



UNIVERSITE
JEAN LOROUGNON GUEDE

REPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE

Union-Discipline-Travail

Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique

UFR ENVIRONNEMENT

ANNEE ACADEMIQUE :
2019-2020

N° D'ORDRE : 0344/2021

N° CARTE D'ETUDIANT :
CI0415000590

LABORATOIRE :
Sciences et Technologies
de l'Environnement

MASTER

Physique-Chimie Appliquée

Option : Environnement

THEME :

**APPLICATION DU MODELE RegCM A LA
DETERMINATION
DES SAISONS PAR ANALYSE DES INDICES
PLUVIOTHERMIQUES**

Présenté par :

DRABO Souleymane

JURY

Président : Mme. TRAORE Karidia, Professeure Titulaire,
Université Jean LOROUGNON GUEDE

Directeur : M. KOUASSI Kouakou Lazare, Professeur titulaire,
Université Jean LOROUGNON GUEDE

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

Examineur : M.SILUE Siélé, Maitre-Assistant,
Université Péléforo GON COULIBALY

Soutenu Publiquement
Le : 27 Février 2021



**UNIVERSITE
JEAN LOROUGNON GUEDE**

REPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE

Union-Discipline-Travail

Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique

UFR ENVIRONNEMENT

ANNEE ACADEMIQUE :
2019-2020

N° D'ORDRE : 0344/2021

N° CARTE D'ETUDIANT :
CI0415000590

LABORATOIRE :
Sciences et Technologies
de l'Environnement

MASTER

Physique-Chimie Appliquée

Option : Environnement

THEME :

**APPLICATION DU MODELE RegCM A LA
DETERMINATION
DES SAISONS PAR ANALYSE DES INDICES
PLUVIOTHERMIQUES**

Présenté par :

DRABO Souleymane

JURY

Président : **Mme. TRAORE Karidia, Professeure Titulaire,
Université Jean LOROUGNON GUEDE**

Directeur : **M. KOUASSI Kouakou Lazare, Professeur titulaire,
Université Jean LOROUGNON GUEDE**

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

Examineur : **M.SILUE Siélé, Maitre-Assistant,
Université Péléforo GON COULIBALY**

Soutenu Publiquement
Le : 27 Février 2021

DEDICACES

À Mon défunt père,

Ma maman,

Mon frère,

Mes Sœurs,

Ma grande famille,

Ma tante CIENHOUNY Fatoumata,

Et à mes chers amis.

REMERCIEMENTS

Je remercie les autorités de l'Université Jean Lorougnon Guédé, avec à leur tête, Professeur TIDOU Abiba Sanogo épouse Koné, Présidente de l'Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa, pour leur dévouement dans la formation des étudiants.

Je remercie le Professeur KOUASSI Kouakou Lazare, Directeur de l'UFR Environnement, pour ce privilège qu'il m'accorde d'être mon directeur scientifique, pour ses conseils, le regard porté sur l'ensemble des travaux de recherche.

Je réitère ma reconnaissance au Professeur DIBI Brou, Directeur du Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement (LSTE) de l'Université Jean Lorougnon Guédé, pour avoir permis la réalisation de ce travail au sein du laboratoire qu'il dirige.

J'exprime sincèrement et chaleureusement mes remerciements au Docteur KOUASSI Adjon Anderson, Enseignant-Chercheur à l'Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa, pour avoir accepté l'encadrement de ce travail de Master. Sa disponibilité, ses critiques constructives, sa patience, ses conseils, ses suggestions et sa rigueur pour le travail m'ont permis d'adopter une bonne méthodologie. Je tiens à lui exprimer mes vifs remerciements et ma reconnaissance inconditionnelle pour l'élaboration de ce manuscrit.

Je remercie sincèrement l'ensemble des enseignants de l'UFR Environnement, auprès desquels j'ai énormément appris, plus particulièrement, les Docteurs ADON, KOUASSI BI, TOKOU, KEZO, GBEHE, ESMEL, DOUKOURE, KEITA, KEDI, SEKA, KOUYATE, DIARRA, KOUADIO, OUSSOU, AKESSE, pour leur disponibilité et leur assistance aux étudiants du laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement.

Mes remerciements vont également à l'endroit de Monsieur KONE Ibrahima, doctorant, en physique de l'atmosphère à l'Université Félix Houphouët Boigny d'Abidjan, pour son assistance dans les techniques numériques et de simulations.

J'adresse un remerciement particulier à ma très chère tante, Madame CIENHOUNY Fatoumata Epse Diarra pour la générosité, l'hospitalité et les encouragements qu'elle a eu à faire à mon égard dans la réalisation de ce travail.

Je remercie tous mes amis de la 3^{ème} promotion de la physiques-chimie sans exception, Particulièrement SALIFOU Ibrahim, SOUMAHORO Aboulaye, ZOURE Moussa, CISSE

Moussa et DOUMBIA Mamadou pour leurs encouragements et leur soutien de tout genre durant tout ce parcours.

Je remercie enfin mes cousins DRABO Mohamed et DRABO Adama, pour leur soutien, leurs conseils et leurs encouragements.

TABLE DES MATIERES

Pages

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS.....	iii
LISTE DES TABLEAUX	iv
LISTE DES FIGURES	v
INTRODUCTION.....	1
PARTIE 1 : GENERALITES	3
1.1-Description de la zone Ouest-Africaine	3
1.1.1-Situation géographique	3
1.1.2-Topographie	3
1.1.3-Répartition de la végétation	4
1.2-Caractéristiques de la climatologie Ouest-Africaine	5
1.2.1-Circulation dans les basses couches.....	6
1.2.2-Circulation en altitudes	7
1.3-Régime de précipitations en Afrique de l’Ouest	8
1.3.1-Zone Guinéenne	8
1.3.2-Zone Soudanienne et sahélienne	8
1.4-Variabilité intra-saisonnière de la mousson Owest-Africain	9
1.5- Modèle climatique Régional RegCM	10
1.5.1-Description du modèle	10
1.5.2-Paramétrisation du modèle.....	11
1.6-Indices Climatiques	12
1.6.1-Différents types d’indices climatiques.....	12
1.6.2-Indices pluviométriques	13
PARTIE 2 : MATERIEL ET METHODES	16
2.1-MATERIEL.....	16
2.1.1-Données.....	16
2.1.2-Logiciels.....	16

2.2-METHODES	17
2.2.1- Méthode de simulation du climat Ouest-Africain	17
2.2.2- Validation de la simulation sur Afrique de l'Ouest	18
2.2.3- Répartition des sites d'études en point de grilles sur la Côte d'Ivoire	18
2.2.4- Détermination et analyse des indices pluviométriques	20
PARTIE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION	23
3.1-RESULTATS	23
3.1.1- Analyse de la simulation sur Afrique de l'ouest	23
3.1.2- Détermination et analyse des indices pluviométriques	26
3.1.3- Analyse climatiques des régions pluviométriques issues des indices pluviométriques	32
3.2-DISCUSSION	33
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	36
REFERENCES	38

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

CDO	: Climate Data Operator
FIT	: Front Inter Tropicale
GCM	: Global Climate Model
GIEC	: Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
ICTP	: International Center for Theoretical Physics
IDM	: Indice d'aridité de De-Martonne
IM	: Indice de Moral
IPCC	: Intergouvernemental Panel on Climate Change
JEA	: Jet d'Est Africain
JET	: Jet d'Est Tropical
JOST	: Jet d'Ouest Subtropical
LAPA-MF	: Laboratoire de Physique de l'Atmosphère et des Mécaniques des Fluides
LSTE	: Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement
MAO	: Mousson d'Afrique de l'Ouest
NCAR	: National Center for Atmospheric Research
NetCDF	: Network Common Data Form
OCDE	: Organisation de Coopération et de Développement Economiques
OMM	: Organisation Météorologique Mondiale
RCM	: Regional Climate Model
RegCM	: Regional Climate Model
SHL	: Saharan Heat Low
SST	: Sea Surface Temperature
ZCIT	: Zone de Convergence Inter Tropicale

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I	: Classification du climat en fonction de la valeur de l'indice de De Martonne	14
Tableau II	: Classification du climat en fonction de la valeur de l'indice de Moral.	14
Tableau III	: Sites d'étude en Côte d'Ivoire et leurs coordonnées géographiques.	19
Tableau IV	: Classification des zones climatiques en fonction de la valeur de l'indice de Moral.	20
Tableau V	: Méthode de classification basé sur I_m des mois selon Moral.	22
Tableau VI	: Table des indices pluviothermiques Annuels I_a .	26
Tableau VII	: Table des indices pluviothermique mensuels I_m .	27
Tableau VIII	: Classification des sites par zones climatiques	28

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Représentation de la zone Ouest-Africaine.....	3
Figure 2 : Topographie (en m) et réseau hydrographique de l'Afrique de l'Ouest.....	4
Figure 3 : Types de végétation Ouest-Africaine.....	5
Figure 4 : Schéma conceptuel de la MAO selon une coupe moyenne zonale et profils méridiens de température potentielle θ et température potentielle équivalente θ_e dans la couche limite. ...	8
Figure 5 : Pluies journalières (en mm. Jour ⁻¹) moyennées entre 10°E et 10°W.....	10
Figure 6 : Température moyenne en Avril (2005-2008).	16
Figure 7 : Cartographie des différents sites choisis en Côte d'Ivoire.	19
Figure 8 : Précipitation moyenne 2005 à 2008 de RegCM sur Afrique de l'Ouest.	24
Figure 9 : Température moyenne 2005 à 2008 de RegCM sur Afrique de l'Ouest.	25
Figure 10 : Histogrammes représentant les cycles saisonniers de précipitation pour chaque site d'études.....	31
Figure 11 : Cycle saisonnier annuel des précipitations (2005-2008) pour chaque station en Côte d'Ivoire : (a) : Zone Sud (b) : Zone centre (c) : Zone nord.	33

INTRODUCTION

Le changement climatique est aujourd'hui un sujet de préoccupation majeure dans tous les milieux : économique, social, politique et scientifiques (Koungbanane *et al.*, 2019). Ce phénomène a pour effets : le réchauffement de la planète avec une hausse de température 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 phénomènes climatiques extrêmes (inondation et sécheresse), la propagation des maladies, l'augmentation des risques de conflits dus à la raréfaction des terres et de l'eau et l'avancée des mers sur les continents suite à la fonte des calottes glaciaires (IPCC, 2007).

Comptant parmi les zones les plus vulnérables, l'Afrique de l'Ouest est sans doute la région qui subira le plus les impacts du changement climatique (IPCC, 2014). En effet, la situation économique de la partie Ouest-Africaine est basée essentiellement sur l'agriculture et l'élevage, eux-mêmes tributaires des conditions climatiques (Dilley *et al.*, 2005 ; IPCC, 2014). Les effets du changement climatique en Afrique de l'Ouest pourraient se ressentir davantage du point de vue naturel qu'humain. Par exemple, d'un point de vue social, la modification des cycles saisonniers, en particulier le régime de précipitations ; le déplacement des zones de production agricole (Boucle de Cacao en CI) due à la ré-modification du zonage climatique et la baisse des rendements agricoles induiront des déplacements massifs de population en quête de terres agricoles plus productives. Cette situation pourrait amplifier davantage les tensions sociales relatives à la disponibilité des terres agricoles et donc au foncier rural. Selon l'IPCC (2014), l'agriculture uniquement irriguée par les pluies devrait être réduite jusqu'à 50% dans certains pays (Sahel) dans les décennies à venir.

Malgré ces enjeux climatiques importants, un problème récurrent demeure quand il s'agit d'étudier le climat en Afrique afin d'apporter des éléments de réponse au phénomène de changement climatique. Il s'agit de la disponibilité des données in situ. Il est en effet difficile de disposer des données d'observation des séries temporelles et une représentativité spatiale suffisante pour l'observation de phénomènes climatiques locaux ou régionaux en Afrique en général et particulièrement en Afrique de l'Ouest (Love *et al.*, 2004). En 2004, 1152 stations du réseau World Weather Watch de l'Organisation météorologique mondiale (OMM) étaient disponibles en Afrique : cela représentait une station pour 26 000 Km², soit 8 fois moins que le minimum recommandé par l'OMM.

Face à cette problématique, la modélisation climatique s'impose comme une alternative capable de simuler les données manquantes. En effet, les modèles climatiques globaux (GCM) peuvent simuler les grands traits du climat Africain mais sont peu précis pour une étude

régionale tandis que les modèles climatiques régionaux (RCM), avec leur représentation physique plus détaillée et une résolution spatiale plus fine, sont maintenant indispensables à l'étude du climat africain. La modélisation régionale représente aujourd'hui un réel défi face au changement climatique (IPCC, 2014). Disposant, dès lors, de données climatiques fiables il est possible de mener toute étude d'impacts climatiques à différentes échelles en rapport avec le phénomène du changement climatique notamment le suivi des ressources en eaux ; ou des ressources agricoles ou même le calage d'un calendrier cultural à petites échelles.

C'est dans ce cadre que s'inscrit la présente étude dont le thème est « Application du modèle RegCM à la détermination des saisons par analyse des indices pluviothermiques ». Elle vise à caractériser les saisons à partir des indices pluviothermiques calculés à l'aide des données simulées du modèle climatique régional RegCM sur l'Afrique de l'ouest. Plus spécifiquement, il s'agit de :

- Analyser la simulation sur l'Afrique de l'Ouest ;
- Analyser le zonage climatique de la Côte d'Ivoire ;
- Analyser le cycle saisonnier des précipitations de la Côte d'Ivoire.

Outre l'introduction, la conclusion et les perspectives, ce mémoire s'articule autour de trois principales parties :

La première partie consiste à faire une synthèse bibliographique en rapport avec la climatologie Ouest-Africaine, le modèle climatique régional RegCM et les indices climatiques.

La seconde partie porte sur le matériel utilisé et la méthodologie employée afin d'atteindre nos objectifs.

La dernière partie présente les résultats de l'étude et la discussion scientifique.

PARTIE 1 : GENERALITES

Dans l'optique de mener à bien la présente étude, il est impératif d'avoir une vue plus claire sur la zone d'étude c'est-à-dire l'Afrique de l'Ouest et de faire ressortir ses caractéristiques climatologiques fondamentales, puis faire une brève description du modèle climatique régional RegCM et enfin présenter de façon succincte les indices climatiques.

1.1-Description de la zone Ouest-Africaine

1.1.1-Situation géographique

L'Afrique de l'Ouest appartient au domaine intertropical, c'est-à-dire compris entre le tropique du cancer et l'équateur. Sur le plan de la longitude, elle se localise entre 18° W (Ouest) et 20°E (Est) et en latitude, entre 4°N (Nord) et la frange sud du Sahara (20°N environ). Elle est limitée au Nord par le désert du Sahara, au sud et à l'ouest par l'océan Atlantique, à l'est par le lac de Tchad et au Sud-Est par le massif d'Adamaoua. (Figure 1).

