

UNIVERSITE ASSANE SECK DE ZIGUINCHOR



UFR : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

Mémoire de Master

Mention : Physique et Application

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

TITRE: Amélioration des prévisions météorologiques au Sénégal avec le modèle WRF

Présenté par : Massara DIAKHATE

Sous Encadrement de : Dr Samo DIATTA(UASZ)

Co-encadrant : Dr Youssouph SANE (ANACIM), Dr Habib SENGHOR (ANACIM)

Soutenu publiquement le **14 Mai 2022** devant le jury composé de :

Bamol Ali SOW	Maitre de conférences	Président	UASZ
Moctar CAMARA	Professeur Titulaire	Rapporteur	UASZ
Ibrahima DIBA	Chercheur	Examineur	UASZ
Emmanuel D. POAN	Expert en modélisation	Examineur	ANACIM
Samo DIATTA	Maitre de conférences	Encadrant	UASZ
Youssouph SANE	Chercheur	Co-encadrant	ANACIM
Habib SENGHOR	Chercheur	Co-encadrant	ANACIM

Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie



Dédicaces

A mon père qui est une référence pour moi ;

A ma brave maman pour son amour et pour toutes les bonnes valeurs qu'elle m'a inculquées ;

A mes frères et sœurs pour la confiance qu'ils portent sur ma modeste personne ;

**A mes Amis : Nogaye SECK, Ndèye Coumba NIANG, Missette SAMBOU, Sokhna DRAME,
Katy Binetou MBODJ, Sayenebou MBAYE, Mame Diarra Bousso MBAYE, Mame Saye
THIAW etc...;**

A ma défunte amie, mère et conseillère Mariama DAFE, que la terre lui soit légère ;

A mes neveux et nièces : Bounama DIAKHATE, Moussa NDOYE et Dianaba TRAORE

**Je dédie ce travail, à toute ma famille particulièrement à mes frères et sœurs de la famille
BADJI de Diabir et de la famille DRAME Kénia Ziguinchor.**

Que DIEU vous garde et vous accorde sa bénédiction.

Remerciements

Je remercie le bon Dieu de m'avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

L'écriture de ce mémoire ne se serait pas aussi bien déroulée sans l'aide de certaines personnes qui m'ont apporté de précieux conseils, suggestions et remarques.

Tout d'abord, mon directeur de mémoire, **Dr. Samo DIATTA**, pour avoir dirigé ce travail bien qu'il soit difficile d'exprimer en quelques mots ma reconnaissance envers lui. Sa patience, sa disponibilité et ses conseils m'ont permis de vivre une expérience stimulante, enrichie par son expertise et sa rigueur scientifique qui influenceront sans doute mes projets professionnels. J'associe à ces remerciements mon maître de stage, le **Dr Youssouph SANE**, pour son aide au quotidien durant tout mon séjour à l'ANACIM, pour ses remarques, ses encouragements et ses observations pertinentes. Je tiens également à remercier mes autres encadrants que sont **Dr Habib SENGHOR** pour leur aide inconditionnelle, leur disponibilité, et leurs remarques qui sont le reflet de ce travail, alors un grand merci!

Je remercie tout le personnel de l'ANACIM, en particulier, le Dr Abdoulatif DIOP pour ses remarques pertinentes et sa rigueur scientifique, Mr Abdou Aziz COLY pour l'aide inconditionnelle, leur disponibilité, et leurs remarques, Mr Ass MBENGUE qui m'a facilité l'accès aux produits ENACTS, Mr Babacar DIAGNE pour les données de stations et Mr Lamine Ngom THIAM pour son soutien.

Je remercie également les membres du jury : Pr Bamol Ali SOW (Président), Pr Moctar CAMARA (Rapporteur), Dr Ibrahima DIBA (Examineur), Dr Emmanuel D. POAN (Examineur) d'avoir accepté d'évaluer ce mémoire.

Je voudrai faire part de ma profonde gratitude aux enseignants chercheurs du département de physique : Pr Bamol Ali SOW, Pr Moctar CAMARA, Dr Mamadou Lamine MBAYE, Dr Diouma KOBOR, Dr Joseph S DIATTA, Dr Samo DIATTA, Dr Ababacar NDIAYE, Dr Lat-grand NDIAYE, Dr Moustapha THIAM, Dr Modou TINE. Je remercie aussi Dr Edouard DIOUF du département de Mathématiques.

