domaine, dans les années 1970, les estimations de précipitations par satellite étaient réalisées par des satellites géostationnaires (GOES ou METEOSAT par exemple) à partir des données du canal visible pour la distinction des cirrus non pluviogènes, et du canal infrarouge pour la mesure de la température du sommet des nuages et sa mise en relation avec les précipitations au sol (Jobard, 2001). Par la suite, des capteurs à micro-ondes passives ont été employés (de type SSM/I en 1987) sur des orbites polaires. Par ailleurs, les données radar au sol sont régulièrement utilisées pour l'étude des précipitations y compris pour valider les méthodes satellitaires (Guillot *et al.*, 1995).

La particularité des données TRMM consiste dans le fait que les algorithmes d'estimation des précipitations combinent ces différents types de données. En effet, la plateforme TRMM dispose à son bord de capteurs micro-ondes (TMI pour TRMM Microwave Imager), radar (PR pour Précipitation Radar) et visible/infrarouge (VIS/IR) (Simpson *et al.*, 1996; Jobard, 2001). Lors de travaux de validation des données satellitaires réalisés à partir de deux réseaux de pluviomètres basés en Afrique, (Jobard, 2001) a démontré la supériorité des méthodes basées sur la combinaison de plusieurs données au pas de temps mensuel. Par contre, pour les mesures instantanées, le capteur micro-ondes s'avère plus performant. Toujours d'après Jobard, (2001), les estimations des pluies TRMM 3B42 et GPCP (Global Précipitation Climatology Project), combinant des données micro-ondes et infrarouges des satellites géostationnaires en plus des données terrain, s'avèrent être les plus performantes. Les précipitations TRMM sont disponibles de 1997 à 2015.

- **Précipitations CHIRPS**

Les précipitations CHIRPS (Climate Hazards group Infrared precipitation with stations), développées par l'US Geological Survey Earth Centre d'observation et des sciences et Santa Barbara Climate Hazards Group à l'Université de La Californie est un produit de précipitation relativement nouveau sur plusieurs sources de données. Ces données intègrent trois types d'informations à savoir données climatologies mondiales, données estimées par satellite et données observations in situ. L'avantage de L'estimation CHIRPS est sa haute résolution spatiale de  $0,05^\circ \times 0,05^\circ$ , qui donne une meilleure représentation des précipitations (Tuo *et al.*, 2018). En outre, Les données CHIRPS fournissent des

séries chronologiques de précipitations de 1981 jusqu'à présent, ce qui favorise son utilisation pour des analyses et simulations climatiques.

- **Température en surface CPC**

Le Centre de prédiction Climatique ou CPC est l'une des composantes du National Centers for Environmental Prediction américain, lui-même partie du National Weather Service de la NOAA. Le rôle du CPC est de compiler les données climatiques et de faire des prévisions à long terme de celles-ci ; des prévisions mensuelles, saisonnières et même plus long. Le CPC remonte à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle lorsque le corps de l'armée des États-Unis prend la responsabilité de tenir un registre des conditions climatiques dans ce pays. À la fin du XX<sup>e</sup> siècle, il a été connu comme le Climate Analysis Center (Centre d'analyse climatique) avant de devenir le CPC. Nous disposons pour cette étude des données de température de surface maximales Tmax sur l'Afrique de l'Ouest.

## **2.4. Méthode**

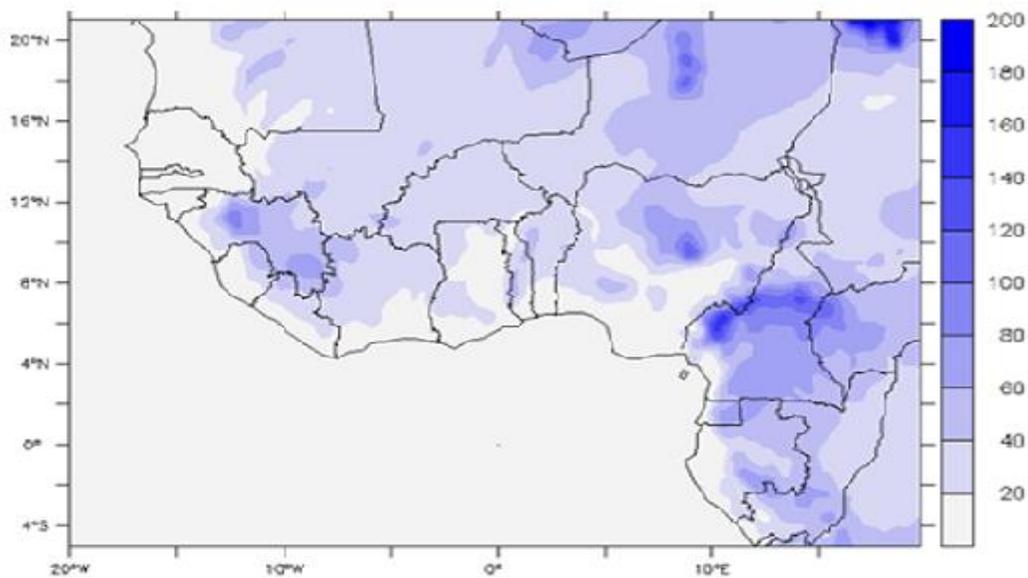
### **2.4.1. Expériences numériques ou simulations**

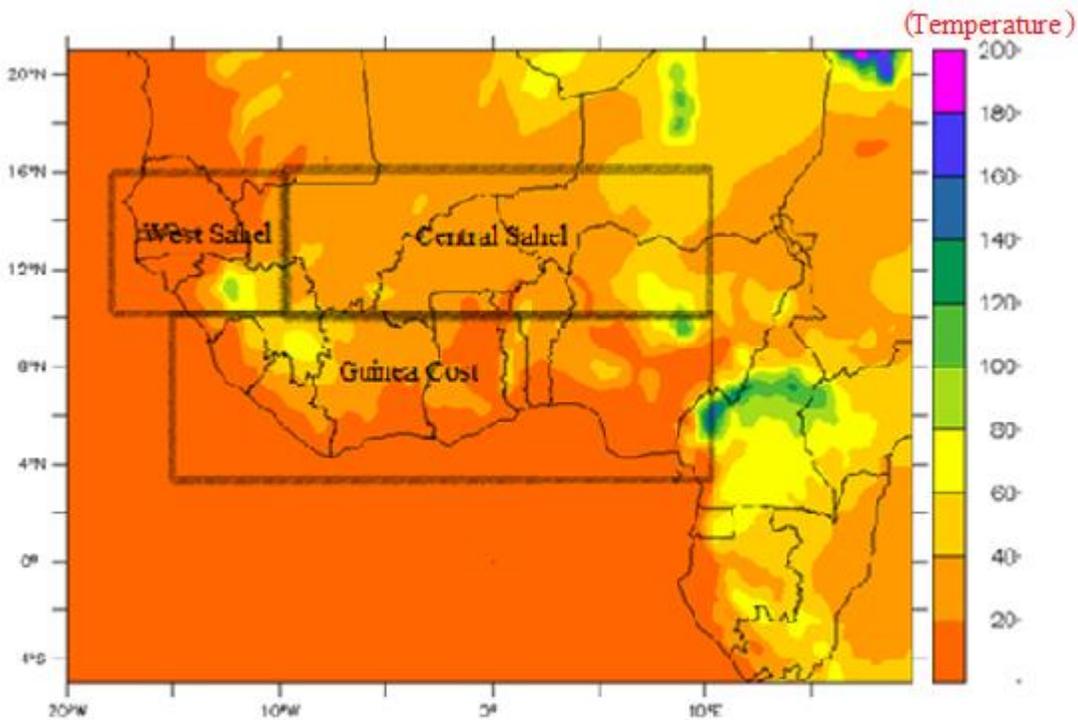
Le RegCM mis en œuvre dans cette étude est la version 4.5. Deux simulations identiques à tout point de vue, excepté les schémas de surfaces, ont été lancées sur l'Afrique de l'Ouest. Deux schémas de surface, ont été utilisés par RegCM4.5. La première simulation utilise le schéma BATS (Dickinson *et al.*, 1989) et la seconde celui de CLM 4,5 (Olson *et al.*, 2013). Pour une meilleure configuration des simulations RegCM4.5, le schéma de surface BATS a été utilisé avec le schéma de convection de Grell tandis que le schéma de surface CLM4.5 a été utilisé avec le schéma de convection Emmanuel suivant les travaux de (Koné *et al.*, 2018). Pour le reste les autres schémas et paramétrisations demeurent identiques. Le tableau III présente la configuration du modèle climatique RegCM4.5. Le domaine modélisé de cette simulation est l'Afrique de l'Ouest (20W-20E; 05S-21N). Le maillage horizontal a une résolution de  $25 \times 25$  km ou  $0.23^\circ \times 0.23^\circ$  soit 174 point de grille en long (lon) et 114 en large (lat) et 23 niveaux sigma. La simulation a été initialisée et forcée toutes les 03h, par les réanalyses ERA-Intérim (Dee *et al.*, 2011) avec une résolution de  $1.5^\circ \times 1.5^\circ$ . La simulation BATS débute du 01 octobre 2002 au 31 décembre 2004, soit 24 mois de données simulées et 03 mois de spin up, pour la 1<sup>ère</sup> expérience.

**Tableau II :** Configuration du model RegCM4.5

PARAMETRE	DESCRIPTION
Grille horizontale	25km X 25km
Initiale et limite	ERA-intérim
Couches verticales (haut)	23 couches (10 hPa)
Schéma de convection	Grell et Emmanuel
Turbulence	Schéma Holtslag
Rayonnement ondes courtes / ondes longues	NCAR CCM3
Période d'analyse	2003-2004

De même la simulation CLM4.5 débute également du 01 octobre 2002 au 31 décembre 2004, soit 24 mois de données simulées et 03 mois de spin up, pour la 2<sup>nd</sup> expérience. Les résultats des 03 premiers mois de simulation ont servi à la mise en équilibre (spin up) du modèle. La figure 5 est la représentation du domaine modélisé, la figure 6 met en exergue les trois zones modélisées de l'Afrique de l'Ouest.