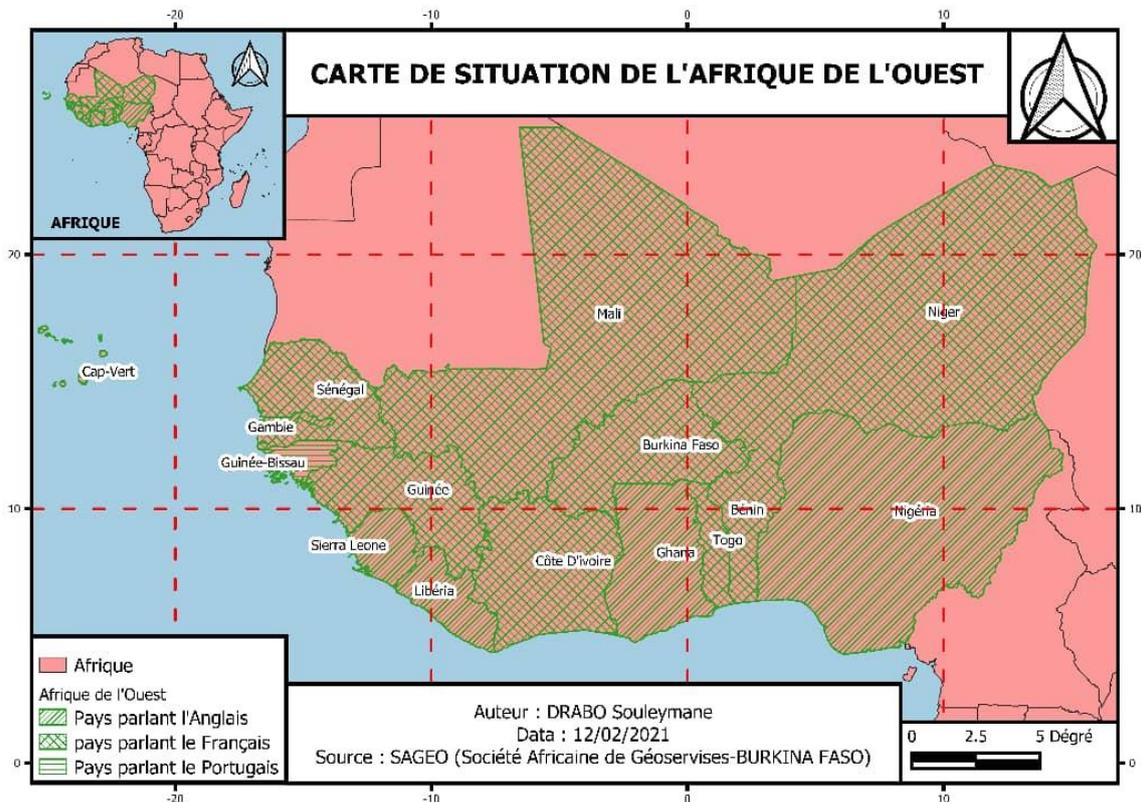


Figure 1 : Représentation de la zone Ouest-Africaine.

1.1.2-Topographie

Le relief de l'Afrique de l'Ouest est assez simple (Figure 2). En effet, la topographie ouest-africaine est composée de grandes plaines et d'espaces tabulaires de faible altitude (200 m environ), de plateaux et de massifs montagneux. Les plaines occupent l'espace littoral,

alors que, à l'intérieur des terres, les bas plateaux dominant. Plateaux de moyenne altitude et massifs montagneux sont situés aux marges sud-ouest, sud-est et nord-est de la région. Les chaînes de montagnes les plus élevées sont le Hoggar (> 2 900 m), le Tibesti (> 3 400 m), le mont Cameroun (> 4 000 m) et, au sud-ouest de la zone, le Fouta-Djalon (> 1 500 m) et les monts guinéens (> 1 700 m). Cette relative simplicité de la topographie explique, en grande partie, l'arrangement méridien des précipitations. Cela n'exclut pas, toutefois, un autre rôle possible du relief comme le soulignent Drobinski *et al.* (2005) à propos du Hoggar qui pourrait avoir une influence sur le positionnement de la dépression thermique saharienne.

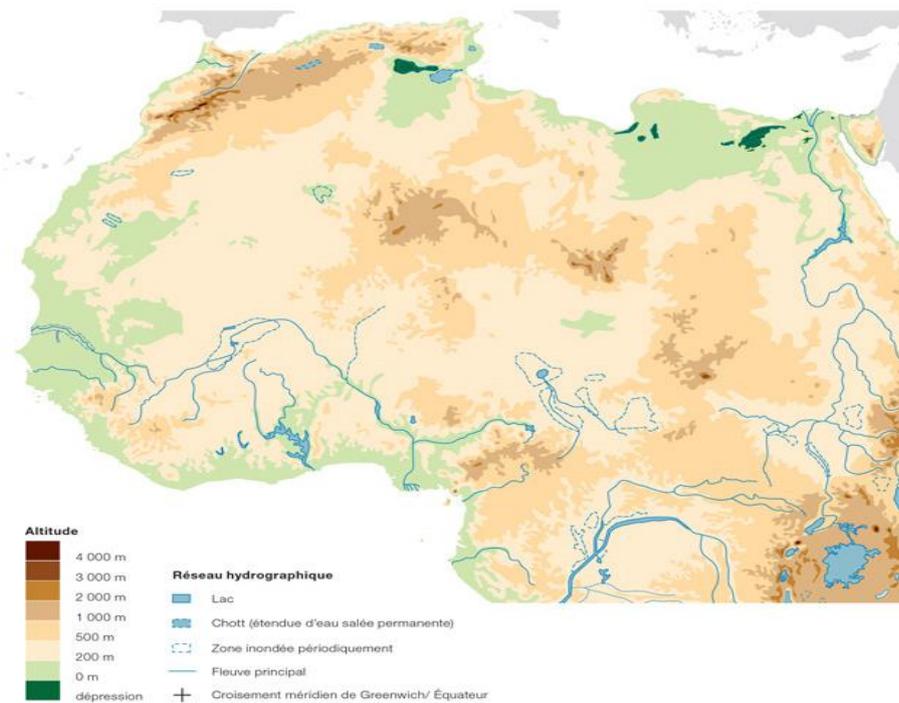


Figure 2 : Topographie (en m) et réseau hydrographique de l'Afrique de l'Ouest (OCDE, 2014).

1.1.3-Répartition de la végétation

La répartition spatiale des différents biotopes Ouest-Africains est fortement dépendante des ressources en eau, des sols et des abats pluviométriques (LeHouerou, 1989) et s'organise donc principalement dans le plan méridien : les formations végétales sont disposées en bandes zonales, même si, à résolution spatiale plus fine, des espaces cultivés modifient cette répartition. Globalement, un gradient méridien (dirigé vers le sud) dans la densité végétale s'observe. L'organisation de la végétation se fait selon des bandes de latitudes bien distinctes (White, 1986) qu'il convient de définir ici :

- ❖ Entre 5°N et 10°N, on parle de zone guinéenne. La couverture végétale de cette zone est représentée par des forêts ombrophiles ;
- ❖ De 10°N à 15°N, il s'agit de la zone soudanienne caractérisée principalement par les forêts claires ;
- ❖ Entre 15°N et 20°N, on trouve la zone sahéenne dominée essentiellement par les formations herbeuses.

Cette répartition zonale de la végétation est représentée sur la figure 3.

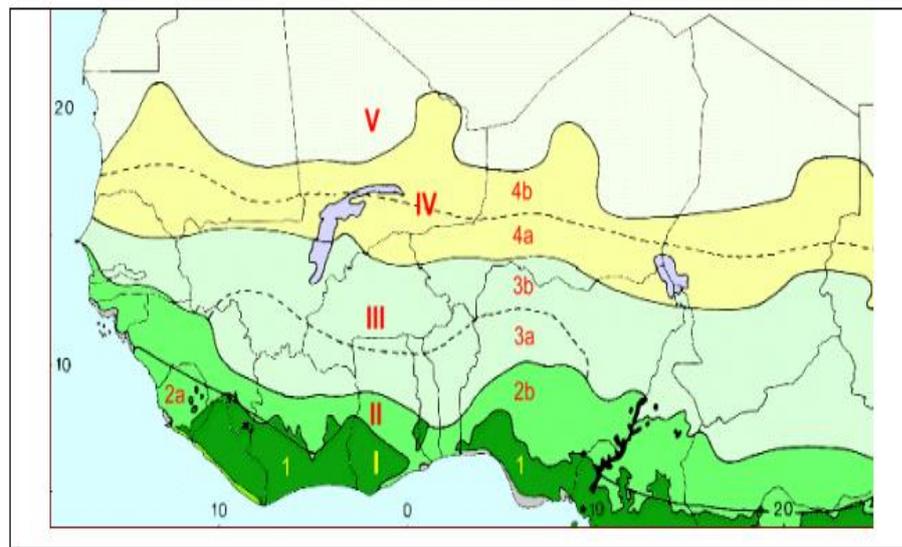


Figure 3 : Types de végétation Ouest-Africaine. (White, 1986)

1) forêt ombrophile ; 2a et 2b) mosaïque forêt ombrophile et formation herbeuse secondaire ; 3a) forêt claire soudanienne avec abondance d'*Isobertinia spp* ; 3b) forêt claire soudanienne indifférenciée ; 4a) formation herbeuse boisée à *Acacia spp* et formation buissonnante décidue ; 4b) formation herbeuse et arbustive. En violet, formation herbeuse à végétation semi-aquatique du delta intérieur du Niger au Mali et végétation azonale marécageuse et aquatique du lac Tchad. En noir, forêts de montagne. Les lisérés gris qui apparaissent sur certaines portions du littoral correspondent aux principales mangroves.

1.2- Caractéristiques de la climatologie Ouest-Africaine

La circulation de la mousson Ouest-Africaine s'organise autour d'éléments clés que nous présenterons brièvement dans cette section. Dans les basses couches, il s'agit du flux de mousson (sud-ouest) et du flux d'Harmattan (nord-est). En altitude, ce sont le Jet d'Est Africain (JEA) en moyenne troposphère, le Jet d'Est Tropical (JET) et Jet d'Ouest SubTropical (JOST), (Louvet, 2008).

1.2.1-Circulation dans les basses couches

1.2.1.1-Flux de mousson

Le flux de mousson est un vent de basse couche suivant la direction sud-ouest et généré par les contrastes thermiques entre les océans et le continent. En effet, ils sont causés d'une part par le fait que le maximum d'ensoleillement s'éloigne de l'équateur et d'autre part par le fait que le continent s'échauffe et se rafraîchit plus vite que la mer. En été, l'ensoleillement est maximal sur le continent. Le sol réchauffe l'air au-dessus qui tend à s'élever, créant une zone de basses pressions locales au niveau du sol. Cela entraîne une circulation atmosphérique de la mer vers la terre appelée brise de mer à échelle continentale. Ainsi, l'air humide au-dessus de l'océan est transporté au-dessus du continent. Cette humidité est alors transformée en précipitations par d'importants mouvements verticaux dans des orages convectifs. Cette circulation peut durer des semaines ou même des mois. Elle ne s'arrête que lorsque la température de surface de la mer devient aussi chaude que la température du continent. En conséquence de quoi, la boucle thermique ne peut plus se former. En hiver, la terre se rafraîchit plus vite que la mer et la circulation est inversée, allant de la terre vers la mer (Drigeard, 2014). Le gradient de température étant beaucoup plus faible en hiver qu'en été, la circulation hivernale est très faible et irrégulière engendrant une diminution du flux de mousson avec des vitesses de l'ordre de 3 à 5 m.s⁻¹ (Beucher, 2010). Le gradient horizontal de température est l'un des mécanismes de base qui pilote la circulation de mousson (Plumb & Hou, 1992). Cependant, les effets de la rotation de la terre et les processus convectifs humides doivent être pris en compte pour expliquer la structure et le cycle saisonnier de la mousson. Ce flux est aussi appelé alizé Austral et il se situe entre la surface et 850 hPa (Ramage, 1971).

1.2.1.2-Flux d'harmattan

À l'inverse du flux de mousson, le flux d'Harmattan est plutôt intense en hiver (jusqu'à 8 m.s⁻¹ en moyenne), et beaucoup plus faible en plein été (inférieur à 5 m.s⁻¹). Il est associé à une circulation cyclonique au niveau du Sahara à partir du printemps et correspond aux alizés de l'hémisphère nord d'origine continentale (Drigeard, 2014). Sa rencontre avec le flux de mousson forme une zone de convergence près de la surface appelée Front Inter Tropical (FIT), positionné autour de 20°N en juillet (Adefolalu, 1983).

1.2.2-Circulation en altitudes

1.2.2.1-Jet d'Est Africain (JEA)

Ce courant atmosphérique ne fait pas partie des vents de basses couches, mais son altitude n'est pas très élevée, à peine au-dessus des flux de mousson et d'Harmattan, aux environs de 650 hPa. Il traverse tout le continent Africain d'Est à l'Ouest, depuis la mer Noire jusqu'à l'océan Atlantique. En période intense de mousson, il se situe entre 13°N et 15°N et il peut atteindre la vitesse de 11 m.s⁻¹ au-dessus de l'Afrique de l'Ouest. Le JEA a une origine thermique liée au gradient méridien de température (Burpee, 1972 ; Thorncroft & Blackburn, 1999) et d'humidité (Cook, 1999) entre le Sahara (chaud et sec) et le golfe de Guinée (humide et plus froid). Ce gradient génère un cisaillement vertical de vent d'est, qui joue un rôle très important dans la formation de lignes de grains tropicales ou d'autres systèmes convectifs.

1.2.2.2-Jet d'Est Tropical (JET)

Le Jet d'Est Tropical est un jet de haute troposphère dont le cœur est situé entre 200 et 100 hPa. Entre fin juin et début septembre, il se positionne sur l'Afrique de l'Ouest vers 10°N et atteint une force moyenne de 15-18 m.s⁻¹ (Beucher, 2010). A grande échelle, le JET est alimenté par la mousson indienne via la cellule de Walker appelée aussi mousson transverse (Webster *et al.*, 1998) qui exporte de la masse d'air vers l'Ouest et permet au JET de se maintenir plus à l'Ouest que l'Inde. Il se renforce à nouveau sur l'Afrique de l'Ouest grâce aux hauts géo-potentiels qui se développent en été vers 200 hPa au niveau du Sahara. Cet anticyclone d'altitude naît du chauffage thermique et, dans une moindre proportion, de la chaleur libérée par les systèmes convectifs de méso-échelle.

1.2.2.3-Jet d'Ouest SubTropical (JOST)

Il représente la composante zonale d'Ouest de la branche divergente de la cellule de Hadley. Situé dans la partie haute de la troposphère, il peut atteindre jusqu'à 30 ou 40 m.s⁻¹ et se situe à environ 30°N de latitude en période de mousson. L'intensité de ce flux suit celle de la cellule de Hadley qui l'alimente. Ainsi, comme nous l'avons vu précédemment, le JOST est plus intense en hiver (Drigeard, 2014) qu'en été (Peyrille, 2006).

La figure 4 représente un schéma regroupant tous les composants clés du système de la mousson Ouest-Africaine et leurs interactions.