J'adresse mes remerciements à tous les chercheurs du LOSEC pour tous les moments passés ensemble dans la bonne humeur et dans un environnement scientifique qui m'a été profitable.

Je ne peux oublier de dire merci à mes parents, mes frères et sœurs, mes amis qui m'ont soutenu durant toutes mes études et surtout dans les moments les plus difficiles.

Résumé

La prévision du temps est d'une importance capitale pour les secteurs de développement comme l'agriculture, l'élevage, la pêche, etc. Les prévisions météorologiques reposent sur les modèles numériques qui simulent l'évolution de l'atmosphère. La gamme d'échelles spatiales impliquée rend particulièrement complexe la modélisation de la mousson africaine. Les modèles de prévision du temps représentant l'ensemble du système de mousson utilisent des mailles grossières (typiquement 20 à 300 km de résolution) et doivent donc représenter la convection nuageuse par des « paramétrisations ». Beaucoup de progrès ont été faits ces dernières années dans le développement de ces paramétrisations et, par conséquent, les modèles sont capables de représenter de façon relativement correcte les caractéristiques moyennes du système de mousson. Ces modèles ont en revanche été très peu évalués dans leur capacité à représenter de façon réaliste les systèmes convectifs de méso-échelle. Dans cette étude, nous avons utilisé WRF qui est un modèle à aire limitée. Nous avons testé plusieurs combinaisons de paramétrisations physiques disponibles. L'objectif principal de ce travail est d'obtenir la meilleure configuration possible du modèle de prévisions météorologiques (WRF) pour simuler les précipitations au Sénégal. Pour ce faire, nous avons utilisé les analyses GFS comme données de forçage. Des expériences de simulation s'étalant sur 24 heures (entre 06TU de J et 06TU de J+1) ont été réalisées pour les journées météorologiques du 05 septembre 2020 et du 02 août 2021 correspondant à des jours où de fortes précipitations ont été enregistrées. Une approche imbriquée a été utilisée avec un premier domaine à une résolution de 36 km couvrant l'Afrique de l'Ouest, un deuxième domaine à une résolution de 12 km et un troisième domaine couvrant le Sénégal à une résolution de 4 km. Les expériences sont réalisées en considérant huit configurations du modèle WRF qui combinent les paramétrisations physiques suivantes : la convection des cumulus, la microphysique, le rayonnement, la couche limite de surface et la couche limite planétaire. La performance du modèle WRF est évaluée en comparant les résultats aux données d'observation ENACTS et de 66 stations et postes pluviométriques. L'analyse des résultats du modèle indique que toutes les combinaisons physiques sont en bon accord avec les observations. Il a été aussi mis en évidence que les précipitations sont fortement sensibles aux schémas de cumulus. Les résultats suggèrent que le choix des schémas de microphysiques et de modèle de surface, ont moins d'impact sur les précipitations simulées par rapport aux schémas de cumulus. Parmi les configurations qu'on a testées, celle associant le schéma de cumulus G3D, le schéma de microphysique Thompson et les schémas de modèle de surface Noah MP LS a donné de meilleurs résultats pour le Sénégal.

Mots clés : ENACTS, données météo, prévisions météorologiques, modèle régional (WRF), skill des prévisions, Mousson Ouest-Africaine, schéma de paramétrisations, précipitations, GFS

Table des matières

Dédicaces	i
Remerciements.....	ii
Résumé.....	iii
Table des matières.....	iv
Liste des figures	vi
Liste des Tableaux	viii
Liste des abréviations.....	ix
Introduction.....	1
Chapitre 1 : Généralités sur la géographie, le climat de l’Afrique de l’ouest et la prévision numérique du temps	3
1.1. Les caractéristiques géographiques de l’Afrique de l’Ouest	3
1.1.1 Le relief.....	3
1.1.2. Les types de sol.....	4
1.1.3 La végétation.....	4
1.1.4 Le climat	5
1.2. Généralités sur le climat.....	7
1.2.1 La circulation générale de l’atmosphère	7
1.2.2. Les éléments majeurs de la mousson en Afrique de l’Ouest.....	9
1.3. Cas du Sénégal.....	15
1.4. Généralité sur la prévision numérique du temps (PNT) et les schémas de paramétrisation physique	16
1.4.1 Aspects généraux de la PNT	16
1.4.2 Les schémas de paramétrisation physique	21
Chapitre 2 : Données, méthodologies et outils	24
2.1 Les données.....	24
2.1.1 Les données liées aux conditions initiales et au forçage.....	24