**Figure 5 :** Topographie du domaine modélisé : Afrique de l'Ouest (20W-20E; 05S-21N)



**Figure 6 :** Topographie du domaine modélisé : Afrique de l’Ouest (20W-20E; 05S-21N) avec délimitation des zones Guinea Coast (15W-10E; 03N-10N) (GCO), Central Sahel (10W-10E; 10N-16N) (CSA), West Sahel (18W-10W; 10N-16N) (WSA).

Les simulations du modèle RegCM4.5 sur l’Afrique de l’Ouest, ont été effectuées sur ordinateur dell I7, RAM et ont durée trois semaines (1814400 en secondes), pour chaque simulation et produit environ 100 Go de données par simulation de 2 ans (2003-2004).

#### 2.4.2. Méthodologie de validation

Les simulations des expériences BATS et CLM seront évaluées à partir des données d’observations à travers les paramètres climatiques de précipitation et de température en surface.

Par approche statistique nous analyserons la meilleure configuration du modèle sur L’Afrique de l’Ouest.

#### 2.4.3. FERRET

Le programme FERRET est un environnement interactif de visualisation et d’analyse informatique conçu pour répondre aux besoins des physiciens qui analysent des ensembles de données maillés vastes et complexes. FERRET a été initialement conçu et écrit pour analyser les ensembles de

données du modèle océanique numérique du projet de modélisation et d'analyse thermique (TMAP) à Pacific Marine de la NOAA (Laboratoire environnemental de Seattle, Washington). Les ensembles de données créés par des super-ordinateurs exécutant de grands modèles de circulation océanique sont généralement séquences de "clichés" tridimensionnels des océans au cours de leur évolution dans le temps.

### **Conclusion partielle**

Cette partie de ce travail nous a permis de familiariser avec le matériel de modélisation dont le modèle climatique régional RegCM4.5, les schémas de surface (BATS et CLM4.5) et surtout le programme FERRET qui a servi à faire sortir les observations et modélisations. Les données ERA-intérim ont servi au forçage du modèle et pour les observations TREMM et CHIRPS pour la précipitation et CPCmax pour la température.

## **PARTIE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION**

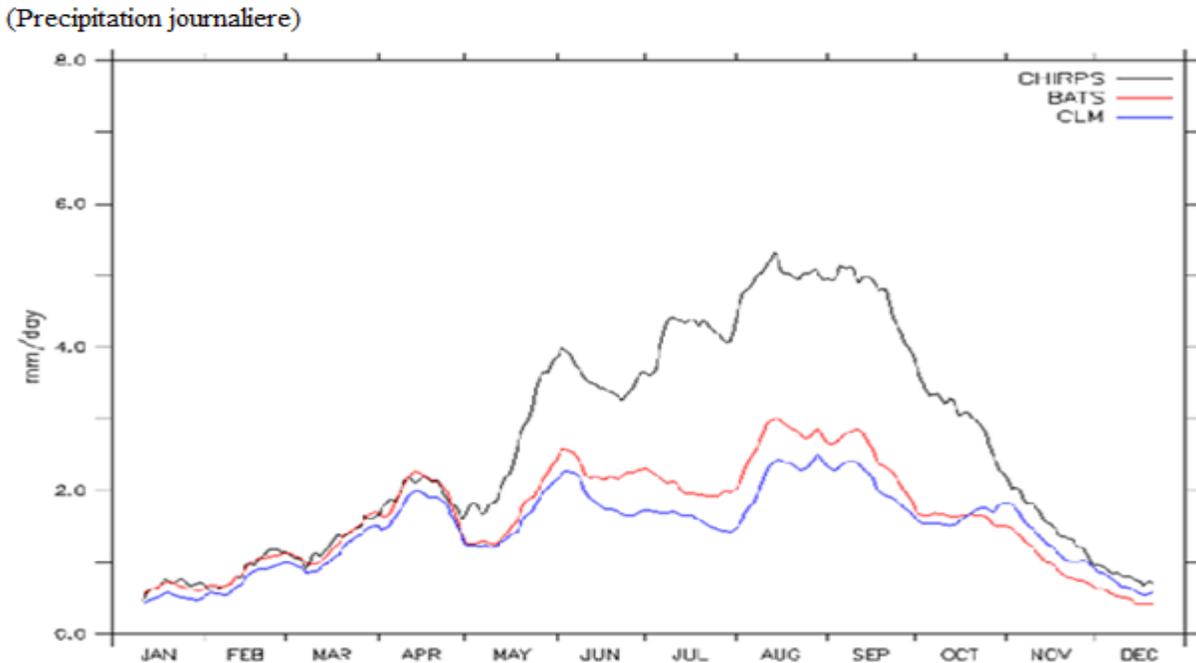
## **Introduction**

A partir des données simulées du modèle RegCM4.5, à travers les deux expériences (2003-2004) BATS et CLM dont la taille est d'environ 200 Go. Nous avons extrait les paramètres de précipitations et de température en surface à une résolution de 25km x 25km ou 0.23° x 0.23°.

Nous avons procédé à une spatialisation des données simulées les emmenant vers la grille des données d'observations, dont la résolution est fonction du type de données variant généralement de 0.25° x 0.25° à 0.5° x 0.5°. Ramené les données simulées à la même grille que les données observées, nous avons mené une analyse comparative basée sur la distribution spatiale, les moyennes spatio-temporelles des paramètres climatiques que sont les précipitations et les températures en surface.

### **3.1. Variation mensuelle moyenne des précipitations**

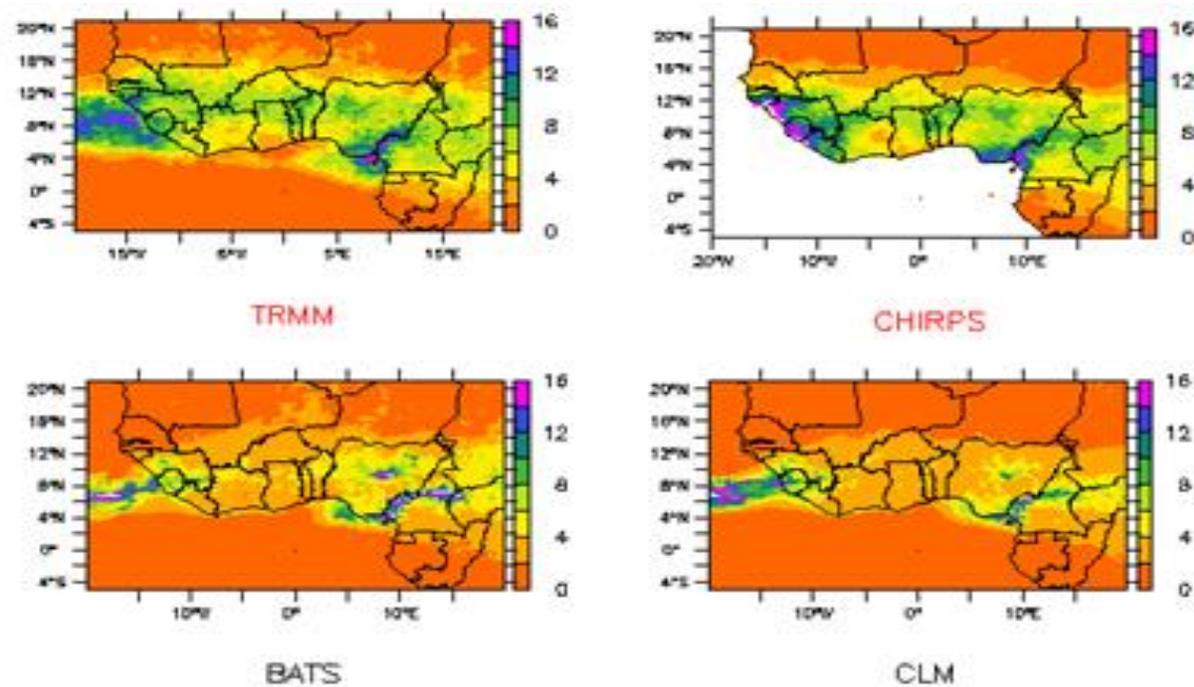
La figure 7 présente les variations mensuelles moyenne des précipitations journalières des observations (CHIRPS) et simulations (BATS et CLM) sur l'Afrique de l'Ouest sur la période 2003-2004. Nous observons que les données simulées et observées ont les mêmes allures, atteignant les pics aux mêmes moments. Nous notons, cependant que le modèle RegCM4.5, sous-estime dans les deux simulations, les précipitations journalières sur l'ensemble de la zone (Afrique de l'Ouest). Les écarts moyens sont de l'ordre de 1,5mm par jour sur toute l'année. Les écarts entre les expériences BATS et CLM sont significatives durant les mois de Juin à Septembre (JJAS), correspond à la période humide sur l'Afrique de l'Ouest. La simulation issue CLM est inférieure à celle de BATS de l'ordre de 0,5mm par jour.



**Figure 7 :** Variation mensuelle moyenne des précipitations journalières sur l’Afrique de l’Ouest, avec HIRPS (noir), BATS (rouge) CLM (Bleu).

### 3.2. Distribution Spatiale des Précipitations JJAS en Afrique de l’Ouest

La répartition spatiale des précipitations journalières en JJAS (2003–2004) sur l’Afrique de l’Ouest est illustrée par la Figure 8 pour les données d’observations (TRMM et CHIRPS), et pour les simulations BATS et CLM. Nous observons comparativement aux observations CHIRPS et TRMM que les maximums de précipitations se situent sur les zones orographiques du Fouta Djalon (16 mm/jour), sur les plateaux du Jos entre le Nigeria et le Cameroun (14 mm/jour). Sur l’ensemble de zone de 0°N à 14°N, les précipitations varient de 4 mm/jour à 14 mm/jour. Le modèle RegCM4.5 simule avec précision la localisation des pics de précipitations sur les zones orographiques du Fouta Djalon, sur la côte Ouest Atlantique, sur les plateaux du Jos entre le Nigeria et sur le Cameroun. Nous notons cependant que les expériences BATS et CLM sous-estime les pics des précipitations journalières. Nous notons également un amincissement des zones arrosées, 4°N à 12°N contre 0°N à 14°N, où les précipitations varient de 4 mm/jour à 14 mm/jour. Le modèle simule donc des zones humides moins étendues comparativement aux observations. Le modèle RegCM4.5 à travers les simulations BATS et CLM sous-estime les précipitations sur l’Afrique de l’Ouest.