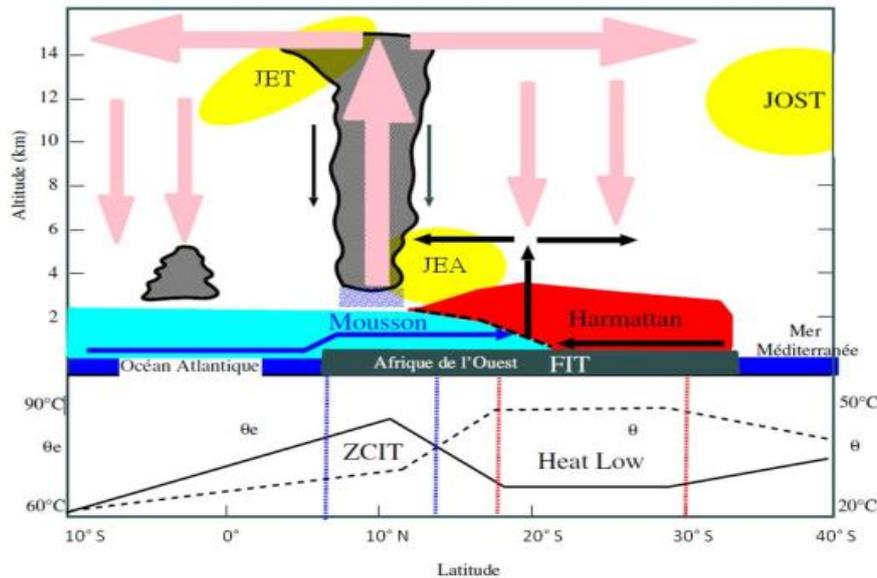


Figure 4 : Schéma conceptuel de la MAO selon une coupe moyenne zonale et profils méridiens de température potentielle θ et température potentielle équivalente θ_e dans la couche limite (Peyrille, 2006).

1.3-Régime de précipitations en Afrique de l'Ouest

Le cycle saisonnier des précipitations sur l'Afrique de l'ouest est lié à la circulation atmosphérique. L'élément majeur de cette circulation est la circulation de mousson caractérisée par un renversement saisonnier des vents. Principalement nous avons le régime "guinéen" entre 5 et 7,5°N (golfe de Guinée) et le régime de "mousson" entre 10 et 20 °N (région soudanienne et sahélienne) (Kouassi,2011).

1.3.1-Zone Guinéenne

Le régime "guinéen" enregistre deux saisons de pluies car elle (zone guinéenne) est balayée deux (2) fois par la zone de convergence intertropicale (ZCIT). Les maximums de pluies sont atteints aux mois de juin et octobre. Mais celui de juin est plus important que celui d'octobre. Le maximum de juin est atteint avec la première position d'équilibre de la ZCIT au moment de l'installation de la mousson (Kouassi, 2011).

1.3.2-Zones Soudanienne et sahélienne

Le régime de "mousson" s'observe dans les régions soudanienne, soudano-sahélienne et sahélienne avec comme caractéristique principale une seule saison des pluies centrée sur les mois de juillet-aout. Le maximum de pluies sur ces régions est atteint avec la deuxième position

d'équilibre de la ZCIT (10°N) après le « saut de mousson » de sa première position d'équilibre à cette deuxième position d'équilibre (Sultan & Janicot, 2000).

1.4-Variabilité intra-saisonnière de la mousson Ouest-Africain

Cette échelle de variabilité est sans doute la plus importante pour les populations Africaines. Connaître la date d'arrivée de la mousson et prévoir son intensité sont toujours des objectifs majeurs pour la communauté scientifique. Aujourd'hui, bien que difficilement explicable, le cycle saisonnier de la Mousson Ouest-Africaine (MAO) est bien décrit et documenté. La figure 6 représente l'évolution des pluies journalières durant toute la période de mousson et selon la latitude considérée. Elle met en évidence les trois phases de la MAO (Sultan & Janicot, 2003) :

- ❖ La pré-mousson, ou « pré-onset », est le moment où le premier saut de la ZCIT a lieu (symbolisé par la première flèche noire sur la figure 6). Cet événement s'est produit, par exemple, au début du mois de mai pour l'année 2000. La ceinture de convergence se déplace alors brusquement vers le nord, de 2°N à 5°N. Différentes structures atmosphériques sont également modifiées : le JEA se renforce et migre jusqu'à 10°N et le Front Inter Tropical remonte jusqu'à 15°N. On parle aussi de régime « guinéen ».
- ❖ Fin juin, la ZCIT se déplace une nouvelle fois brusquement vers le nord (de 5°N à 10°N) pour marquer le début de la seconde phase de la mousson. C'est alors le moment du « onset », ou « saut de mousson » (deuxième flèche noire sur la figure 6). Durant cette période, la MAO s'intensifie car les gradients méridiens de pression, température et humidité augmentent. En effet, le golfe de Guinée se rafraichit et la zone saharienne se réchauffe simultanément. Cela provoque un renforcement du flux de mousson et sa « poussée » vers le nord jusqu'à environ 20°N. Le JEA, le JET ainsi que le JOST se décalent eux aussi vers le nord. Cette phase est également appelée régime « sahélien ».
- ❖ Enfin, la phase de « retrait » de la ZCIT (troisième flèche noire sur la figure 6), intervient à partir de la fin du mois d'août. Cette dernière étape de la MAO se déroule de manière moins abrupte que les deux autres. À la fin de cette période, les différents flux atmosphériques caractéristiques de la mousson s'affaiblissent et se retirent vers le sud.

Le cycle saisonnier de la MAO est donc bien connu. Cependant, la communauté scientifique n'est aujourd'hui toujours pas en mesure d'expliquer comment et quand se produit le « onset » de la mousson africaine. Plusieurs théories coexistent : pour certains, ce phénomène est dû à l'effet des SST (Sea Surface Temperature) dans l'océan Atlantique tropical et le Golfe de Guinée (Janicot, 1992 ; Eltahir & Gong, 1996 ; Ward, 1998 ; Grodsky

& Carton, 2001 ; Gu & Adler, 2004) d'autres mettent en avant la dynamique de l'atmosphère (Semazzi & Sun, 1998 ; Tomas & Webster, 1997 ; Sultan & Janicot, 2003 ; Matthews, 2004), ou bien considèrent de manière plus globale le système couplé Terre-atmosphère-océan (Rowell *et al.*, 1995 ; Zheng & Eltahir, 1998 ; Fontaine *et al.*, 2002).

En résumé, la circulation de mousson provoquée par le gradient énergétique entre océan et continent est sensible aux variations méridiennes d'énergie, ces dernières étant elles-mêmes sensibles aux conditions de surfaces, océaniques et continentales.

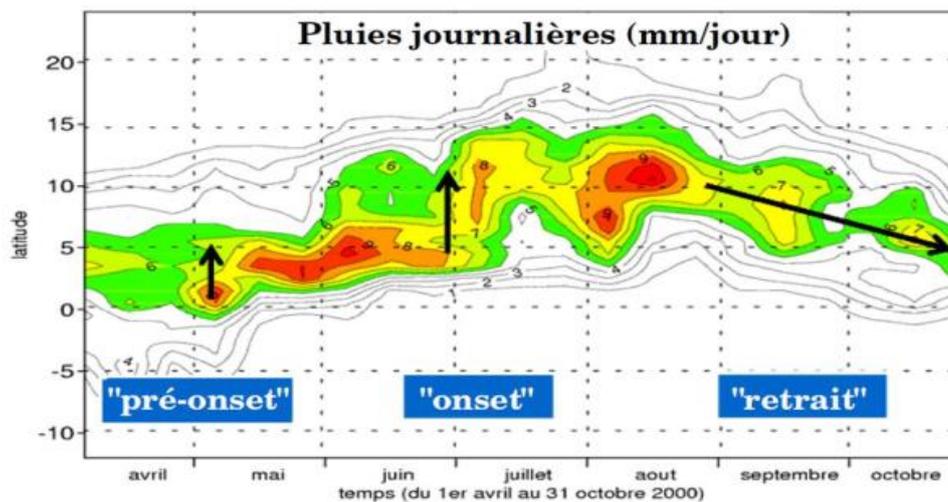


Figure 5 : Pluies journalières (en mm. Jour⁻¹) moyennées entre 10°E et 10°W (Sultan & Janicot, 2003).

1.5- Modèle climatique Régional RegCM

Après avoir présenté notre zone d'étude (Afrique de l'Ouest), nous présentons dans cette section, le modèle climatique qui sera mis en œuvre sur l'Afrique de l'ouest. L'outil de modélisation peut fournir des données climatiques palliant ainsi à tout déficit de données in situ d'une part et permettant d'autre part d'entreprendre diverses études d'impacts à travers des scénarii.

1.5.1-Description du modèle

Le modèle climatique régional RegCM version 4.5 (RegCM4.5) est la version actuelle, développée et améliorée de RegCM du Centre International « Abdus Salam international Center for Theoretical Physics » (I.C.P.T), 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-grid, le système de coordonnées verticales sigma pour une meilleure prise en compte de la

topographie, il inclut différents schémas. Il a évolué de la première version développée à la fin des années 80 (RegCM1), (Dickinson *et al.*, 1989 ; Giorgi, 1990), aux versions ultérieures au début des années 90 (RegCM2), (Giorgi *et al.*, 1993b ; Giorgi *et al.*, 1993c), fin des années 90 (RegCM2.5), (Giorgi & Mearns, 1999) et années 2000 (RegCM3), (Pal *et al.*, 2000). Le système RegCM est un modèle communautaire. En particulier il est conçu pour être utilisé par une communauté variée composé par des scientifiques de pays industrialisés ainsi que de pays en développement (Pal *et al.*, 2007). Depuis la sortie de RegCM3 décrite par Pal *et al.* (2007), le modèle a subi une évolution substantielle à la fois en termes de code logiciel et de représentations physiques. Cette évolution a conduit au développement d'une quatrième version du modèle, RegCM4, qui a été publié par le ICPT en juin 2010 en tant que version prototype (RegCM4.0) et en mai 2011 en tant que première version complète (RegCM4.1). Depuis la version RegCM4.5, le modèle peut également utiliser un noyau dynamique non hydrostatique, et permet des résolutions horizontales de l'ordre de quelques kilomètres.

1.5.2-Paramétrisation du modèle

La paramétrisation du modèle traduit en équation les phénomènes climatiques pris en compte par celui-ci. En pratique, le modèle est composé d'une partie dynamique et d'une partie physique (Malardel, 2005).

1.5.2.1- Partie dynamique

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 (Kiehl *et al.*, 1996) et comprend une représentation des aérosols). 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. Le schéma de précipitation à grande échelle de Pal *et al.* (2007), appelé schéma d'humidité SUBEX (SUBgrid EXplicit), 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). Ce schéma est utilisé avec un coefficient 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 (1986), 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. Ce modèle de terrain présente, dans chaque cellule de la grille, la possibilité d'avoir 15 couches de sol, jusqu'à cinq (5) couches de neige, cinq (5) types d'unités terrestres différents et seize (16) unités fonctionnelles de différents types. RegCM4-CLM4.5 propose cinq (5) schémas convectifs différents dont :

- le schéma de Kuo modifié (Anthes,1977),
- le schéma de Tiedtke (Tiedtke, 1989),
- le schéma Emanuel (Emanuel, 1991),
- le schéma Grell (Grell, 1994) et
- le schéma de Kain-Fritsch (Kain, 2004) avec la possibilité de combiner différents schémas sur l'océan et la terre (appelée convection « mixte »).

1.5.2.2- Partie physique

Cette partie prend en compte l'effet des processus d'échelle inférieure à la maille qui joue un rôle significatif dans l'évolution de l'état du fluide atmosphérique et qui ne sont pas pris en compte dans la partie dynamique. La physique traite donc des échanges entre l'atmosphère et les autres composantes du système climatique (océan, sol, biosphère, cryosphère), à travers plusieurs schémas à savoir : la paramétrisation du bilan radiatif, de la couche limite de surface, des changements d'état de l'eau, des précipitations et de la convection. (Nomenjanahary, 2012).

1.6-Indices Climatiques

1.6.1-Différents types d'indices climatiques

En raison de la variabilité spatio-temporelle des paramètres climatiques et de la nécessité de description synthétique, de classement et de comparaison des types de climat et de végétation à travers le monde, de nombreux auteurs ont proposé diverses formules, indices et expressions graphiques, tenant compte d'un nombre plus ou moins élevé de facteurs (Lebourgeois, 2010). Ces derniers ont une valeur numérique qui concerne un espace, un point ou une date. Ces valeurs servent à des applications spécifiques. Celles-ci peuvent porter sur des valeurs quotidiennes, mensuelles, saisonnières, annuelles ou périodiques. Les éléments les plus

couramment analysés sont les précipitations, les températures et l'évapotranspiration. On distingue deux grands types d'indices selon leur finalité (Lebourgeois, 2010) :

- ❖ **Les indices climatiques globaux** fournissent des variables synthétiques qui combinent généralement des données climatiques moyennes calculées à partir de séries climatologiques correspondant à un poste d'observation. Ces indices sont valables globalement pour la zone de représentativité du poste considéré. Ils ont été tout d'abord utilisés pour classer et cartographier les climats selon leur aridité par les hydrologues et les géomorphologues (KOPPËN, DE MARTONNE, GAUSSEN et BAGNOULS, MORAL...) puis par les botanistes et écologues (EMBERGER, THORTHWAITE...). A l'échelle macro climatique, ces indices permettent d'expliquer la répartition biologique des essences, de définir les limites d'aire biotique coïncidant avec celle d'un facteur climatique précis.
- ❖ **Les indices climatiques de production** sont destinés à permettre une estimation de la production d'un type de culture pour une période et dans une zone donnée.

Aussi, ces indices sont classés par le nombre de paramètres utilisés par chaque indice. On distingue alors :

- Indices à une seule variable climatique (température ou précipitation)
- Indices à deux variables climatiques (température et précipitation)

Dans cette partie, nous nous proposons d'étudier l'évolution des indices climatiques qui est basé essentiellement sur les deux paramètres climatiques (la température et la précipitation).

1.6.2-Indices pluviothermiques

Il existe de nombreux indices pluviothermiques. Dans cette partie, nous nous limiterons à quatre (4) indices pluviothermiques.

1.6.2.1-Indice d'aridité de De-Martonne (IDM)

Le facteur de pluie a été modifié par De-Martonne en 1926, de manière à éviter d'avoir des valeurs négatives, lorsque la température moyenne de l'air est inférieure à 0°C, cet indice caractérise le pouvoir évaporant de l'air à partir de la température. (Guyot, 1999). En 1926, De Martonne a proposé la formule suivante :

$$\mathbf{IDM} = \frac{P}{T+10} \quad (\text{Eq. 2})$$

Avec :

P : précipitation moyenne annuelle en (mm)

T : température moyenne annuelle en (°C)

Tableau I : Classification du climat en fonction de la valeur de l'indice de De Martonne

Valeur de l'indice	Type de climat
$0 < I_{DM} < 5$	Hyper-Aride
$5 < I_{DM} < 10$	Aride
$1 < I_{DM} < 20$	Semi-aride
$20 < I_{DM} < 30$	Sub-humide
$30 < I_{DM} < 55$	Humide

1.6.2.2-Indice pluviométrique de Moral (IM)

L'indice de Moral (1964), donné par l'expression ci-dessous (IM), est un paramètre qui détermine la limite entre l'humidité et la sécheresse à partir de la hauteur des précipitations en (mm).

$$\mathbf{IM} = \frac{P}{T^2 - 10T + 200} \quad (\text{Eq. 3})$$

Tableau II : Classification du climat en fonction de la valeur de l'indice de Moral.