Table des matières

2.1.2 Les données géographiques ou statiques	25
2.1.3 Les données de vérification	25
2.2 L’Outil et la méthodologie.....	26
2.2.1 Description du modèle WRF	26
2.2.3 Le choix des schémas de paramétrisation.....	30
2.2.4. Simulation avec le modèle WRF-ARW v4.1.2.....	32
2.3. Les méthodes statistiques utilisées.....	34
2.3.1. Le Biais	35
2.3.2. L’erreur moyenne absolue ou MAE	35
2.3.3. L’erreur quadratique moyenne (ou RMSE)	35
2.3.4. Régression linéaire simple et corrélation.....	36
Chapitre 3 : Résultats et discussions.....	40
3.1. Simulation des précipitations selon les cas d’études	40
3.1.1 Cas de l’événement météorologique du 05 septembre 2020	40
3.1.2 Cas de l’événement météorologique du 02 Août 2021	45
3.1. 3. Vérification des simulations : Table de contingence	49
3.1.4. Analyse de la simulation diurne de la précipitation.....	50
3.1.5 Analyse du diagramme de Taylor	52
3.2 Discussions	55
Conclusion et perspectives.....	56
Bibliographie.....	57
Annexe	61
namelist.WPS.....	61
namelist.input.....	61

Liste des figures

Figure 1.1 : Relief de l’Afrique de l’Ouest. Source Gael et Abdellahi, 2015	4
Figure 1.2 : Carte de la végétation de l’Afrique de l’Ouest. Source Beucher, 2010.	5
Figure 1.3 : Précipitations annuelles et régions agro-climatiques en Afrique de l’Ouest.....	6
Figure 1.4 : Bilan énergétique de la Terre (en W.m-2.an-1). Source : Kielh et Trenberth (1997).....	8
Figure 1.5 : Représentation schématique de la circulation atmosphérique globale. Adapté de	9
Figure 1.6 : 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. D’après (Drigeard, 2014).....	10
Figure 1.7 : Représentation 3D des différentes composantes de la circulation de la mousson Ouest-africaine. D’après (Drigeard, 2014).	10
Figure 1.8 : Coupe méridienne de la troposphère de l’Afrique de l’Ouest en juillet-août et types de temps associés (Dhonneur, 1974).	11
Figure 1.9 : Pluies journalières (en mm.jour-1) moyennées entre 10°E et 10°W. D’après Sultan et Janicot (2003).....	15
Figure 1.10 : Carte de la zone d’étude.....	16
Figure 1.11 : Les diverses échelles de mouvement et les phénomènes météorologiques associés avec leurs échelles de temps et d’espace. (Rio et al., 2014)	17
Figure 1.12 : Image montrant la discrétisation en 3D de l’Atmosphère terrestre.....	18
Figure 1.13 : Schéma conceptuel des interactions physiques dans les modèles de PNT (D’après Louis, 1980). Source : Voitus 2017.....	20
Figure 1.14 : Schéma d’une maille contenant en partie des nuages. Source : (« Le Manuel numérique max - Belin Education »)	22
Figure 2.1 : Localisation des stations et postes pluviométriques retenues pour évaluer le modèle WRF	26
Figure 2.2 : Les composantes du système de WRF (Skamarock et al., 2019).....	27
Figure 2.3 : Configuration d’emboîtement autorisées et non autorisées (Skamarock et al., 2019) ...	28
Figure 2.4 : Schéma illustratif des interactions entre les différentes paramétrisations physiques présentes dans le modèle WRF (Shamarock et al., 2019).....	29
Figure 2.5 : Domaine de simulation.....	33
Figure 2.6 : Schéma illustratif de la mise en œuvre de la simulation du modèle WRF. Source Komboigo et Zoungrana, 2018	34