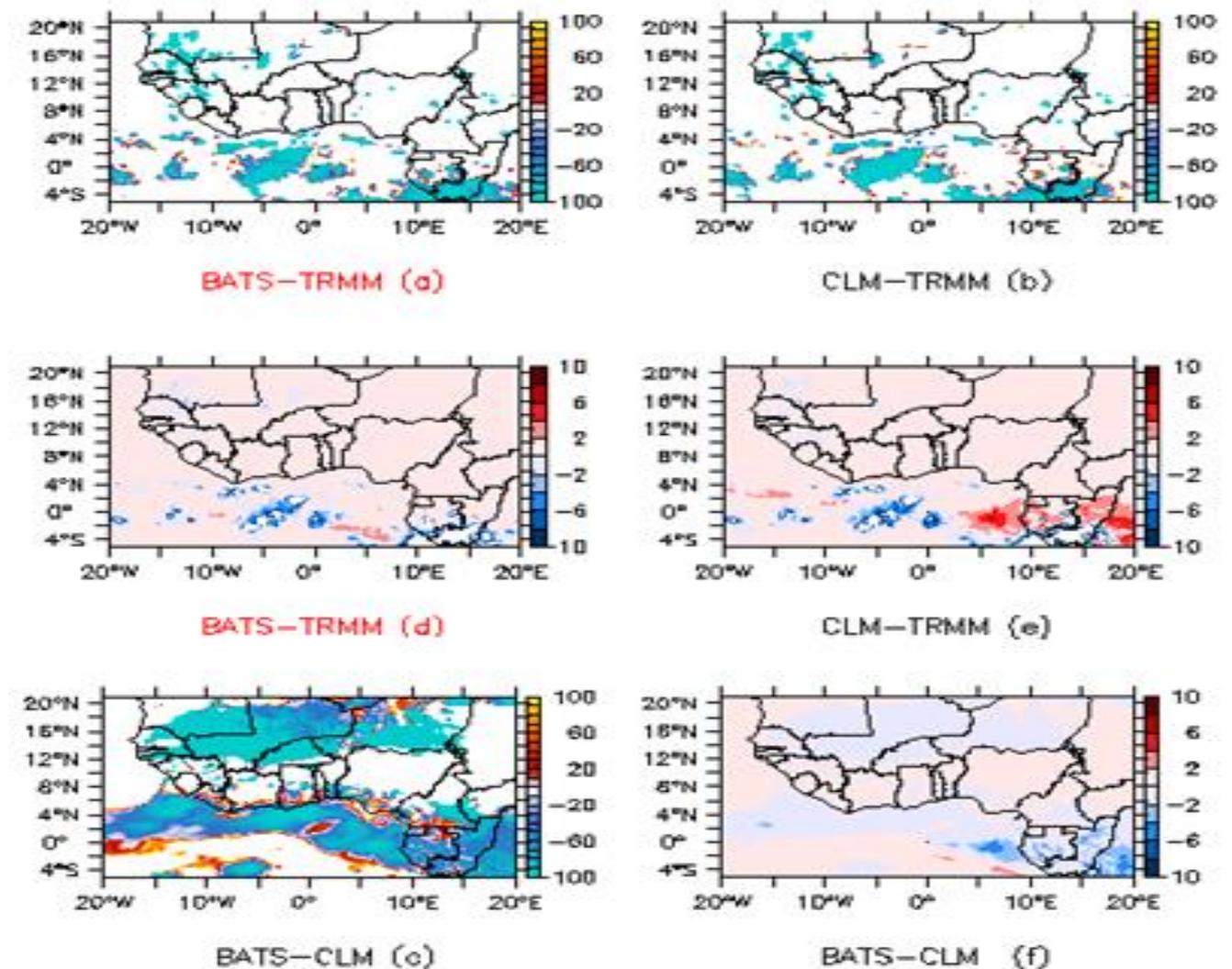


**Figure 8 :** Distribution spatiale des précipitations (mm/jour) JJAS moyennées sur la période 2003-2004 sur l'Afrique de l'ouest avec des simulations RegCM (BATS et CLM) et observations (TRMM et CHIRPS) (2003-2004).

### 3.3. Analyse des précipitations simulées et observées (BATS, CLM et TRMM)

La figure 9 présente les biais entre les champs de précipitations observées et simulées. Cette différence est exprimée en termes d'erreur relative en pourcentage (figure 9 : a, b et c) et mm/jour (figure 9 : d, e et f). BATS-TRMM représente le champ d'erreur relative des précipitations journalières en chaque point de grille de l'expérience BATS par rapport aux observations TRMM. Il en est de même de CLM-TRMM et BATS-CLM qui sont respectivement l'erreur relative de CLM par rapport aux observations TRMM et l'erreur relative de BATS rapport à CLM. Les figures 9a et 9b montrent que le modèle à travers les expériences BATS et CLM sous estime les précipitations, principalement sur l'Atlantique avec des erreurs relative de 40 à 60 %, en terme de précipitation journalière avec des biais négatifs de 2 à 6 mm/jour, figure 9d 9e. Sur le continent, (figure 9a et 9b) le modèle à travers les expériences BATS et CLM sous-estime les précipitations principalement sur trois zones. La région de forêt équatoriale du Congo d'une part, celle de la Mauritanie et du Sénégal avec des erreurs relatives de plus de 60 %. Hormis ces régions, les expériences BATS et CLM restituent des champs de précipitations assez réalistes avec des erreurs

de moins de 20% ou des biais de moins de 2 mm/jour. En comparant les simulations entre elles, les différentes figures 9c et 9d indiquent une sous-estimation des précipitations de l'expérience BATS par rapport à celle de CLM, au niveau de l'Atlantique. Autrement CLM améliore la représentativité des précipitations sur l'océan. Sur le continent dans la région forestière du Congo Centrafrique et en zone sahélienne au-delà du 14° de latitude nord, nous notons des erreurs relatives de 50% à 100%. Cependant, les deux expériences de simulation s'équivalent presque partout sur les côtes du continent jusqu'à 14° de latitude nord avec des biais de moins de 2 mm/jour.

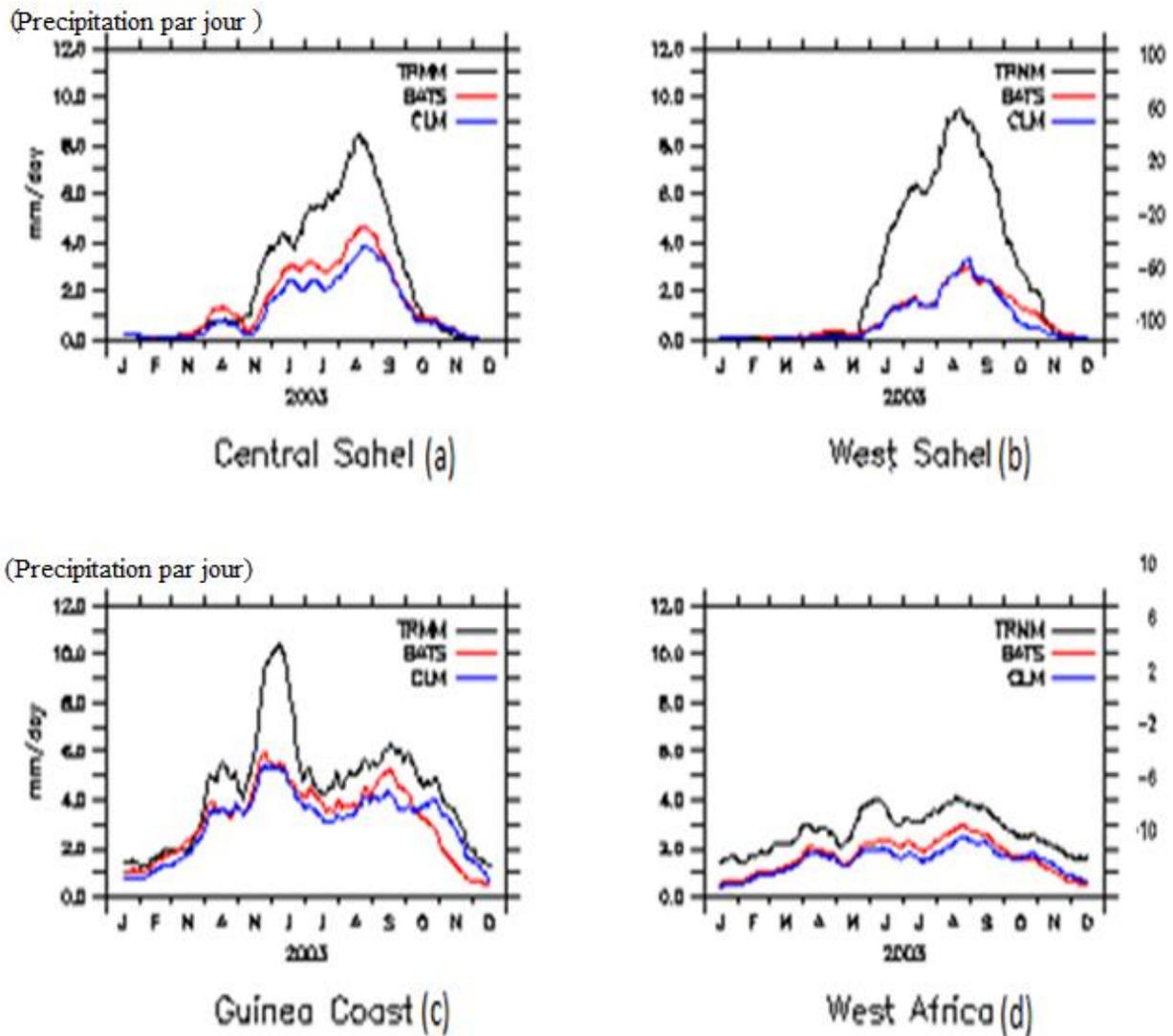


**Figure 9 :** Biais des champs de précipitations simulées et observées (BATS, CLM et TRMM) exprimés en erreur relative (a, b, et c) et en mm/jour (d, e et f).