Valeur de l'indice	Type de climat
$IM < 1$	Climat sec
$IM > 1$	Climat humide

1.6.2.3- Indice de la sécheresse estival d'Emberger

Appelé aussi l'indice de xéricité « S », il permet de distinguer le climat méditerranéen. « S » est le rapport entre le total des précipitations des mois estivaux (juin, juillet, août) en (mm), (Pe), et la moyenne des températures maximales du mois le plus chauds en °C.

$$S = \frac{P_e}{M} \quad (\text{Eq. 4})$$

D'après Emberger (1942), pour qu'une station soit méditerranéenne, en plus de son régime de pluie méditerranéenne, il faut que $S \leq 7$ (Hammouda & Mataam, 2003), citent que (Daget, 1997) a ramené l'indice de xéricité à une valeur de 5, elle permet une meilleure séparation entre les climats méditerranéens et les climats océaniques en Europe occidentale.

1.6.2.4-Quotient pluviothermique d'Emberger

Le quotient pluviothermique permet de distinguer l'aridité dans les régions méditerranéennes. Une région est d'autant plus sèche que le quotient pluviothermique est plus petit. En 1932, Emberger (1932) proposa une formule permettant le calcul de l'indice d'aridité annuelle en tenant compte des précipitations et de la température. Cette formule s'écrit :

$$Q_2 = \frac{1000P}{\left(\frac{M+m}{2}\right)(M-m)} \quad (\text{Eq. 5})$$

$$Q_2 = \frac{2000}{M^2 - m^2} \quad (\text{Eq. 6})$$

Avec :

Q_2 : Quotient pluviothermique d'EMBERGER.

P : Précipitation moyenne annuelle (mm).

M : Moyenne des températures maximales.

m : moyenne des températures minimales.

Pour éviter les températures négatives, celles-ci seront exprimées en degré Kelvin(K).

Le quotient pluviothermique et le degré de xéricité d'un lieu donné sont inversement proportionnels. (Hammouda & Mataam, 2003).

PARTIE 2 : MATERIEL ET METHODES

2.1-MATERIEL

2.1.1-Données

Dans ce travail, nous n'avons utilisé que les données émanant de la simulation du climat Ouest Africain à l'aide du modèle climatique RegCM sur une période de 4 ans (2005-2008). Essentiellement, nous avons considéré que les données (température et précipitation). La figure 6 présente un échantillon de données de simulation (Température en °C).

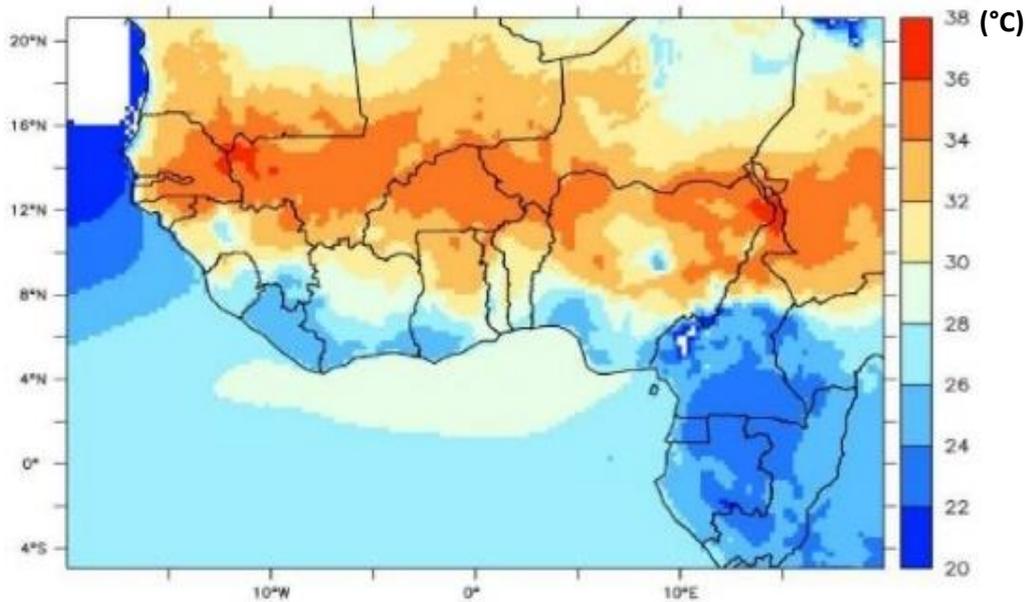


Figure 6 : Température moyenne en Avril (2005-2008).

2.1.2-Logiciels

Dans cette étude, nous avons utilisé des logiciels pour le calcul scientifique et le traitement des données simulées (outputs) du modèle RegCM4.5. Il s'agit notamment des logiciels Ferret, CDO, Python et le logiciel R.

❖ Ferret

Nous avons utilisé Ferret pour traiter les données de simulation puis tracer les graphes de variation de la température et de la précipitation.

❖ CDO (Climate Data Operator)

Le logiciel CDO a permis le traitement des données de simulation de ce travail à bien d'égard. A titre illustratif, il a permis d'extraire uniquement les paramètres températures et précipitation du fichier de simulation dont la taille est de 3 Go pour un mois de données simulées

à 100 Mo. Cela a facilité la gestion des tailles des fichiers et d'effectuer nos opérations avec moins de contraintes d'espace de stockage.

❖ Python

Nous avons utilisé la version 3 dans cette étude pour la représentation des courbes, le calcul des indices pluviométriques et le traitement statistique de nos données.

❖ Le logiciel R

Ce logiciel a été utilisé pour tracer les histogrammes des indices pluviométriques mensuels calculés pour chaque site d'étude.

2.2-METHODES

Le travail porte sur la détermination du zonage climatique (saisons et du type de climat) basée sur l'analyse de l'indice pluviométrique, obtenu à partir de données simulées du modèle climatique RegCM4.5 sur l'Afrique de l'Ouest. L'originalité de l'étude réside dans le fait que, contrairement à la plupart des études menées avec des indices climatiques (Diawara *et al.*, 2014 ; Kouadio *et al.*, 2011) basées sur des données in situ, celle-ci est basée sur des données simulées issues d'un modèle climatique régional. L'enjeu est que face à des difficultés liées à la disponibilité des données climatiques, particulièrement en Afrique, les modèles climatiques se présentent comme une source de données climatiques.

2.2.1- Méthode de simulation du climat Ouest-Africain.

Une simulation de quatre ans (2005-2008) du modèle RegCM sur l'Afrique de l'Ouest, a été mise en œuvre au centre de calcul de Bingerville. La simulation a été menée avec la version RegCM4.5, la dernière version de RegCM. Elle utilise 18 niveaux sigma avec 25 km de résolution spatiale et 347 X 167 points de grille. Le schéma de surface utilisé est celui de CLM4.5, les autres schémas sont les schémas standards utilisés sur l'Afrique de l'Ouest par le Modèle (Koné *et al.*, 2018 ; Sylla *et al.*, 2010). Le Modèle a été initialisé et forcé par les données Era-interim du centre Européen ECMFW. La simulation fournit la plupart des paramètres climatiques en surface et en altitude sur l'Afrique de l'Ouest. Le domaine de modélisation de cette simulation est (20° Est -20° Ouest et 4° Sud – 25° Nord), soit 25 x 25 point de grille, avec une résolution horizontale de 25 km ou 0.23° degré. Le modèle a été initialisé le 01 Octobre 2004 et forcé toutes les six heures jusqu'au 31 décembre 2008, avec trois de spin up. A la suite de la simulation, nous avons retenu en outputs (sorties) les paramètres climatiques précipitation et température de l'air à 2 mètres pour la suite de notre étude.

2.2.2-Validation de la simulation sur Afrique de l'Ouest

Le modèle climatique RegCM a été validé sur l'Afrique de l'Ouest à travers les travaux de Afiesimama *et al.* (2006) ; Konaré *et al.* (2008) ; Sylla *et al.* (2010) ; Adeniyi *et al.* (2014) et Koné *et al.* (2018). Etant donné que le changement climatique est un phénomène évolutif, il nous incombe à cet effet, de valider notre simulation. Ainsi, notre méthode consistera à analyser les données issues de la simulation afin de vérifier que le modèle reproduit les traits généraux du climat Ouest Africain à savoir :

- Le cycle de mousson (établissement, intensification, saut de mousson et retrait progressif), (Sultan & Janicot, 2000 ; Janicot *et al.*, 2010) ;
- La localisation spatio-temporelle des pics des paramètres étudiés (température et précipitation) ;
- Le gradient méridien des précipitations et des températures des côtes du golfe de Guinée aux zones sahariennes. (Afiesimama *et al.*, 2006 ; Adeniyi *et al.*, 2014 ; Sylla *et al.*, 2010).

2.2.3-Repartition des sites d'études en point de grilles sur la Côte d'Ivoire

Cette méthode consiste à choisir des sites d'étude avec leurs coordonnées géographiques dans notre zone d'étude (Afrique de l'Ouest), puis y effectuer des études climatiques en vue de caractériser la variabilité climatique de ces sites d'étude. Pour des raisons de temps d'étude, nous nous focaliserons sur une sous-région de notre zone d'étude : **la Côte d'Ivoire**, puis extrapoler cette étude à l'échelle de l'Afrique de l'Ouest.

Ainsi, nous avons choisi onze sites qui sont : Abidjan (ABJ), Bouaflé (BOU), Dimbokro (DIM), Lamto (LAM), Gagnoa (GAG), Grand-Bereby (GRB), Sassandra (SAS), Korhogo (KOR), Odiénné (ODI), Tengrela (TEN) et Tabou (TAB), tous situés sur le territoire Ivoirien. Le Tableau III présente les différents sites choisis avec leurs coordonnées géographiques.

Toutefois, nous aurions pu choisir des sites à n'importe quel point de la grille ou coordonnée géographique à l'intérieur du domaine modélisé étant donné que l'objectif est de caractériser les régions climatiques de notre zone d'étude.

Tableau III : Sites d'étude en Côte d'Ivoire et leurs coordonnées

	SITES	LONGITUDE	LATITUDE
1	ABIDJAN	-4,0333	5,3333
2	BOUAFLE	-5,7442	6,9904
3	DIMBOKRO	-4,7000	6,6400
4	GAGNOA	-5,9333	6,1333
5	GRAND-BEREBY	-6,9220	4,6514
6	KORHOGO	-5,3717	9,2729
7	LAMTO	-5,0167	6,2167
8	ODIENNE	-7,5600	9,4800
9	SASSANDRA	-6,0800	4,9500
10	TABOU	-7,3528	4,4229
11	TENGRELA	-6,2925	10,3853

Une cartographie des onze sites est fournie à la figure 7.

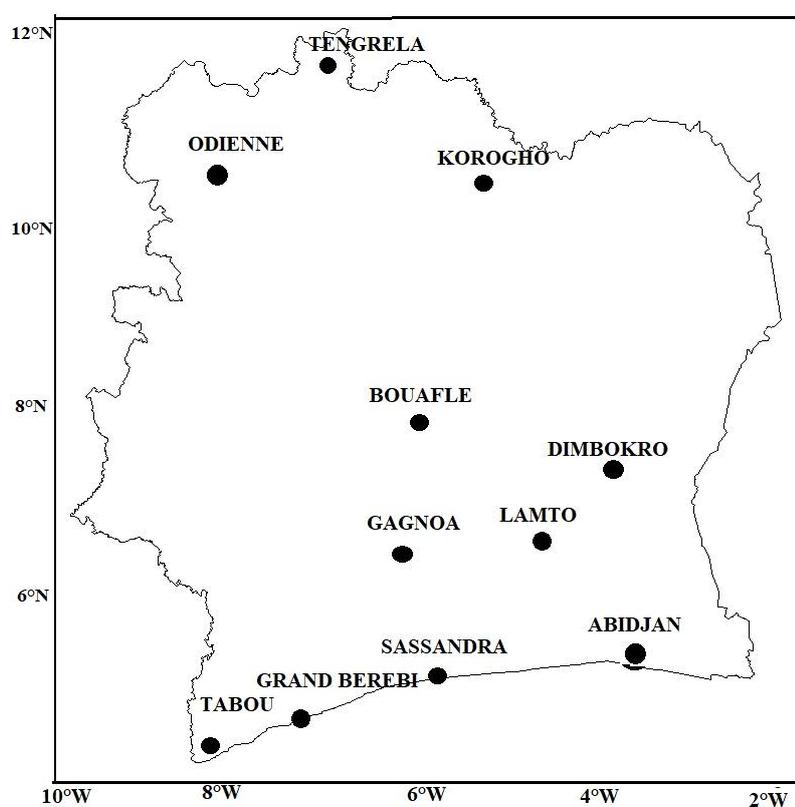


Figure 7 : Cartographie des différents sites choisis en Côte d'Ivoire.

2.2.4-Détermination et analyse des indices pluviothermiques

L'indice pluviothermique est basé sur les paramètres température et précipitation. Il est utilisé pour caractériser le type de climat sur les onze (11) sites (points de grille) du domaine modélisé. Moral (1964) et Diawara *et al.* (2014) se sont basés sur la relation complexe entre la température et les précipitations dans le but de caractériser le climat tropical. En effet, Ils ont supposé que le paramètre climatique évaporation, qui exprime les besoins en eau ne varie pas directement avec la température et qu'en zone tropicale les précipitations sont une fonction quadratique de la température. En se basant sur ces hypothèses, Moral a établi l'indice pluviothermique annuel I_a par la relation empirique suivante :

$$I_a = \frac{P_m}{P_s} = \frac{P_m}{\bar{T}^2 - 10\bar{T} + 200} \quad (\text{Eq. 7})$$

$$P_s = \bar{T}^2 - 10\bar{T} + 200 \quad (\text{Eq. 8})$$

L'indice pluviothermique annuel I_a est calculé à partir de l'équation (7). Les paramètres P_m et \bar{T} désignent respectivement les précipitations et température moyennes annuelles, P_s est le seuil pluviométrique entre les saisons humides et sèches. La température moyenne \bar{T} est calculée sur la période considérée. Suivant les travaux de Moral (1964), une valeur de l'indice pluviothermique annuelle égale à 1 ($I_a=1$) représente la limite entre la zone tropicale humide et sèche en Afrique de l'Ouest. Le Tableau IV montre la délimitation des zones climatiques de l'Afrique de l'Ouest en fonction de la valeur de l'indice pluviothermiques annuels de Moral.

Tableau IV : Classification des zones climatiques en fonction de la valeur de l'indice de Moral.