Figure 3.1: Cumul des précipitations simulées par le modèle WRF dans le Domaine 3 (4km de résolution) pour la journée météorologique du 05 septembre 2020 – comparaison qualitative avec ENACTS (obs).....	41
Figure 3.2 : Différence entre le cumul des précipitations simulées par le modèle WRF dans le domaine 3 (4km de résolution) par rapport à ENACTS pour la journée météorologique du 05 septembre 2020.....	42
Figure 3.3 : Découpage du Sénégal en zones climatologiques homogènes à partir des données pluviométriques : source ANACIM.....	43
Figure 3.4 : Scores de différentes configurations du modèle WRF par rapport à ENACTS pour domaine 4Km.....	44
Figure 3.5 : Cumul des précipitations simulées par le modèle WRF dans le domaine 3 (4km de résolution) pour la journée météorologique du 02 Août 2021 – comparaison qualitative avec ENACTS (obs).....	45
Figure 3.6 : Différence entre le cumul des précipitations simulées par le modèle WRF dans le domaine 3 (4km de résolution) par rapport à ENACTS pour la journée météorologique du 02 Août 2021.....	46
Figure 3.7: Scores de différentes configurations du modèle WRF par rapport à ENACTS pour domaine 4Km.....	48
Figure 3.8: Récapitulatif des moyennes des scores de vérification pour la journée météorologique du 05 septembre 2020.....	49
Figure 3.9 : Récapitulatif des moyennes des scores de vérification pour la journée météorologique du 02 août 2021.....	50
Figure 3.10 : variation diurne des précipitations observation et simulées par le modèle pour la journée météorologique du 05 septembre 2020.....	51
Figure 3.11 : variation diurne des précipitations observation et simulées par le modèle pour la journée météorologique du 02 août 2021.....	51
Figure 3.12: Diagramme de Taylor entre les différentes configurations du modèle WRF et les observations ENACTS.....	53
Figure 3.13: Diagramme de Taylor entre le modèle WRF e Taylor entre les différentes configurations du modèle WRF et les observations ENACTS.....	54

Liste des Tableaux

Tableau 2.1: Schémas de paramétrisation utilisés pour les simulations. Les chiffres entre parenthèse désignent leurs codes de paramétrisation dans le modèle WRF version 4.1.2.....	31
Tableau 2.2 : Les combinaisons possibles des schémas de paramétrisation utilisés pour les simulations, représentées en parenthèses par WRF1 à WRF8.....	32
Tableau 2.3 : Présentation d'un tableau de contingence.....	37
Tableau 3.1 : Les quatre statistiques différentes pour la journée météorologique du 05 septembre 2020.....	53
Tableau 3.2 : Les quatre statistiques différentes pour la journée météorologique du 02 août 2021..	54

Liste des abréviations

- AEJ** : African Easterly Jet
- ANACIM** : Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie
- AROME** : Applications de la Recherche à l'Opérationnel à Méso-Echelle
- ARPEGE** : Action de Recherche Petite Échelle Grande Échelle
- ARW** : Advanced Research WRF
- CEDEAO** : Communauté Economique Des Etats de l'Afrique de l'Ouest
- ECMWF** : European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
- ENACTS** : Enhancing National Climat Services
- FAR** : False Alarm Rate
- FIT** : Front Intertropical
- G3D** : Schéma de convection Grell 3D
- GD** : Grell-Devenyi cumulus schème
- GES** : Gaz à Effet de Serre
- GFS** : Global Forecasting System
- GPCP** : Global Precipitation Climatology Project
- GRIB** : GRIdded Binary
- IGBP** : International Geospher-Biosphèr Program
- IRI** : Institut international de recherche sur le climat et la société
- ITD** : InterTropical Discontinuity
- JET** : Jet d'Est Tropical
- JOST** : Jet Ouest Sub-Tropical
- KF** : Kain-Fritsch cumulus scheme
- LAM** : Limited Area Mod