### 3.4. Cycle annuel de précipitation sur les zones de l' Afrique de l'Ouest

La figure10 représente le cycle annuel de précipitation sur quatre zones de l'Afrique de l'Ouest. Il s'agit des zones :

- Central Sahel de 10°W-10°E longitude; et de 10°N-16°N latitude;
- West Sahel, de 18°W-10°W longitude; et de 10°N-16°N latitude;
- Guinea Cost, de 15°W-10°E longitude; et de 03°N-10°N latitude;
- West Africa, de 20°W-20°E longitude ; et de 05°S-21°N latitude.



**Figure 10 :** Cycle annuel des précipitations sur les différentes régions en Afrique de l'Ouest. (a) Central Sahel, (b) West Sahel, (c) Guinea Cost et (d) West Africa.

L'analyse de la figure 10a relative à la zone de Central Sahel, indique pour les mois de Mai à Septembre, correspondant à la saison des pluies JJAS, que les simulations du modèle sous estiment les précipitations (4mm/jour), contre (8mm/jour) pour les observations. L'écart entre les observations croit du début de la saison vers le pic au mois d'Août correspondant au mois où le FIT atteint sa position la plus septentrionale, où l'ensemble de la zone est arrosée. Durant les autres mois, les simulations et les observations coïncident sur la zone. Comme interprétations, on pourrait dire que le fait que les écarts croissent durant la période humide est dû à l'incapacité des deux schémas de surfaces a représenté les précipitations des périodes humides, ils doivent être améliorée. De plus, dans la zone du Central Sahélien (18°W-10°W; 10°N-16°N), les 70 % des précipitations sont dues non pas aux phénomènes locaux, de type convectif, mais à des précipitations de grandes échelles de type non convective(Wang *et al.*, 2015b). L'amplification des biais en JJAS ne pourraient pas être attribué au schéma de surface ou à celui de convection. Le schéma de surface BATS semble mieux reproduire la réalité des observations TRMM et CHIRPS par rapport au CLM, car les biais sont plus faibles (20% pour BATS et 50% pour CLM). L'analyse de la figure 10b relative à zone de West Sahel, indique un écart assez considérable entre observation (pics à 9mm/jour) et simulations (pics à 3mm/jour), soit un biais de 6mm/jour. Le modèle sous-estime des hauteurs de précipitations journalières au tiers des observations. Ici également les différences se limitent à la saison des pluies JJAS, alors même que les données simulées (BATS et CLM) coïncident entre elles sur la zone. Le fait que le modèle sous-estime avec un écart significatif tandis que les expériences BATS et CLM coïncident sur la zone, suggère que les deux modèles de surface sont limités dans leur représentations. L'interprétation, ici rejoint celle de la figure 10a. D'autant plus que nous sommes aux mêmes latitudes que le central Sahel. L'idée serait d'analyser les précipitations de types convectives et celles de grandes échelles observées (TRMM et CHIRPS) et simulées (BATS, CLM), afin de déterminer le type de précipitations aux quelles sont liées les biais, malheureusement nous avons été limitées par la disponibilité des données d'observations. L'analyse de la figure 10c relative à la zone de Guinea Coast, indique que le caractère bimodal des précipitations de cette zone est assez bien restitué par le modèle RegCM avec des pics en juin et en octobre. Les écarts dû à la sous-estimation du modèle sont notables autour des pics, en Juin (écart de 4mm/jour) et en octobre (1mm/jour) correspond respectivement à la grande et petite saison des pluies. Hormis ces pics, les expériences de simulations BATS et CLM, pour le reste coïncident assez bien entre elles, et avec les observations (moins de 1mm/jour). Ici les biais sont minimisés

(1mm/jour), contre 4mm/jour et 3mm/jour respectivement en zone Central Sahel et West Sahel. La zone Guinea Coast (15°W-10°E; 03°N-10°N) est une zone proche des côtes du golfe de guinée, l'humidité y est fréquemment advectée. De par ce caractère zonal de la distribution de la végétation, cette zone abrite une végétation assez dense et fournie. L'humidité marine et la densité de la végétation est propice à des développements de phénomènes climatiques d'échelle locale, qui sont assez bien pris en compte par la formulation des schémas de surface, de plus une prépondérance des précipitations convective sur la zone (Giorgi *et al.*, 2012a). L'analyse de la figure 10d relative à l'ensemble du domaine West Africa indique que les CLM4.5 et BATS restent assez proches, les biais sont de moins de 1mm/jour, de plus l'allure commune des données simulées coïncide assez bien avec les observations. Le modèle sous-estime les précipitations journalières, sur la zone avec des biais moyen de 2 mm/jour.

### 3.4. Statistiques des champs de précipitations simulées et observées

Dans le but d'analyser les performances de chaque schéma de surface, nous procédons dans cette section à une étude comparative des champs de précipitations simulés et observés, (tableau III). L'idée est de mettre en exergue la ressemblance des valeurs de précipitations aux points de grilles des mailles simulées et observées.

Elle portera donc à la fois sur la localisation géographique (point de grille) et sur la valeur du paramètre climatique (précipitation). Après avoir ramené les grilles (observations et simulations) à la même résolution spatiale, nous déterminons les biais et corrélations en chaque point de grille, sur la période d'étude (2003-2004). Les biais et corrélations dans le tableau sont moyennés sur le domaine et sur la période 2003-2004.

**Tableau III** : Statistiques des champs de précipitation journalière en surface, simulées (BATS et CLM) et observée (TRMM et CHIRPS), sur différentes sous régions de l'Afrique de l'Ouest.

	ZONES							
	WAF		GCO		WSA		CSA	
Précipitations	RMSE	CORR	RMSE	CORR	RMSE	CORR	RMSE	CORR
BATS-TRMM	11,52	0,46	14,88	0,38	11,91	0,43	11,13	0,27
CLM-TRMM	10,40	0,58	12,38	0,49	11,89	0,39	11,10	0,25
CLM-BATS	7,59	0,62	9,08	0,68	2,56	0,82	3,31	0,61

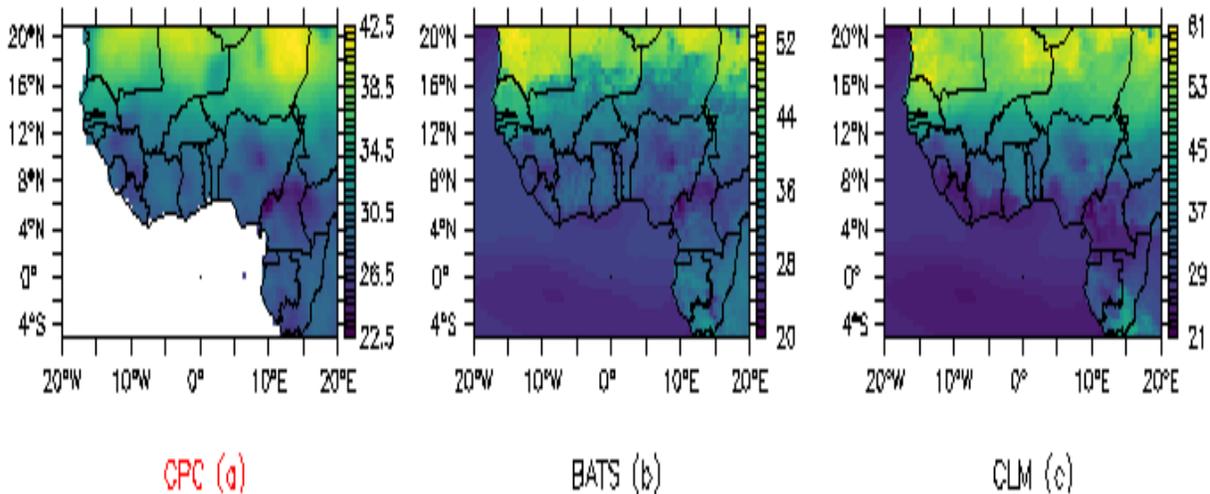
Le tableau III présente les coefficients de corrélations et les écarts quadratiques moyens des précipitations JJAS pour les données simulées et observées. Sur le Central Sahel BATS a un écart quadratique moyen RMSE de 11.13 contre 11.10 pour CLM4.5 et une corrélation non significative de 0,3, les RMSE des deux expériences sont du même ordre. Sur cette zone les deux schémas se valent et sont peu performants dans la restitution des observations. Dans la région West Sahel les simulations ont les mêmes écarts RMSE (11.90), la corrélation est de 0.44 pour BATS contre 0.40 pour l'expérience CLM4.5. Les deux expériences sont fortement corrélées (0,82), quoique peu représentatives des observations de la zone. Dans la région Guinea Coast l'expérience BATS est corrélée aux observations à 0,38 contre 0,50 pour celle de CLM4.5. Ces valeurs de coefficient de corrélation sont assez proches de celles de la zone de West Sahel. Sur l'ensemble de domaine West Africa les simulations BATS ont une corrélation de 0,46 contre 0,58 pour CLM4.5, avec des RSME respectif de 11,52 et 10,4 pour BATS et CLM. En résumé, relativement aux précipitations et sur les différentes sous régions de l'Afrique de l'Ouest les performances du modèle RegCM, mettant en jeu les schémas de surface BATS et CLM sont mitigés. Les performances varient d'une zone à l'autre et d'un schéma de surface à l'autre. Les corrélations, entre les champs de précipitations simulées et observées les plus significatives sont de l'ordre de 0,40 à 0,58. L'inter corrélation entre données simulées est plus marqué, variant de 0,4 à 0,7. Les deux expériences de simulations sous estiment les précipitations sur l'Afrique de l'Ouest.

### **Conclusion des observations des précipitations**

CLM4.5 et BATS ont des capacités à reproduire les intensités des précipitations et tous deux en sous-estiment les quantités. Les écarts en terme de précipitations journalières vont de 2 mm/jour jusqu'à 4 mm/jour. Le modèle sous-estime les quantités de pluie de moitié ou de 1/3 suivant la zone. Le modèle restitue une distribution spatiale des précipitations assez réaliste. Quant à leur performance à restituer la climatologie (précipitations) en Afrique de l'Ouest, CLM4.5 est plus approprié que BATS.