Zones climatiques	Valeurs de I_a
Désertiques	$I_a \leq 0,25$
Subdésertiques	$0,25 < I_a \leq 0,5$
Arides	$0,5 < I_a \leq 1$
Subhumides	$1 < I_a \leq 2$
Humides	$2 < I_a \leq 3$
Pluvieuses	$I_a > 3$

Lorsque l'indice pluviothermique I_a est déterminé sur une série de plusieurs années, il permet de caractériser le type de climat du site étudié, (Moral, 1964 ; Diawara *et al.*, 2014). Le calcul de l'indice pluviothermique peut se faire également à l'échelle d'une année dans ce cas l'indice pluviothermique mensuelle I_m permet de déterminer les mois pluvieux ou rain (r), humide ou wet (w), sec ou dry (d) et aride ou arid (a). Les indices pluviothermiques mensuel I_m pour chaque type de mois (en termes de saison) sont fourni par les équations suivantes :

$$P_{S1} = \frac{T^2}{10} + T + 30 \quad (\text{Eq. 9})$$

$$P_{S2} = \frac{T^2}{10} - T + 20 \quad (\text{Eq. 10})$$

$$P_{S3} = \frac{T^2}{10} - T + 10 \quad (\text{Eq. 11})$$

Si :

- ❖ $P_s \geq P_{S1}$: le mois est déclaré pluvieux ou rain (r) et on attribue la valeur : +2 ;
- ❖ $P_{S1} \leq P_s \leq P_{S2}$: le mois est déclaré humide ou wet (w) et on attribue la valeur : +1 ;
- ❖ $P_{S2} \leq P_s \leq P_{S3}$: le mois est déclaré sec ou dry(d) et on attribue la valeur : 0
- ❖ $P_s \leq P_{S3}$: le mois est déclaré aride ou arid (a) et on attribue la valeur : -1

A titre d'exemple, pour un mois donné et en supposant que la température moyenne de ce mois est de 30 ° C, on calcul PS, puis on le compare aux valeurs limites.

- ❖ Si $P_s \geq 150\text{mm}$, le mois est déclaré mois pluvieux ;
- ❖ Si $80\text{mm} \leq P_s \leq 150\text{mm}$, le mois est déclaré mois humide ;
- ❖ Si $25\text{mm} \leq P_s \leq 80\text{mm}$, le mois est déclaré mois sec ;
- ❖ Si $P_s \leq 25\text{mm}$, le mois est déclaré mois sec.

Tableau V : Méthode de classification basé sur I_m des mois selon Moral.

T(°c)	Mois Pluvieux	PS1	Mois Humide	PS2	Mois sec	PS3	Mois aride
25		117,5		57,5		16,25	
26		123,6		61,6		17,8	
27		129,9		65,9		19,45	
28		136,4		70,4		21,2	
29		143,1		75,1		23,05	
30		150		80		25	
31		157,1		85,1		27,05	
32		164,4		90,4		29,2	
33		171,9		95,9		31,45	
	P / R		H / W		S / D		A

A partir des formules ci-dessus l'indice pluviométrique de répartition mensuelle I_m est établi en sommant toutes les valeurs des quatre catégories (+2 ; +1 ; 0 ; -1) des 12 mois de l'année.

Enfin, en choisissant comme principales valeurs limites de l'indice pluviométrique de répartition mensuelle I_m les valeurs limites de l'indice : -6, 0, +6, +12 et +18. En d'autres termes les sites dont les I_m sont compris par exemple entre $6 \leq I_m \leq 12$, appartiennent à une même zone climatique, ainsi de suite.

PARTIE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION

3.1-RESULTATS

3.1.1-Analyse de la simulation sur Afrique de l'ouest

3.1.1.1-Précipitation

La figure 8 présente les précipitations mensuelles moyennées de 2005 à 2008, sur l'Afrique de l'Ouest, d'avril à septembre, correspondant à la période de mousson sur l'Afrique de l'Ouest (établissement, extension et retrait du flux de mousson). Les précipitations sur l'ensemble du domaine varient de 0mm/jour (orange) à 16mm/jour (violet). On observe l'établissement du flux de mousson en avril se traduisant par un début des précipitations sur les zones du littoral avec un maximum 12mm/jour (vert). L'établissement du flux de mousson est suivi, au mois de mai d'une intensification des précipitations sur les côtes du littoral (persistance et extension de la couleur verte) et d'une extension méridienne (couleur jaune de 6mm/jour) de la bande de précipitation autour de 10° Latitude Nord. Cette extension se poursuit de mai au mois de juin (figure 8.c). Cela correspond à la première saison des pluies sur la région du littoral. Au mois de juillet, le phénomène de « saut » de mousson qui correspond au déplacement des maximums de précipitations des côtes vers 11° N en moyenne, correspondant à l'établissement de la saison de mousson d'été sur l'Afrique de l'Ouest est observé. Le plein développement de la saison des pluies sur les régions sahéliennes est observé au mois d'Août, où nous observons l'extension méridienne maximale de la bande pluvieuse de 6mm/jour autour de 15°N. Cette extension demeure autour de cette latitude jusqu'à la fin du mois d'Août, puis redescend progressivement vers le sud, repassant au-dessus des côtes guinéennes. Ce passage correspond à la deuxième saison des pluies sur cette région (figure.8. f) au mois de septembre et octobre. Nous observons également, durant les deux saisons des pluies sur la région du littoral figure 8.c et figure 8.f, que le modèle localise des pics de précipitations à 16mm/jour sur les zones principales orographiques du Fouta djalon (Guinée), des plateaux du joss (Nigeria) et de l'Adamaoua (Cameroun) et sur les zones forestières du Cameroun et Nigeria.

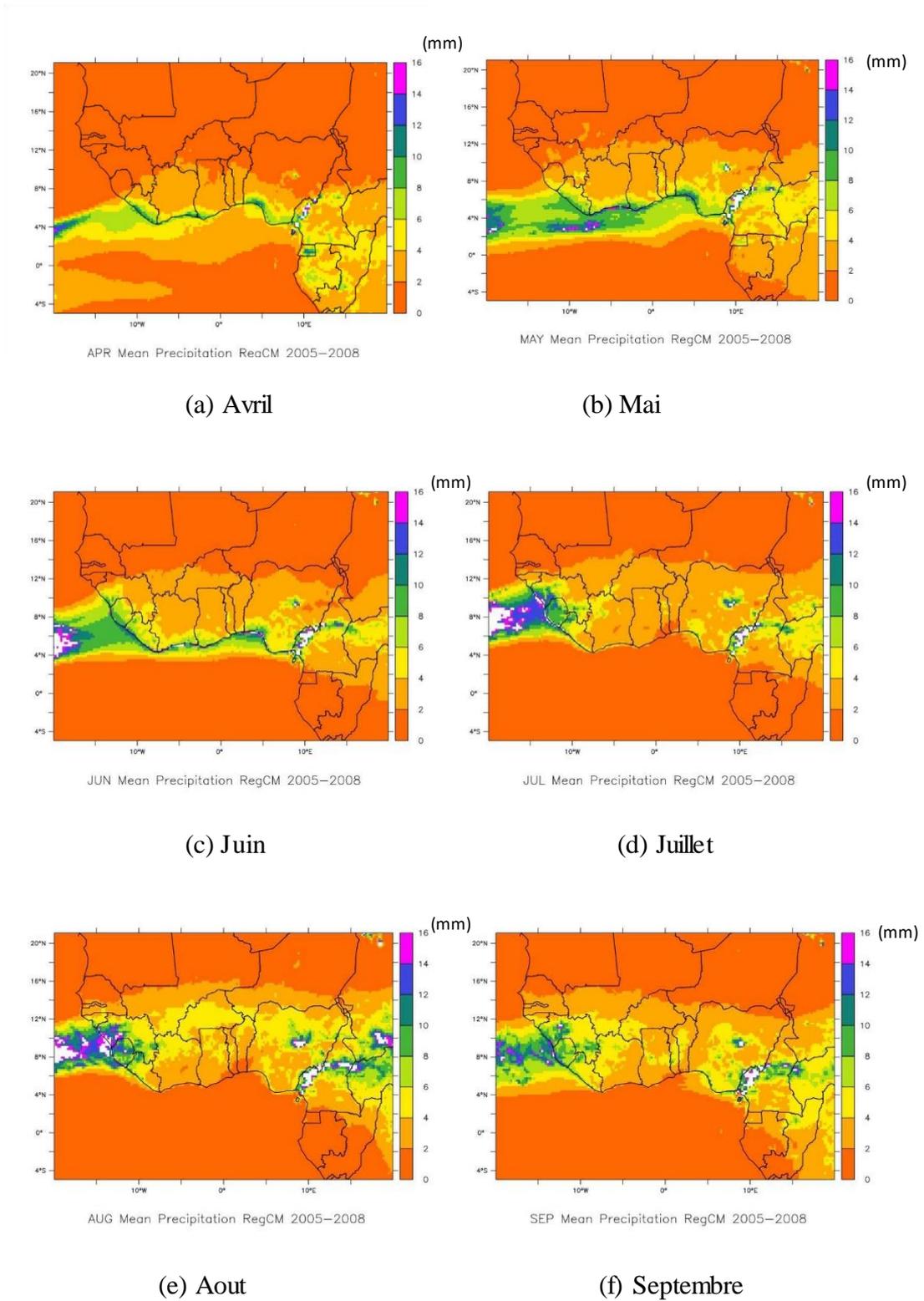


Figure 8 : Précipitation moyenne 2005 à 2008 de RegCM sur Afrique de l'Ouest.

3.1.1.2-Température

Les champs de températures mensuelles de l'air en surface (2 m du sol) moyennées sur la période 2005-2008 sur l'Afrique de l'Ouest sont présentés à la figure 9. Les températures de l'air en surface (2 m du sol) simulées, varient de 20 °C à 38 °C. Les températures d'une saison à l'autre varient très peu. L'analyse des champs de températures révèle une distribution avec un gradient positif des côtes du littoral vers les régions sahariennes. Des côtes jusqu'à 13° Latitude Nord les températures au-delà de cette latitude varient de 30°C à 38°C et ce durant la période de mousson Ouest-Africaine.

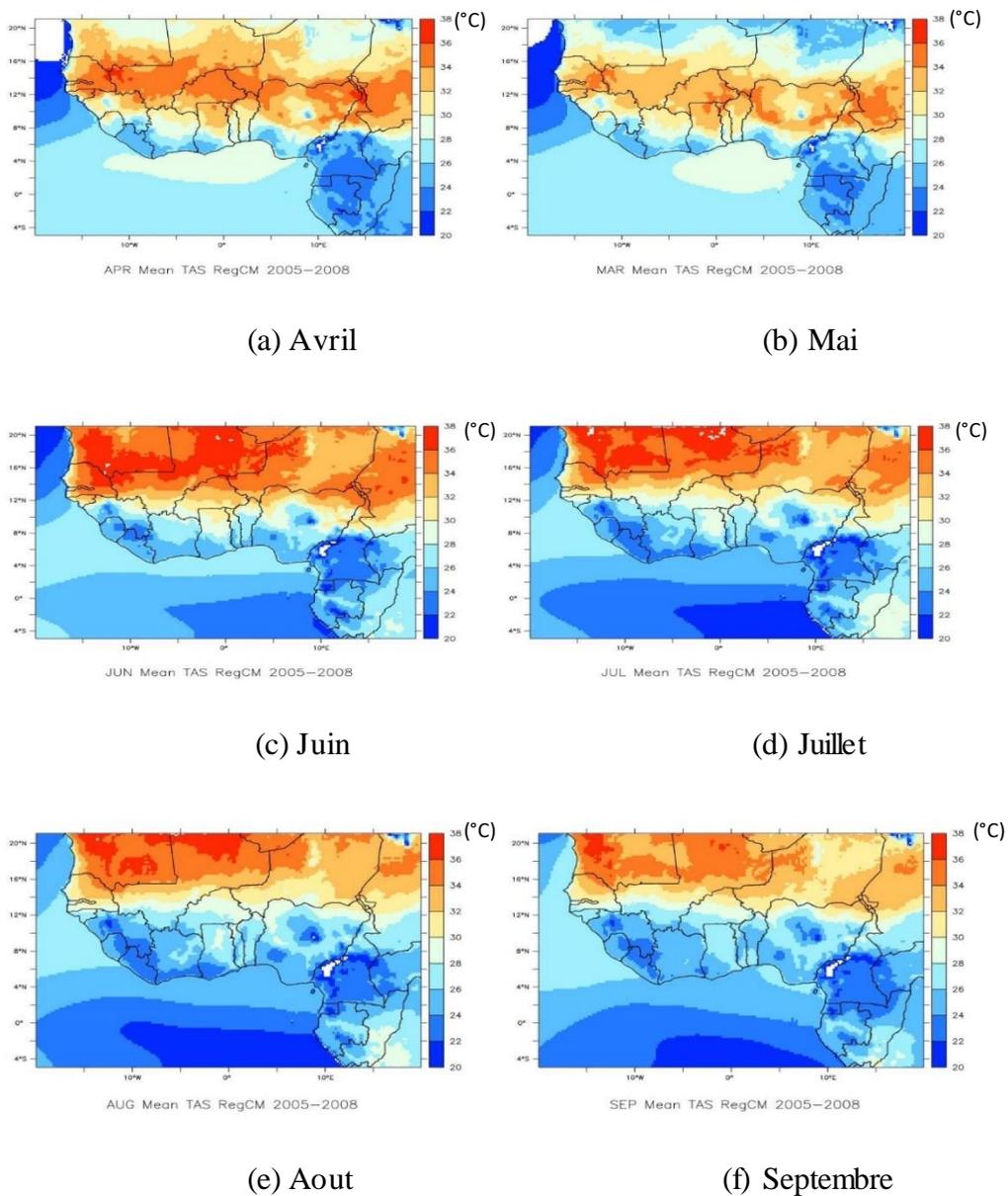


Figure 9 : Température moyenne 2005 à 2008 de RegCM sur Afrique de l'Ouest.

3.1.2- Détermination et analyse des indices pluviothermiques

3.1.2.1-Indices pluviothermiques annuels

Le tableau VI présente Les indices pluviothermiques annuels des 11 sites d'étude. L'analyse des indices I_a calculés sur la série des quatre ans (2005-2008) et pour les onze sites montre que les I_a varient de 4.43 pour le site de Tabou à 1.03 pour celui de Tengrela. Les valeurs des indices I_a déterminés indiquent que les sites étudiés se répartissent entre les zones pluvieuses ($I_a \geq 3$), zones humides ($2 \leq I_a \leq 3$) et zones subhumides ($1 \leq I_a \leq 2$).

Ainsi, on a :

- Zones pluvieuses : ABJ, GRB, SAS et TAB.
- Zones Humides : BOU, DIM, GAG et LAM
- Zones subhumides : KOR, ODI et TEN.

Tableau VI : Table des indices pluviothermiques Annuels I_a .