Liste des abréviations

LSM : Land Surface Model

MAE : Mean Absolute Error

MAO : Mousson de l’Afrique de l’Ouest

MCS : Mesoscale Convective Systeme

MODIS : MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer

MST : modèles de surface terrestre

MYJ : Mellor Yamada Janjic planetary boundary layer scheme

NCAR : National Center for Atmosphere Research

NCEP : National Centers for Environmental Prediction

NMM : Non hydrostatic Mesoscale Model

NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration

Noah MP : Unified Noah model

NSAS : Schéma de convection News Simplified Arakawa-Schubert

OMM : Organisation Météorologique Mondiale

PBL : couche limite planétaire

PIB : Produit Intérieur Brut

PNB : Produit National Brut

PNT : Prévision Numérique du Temps

POD : Probability Of Detection

RMSE : Root Mean Square Error

RRTMG : Rapid Radiative Transfer Model

RUC : Rapid Update Cycle land surface scheme

SHL : Saharan Heat Low

TK : Tiedtke cumulus scheme

Liste des abréviations

UTC : Temps Universel Coordonné

WPS : WRF Preprocessing System

WRF : Weather Reseach Forecast

YSU : Yonsei University planetary boundary layer scheme

ZCIT : Zone de Convergence Inter-Tropicale

Introduction

La météorologie est une science interdisciplinaire qui vise à comprendre les phénomènes atmosphériques. Le climat en Afrique de l'Ouest est modulé par des vents saisonniers de basse couche dénommés « mousson, alizé et harmattan ». La mousson occasionne un grand nombre de systèmes convectifs de méso-échelle ou MCS (Mathon et al., 2002 ; Lebel et al., 2003), responsables de la grande majorité des précipitations. La météo locale, en particulier les précipitations sont d'une importance capitale pour les populations du Sénégal, qui ont beaucoup d'activités liées à l'agriculture pluviale. Des prévisions météorologiques fiables mises à la disposition des usagers à temps permettront d'avoir des impacts majeurs sur les potentialités agricoles, la ressource en eau, la santé humaine, et affecter d'autres secteurs de l'économie tels que la production d'énergie, les transports et la pêche, etc.

En Afrique de l'Ouest, l'agriculture occupe une place de premier rang dans l'économie (Plus de 30% du PIB régional, plus de 55% de la population rurale (CEDEAO, 2015)). Une longue sécheresse peut entraîner des pénuries alimentaires pouvant conduire à des épisodes de famine comme cela a été le cas des années 1970. Des précipitations intenses peuvent également provoquer des inondations dont les bilans matériels et humains sont souvent lourds. Certaines maladies (paludisme, cholera, etc.) sont également sensibles aux variations pluviométriques et à la température (Martiny, et al., 2012). De ce fait, la vie des êtres humains restera toujours dépendante des conditions météorologiques. De très bonnes prévisions météorologiques mises à la disposition des usagers à temps peuvent réduire considérablement les pertes en vies humaines et les dégâts matériels mais aussi faciliter le travail dans les secteurs agricoles, pêches, l'aviation etc.

Grâce à l'évolution de la technologie, surtout en termes d'informatique, et les études avancées sur l'état de l'atmosphère, la prévision du temps devient de plus en plus précise. Un modèle météorologique est d'une très grande complexité avec un nombre important de processus et d'interactions atmosphère-océan-biosphère. Ces modèles, n'ont cessé d'évoluer au cours de ces dernières décennies en intégrant des paramétrisations physiques de plus en plus réalistes, performantes et en exploitant des observations de différentes natures (Karbou et al., 2012).

La pluie est un processus météorologique d'une grande variabilité dans le temps et dans l'espace dans difficile à prévoir. Cette difficulté de la prévoir est davantage accrue dans les régions d'Afrique subsaharienne où les systèmes météorologiques évoluent sur des échelles plutôt locales. Aussi, ces régions exploitent pour la plupart des sorties de modèles globaux dont la résolution spatiale est en général très large en comparaison avec la taille des systèmes météorologiques (Diop-Kane et al, 2018).

Introduction

Les faiblesses de ces modèles dans cette région du monde s'expliquent également par des lacunes dans la représentation de certains phénomènes physiques, exacerbées par le déficit d'observations qui seraient nécessaires pour les ajuster (Lafore, 2007 ; Karbou et al, 2012).

La prévision numérique du temps (PNT) est aujourd'hui incontournable pour prévoir l'état de l'atmosphère. Il existe de nombreux modèles dans ce domaine d'application. Au Sénégal, l'Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie (ANACIM) dans sa mission de prévision du temps, cherche une meilleure configuration du modèle Weather Research and Forecasting (WRF) pour améliorer la prévision météorologique au Sénégal. Ce travail s'inscrit dans ce cadre et vise à déterminer laquelle des configurations faites à partir de combinaison de schémas de paramétrisation physique dans le modèle WRF simulent le mieux les précipitations au Sénégal. Ainsi, l'objectif général de cette étude est d'évaluer la performance du modèle WRF pour la prévision de la précipitation. Plus précisément, les objectifs spécifiques pour atteindre cet objectif global consistent à :