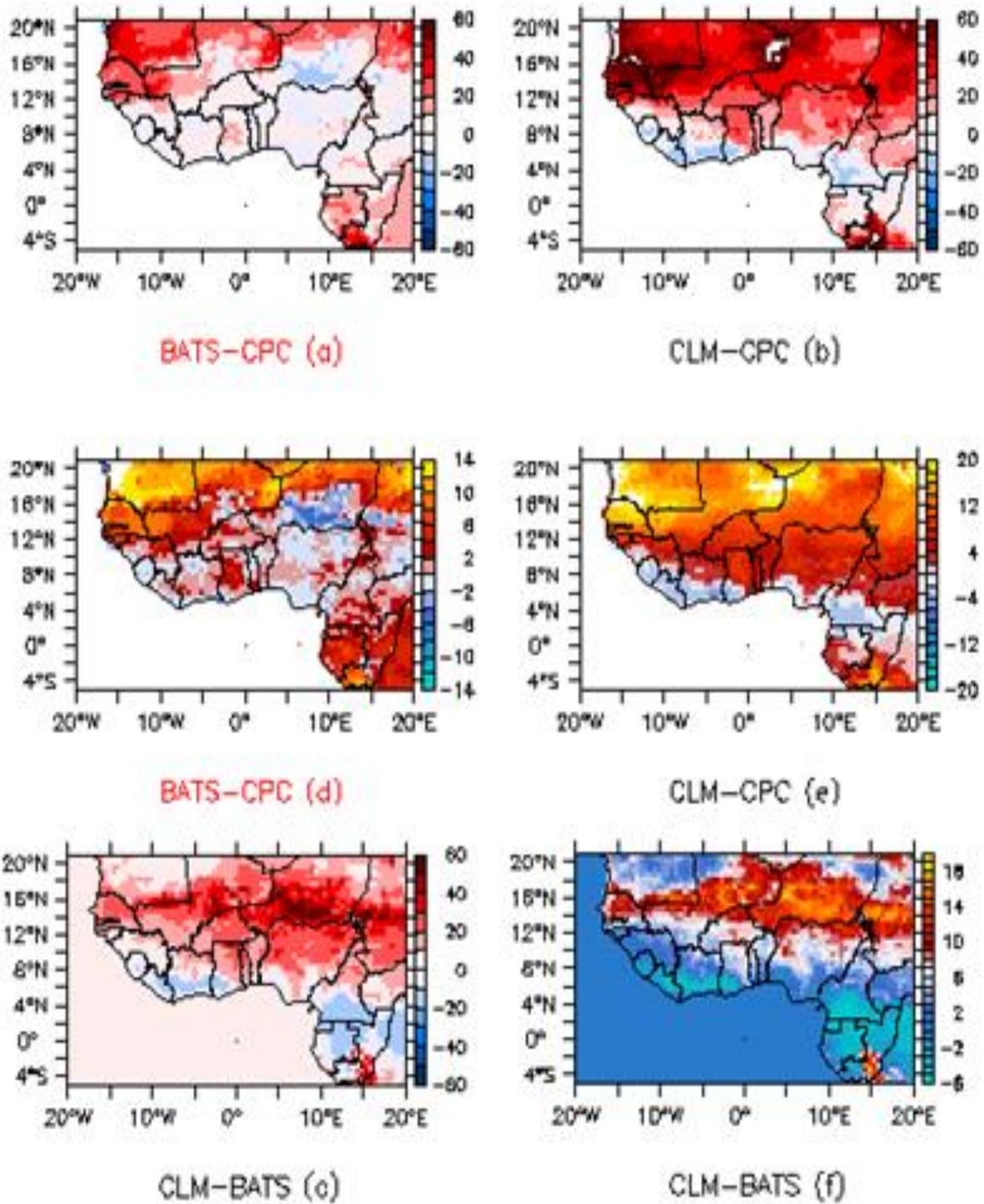
### 3.5. Distribution spatiale de température de surface

La figure 11 présente la distribution spatiale de température maximale journalière en surface, moyennée sur la période de 2003-2004, pour les données d'observation (CPC) et les simulations RegCM (expérience BATS et CLM). La distribution spatiale des données d'observation (CPC), figure 11a présente sur l'Afrique l'Ouest, le caractère zonal des températures en surface avec l'existence d'un gradient de température des côtes du Golfe de Guinée vers les zones sahélo-sahariennes. Les températures ( $T_{max}$ ) varient de  $22.5^{\circ}\text{C}$  sur les zones froides (Plateau Jos, chaînes de montagne de Cameroun, Fouta Djalon, etc.) à  $42.5^{\circ}\text{C}$  sur zones chaudes du Sahara. Les simulations figure (11b et 11c) arrivent à reproduire les traits généraux des champs de température observées, en particulier le caractère zonal, lié au gradient sud-nord de températures. Ce gradient de température est déterminant dans l'évolution du Jet Est Africain (JEA) (Cook, 1999). Elles reproduisent également la localisation des zones froides sur les zones orographiques du Plateau Jos, des chaînes de montagne de Cameroun, du Fouta Djalon, etc. Sur les zones forestières équatoriales du Congo (figure 11b et figure 11c), la localisation des pics de température sur les zones sahélo-sahariennes, au-delà de  $16^{\circ}\text{N}$  (Mauritanie, Mali et Niger) est assez bien restituée. Les températures journalières maximales simulées de la zone varient de  $20^{\circ}\text{C}$  à  $52,5^{\circ}\text{C}$  pour expérience BATS contre  $20^{\circ}\text{C}$  à  $60^{\circ}\text{C}$  pour CLM4.5.



**Figure 11 :** Distribution spatiale de température de surface  $T_{max}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) de JJAS (2003–2004) sur l'Afrique de l'Ouest. CPC (a), BATS (b), CLM (c).

La figure 12(d-e-f) présente les biais (différences) entre les champs de températures journalières maximales en surface simulées (BATS, CLM) et observées (CPC). Nous observons, figure 12d, que le modèle RegCM à travers l'expérience BATS simule des températures assez réalistes sur l'Afrique de l'Ouest, biais de moins de 4°C (10 %), des côtes du Golfe de Guinée jusqu'à 12°N figure 12d. Nous notons cependant des biais positifs d'environ 10°C (30 %) sur les zones forestières du Congo et du Sahara. L'expérience CLM figure 12e présente des biais positifs de plus 10°C (30 %) sur des zones plus étendues de 8°N à 20°N, les biais de moins de 4°C (10 %) se limitent à peine à quelques zones autour 8°N de latitude, tandis que sur les côtes de Golfe de Guinée et sur les forêts équatoriales du Congo, nous notons des biais froids de -4°C (-10 %). Les biais entre les deux expériences de simulation montrent que le CLM surestime les températures de 10°C (20 %) sur l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest, avec des pics positifs de 40 % sur le Niger à 16°N et des pics de biais négatifs -6°C (-20 %) sur les côtes du Golfe de Guinée et au-dessus des zones forestières du Congo. Comparativement aux observations les expériences de BATS et CLM surestiment les températures maximales journalières en surface respectivement de 4°C et 10°C. La distribution spatiale des champs de températures maximales semble être mieux restituée par l'expérience BATS avec des zones de faibles biais plus étendues. Il semble complexe de déterminer les origines et les causes des biais de température. Ils impliquent pour la plupart des changements dans les interactions surface-atmosphère qui ont la même fonction mais de différents paramètres comme la quantité d'eau et les flux énergétiques en surface (l'albédo de surface), la nébulosité (ensemble de nuage visible dans le ciel) et l'advection (Sylla *et al.*, 2012).

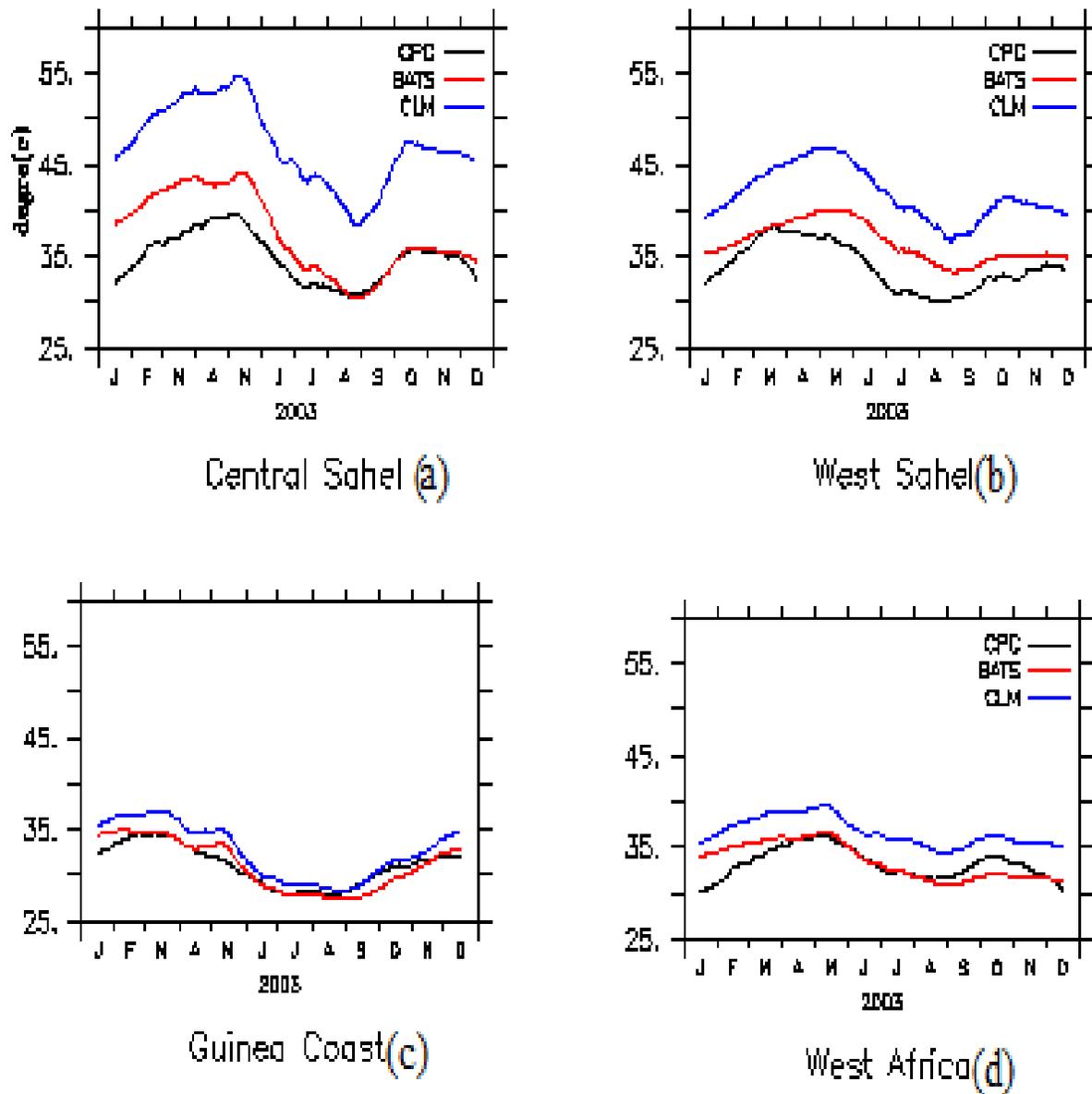


**Figure 12 :** Biais de température (°C) maximale journalière JJAS sur l’Afrique de l’Ouest des observations (CPC) et simulations (BATS et CLM).