Sites	Ps(mm)	Pm (mm)	I_a
ABJ	638,90	2648,71	4,15
BOU	641,45	1330	2,07
DIM	680,20	1441	2,12
GAG	630	1400	2,22
GRB	640,2	2730	4,26
KOR	727,25	885,71	1,22
LAM	632,03	1390	2,20
ODI	677,25	929,70	1,37
SAS	564,67	2127,08	3,77
TAB	643,83	2850,33	4,43
TEN	747,61	769,67	1,03

3.1.2.2-Indice pluviothermique de répartition mensuelle

Le tableau VII présente les indices pluviothermiques de répartition mensuelle des différents sites calculés selon la méthode exposée au chapitre précédent.

Tableau VII : Table des indices pluviothermique mensuels I_m .

Présentation des $I(m)$ par station														
sites		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	$I(m)$
ABJ	Type mois valeurs	d 0	w 1	r 2	r 2	r 2	r 2	w 1	d 0	w 1	r 2	r 2	w 1	16
BOU	Type mois valeurs	d 0	d 0	w 1	w 1	r 2	r 2	w 1	w 1	r 2	w 1	w 1	d 0	12
DIM	Type mois valeurs	d 0	d 0	w 1	w 1	r 2	r 2	w 1	w 1	r 2	w 1	d 0	d 0	11
GAG	Type mois $I(m)$	d 0	d 0	w 1	w 1	r 2	r 2	w 1	w 1	r 2	w 1	w 1	d 0	12
GRB	Type mois valeurs	w 1	w 1	w 1	r 2	r 2	r 2	r 2	w 1	w 1	r 2	r 2	w 1	18
KOR	Type mois valeurs	a -1	d 0	d 0	d 0	w 1	w 1	w 1	r 2	r 2	w 1	d 0	a -1	6
LAM	Type mois valeurs	d 0	d 0	w 1	w 1	r 2	r 2	w 1	d 0	w 1	r 2	w 1	d 0	11
ODI	Type mois valeurs	a -1	d 0	d 0	d 0	w 1	w 1	w 1	r 2	r 2	w 1	d 0	a -1	6
SAS	Type mois valeurs	d 0	w 1	w 1	r 2	r 2	r 2	r 2	w 1	w 1	r 2	r 2	d 0	16
TAB	Type mois valeurs	w 1	w 1	w 1	r 2	r 2	r 2	r 2	w 1	w 1	r 2	r 2	w 1	18
TEN	Type mois valeurs	a -1	a -1	d 0	d 0	w 1	w 1	w 1	r 2	r 2	w 1	d 0	a -1	5

L'analyse des valeurs de I_m des différents sites, indique que les valeurs I_m varient de $I_m = 5$ pour le site de Tengrela à $I_m = 18$ pour le site de Tabou. Les valeurs de I_m obtenues et présentées dans le Tableau VII nous permettent donc de discriminer les sites en fonction de la classification proposée par Moral (1964). En effet les principales valeurs limites de l'indice pluviothermique de répartition mensuelle sont $-6, 0, 6, 12$ et 18 . L'analyse nous permet de déterminer trois zones pluviométriques de répartition mensuelles ou zones pluviométriques à savoir :

- ❖ Région-01 : $12 \leq I_m \leq 18$ comprenant les sites ABJ, SAS, TAB et GRB ;
- ❖ Région-02 : $6 \leq I_m \leq 12$ comprenant les sites BOU, LAM, DIM, GAG ;
- ❖ Région-03 : $0 \leq I_m \leq 6$ comprenant les sites ODI, KOR, TEN.

Nous basant sur les travaux de Moral (1964) pour le calcul du cumul pluviométrique mensuel et d'après les seuils de I_m , nous obtenons le tableau VIII qui permet la caractérisation des onze sites en trois zones climatiques ou zones pluviométriques. Les sites de Korhogo, Tengrela et Odienné dont les I_m sont compris entre 0 et 6, appartiennent donc à la même zone pluviométrique (climatique). Il en est de même des sites de Bouaflé, Gagnoa, Lamto et Dimbokro avec des valeurs de I_m compris entre 6 et 12. Ainsi que ceux de Abidjan, Sassandra, Gand-Bereby et Tabou avec des I_m compris entre 12 et 18.

Tableau VIII : Classification des sites par zones climatiques

		Classification des sites par zones pluviométriques à partir $I(m)$												
	Type mois valeurs	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	$I(m)$
TAB	Type mois valeurs	w 1	w 1	w 1	r 2	r 2	r 2	r 2	w 1	w 1	r 2	r 2	w 1	18
GRB	Type mois valeurs	w 1	w 1	w 1	r 2	r 2	r 2	r 2	w 1	w 1	r 2	r 2	w 1	18
ABJ	Type mois valeurs	d 0	w 1	r 2	r 2	r 2	r 2	w 1	d 0	w 1	r 2	r 2	w 1	16
SAS	Type mois valeurs	d 0	w 1	w 1	r 2	r 2	r 2	r 2	w 1	w 1	r 2	r 2	d 0	16
BOU	Type mois valeurs	d 0	d 0	w 1	w 1	r 2	r 2	w 1	w 1	r 2	w 1	w 1	d 0	12
GAG	Type mois valeurs	d 0	d 0	w 1	w 1	r 2	r 2	w 1	w 1	r 2	w 1	w 1	d 0	12
DIM	Type mois valeurs	d 0	d 0	w 1	w 1	r 2	r 2	w 1	w 1	r 2	w 1	d 0	d 0	11
LAM	Type mois valeurs	d 0	d 0	w 1	w 1	r 2	r 2	w 1	d 0	w 1	r 2	w 1	d 0	11
KOR	Type mois valeurs	a -1	d 0	d 0	d 0	w 1	w 1	w 1	r 2	r 2	w 1	d 0	a -1	6
ODI	Type mois valeurs	a -1	d 0	d 0	d 0	w 1	w 1	w 1	r 2	r 2	w 1	d 0	a -1	6
TEN	Type mois valeurs	a -1	a -1	d 0	d 0	w 1	w 1	w 1	r 2	r 2	w 1	d 0	a -1	5

Pour ce qui est des cycles saisonniers de précipitation, l'analyse des indices de répartition mensuelles des différents sites révèle que :

❖ Région pluvieuse

- Pour le site d'Abidjan, six mois pluvieux (r) (mars, avril, mai, juin, octobre et novembre), quatre mois humides (w), (février, juillet, septembre et décembre) et deux mois secs (d), (janvier et aout) ;
- Tabou et Grand-Bereby présentent également le même cycle saisonnier de précipitation. Il y'a six mois pluvieux (r) (avril, mai, juin, juillet, octobre et novembre), six mois humides (w), (janvier, février, mars, aout, septembre et décembre) ;
- Sassandra présente six mois pluvieux (r) (avril, mai, juin, juillet, octobre et novembre), quatre mois humides (w), (février, mars, aout et septembre) et deux mois secs (d), (janvier et décembre).

En somme, dans cette région, nous notons un cycle saisonnier de précipitation de type bimodal, où, en moyenne, la grande saison des pluies part d'Avril à juillet et la petite saison de pluies, d'octobre à Novembre. Une grande saison sèche de décembre à mars et une petite saison sèche d'aout à septembre.

❖ Région humide

- Pour le site de Lamto, trois mois pluvieux (r) mai, juin et septembre, cinq mois humides (w) mars, avril, juillet, septembre et novembre ; quatre mois secs (d) janvier, février, aout, et décembre ;
- Le site de Bouafle et Gagnoa présentent le même cycle saisonnier de précipitation. Nous notons trois mois pluvieux (r) (mai, juin et septembre), six mois humides (w) mars, avril, juillet, aout, octobre et novembre, trois mois secs janvier, février et décembre ;
- Pour le site de Dimbokro, la même analyse révèle trois mois pluvieux (r) (mai, juin et septembre), cinq mois humides (w) mars, avril, juillet, aout et octobre et quatre mois secs janvier, février, novembre et décembre.

Il faut retenir pour cette région également un cycle saisonnier de précipitation de type bimodal. Les différents sites ont pratiquement le même cycle saisonnier. Nous observons deux saisons pluvieuses de mai à juin (la grande saison des pluies) et en septembre (la petite saison des pluies). Une grande saison sèche d'octobre au mois d'Avril et une petite saison sèche de juillet au mois d'aout.

❖ Région subhumide

- Korhogo et Odienné présentent les mêmes caractéristiques liées à I_m . Le cycle saisonnier de précipitation est caractérisé par deux mois pluvieux (r) (aout et septembre), quatre mois humides (w), (mai, juin, juillet et octobre), quatre mois secs (d), (février, mars, avril et novembre) et deux mois arides (a), (janvier et décembre) ;
- Tengrela présente deux mois pluvieux (r) (aout et septembre), quatre mois humides (w), (mai, juin, juillet et octobre), trois mois secs (d), (mars, avril et novembre), trois mois arides (a), (janvier, février et décembre).

Cette région est caractérisée par un cycle saisonnier de précipitation de type unimodal. Une petite saison des pluies qui part du mois d'aout au mois de septembre et une grande saison sèche s'étendant d'octobre à juillet.

La figure 10 présente les variations saisonnières de précipitation au niveau des 11 sites basées sur les indices pluviothermiques mensuels de Moral.

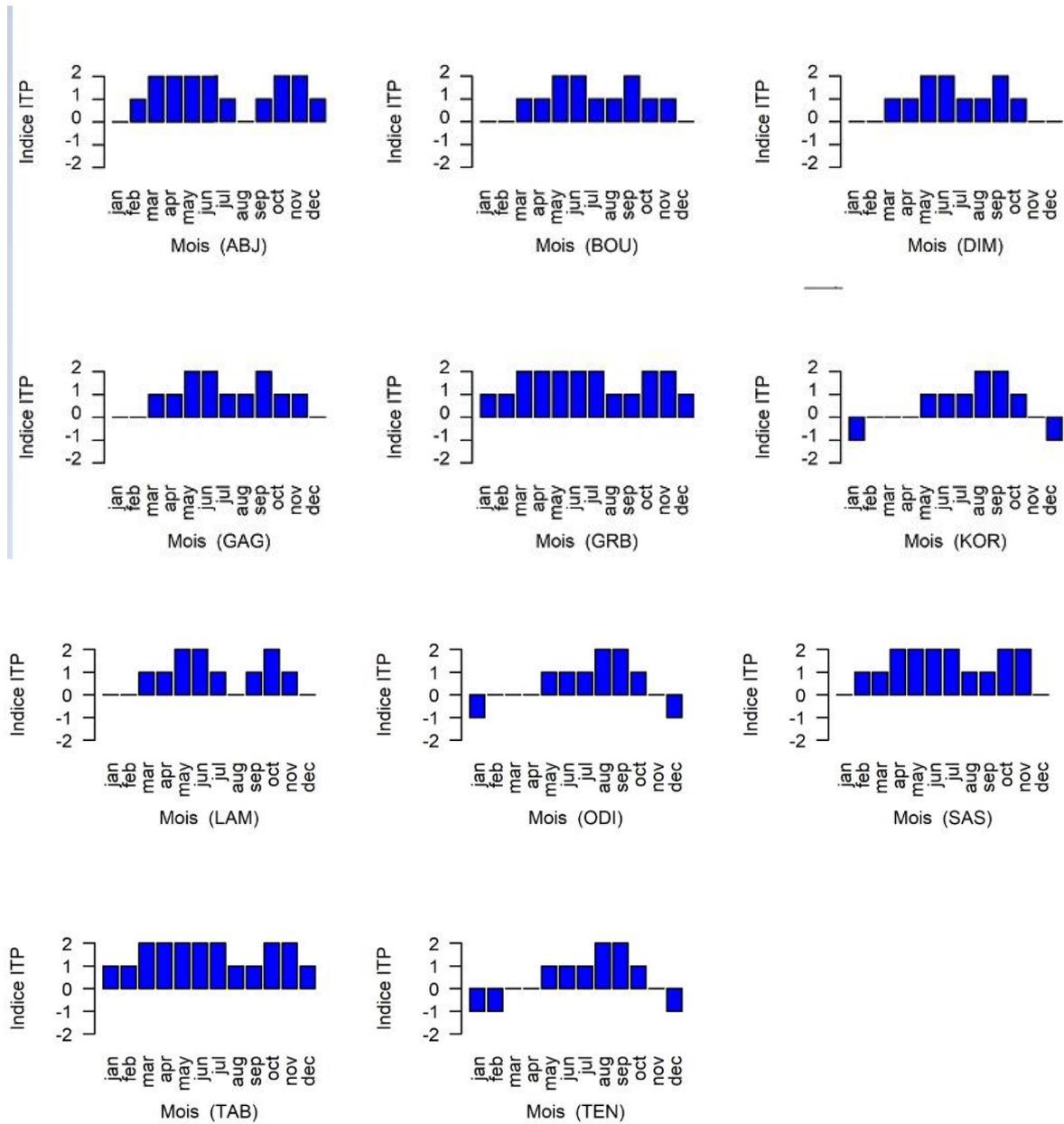


Figure 10 : Histogrammes représentant les cycles saisonniers de précipitation pour chaque site d'études.

On pourra également utiliser ces indices dans n'importe quelle localité de l'Afrique de l'Ouest, connaissant les coordonnées géographiques, pour déterminer le zonage climatique et le cycle saisonnier de précipitation de la localité en question.

3.1.3-Analyse climatiques des régions pluviométriques issues des indices pluviothermiques

Après avoir utilisé les indices pluviothermiques pour déterminer le zonage climatique et les cycles saisonniers des précipitations des onze sites d'étude, nous analysons dans cette session, en guise de confirmation, le cycle saisonnier des précipitations de chacune des régions pluviométriques en nous basant sur les cumuls de précipitations des sites étudiés. La figure 11 présente le cycle annuel moyen des précipitations de 2005–2008 des sites regroupés par zone pluviométriques suivant les indices pluviothermiques I_m .

- ❖ La première zone pluviométrique est composée des sites du littoral de la Côte d'Ivoire, ABJ SAS, GRB et TAB. La figure 11.a présente pour chacun des quatre sites un cycle annuel de précipitations à caractère bimodal. Deux saisons pluvieuses d'avril à juillet (grande saison des pluies) et d'octobre à Novembre (petite saison de pluies). Une grande saison sèche de décembre à mars et une petite saison sèche d'aout à septembre sont également observées. Les pics de précipitations varient de moins 50mm/mois en saison sèche ; de 530mm/mois (en juin) durant la grande saison des pluies en passant par 350mm/mois en novembre pour la petite saison pluvieuse. Sur l'ensemble des quatre sites on observe une similitude assez bien marquée du cycle annuel de précipitation confirmant le fait qu'ils appartiennent à une seule et unique région pluviométrique dont le cycle saisonnier moyen est décrit à la figure 11.a.
- ❖ Le cycle saisonnier des précipitations de la seconde zone pluviométrique composée des sites de DIM, BOU, LAM et GAG est présenté à la figure 11.b. Nous observons ici également le caractère bimodal des précipitations pour l'ensemble des quatre sites. Le maximum de précipitation de la grande saison des pluies de mai à juin est de 125mm/mois, assez semblable à celui du pic de la petite saison des pluies en septembre. La concordance temporelle du cycle saisonnier de précipitation des quatre sites ainsi que les cumuls de précipitations est assez nette. Nous notons cependant un déficit des cumuls de précipitation dans cette zone pluviométrique par rapport à la zone précédente (figure 11.a).
- ❖ Le cycle annuel de précipitation des sites KOR, TEN et ODI est présenté à la figure 11.c. On observe une assez bonne similitude des trois cycles annuels avec un cumul annuel de ODI en deçà des deux autres. Le cycle de précipitation de cette zone pluviométrique, contrairement aux deux autres, est de type unimodal. Le pic de précipitation de 190mm/mois est observé durant la saison des pluies du mois d'Août à septembre.