- Choisir différentes configurations du modèle WRF telles que proposées par des études précédentes effectuées sur l'Afrique de l'Ouest
- Faire des tests de sensibilité des paramétrisations
- Évaluer les configurations testées

Ce rapport de mémoire est organisé en trois (3) chapitres précédé par une introduction et se termine par une conclusion. Le premier chapitre est consacré aux aspects géographiques ainsi que les éléments météorologiques majeurs spécifiques à la zone d'étude. Dans le deuxième chapitre, nous présenterons les données, la méthodologie et les outils utilisés dans le cadre de cette étude. Le dernier chapitre est réservé à l'analyse des simulations et la discussion des résultats.

Chapitre 1 : Généralités sur la géographie, le climat de l’Afrique de l’ouest et la prévision numérique du temps

Nous abordons dans ce chapitre la zone d’intérêt de notre étude qui est l’Afrique de l’Ouest. Le Sénégal qui est le domaine de simulation, se trouve sur la côte Ouest de cette partie de l’Afrique. La connaissance des aspects géographiques (relief, végétation, hydrographie et nature des sols) et des conditions météorologiques et climatologiques de la zone d’intérêt est très importante aussi bien pour les prévisionnistes que pour les modélisateurs car elle permet de tenir compte des spécificités de la région.

Nous évoquerons d’abord les caractéristiques géographiques de l’Afrique de l’Ouest, ensuite les éléments majeurs qui pilotent le mécanisme de la mousson Ouest Africaine et enfin la prévision numérique du temps (PNT).

1.1. Les caractéristiques géographiques de l’Afrique de l’Ouest

L’Afrique de l’Ouest se situe entre le tropique de Cancer et l’équateur. Sur le plan de la longitude, elle se localise entre 17° ouest et 20° est. 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 Tchad, au sud-est par le massif d’Adamaoua. Elle présente un relief peu contrasté, un sol laissant entrevoir un type dominant, une hydrographie dominée par deux bassins et une répartition de sa végétation quasiment zonale.

1.1.1 Le relief

La région Ouest Africaine est caractérisée par un relief composé de vastes plaines, plateaux de faible altitude (inférieure à 300 m) et de massifs montagneux. Les plaines occupent la bordure littorale sur le Sénégal et la Gambie, tandis qu’à l’intérieur les bas plateaux dominent. Les plateaux de moyenne altitude et les massifs montagneux marquent les bordures sud et nord-est de l’Afrique de l’Ouest. En outre, il y a quelques zones montagneuses isolées qui sont au-dessus de 500m d’altitude et certains sommets dépassent 1000 m. Les plus importants sommets sont : au sud-ouest, le Fouta-Djalou (1537 m) et le mont Nimba (1752 m) ; au sud-est le plateau de Jos (1280 m) ; au nord-est le massif de l’Aïr (2022 m), le Hoggar (2900 m) et le Tibesti (3400 m) (Bouali, 2009).

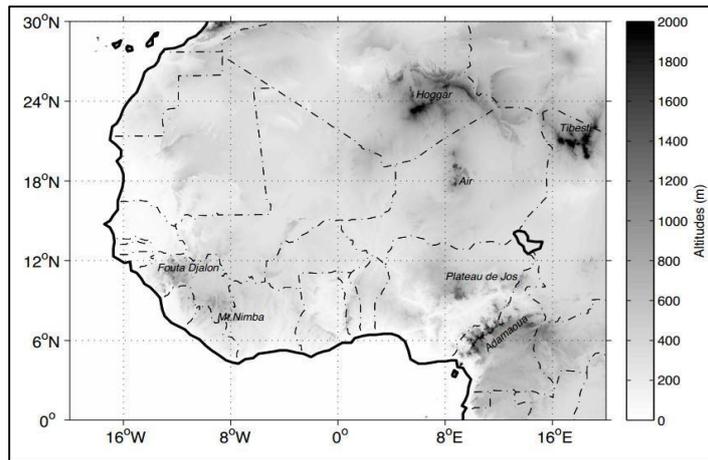


Figure 1.1 : Relief de l'Afrique de l'Ouest. Source Gael et Abdellahi, 2015

1.1.2. Les types de sol

La plus grande partie de l'Afrique de l'Ouest repose sur un socle précambrien rigide, constitué de roches cristallines et métamorphiques, résistant à l'érosion. Au sud du Nigeria, du Bénin, du Togo et jusqu'au Sénégal, on retrouve des roches sédimentaires très jeunes.