### 3.6. Cycle annuel de températures de surface

La figure 13 présente le cycle annuel de Température journalière maximale Tmax en surface sur des sous régions de l'Afrique de l'Ouest, pour lesquelles nous avons précédemment menés des analyses relatives aux précipitations. Il s'agit de Central Sahel (10°W-10°E et 10°N-16°N), West Sahel (18°W-10°W et 10°N-16°N), Guinea Coast (15°W-10°E et 03°N-10°N), West Africa (20°W-20°E et 05°S-21°N). L'analyse de la figure 13a relative à la zone de Central Sahel, indique que les expériences (BATS et CLM) reproduisent le cycle annuel de température surface avec des pics en Mai (39°C, 44°C, et 55°C respectivement CPC, BATS et CLM), Août (31°C, 31°C, et 47°C respectivement CPC, BATS et CLM) et Octobre (39°C, 44°C, et 55°C respectivement CPC, BATS et CLM). On note cependant un écart constant d'environ 14°C entre les observations et l'expérience CLM, sur tout le cycle annuel. L'expérience CLM et BATS surestiment respectivement de près de 50 % et 47 % les températures maximales observées sur cette zone. La figure 13b relative à la zone de West Sahel, montre ici également que le modèle RegCM surestime les observations. On note un écart constant (de 10°C, soit 26 %) entre les expériences CLM et les observations CPC. L'écart entre BATS et observation est moindre (de 5°C, soit 13%), ce pendant BATS reproduit moins bien les pics de température max sur la zone (décalage temporel des pics).

Sur la zone Guinea Coast, figure 13c nous avons une assez bonne restitution par le modèle (BATS et CLM) en terme de biais (moins de 3°C, 8 %). On note, par contre pour les deux simulations que la localisation temporelle n'est pas correctement restituée. L'analyse de la figure 13d relative à zone de West Africa, présente un écart quasi constant entre CLM et les observations. CLM reproduit le cycle de température en surface avec les pics temporelle correctes mais avec des écarts notables de l'ordre de 13°C (40 %). Au niveau de l'expérience BATS, le phénomène s'inverse, alors que les écarts sont minimisés (-2 °C, ou 7 %), l'expérience reproduit moins bien les pics temporels de température sur la zone (pics de Aout décalé en septembre).



**Figure 13 :** Cycle annuel de Température en surface observée Tmax et modélisée (BATS et CLM4.5), sur les quatre zones.

### 3.7. Analyse statistique des champs de température

Sur Central Sahel l'expérience BATS présente un écart quadratique moyen (RMSE) assez faible, mais reste peu corrélé aux observations (0,39). Par contre l'expérience CLM indique une corrélation

assez significative de 0,64 avec des écarts quadratiques moyens (RMSE) triple de ceux de BATS. Cela signifie que comparativement à BATS, CLM simule assez mieux les températures de cette sous-région tout en surestimant les observations (CPC). Dans la région West Sahel les simulations sont assez bien corrélées entre elles et présentent la même corrélation de 0,79 par rapport aux observations. Les valeurs de RMSE présentées par l'expérience CLM sont doubles de celle BATS, ce qui suggère que comparativement à CLM, BATS reste plus performant sur cette sous-région. Sur Guinea Coast, les deux expériences ont une corrélation peu significative de 0.32 et 0.30 respectivement BATS et CLM, les valeurs des RMSE sont assez faible.

Cela suggère que dans cette zone, le modèle BATS reste relativement performant par rapport à CLM. Sur l'ensemble du domaine West Africa les simulations sont assez bien corrélées entre elles (0,90) et pratiquement la même corrélation de 0,74 par rapport aux observations. Les valeurs de RMSE présentées par l'expérience CLM sont doubles de celle BATS, ce qui suggère que comparativement à CLM, BATS reste plus performant sur cette sous-région.

Le Tableau IV résume les performances des différentes expériences par l'analyse des données statistiques liées au champ de températures sur différentes sous régions de l'Afrique de l'Ouest. Malgré la formulation assez détaillée et élaborée du schéma de surface CLM, les performances des deux schémas en jeu restent mitigées, en effet elles varient d'une zone à l'autre et s'égalent par endroit (WSA). Des résultats similaires ont été également notifiés par (Chung *et al.*, 2018) et (Wang *et al.*, 2015b), respectivement dans des études comparatives de schémas de surface du modèle RegCM en Asie du sud-est et sur les Plateaux du Tibet. Leurs travaux ont révélé que le remplacement du schéma de surface BAST par CLM dans la configuration n'induit pas systématiquement une amélioration des performances du modèle.

**Tableau IV :** Statistiques des champs de Température maximales journalière en surface, simulées (BATS et CLM) et observées (CPC), sur différentes sous régions de l'Afrique de l'Ouest.

	ZONES							
	WAF		GCO		WSA		CSA	
Températures	RMSE	CORR	RMSE	CORR	RMSE	CORR	RMSE	CORR
BATS-CPC	6,808	0,74	3,15	0,32	7,95	0,75	4,62	0,38
CLM-CPC	11,95	0,78	5,43	0,27	14,58	0,77	11,67	0,64
CLM-BATS	6,503	0,89	3,51	0,57	6,39	0,95	10,42	0,66

**Conclusion partielle**

L'analyse comparée des simulations de BATS et CLM4.5 avec les données d'observation de précipitations (TRMM et CHIRPS) et température CPCmax a été menée. Les résultats indiquent une restitution assez réaliste de la climatologie de l'Afrique de l'Ouest. Les simulations BATS et CLM4.5, en termes d'hauteur de pluie, de distributions spatiales des champs de température et de précipitation puis l'analyse statistique des performances des deux simulations indique pour les précipitations, les corrélations entre les champs simulés BATS et ceux de CLM4.5 variant de 0.60 à 0.82 et pour les températures en surface les corrélations entre les champs simulés BATS et ceux du CLM varient de 0.57 à 0.95. Dans l'ensemble les résultats de l'étude suggère une performance mitigée des schémas de surface BATS et CLM, sur l'Afrique de l'Ouest, pour le modèle RegCM4.5. En d'autres termes les trois paramètres que sont la localisation temporelle (effet saisonnier), la distribution spatiale (en point de grille) et l'ordre de grandeurs des paramètres climatiques (biais) ne sont pas simultanément améliorés. L'introduction du nouveau schéma de surface CLM4.5, conduit donc à une performance de même ordre que celui de BATS, quoique ayant une formulation plus détaillée.

## **CONCLUSION**

Dans cette étude, nous avons analysé sur l'Afrique de l'Ouest la réponse du modèle régional RegCM4.5 sur la distribution spatiale, les hauteurs des précipitations et sur les températures en surface, dans le cas d'un changement du schéma de surface BATS par celui de CLM4.5. Dans cet objectif d'améliorer le modèle climatique régional RegCM4.5, deux expériences de simulations ont été menées sur la période de janvier 2003 à Décembre 2004, en utilisant chacun des schémas de surface BATS et CLM4.5. Les réanalyses du Centre européen ERA-intérim ont été utilisées pour l'initialisation et le forçage du modèle RegCM4.5. Le schéma de convection d'Emmanuel a été utilisé avec BATS, tandis que Grell a été utilisé avec CLM4.5. Les autres paramétrisations et configurations ont été maintenues identiques pour les deux expériences de simulations. Les données simulées ont été comparées à des données d'observation spatialisées en points grilles, il s'agit des données TRMM et CHIRPS pour les précipitations et CPC pour les températures. Les expériences de simulations BATS et CLM4.5 reproduisent assez bien les cycles saisonniers de précipitation, la distribution spatiale et les hauteurs de précipitations. Les coefficients de corrélation spatiale entre simulations CLM4.5, BATS et observations sont assez significatifs d'une saison à l'autre. Concernant les températures de surface, les simulations restituent assez bien également les traits généraux des données d'observations, c'est à dire le caractère zonal des températures sur la zone de l'Afrique de l'Ouest, la localisation des zones froides (zones orographique, côtes du golfe de Guinée et zones forestières) et des zones chaudes (Sahara). Le modèle RegCM4.5 arrive donc à restituer la climatologie de la zone à travers les précipitations et les températures. Le remplacement du schéma de surface BATS par CLM4.5 dans la configuration du modèle RegCM4.5, conduit principalement à une amélioration des précipitations sur l'océan Atlantique (6mm/jour), cet impact n'est pas assez perceptible en général sur le continent. Alors que CLM4.5 restitue correctement les cycles saisonniers et la distribution spatiale, en retour les biais (Précipitation et température) croissent respectivement (20% et 50%). Les précipitations sont sous estimées, particulièrement en saison humide JJAS de 4mm/jour à 14mm/jour. L'introduction de CLM4.5 n'améliore pas cette sous-estimation comparativement à BATS, surtout en région sahélo-Sahara. CLM4.5 introduit une amélioration du cycle saisonnier et la distribution spatiale des températures en surface. Cependant, les biais positifs existant déjà avec BATS sont amplifiés davantage particulièrement sur les zones de West Sahel (18°W-10°W et 10°N-16°N) et central Sahel (10°W-10°E et 10°N-16°N). CLM4.5 ne parvient pas à minimiser les surestimations de température en surface du modèle RegCM4.5 (CLM et BATS surestiment respectivement 50% et

47%). L'analyse statistique des champs de précipitation et de température de surface entre données observées et simulées, en différentes saisons et zones de l'Afrique de l'Ouest indique :

- Simulations BATS, les corrélations varient de 0,27 à 0,46 pour les précipitations alors qu'elles varient de 0,32 à 0,75 pour les températures en surface.
- Simulations CLM4.5, les corrélations de 0,25 à 0,58 pour les champs de précipitations alors qu'elles varient de 0,26 à 0,77 pour les champs température en surface.