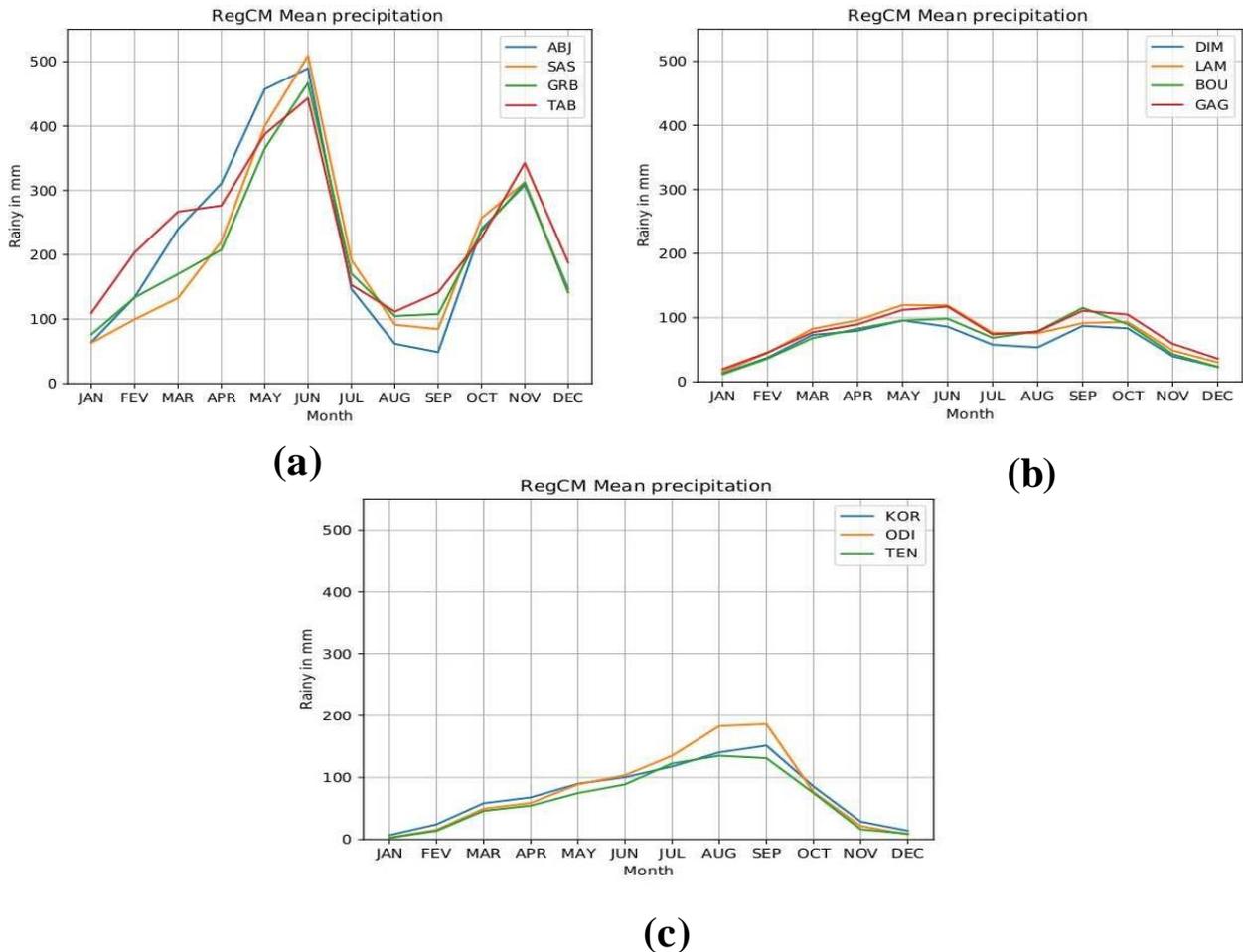


Figure 11 : Cycle saisonnier annuel des précipitations (2005-2008) pour chaque station en Côte d'Ivoire : (a) : Zone Sud (b) : Zone centre (c) : Zone nord.

3.2-DISCUSSION

La présente étude est une application de la modélisation régionale à un cas d'étude pratique, celui du zonage climatique et du cycle saisonnier de précipitation afin de présenter la modélisation climatique comme une alternative à l'épineux problème de manques de données climatique en Afrique.

La simulation du climat Ouest Africain à l'aide du modèle climatique RegCM4.5 sur quatre ans (2005-2008), montre que la climatologie du cycle annuel moyen des précipitations peut se résumer en trois grandes phases. D'abord, nous avons la phase d'établissement de la mousson. Dans cette phase, les premières pluies apparaissent sur les zones du littoral avec un

maximum de 12mm/jour (5°N) au mois d'avril jusqu'au mois de juin. Ensuite, vient la (2) phase de « saut de mousson ». Elle intervient au mois de juillet. Le phénomène de « saut » de mousson (Sultan & Janicot, 2000) correspond au déplacement des maximums de précipitations des côtes vers les 11°N en moyenne. Pendant cette phase, l'établissement de la saison de mousson d'été sur l'Afrique de l'Ouest est observé ainsi que le plein développement de la saison des pluies sur les régions sahéliennes au mois d'août, où nous observons l'extension méridienne maximale de la bande pluvieuse de 6mm/jour autour de 15°N . Enfin, nous avons la phase de « retrait ». Cette extension demeure autour de cette latitude (15°N) jusqu'à la fin du mois d'août, puis redescend progressivement vers le sud, repassant au-dessus des côtes guinéennes. De tels résultats ont été obtenus par Kouassi *et al.* (2010) dans leurs études portant sur le climat Ouest-Africain à l'aide du modèle atmosphérique régional M.A.R. Aussi, l'analyse des champs de températures révèle une distribution avec un gradient positif des côtes du littoral vers les régions sahariennes. Des côtes jusqu'au tour de 13° de latitude Nord, les températures au-delà de cette latitude varient de 30°C à 38°C et ce durant la période de mousson ouest-africaine. Cette répartition spatiale de la température a été soulignée dans les travaux de Koné *et al.* (2018). Ainsi, le modèle réussi à restituer la dynamique du flux de mousson sur l'Afrique de l'ouest, décrit par Drigeard (2014) et Kouassi *et al.*, (2010), notamment la localisation des maximums (Kouassi *et al.*, 2010), les niveaux de précipitation durant la saison de mousson (Koné *et al.*, 2018) ainsi que le gradient méridien de température (Koné *et al.*, 2018).

L'analyse des indices pluviométriques annuelles « I_a » basée sur les travaux de Moral (1964) et repris par Diawara *et al.* (2014), suggère que les sites se répartissent entre régions pluvieuse, humide et subhumide. L'analyse des indices pluviométriques mensuels « I_m » révèle que les onze sites choisis se répartissent en trois régions pluviométriques avec des cycles saisonniers de précipitations différents. Cette discrimination basée sur I_m a été renforcée par une analyse des cumuls de précipitation qui confirme le découpage basé sur les indices pluviométrique. Ainsi, la première zone (pluvieuse) composée d'Abidjan, Sassandra, Grand-Bereby et Tabou, a un cycle annuel de précipitations à deux saisons pluvieuses (cycle bimodal). Dans cette zone, la grande saison des pluies part d'avril à juillet suivie d'une petite saison sèche d'août à septembre. D'octobre à novembre nous avons la petite saison pluvieuse suivie d'une grande saison sèche qui part de décembre à mars. Et une petite saison sèche d'août à septembre. Ensuite, la seconde zone pluviométrique (humide) composée des sites de Dimbokro, Bouafle, Lamto et Gagnoa présente également le caractère bimodal. Dans cette zone, la grande saison des pluies part de mai à juin et la petite saison des pluies en septembre. Enfin, La troisième

zone composée des sites de Korhogo, Tengrela et Odienné présente un cycle saisonnier de précipitation à caractère unimodal. La petite saison des pluies de cette zone part du mois d'aout au mois de septembre. La grande saison sèche de cette zone couvre la période allant de novembre à avril.

Cette répartition du zonage climatique et du cycle saisonnier de précipitations irrégulier au niveau des différents sites d'étude peut s'expliquer par la répartition des facteurs locaux, tels que la dynamique de la végétation fortement liée à la pression anthropique, le relief et la morphologie des côtes dans une moindre mesure (Diawara *et al.*, 2014). La forêt du Sud, la savane boisée du Centre et la savane herbeuse du Nord sont les différents systèmes de végétation rencontrés dans cette sous-région d'Afrique.

Les résultats de cette étude sont similaires à ceux mis en exergue par les travaux de Kouadio *et al.* (2011) sur le zonage climatique de la Côte d'Ivoire et du Ghana basé sur les données in situ. Comparativement à ces travaux les cumuls mensuels de précipitations simulées sur la seconde région (Lamto, Dimbokro, Bouaflé et Gagnoa) sont plus faibles que ceux de Kouadio *et al.* (2011). Cependant l'indice Pluviothermique prenant en compte les températures et les précipitations aboutit au même zonage climatique. Cela s'explique par le fait que relativement aux données simulées, un biais négatif des précipitations peut être comblé par un autre positif sur les températures.

Avec un « I_a » variant de 1.70 à 1.90, Diawara *et al.* (2014) a montré que la zone de Lamto a un climat de type subhumide et que durant certaines années, le climat y est de type humide. Ses travaux basés sur les indices pluviométriques mensuels révèlent que Lamto a un régime pluviométrique basé sur quatre mois secs, deux mois pluvieux, cinq mois humides et un mois aride. Nos travaux sur Lamto montrent un indice « I_a » de 2.2 soit, quatre mois secs, trois mois pluvieux et cinq mois humides. Le dépassement de « I_a » de 15 % entre les deux études peut être attribué à la période d'étude et au caractère évolutif du changement climatique.

Cette présente étude révèle qu'au-delà du zonage climatique, la modélisation peut optimiser le potentiel agricole des pays africains en aidant à identifier les zones de production, à suivre la dynamique des cycles de précipitations et les ressources en eaux.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ce travail s'est basé sur la caractérisation des saisons à l'aide des indices pluviométriques calculés à partir d'une simulation de 4 ans (2005-2008) du modèle Régional RegCM sur l'Afrique de l'Ouest. L'analyse à l'échelle de l'Afrique de l'Ouest des données de simulation suggère que le modèle reproduit avec réalisme la circulation atmosphérique régionale de l'Afrique de l'Ouest notamment la dynamique du flux de mousson Ouest-Africaine et la localisation spatio-temporelle des pics de précipitation et de température durant la saison de mousson. En outre, l'analyse des indices pluviométriques annuels et mensuels en point de grille sur la Côte d'Ivoire révèle trois zones climatiques avec des cycles saisonniers de précipitations différents. Il s'agit de la zone pluvieuse composée d'Abidjan, Sassandra, Grand-Bereby et Tabou, caractérisée par un cycle annuel de précipitations à caractère bimodal c'est-à-dire deux saisons pluvieuses. D'avril à juillet nous avons la grande saison des pluies et d'octobre à novembre la petite saison des pluies. Une grande saison sèche est observée de décembre à mars et une petite saison sèche d'août à septembre. Concernant la seconde zone pluviométrique, elle est composée des sites de Dimbokro, Bouaflé, Lamto et Gagnoa. Elle présente également un caractère bimodal. Dans cette zone la grande saison des pluies part de mai à juin et la petite saison des pluies en septembre. Quant à la troisième zone composée des sites de Korhogo, Tengrela et Odienné, elle présente un cycle saisonnier de précipitation à caractère unimodal. La petite saison des pluies part du mois d'août au mois de septembre et la grande saison sèche de novembre à avril. On pourra également utiliser ces indices dans n'importe quelle localité de l'Afrique de l'Ouest, connaissant les coordonnées géographiques, pour déterminer le zonage climatique et le cycle saisonnier de la localité en question.

Cette présente étude révèle qu'au-delà du zonage climatique, la modélisation pourrait optimiser le potentiel agricole des pays Africains en aidant à identifier les zones de production et à suivre la dynamique des cycles de précipitations et les ressources en eaux. Les résultats des travaux de cette étude, soulignent l'importance de la modélisation climatique particulièrement des modèles climatiques régionaux dans la planification de la lutte contre le changement climatique. Ils se révèlent non seulement comme outil d'aide à la décision, à la planification et à la production des informations déterminantes dans l'élaboration des politiques agricoles et hydrologiques en Afrique de l'Ouest, mais également comme outils d'étude d'impacts face au phénomène de changement climatique. Enfin, on retient que la modélisation est une alternative à l'épineux problème de la disponibilité des données climatiques en Afrique de l'Ouest.

Toutefois, pour une étude approfondie, il serait intéressant de déterminer les indices pluviométriques à partir des données in situ, en plus des indices calculés à partir des données

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

de simulation, puis effectuer le calcul des erreurs sur les indices émanant de la simulation afin d'évaluer la précision des données de simulation quand elles sont utilisées pour la détermination du zonage climatique et le cycle saisonnier d'une zone donnée. Aussi, pour ce qui est de la détermination du zonage climatique de l'Afrique de l'Ouest, il serait intéressant de d'effectuer l'étude en point de grille sur toute l'étendue de l'Afrique de l'Ouest en considérant par exemple 5 sites dans chaque pays de ladite zone.

REFERENCES

- Adefolalu D.O. (1983). Monsoon Onset in West Africa-Application of Satellite Imagery. *Achieve for Meteorology, geophysics and bioclimatology serie B*, 32 : 103-117.
- Adeniyi M.O. (2014). Sensitivity of different convection schemes in RegCM4.0 for simulation of precipitation during the Septembers of 1989 and 1998 over West Africa. *Theoretical and Applied Climatology*, 115(1-2): 305-322.
- Afiesimama E.A., Pal J.S., Abiodun B.J., Gutowski W.J. & Adedoyin A. (2006). Simulation of West African monsoon using the RegCM3. Part I: Model validation and interannual variability. *Theoretical and Applied Climatology*, 86 : 23-37.
- Anthes R.A. (1977). Un schéma de paramétrage cumulus utilisant un modèle de nuage unidimensionnel. *Monthly Weather Review*, 105 : 270-286.
- Beucher F. (2010). Météorologie Tropicale : des alizés aux cyclones. *In : Cours et Manuels. Météo-France (Eds), Paris (France), pp. 420-476.*
- Burpee R.W. (1972). The origin and structure of easterly waves in the lower troposphere of North Africa. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 29 : 77-90.
- Cook K.H. (1999). Generation of the African Easterly Jet and its role in determining West African precipitation. *Journal of Climate*, 12 : 1165-1185.
- Daget P.H. (1997). Le bioclimat méditerranéen : caractères généraux, modes de caractérisation. *Vegetation*, 34(1) : 1-20.
- Diawara A., Yoroba F., Kouadio K.Y., Kouassi K.B., Assamoi E.M., Diedhiou A. & Assamoi P. (2014). Climate Variability in the Sudano-Guinean Transition Area and Its Impact on Vegetation: The Case of the Lamto Region in Côte D'Ivoire. *Advances in Meteorology*, 1 : 1-11.
- Dickinson R.E., Errico R.M., Giorgi F. & Bates G.T. (1989). Un modèle climatique régional pour l'ouest des États-Unis. *Climatic Change*, 15 : 383-422.
- Dilley M., Chen R.S., Deichmann U., Lerner-Lam A., Arnold M., Agwe J., Buys P., Kejkstad O., Lyon B., & Yetman G. (2005). Naturel disaster hotspots: A global risk analysis. *World bank Disaster Risk Management Series*, 5 : 1-132.