Les principales grandes catégories de sol en Afrique de l'Ouest sont au nombre de cinq (05):

- **les sols ferralitiques** : ce sont des sols des régions humides et possèdent en commun une très grande épaisseur et des couleurs vives, le plus souvent rouges ;
- **les sols ferrugineux** : qui sont des sols à profil différencié, peu à moyennement épais, de teinte claire ;
- **les sols à argiles gonflantes** : qui représentent la troisième grande catégorie de sols qui constitue un ensemble caractérisé par la dominante, voire l'exclusivité, sur le profil entier, d'argiles smectiques saturées en bases dès une faible profondeur. Ces sols présentent une assez grande réserve d'éléments utiles aux plantes ;
- **les sols bruns subarides** : qui se caractérisent par un profil coloré par la matière organique avec une faible épaisseur ;
- **les sols hydromorphes** : qui sont caractérisés par un profil dominé par un excès d'eau provoquant l'engorgement permanent d'une partie ou de la totalité du profil.

1.1.3 La végétation

Les formations végétales en Afrique de l'Ouest s'organisent clairement par des bandes zonales avec un gradient nord-sud de la densité végétale suivant les ressources en eau des sols (Bouali, 2009). Telle qu'elle a été définie par Mayaux et al., (2003) la couverture végétale s'organise en trois grandes zones entre le Golfe de Guinée et le Sahara à savoir :

- Les forêts : On retrouve des forêts denses, essentiellement sur le long de la côte du Golfe de Guinée ; des forêts montagnardes et sub-montagnardes vers le mont Cameroun, le Libéria, la Guinée et le Sierra Leone ; des forêts de mangroves sur l'extrême côte Ouest et enfin des forêts humides sur les côtes du Libéria, Côte d'Ivoire, Ghana et Togo.
- La savane : On distingue la savane boisée décidue au nord des forêts humides (sur le domaine soudano-guinéen) ; la savane arborée au nord du domaine soudano-sahélien ; la savane arbustive sur le nord du Cameroun et enfin la savane herbacée autour du lac Tchad, au Niger et au Mali ;
- Les zones agricoles : On observe des terres cultivées (50% des cultures) sur toute la ceinture sahélienne ; de la végétation sèche (30%) plus au sud, de l'agriculture irriguée et des vergers au bord du fleuve Niger (Mali).

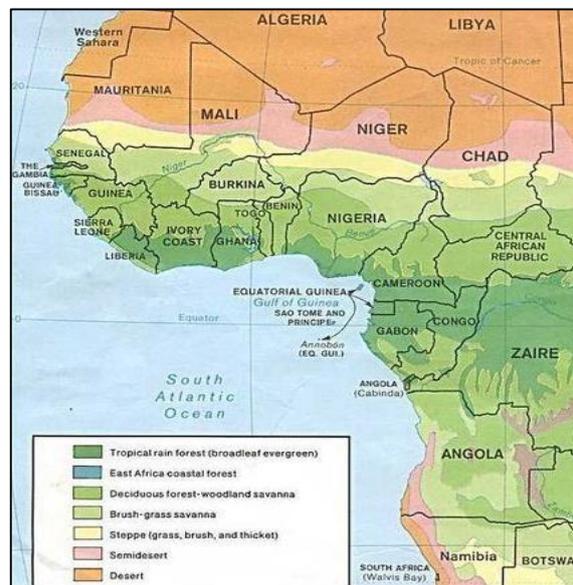


Figure 1.2: Carte de la végétation de l'Afrique de l'Ouest. Source Beucher, 2010.

1.1.4 Le climat

L'Afrique occidentale est entièrement située dans la zone intertropicale, caractérisée par un climat chaud. La température moyenne annuelle est supérieure à 20°C dans toute cette zone et les amplitudes thermiques annuelles ou journalières ne sont élevées que dans les zones désertiques. C'est le régime des pluies qui détermine les principales variations climatiques (Ouédraogo, 2017).