L'analyse statistique des données simulées entre elles (BATS et CLM), relativement aux champs de précipitations et de température, en différentes saisons et zones de l'Afrique de l'Ouest indique :

- Précipitation : les corrélations entre les champs simulés BATS et ceux du CLM varient de 0,60 à 0,82.
- Températures en surface: les corrélations entre les champs simulés BATS et ceux du CLM varient de 0,57 à 0,95.

Les résultats de cette étude suggère une performance mitigée des schémas de surface BATS et CLM4.5, sur l'Afrique de l'Ouest pour le modèle RegCM4.5. En d'autres termes les trois paramètres que sont la localisation temporelle (effet saisonnier), la distribution spatiale (en point de grille) et l'ordre de grandeurs de paramètres climatiques, (biais) ne sont pas simultanément améliorés. L'introduction du nouveau schéma de surface CLM4.5, conduit donc à une performance de même ordre que celui de BATS, quoique ayant une formulation plus détaillée.

Il convient donc pour des études futures, dans le même objectif de recherches de performances de schéma de surface, d'étendre l'analyse sur d'autres paramètres climatiques tels que :

- Les précipitations de types convectifs ;
- Les flux turbulents en surface et l'humidité (évaporation, évapotranspiration) ;
- Les facteurs de la circulation atmosphérique, les JET et JEA

Une analyse plus poussée imposera une diversité des sources de données d'observation, trois sources au minimum pour la précipitation et la température.

## **REFERENCES**

- Abiodun B.J., Gutowski W.J., Abatan A.A. & Prusa J.M. (2011). CAM-EULAG: A non-hydrostatic atmospheric climate model with grid stretching. *Acta Geophysica*, 59(6): 1158–1167.
- Anthes N., Fartmann T., Hermann G. & Kaule G. (2003). Combining larval habitat quality and metapopulation structure – the key for successful management of pre-alpine *Euphydryas aurinia* colonies. *Journal of Insect Conservation*, 7(3): 175–185.
- Bonan G.B., Levis S., Kergoat L. & Oleson K.W. (2002). Landscapes as patches of plant functional types: An integrating concept for climate and ecosystem models: PLANT FUNCTIONAL TYPES AND CLIMATE MODELS. *Global Biogeochemical Cycles*, 16(2): 5-1-5–23.
- Brutsaert W. (1982). *Evaporation into the Atmosphere: Theory, History and Applications*, 124p
- Chung J.X., Juneng L., Tangang F. & Jamaluddin A.F. (2018). Performances of BATS and CLM land-surface schemes in RegCM4 in simulating precipitation over CORDEX Southeast Asia domain: precipitation simulation sensitivity to land-surface schemes. *International Journal of Climatology*, 38(2): 794–810.
- Cook V. (1999). Using SLA research in language teaching. *International Journal of Applied Linguistics*, 9(2): 267–284.
- Deardorff J.W. (1978). Efficient prediction of ground surface temperature and moisture, with inclusion of a layer of vegetation. *Journal of Geophysical Research*, 83(C4): 1889-1899.
- Dickinson J. (2010). Measuring the cost of nurse practitioners. *Australian Journal of Public Health*, 16(3): 214–215.
- Dickinson R.E., Errico R.M., Giorgi F. & Bates G.T. (1989). A regional climate model for the western United States. *Climatic Change*, 15(3): 383–422.
- Emanuel K.A. (1991). The Theory of Hurricanes. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 23(1): 179–196.

- Fiddian-Green R.G. & Silen W. (1975). Mechanisms of disposal of acid and alkali in rabbit duodenum. *The American Journal of Physiology*, 229(6): 1641–1648.
- Giannini A. (2003). Oceanic Forcing of Sahel Rainfall on Interannual to Interdecadal Time Scales. *Science*, 302(5647): 1027–1030.
- Giorgi F., Coppola E., Solmon F., Mariotti L., Sylla M., Bi X., Elguindi N., Diro G., Nair V., Giuliani G., Turuncoglu U., Cozzini S., Güttler I., O'Brien T., Tawfik A., Shalaby A., Zakey A., Steiner A., Stordal F., Sloan L., *et al.* (2012a). RegCM4: model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. *Climate Research*, 52: 7–29.
- Giorgi F., Coppola E., Solmon F., Mariotti L., Sylla M., Bi X., Elguindi N., Diro G., Nair V., Giuliani G., Turuncoglu U., Cozzini S., Güttler I., O'Brien T., Tawfik A., Shalaby A., Zakey A., Steiner A., Stordal F., Sloan L., *et al.* (2012b). RegCM4: model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. *Climate Research*, 52: 7–29.
- Giorgi F. & Gutowski W.J. (2015). Regional Dynamical Downscaling and the CORDEX Initiative. *Annual Review of Environment and Resources*, 40(1): 467–490.
- Giorgi F. & Mearns L.O. (1991). Approaches to the simulation of regional climate change: A review. *Reviews of Geophysics*, 29(2): 191-200.
- Gong C. & Eltahir E. (1996). Sources of moisture for rainfall in West Africa. *Water Resources Research*, 32(10): 3115–3121.
- Grell C. (1993). La foi et l'histoire à la fin du XVIIIe siècle. *Revue de synthèse*, 114(3–4): 99–100.
- Guillot B., Dagonne D. & Lahuec J.-P. (1995). Satellite et surveillance du climat : le programme veille climatique / Satellites and climatic surveillance : the Climatic Watch Programme. *Revue de géographie de Lyon*, 70(3): 267–273.
- Held D. ed. (2005). *Debating globalization*. Polity, Cambridge, UK ; Malden, MA, 205 p.

- Holtlag B., Bruijn E.I.F. & Pan H.-L. (1990). A High-Resolution Air-Mass Transformation Model For Short-Range Weather Forecasting. *Monthly Weather Review - mon weather rev*, 118: 264-280
- Hurrell J.W., Holland M.M., Gent P.R., Ghan S., Kay J.E., Kushner P.J., Lamarque J.-F., Large W.G., Lawrence D., Lindsay K., Lipscomb W.H., Long M.C., Mahowald N., Marsh D.R., Neale R.B., Rasch P., Vavrus S., Vertenstein M., Bader D., Collins W.D., et al. (2013). The Community Earth System Model: A Framework for Collaborative Research. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94(9): 1339–1360.
- Im K., Lee J.-M., Lyttelton O., Kim S.H., Evans A.C. & Kim S.I. (2008). Brain Size and Cortical Structure in the Adult Human Brain. *Cerebral Cortex*, 18(9): 2181–2191.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2014). Climate Change 2014 Mitigation of Climate Change: Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, 121 p.
- Jenkins G.S., Gaye A.T. & Sylla B. (2005). Late 20th century attribution of drying trends in the Sahel from the Regional Climate Model (RegCM3): drying trends in the sahel from RegCM3. *Geophysical Research Letters*, 32(22): 352-361
- Jobard F. (2001). Comprendre l’habilitation à l’usage de la force policière. *Déviance et Société*, 25(3): 325–345.
- Kain J.S. (2004). The Kain–Fritsch Convective Parameterization: An Update. *Journal of Applied Meteorology*, 43(1): 170–181.
- Kain J.S. & Fritsch J.M. (1989). A One-Dimensional Entraining/Detraining Plume Model and Its Application in Convective Parameterization. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 47(23): 2784–2802.
- Koné B., Diedhiou A., Touré N.E., Sylla M.B., Giorgi F., Anquetin S., Bamba A., Diawara A. & Koba A.T. (2018). Sensitivity study of the regional climate model RegCM4 to different convective schemes over West Africa. *Earth System Dynamics*, 9(4): 1261–1278.

- Laprise R., Hernández-Díaz L., Tete K., Sushama L., Šeparović L., Martynov A., Winger K. & Valin M. (2013). Climate projections over CORDEX Africa domain using the fifth-generation Canadian Regional Climate Model (CRCM5). *Climate Dynamics*, 41(11–12): 3219–3246.
- Lauritzen P.H., Nair R.D., Herrington A.R., Callaghan P., Goldhaber S., Dennis J.M., Bacmeister J.T., Eaton B.E., Zarzycki C.M., Taylor M.A., Ullrich P.A., Dubos T., Gettelman A., Neale R.B., Dobbins B., Reed K.A., Hannay C., Medeiros B., Benedict J.J. & Tribbia J.J. (2018). NCAR Release of CAM-SE in CESM2.0: A Reformulation of the Spectral Element Dynamical Core in Dry-Mass Vertical Coordinates With Comprehensive Treatment of Condensates and Energy. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 10(7): 1537–1570.
- Lawrence D.M., Fisher R.A., Koven C.D., Oleson K.W., Swenson S.C., Bonan G., Collier N., Ghimire B., Kampenhout L., Kennedy D., Kluzek E., Lawrence P.J., Li F., Li H., Lombardozzi D., Riley W.J., Sacks W.J., Shi M., Vertenstein M., Wieder W.R., *et al.* (2019). The Community Land Model Version 5: Description of New Features, Benchmarking, and Impact of Forcing Uncertainty. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11(12): 4245–4287.
- Lawrence D.M., Oleson K.W., Flanner M.G., Thornton P.E., Swenson S.C., Lawrence P.J., Zeng X., Yang Z.-L., Levis S., Sakaguchi K., Bonan G.B. & Slater A.G. (2011). Parameterization improvements and functional and structural advances in Version 4 of the Community Land Model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 3(3): 1885–1890.
- Le Houérou H.N. (1989). Definition, Geographical Limits, Contacts with Other Ecoclimatic Zones. *In: The Grazing Land Ecosystems of the African Sahel*, Springer Berlin Heidelberg, pp. 1–16.
- Li T. & Philander S.G.H. (1997). On the Seasonal Cycle of the Equatorial Atlantic Ocean. *Journal of Climate*, 10(4): 813–817.