- Drigeard E. (2014). Microphysique glacée des systèmes convectifs observés dans le cadre de Megha-Tropiques en Afrique de l'Ouest : comparaison des mesures aéroportées avec des radars sol et un modèle numérique. Thèse de doctorat, Université Clermont II (Clermont, France), 219 p.
- Drobinski P., Sultan B. & Janicot S. (2005). Role of the Hoggar massif on the West African monsoon onset. *Geophysical Research Letters*, 1-32.
- Eltahir E.A.B. & Gong C. (1996). Dynamics of Wet and Dry Years in West Africa. *Journal of Climate*, 9 : 1030-1042.
- Emanuel K.A. (1991). Un schéma pour représenter la convection cumulus dans des modèles à grande échelle. *Journal of Atmospheric Science*, 48 (21) : 2313-2335.
- Emberger L. (1942). Un projet de classification des climats du point de vue phytogéographique. *Bulletin de la Société d'Histoire Naturelle de Toulouse*, 77 : 97-124.
- Fontaine B., Philippon N., Trzaska S. & Roucou P. (2002). Spring to summer changes in the West African monsoon through NCEP/NCAR reanalyses. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 107 : 11-19.
- Giorgi F. (1990). Simulation du climat régional à l'aide d'un modèle à superficie limitée imbriqué dans un modèle de circulation générale. *Journal Climate*, 3 : 941-963.
- Giorgi F., Marinucci M.R. & Bates G.T. (1993b). Développement d'un modèle climatique régional de deuxième génération (regcm2) i : Couche limite et processus de transfert radiatif. *Monthly Weather Review*, 121 : 2794-2813.
- Giorgi F., Marinucci M.R., Bates G.T. & DeCanio G. (1993c). Développement d'un climat régional de deuxième génération model (regcm2) ii : Processus convectifs et assimilation des conditions aux limites latérales. *Monthly Weather Review*, 121 : 2814-2832.
- Giorgi F. & Mearns L.O. (1999). Introduction à la section spéciale : la modélisation du climat régional revisitée. *Journal of Geophysic Research*, 104 : 6335-6352.
- Giorgi F., Pal J.S., Bi X., Sloan L., Elguindi N. & Solomon F. (2006). Présentation du numéro spécial tac : le regcnet réseau. *Climatologie théorique et appliquée*, 86 : 1-4.

- Grell G.A., Dudhia J. & Stauffer D.R. (1994). Description du modèle méso-échelle Penn State / NCAR de cinquième génération (MM5). Rapport technique TN-398 + STR, NCAR, Boulder, Colorado, 121 p.
- Grodsky S.A. & Carton J.A. (2001). Coupled land/atmosphere interactions in the West African Monsoon. *Geophysical Research Letters*, 28 : 1503-1506.
- Gu G. & Adler R.F. (2004). Seasonal Evolution and Variability Associated with the West African Monsoon System. *Journal of Climate*, 17 : 3364-3377.
- Guyot G. (1999). Climatologie de l'environnement-cours et exercices corrigés, Dunod, Paris (France), 525 p.
- Hammouda R. & Mataam H. (2003). Contribution à l'étude diachronique du climat et du bioclimat de la steppe algérienne. Mémoire d'ingénieur, Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene, Algérie, 66 p.
- Holtslag A.A.M., Bruijn E.I.F. & Lapoêle H.L. (1990). Un modèle de transformation de la masse d'air à haute résolution pour prévisions météorologiques de plage. *Monthly Weather Review*, 118 : 1561-1575.
- IPCC (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 (USA), 996 p.
- IPCC (2014). Changements climatiques 2014 : Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat Sous la direction de l'équipe de rédaction principale. Rapport de synthèse, Genève (Suisse), 161 p.
- Janicot S. (1992). Spatiotemporal Variability of West African Rainfall. Part II: Associated Surface and Airmass Characteristics. *Journal of Climate*, 5 : 499-511.
- Kain J. S. (2004). The Kain-Fritsch Convective Parameterization: An Update. *Journal of Applied Meteorology*, 43 : 170-181.
- Kiehl J.T., Hack J.J., Bonan G.B., Boville B.A., Breigleb B.P., Williamson D. & Rasch P. (1996). La description du modèle climatique de la communauté NCAR (CCM3). Rapport technique NCAR / TN-420 + STR, National Center for Recherche

- Atmosphérique, 152 p.
- Konaré A., Zakey A.S., Solmon F., Gorgi F., Rauscher S., Ibrah S. & Bi X. (2008). A regional climate modeling study of the effect of desert dust on the west African monsoon. *Journal of Geophysical Research*, 113 : 1-15.
- 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 Dynamic*, 9 : 1261–1278.
- Kouadio K.Y., Aman A., Ochou A.D., Ali K.E. & Assamoi P.A. (2011). Rainfall Variability Patterns in West Africa: Case of Cote d’Ivoire and Ghana. *Journal of Environmental Science and Engineering*, 5(2011) : 1229-1238.
- Kouassi A., Kouamé F., Koffi Y., Dje K., Paturel J.E. & Oulare S. (2010). Analysis of climate variability and of its influences on seasonal rainfall regimes in West Africa: case of the N’zi (Bandama) watershed in Ivory Coast. *European Journal of geography : Cybergeo*, 1-30.
- Kouassi K.B. (2011). Etude de l'évolution des perturbations méso-synoptiques sur l’Afrique de l'Ouest à l'aide du modèle atmosphérique régional (MAR). Thèse de Doctorat en climat tropical et environnement, Université de Felix Houphouët Boigny, (Abidjan, Cote d’Ivoire), 128p.
- Koungbanane D., Vodounon H.T. & Zahiri E.P. (2020). Indicateurs de changements climatiques dans le bassin-versant de l’oti au Togo. *Climat et développement*, 17-29.
- Lebourgeois F. (2010). Cours de bioclimatologie à l’usage des forestiers., AgroParisTech-ENGREF, Nancy (France), 250 p.
- LeHouerou H.N. (1989). The grazing land ecosystems of the African sahel. *Ecological studies*, 1-75.
- Louvet S. (2008). Modulations intrasaisonnières de la mousson d’Afrique de l’ouest et impacts sur les vecteurs du paludisme à NDIOP (Sénégal) : diagnostics et prévisibilité. Thèse de Doctorat en Climatologie, Université de Bourgogne, France, 212 p.

- Love P.E.D., Irani Z. & Edwards D.J. (2004). A rework model for construction Projects. *IEEE Transactions on engineering management*, 5: 426-440.
- Malardel S. (2005). Fondamentaux de Météorologie à l'école du temps. Météo-France, Paris (France), 726 p.
- Matthews A.J. (2004). Intraseasonal variability over tropical Africa during northern summer. *Journal of Climate*, 17 : 2427-2440.
- Moral P. (1964). Essai sur les régions pluviothermiques de l'Afrique de l'Ouest. *Annales de Géographie*, 73(400) : 660-686.
- Nicholson E.S. & Farrar T.J. (1994). The influence of soil type and the relationships between NDVI, rainfall, and soil moisture in semiarid Botswana.I. NDVI response to rainfall. *remote sensing of environment*, 50 : 107-120.
- Nomenjanahary M.A. (2012). Contribution à l'étude du changement climatique : Etude de la sécheresse dans le sud de Madagascar et l'utilisation du modèle climatique régionale RegCM4. Mémoire d'ingénieur, Université d'Antananarivo, Madagascar, 149 p.
- OCDE (2014). Regards sur l'éducation : les indicateurs de l'OCDE. OCDE, Paris (France), 592 p.
- Oleson K.W., Niu G.Y., Yang Z.L., Lawrence D.M., Thornton P.E., Lawrence P.J., Stockli R., Dickinson R.E., Bonan G.B., Levis S., Dai A. & Qian T. (2008). Améliorations du modèle foncier communautaire et leur impact sur le cycle hydrologique. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 113(1) : 4564-4574.
- Pal J.S., Giorgi F., Bi X. & al. (2007). Le CIPT RegCM3 et RegCNET: modélisation du climat régional pour les monde. *American Meteorological Society*, 88 : 1395-1409.
- Pal J.S., Small E.E. & Eltahir E.A.B. (2000). Simulation des bilans eau et énergie à l'échelle régionale : représentation des processus de nuages et de précipitations de sous-réseau dans RegCM. *Journal Geophysic Research Atmospheres*, 105 : 29579– 29594.
- Peyrille P. (2006). Etude idéalisée de la mousson ouest-africaine à partir d'un modèle numérique bi-dimensionnelle. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier Toulouse III, France, 206 p.

- Plumb R.A. & Hou A.Y. (1992). The response of a zonally symmetric atmosphere to subtropical thermal forcing: threshold behavior. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 49 : 1790–1799.
- Ramage C.S. (1971). Monsoon Meteorology. *International geophysics*, 15 : 1- 296.
- Rocle R. (2009). Le GIEC, une institution d'experts scientifiques au service du politique. *Regards croisés sur l'économie*, 6 : 56-58.
- Rowell D.P., Folland C.K., Maskell K. & Ward M.N. (1995). Variability of summer rainfall over tropical North Africa (1906–92): Observations and modelling Quarterly. *Journal of the Royal Meteorological Society*, 121 : 669-704.
- Semazzi F.H.M. & Sun L. (1998). The Role of Orography in Determining the Sahelian Climate. *International Journal of Climatology*, 17 : 581-596.
- Smith E.A. (1986). The Structure of the Arabian Heat Low. Part II: Bulk Tropospheric Heat Budget and Implications. *Monthly Weather Review*, 114 : 1084-1102.
- Sultan B. & Janicot S. (2000). Abrupt shift of the ITCZ over West Africa and intra-seasonal variability. *Geophysical Research Letters*, 27 : 3353-3356.
- Sultan B. & Janicot S. (2003). The West African monsoon dynamics. Part II: The "preonset" and "onset" of the summer monsoon. *Journal of Climate*, 16 : 3407-3427.
- Sundqvist H., Berge E. & Kristjansson J.E. (1989). Les effets du choix du domaine sur la simulation des précipitations estivales et sensibilité dans un modèle climatique régional. *Journal Climate*, 11 : 2698-2712.
- Sylla M.B., Coppola E., Mariotti L., Giorgi F., Ruti P.M. & Aquila A. (2010). Multiyear simulation of the African climate using a regional climate model (RegCM3) with the high-resolution ERA-interim reanalysis. *Climate Dynamic*, 35 : 231-247.
- Thorncroft C.D. & Blackburn M. (1999). Maintenance of the African easterly jet. Quarterly. *Journal of the Royal Meteorological Society*, 125:763-786.
- Tiedtke M. (1989). A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large-scale models. *Monthly weather Review*, 8 : 1779-1880.

- Tomas R.A & Webster P.J. (1997). The role of inertial instability in determining the location and strength of near-equatorial convection. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 123 : 1445-1482.
- Ward M.N. (1998). Diagnosis and Short-Lead Time Prediction of Summer Rainfall in Tropical North Africa at Interannual and Multidecadal Timescales. *Journal of Climate*, 11 : 3167-3191.
- Webster P. J., Magana V., Palmer T., Shukla J., Tomas A. & Yasunari T. (1998). Monsoons: processes, predictability, and the prospects for prediction. *Journal Geophysic Research*, 103 : 14451-14510.
- White F. (1986). La végétation de l'Afrique. Mémoire accompagnant la carte de végétation de l'Afrique. *Natural resources research*, 20 : 356-384.
- Zeng X., Zhao M. & Dickinson R.E. (1998). Intercomparaison d'algorithmes aérodynamiques massifs pour le calcul de flux de surface de la mer en utilisant les données toga coare et tao. *Journal of Climate*, 11 : 2628-264.
- Zheng X. & Eltahir E.A.B. (1998). The Role of Vegetation in the Dynamics of West African Monsoons. *Journal of Climate*, 11 : 2078-2096.

RESUME

Ce travail est basé sur la détermination des saisons à l'aide des indices pluviothermiques calculés à partir d'une simulation de 4 ans (2005-2008) du modèle Régional RegCM sur l'Afrique de l'Ouest. L'analyse des données de simulation suggère que le modèle reproduit avec réalisme la dynamique du flux de mousson Ouest-Africaine et la distribution spatiale de température et précipitation. L'étude du zonage climatique et du cycle saisonnier des onze sites d'études choisis en Côte d'Ivoire par analyse des indices pluviothermiques annuels et mensuels calculés à partir des données simulées, révèle que les onze sites se regroupent en trois régions pluviométriques. La première région (pluvieuse) regroupe les sites Abidjan, Sassandra, Grand Bereby et Tabou avec un cycle de précipitation de type bimodal. La seconde (Humide), couvre les sites de Dimbokro, Bouaflé, Lamto et Gagnoa avec un cycle de précipitation de type bimodal. La troisième (Subhumide) regroupe les sites Dimbokro, Bouaflé, Lamto et Gagnoa avec un cycle de précipitation de type unimodal. Cette présente étude révèle que la modélisation peut combler le manque de données in situ et optimiser le potentiel agricole des pays africains en aidant à identifier les zones de production et à suivre le cycle de précipitations.

Mots clés : Mousson Ouest-Africaine, indice pluviothermique, zonage climatique, RegCM.

ABSTRACT

This work is based on the characterization of the seasons using pluviothermal indices calculated from four years of simulation (2005-2008) of the RegCM Regional model over West Africa. The Analysis of simulation data suggests that the model realistically reproduces the dynamics of the West African monsoon flow and the spatial distribution of temperature and precipitation. The study of the climatic zoning and the seasonal cycle of eleven study sites chosen in Côte d'Ivoire by analysis of the annual and monthly pluviothermal indices calculated from the simulated data, reveals that the eleven sites are grouped into three rainfall regions. The first region (rainy), includes Abidjan, Sassandra, Grand Bereby and Tabou sites with a bimodal type of precipitation cycle. The second (Wet) covers Dimbokro, Bouaflé, Lamto and Gagnoa sites with a bimodal type of precipitation cycle. The third one (Subhumid) groups together Korhogo, Tengrela and Odiene sites with a unimodal precipitation cycle. This present study reveals that modeling can be used to fill the lack of in situ data and optimize the agricultural potential of African countries by helping to identify production areas and to monitor the dynamics of rainfall cycles.

Keywords: West African monsoon, pluviothermal index, climatic zoning, RegCM.