- Marniemi J. & Parkki M.G. (1975). Radiochemical assay of glutathione S-epoxide transferase and its enhancement by phenobarbital in rat liver in vivo. *Biochemical Pharmacology*, 24(17): 1569–1572.
- Oettli P. (2008). Précipitations et relief en Afrique orientale et australe : modélisations statistiques et géostatistiques, 120p
- Ohshima T. & Kiehl R.A. (1996). Operation of bistable phase-locked single-electron tunneling logic elements. *Journal of Applied Physics*, 80(2): 912–923.
- Oleson K.W., Niu G.-Y., Yang Z.-L., Lawrence D.M., Thornton P.E., Lawrence P.J., Stöckli R., Dickinson R.E., Bonan G.B., Levis S., Dai A. & Qian T. (2008). Improvements to the Community Land Model and their impact on the hydrological cycle: community land model hydrology. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 113(G1): 4564-4574
- Olson R., Srivier R., Chang W., Haran M., Urban N.M. & Keller K. (2013). What is the effect of unresolved internal climate variability on climate sensitivity estimates?: effect of internal variability. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(10): 4348–4358.
- Olson S., Parmley E., Soos C., Gilbert M., Latorre-Margalef N., Hall J., Hansbro P., Leighton F., Munster V. & Joly D. (2014). Olson *et al.* 2013 Technical Appendix, 145 p.
- Ouedraogo A.P. (2001). Food and the Purification of Society: Dr Paul Carton and Vegetarianism in Interwar France. *Social History of Medicine*, 14(2): 223–245.
- Pal J.S., Giorgi F., Bi X., Elguindi N., Solmon F., Gao X., Rauscher S.A., Francisco R., Zakey A., Winter J., Ashfaq M., Syed F.S., Bell J.L., Diffenbaugh N.S., Karmacharya J., Konaré A., Martinez D., da Rocha R.P., Sloan L.C. & Steiner A.L. (2007). Regional Climate Modeling for the Developing World: The ICTP RegCM3 and RegCNET. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88(9): 1395–1410.
- Parry M.L. & Intergovernmental Panel on Climate Change eds. (2007). Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability: contribution of Working Group II to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, U.K. ; New York, 976 p.

- Peyrillé P., Lafore J.-P. & Redelsperger J.-L. (2007). An Idealized Two-Dimensional Framework to Study the West African Monsoon. Part I: Validation and Key Controlling Factors. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 64(8): 2765–2782.
- Raju P.V.S., Bhatla R., Almazroui M. & Assiri M. (2015). Performance of convection schemes on the simulation of summer monsoon features over the South Asia CORDEX domain using RegCM-4.3: regional climate simulation of rainfall and circulation features over south asia. *International Journal of Climatology*, 35(15): 4695–4706.
- Rocle R. (2009). Le GIEC, une institution d'expertise scientifique au service du politique. *Regards croisés sur l'économie*, 6(2): 56-60
- Simpson P.M., Horton S. & Brown G. (1996). Male Nudity in Advertisements: A Modified Replication and Extension of Gender and Product Effects. *Journal of the Academy of Marketing Science*, 24(3): 257–262.
- Smith M.F. (1988). Evaluation utilization revisited. *New Directions for Program Evaluation*, 1988(39): 7–19.
- Solomon S., Intergovernmental Panel on Climate Change & Intergovernmental Panel on Climate Change eds. (2007). Climate change 2007: the physical science basis: contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge ; New York, 996 p.
- Sundqvist H., Berge E. & Kristjánsson J. (1989). Condensation and Cloud Parameterization Studies with a Mesoscale Numerical Weather Prediction Model. *Monthly Weather Review - mon weather rev*, 117: 155-165
- Sylla M., Giorgi F. & Stordal F. (2012). Large-scale origins of rainfall and temperature bias in high-resolution simulations over southern Africa. *Climate Research*, 52: 193–211.
- Takashima T., Hikosaka K. & Hirose T. (2004). Photosynthesis or persistence: nitrogen allocation in leaves of evergreen and deciduous Quercus species. *Plant, Cell and Environment*, 27(8): 1047–1054.

- Tiedtke A. & Rasmussen L. (1989). Constitutive Secretion of Acid Hydrolases in *Tetrahymena thermophila*. *The Journal of Protozoology*, 36(4): 378–382.
- Tuo H., Yang Y., Tao X., Liu D., Li Y., Xie X., Li P., Gu J., Kong L., Xiang R., Lei C., Wang H. & Zhang A. (2018). The Prevalence of Colistin Resistant Strains and Antibiotic Resistance Gene Profiles in Funan River, China. *Frontiers in Microbiology*, 9: 3094-3100.
- Uppala S.M., KÅllberg P.W., Simmons A.J., Andrae U., Bechtold V.D.C., Fiorino M., Gibson J.K., Haseler J., Hernandez A., Kelly G.A., Li X., Onogi K., Saarinen S., Sokka N., Allan R.P., Andersson E., Arpe K., Balmaseda M.A., Beljaars A.C.M., Berg L.V.D., *et al.* (2005). The ERA-40 re-analysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 131(612): 2961–3012.
- Wang G. & Eltahir E.A.B. (2000). Ecosystem dynamics and the Sahel Drought. *Geophysical Research Letters*, 27(6): 795–798.
- Wang X., Yang M. & Pang G. (2015a). Influences of Two Land-Surface Schemes on RegCM4 Precipitation Simulations over the Tibetan Plateau. *Advances in Meteorology*, 2015: 1–12.
- Wang X., Yang M. & Pang G. (2015b). Influences of Two Land-Surface Schemes on RegCM4 Precipitation Simulations over the Tibetan Plateau. *Advances in Meteorology*, 2015: 1–12.
- Wang X., Zhuang X., Yang S., Chen Y., Zhang Q., Zhu X., Zhou H., Guo P., Liang J., Huang Y., Pan A. & Duan X. (2016). Wang *et al.* Reply: *Physical Review Letters*, 117(21): 219702-219802.
- Xu X., Wang J., Zeng J., Spurr R., Liu X., Dubovik O., Li L., Li Z., Mishchenko M.I., Siniuk A. & Holben B.N. (2015). Retrieval of aerosol microphysical properties from AERONET photopolarimetric measurements: 2. A new research algorithm and case demonstration: a new inversion algorithm for aeronet. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(14): 7079–7098.
- Zakey A.S., Solmon F. & Giorgi F. (2006). Implementation and testing of a desert dust module in a regional climate model. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6(12): 4687–4704.

Zeng C., Younger-Shepherd S., Jan L.Y. & Jan Y.N. (1998). Delta and Serrate are redundant Notch ligands required for asymmetric cell divisions within the *Drosophila* sensory organ lineage. *Genes & Development*, 12(8): 1086–1091.

## RESUME

L'objectif principal de cette étude est d'améliorer la performance du modèle climatique régional RegCM4.5, sur l'Afrique de l'Ouest par l'implémentation d'un nouveau schéma de surface. A cet effet, nous avons procédé à une analyse des performances simulées entre le schéma de surface BATS et un plus récent CLM4.5. Deux simulations de RegCM4.5, de deux années (2003-2004), à une résolution horizontale de 25 km, sur l'Afrique de l'Ouest avec des données de forçage ERA-interim ont été menées. L'une avec le schéma de surface BATS et l'autre avec CLM4.5, excepté les schémas de surface, les deux simulations ont les mêmes paramétrisations. L'analyse statistique a porté essentiellement sur les champs de précipitations et températures en surface. L'analyse comparée des simulations de BATS et CLM4.5 avec les données d'observation de précipitations (TRMM et CHIRPS) et température CPCmax a été menée. Les résultats indiquent une restitution assez réaliste de la climatologie de l'Afrique de l'Ouest, par les simulations BATS et CLM4.5, en termes de hauteur de pluie, distributions spatiales, des champs de température et de précipitation. L'analyse statistique des performances des deux simulations indique que les corrélations entre les champs simulés BATS et ceux du CLM4.5 varient de 0.60 à 0.82 pour la précipitation et les températures en surface. Les corrélations entre les champs simulés BATS et ceux du CLM varient de 0,57 à 0,95. Dans l'ensemble les résultats de l'étude suggère une performance mitigée des schémas de surface BATS et CLM4.5, sur l'Afrique de l'Ouest, pour le modèle RegCM4.5.

**Mots-clés :** Modèle climatique régional, RegCM4.5, Schéma de surface, BATS, CLM4.5

## ABSTRACT

The main objective of this study is to improve the performance of the regional climate model RegCM4.5, over West Africa by implementing a new surface pattern. To this end, we have carried out an analysis of the simulated performances between the BATS surface diagram and a more recent CLM4.5. Two simulations of RegCM4.5, two years (2003-2004), at a horizontal resolution of 25 km, over West Africa with ERA-interim forcing data were carried out. One with the BATS surface diagram and the other with CLM4.5, except the surface diagrams, the two simulations on the same parameterizations. Statistical analysis focused on forecast fields and surface temperatures. Comparative analysis of simulations of BATS and CLM4.5 with forecast observation data (TRMM and CHIRPS) and temperature CPCmax was conducted. The results obtained a fairly realistic restitution of the climatology of West Africa, by the BATS and CLM4.5 simulations, in terms of rain height, spatial distributions, temperature and precipitation fields. Statistical analysis of the performance of the two simulations indicates that the correlations between the BATS simulated fields and those of the CLM4.5 vary from 0.60 to 0.82 for precipitation and surface temperatures. The correlations between the simulated BATS fields and those of the CLM vary from 0.57 to 0.95. In the overall results of the study on attenuated performance of the BATS and CLM4.5 surface patterns, on West Africa, for the RegCM4.5 model.

**Keywords:** Regional climate model, RegCM4.5, Surface diagram, BATS, CLM4.5