La saison pluvieuse ou hivernage est de plus en plus courte quand on remonte vers le nord, en direction du tropique de Cancer (FEWS, 2007). Ces aspects climatiques permettent de distinguer les climats suivants, du sud au nord :

- Le climat guinéen ou climat tropical humide, proche du climat équatorial par l'abondance des précipitations, se distingue par l'existence de trois saisons : deux saisons des pluies, de mai à juin et d'octobre à novembre (varie plus ou moins selon les régions), et la saison sèche. On rencontre particulièrement ce type de climat le long du Golfe de Guinée, de la Sierra Leone à la Côte d'Ivoire où les précipitations sont cependant inférieures à 1500 mm par an sauf sur les hauts reliefs.
- Le climat soudanien ou climat tropical sec, avec une saison sèche qui s'allonge à mesure que l'on se rapproche du Tropique de Cancer. La sécheresse est accentuée par l'harmattan (vent sec qui souffle à partir du secteur nord-est vers l'océan Atlantique). Les précipitations annuelles dépassent 1000 mm au sud du Mali mais restent inférieures à 800 mm au nord du Nigeria ;
- Le climat steppique ou sahélien qui marque le passage du climat tropical sec au climat désertique : c'est donc un climat subdésertique. Les pluies sont de plus en plus rares (moins de 500 mm) et ne tombent que pendant trois mois (juillet-août-septembre). Surtout, elles sont irrégulières d'une année à l'autre. Les températures sont plus élevées que dans les régions humides et atteignent 40° C à la fin de la saison sèche.
- Le climat saharien ou climat désertique se caractérisant par une pluviométrie annuelle normalement inférieure à 150 mm et une saison des pluies qui, en général, dure à peine 1 mois. Ce type de climat se rencontre au-delà du tropique de cancer.

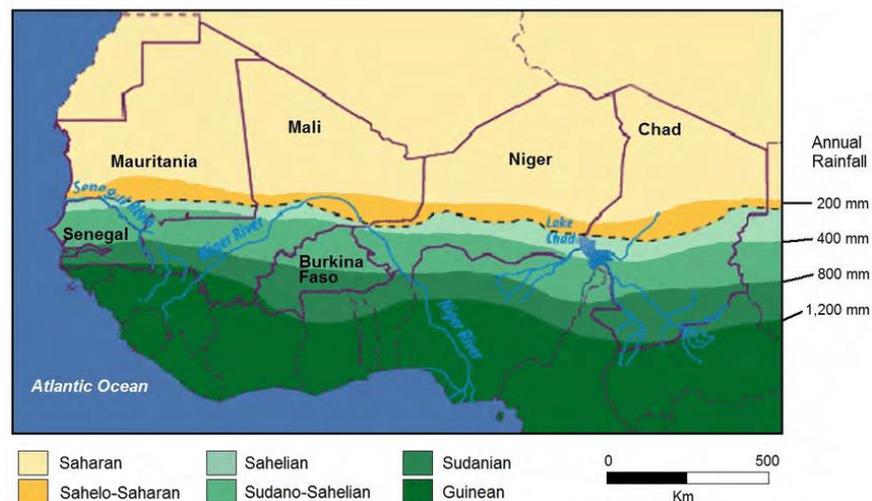


Figure 1.3: Précipitations annuelles et régions agro-climatiques en Afrique de l'Ouest
Source : (FEWS, 2007)

Les caractéristiques géographiques (position, orographie, végétation, etc.) de la région Ouest africaine jouent un rôle essentiel dans la circulation atmosphérique. En effet elles constituent des facteurs importants de la mousson africaine et de la genèse des systèmes convectifs surtout en été boréal.

1.2. Généralités sur le climat

Selon l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM), le climat est défini comme « la synthèse des conditions météorologiques dans une région donnée, caractérisée par des statistiques à long terme (valeurs moyennes, variances, probabilités de valeurs extrêmes, etc.) des éléments météorologiques (températures, précipitations, vents) dans cette région ».

1.2.1 La circulation générale de l'atmosphère

Le climat à la surface de la Terre est régi par les lois du système climatique, système complexe dont les principales composantes sont l'atmosphère, la lithosphère (surface terrestre), l'hydrosphère (lacs, mers, océans et autres plans d'eau), la cryosphère (les glaces du monde entier) et la biosphère (l'ensemble des êtres vivants, en particulier la végétation, ainsi que la matière organique des sols). Ces 5 composantes sont en interaction permanente par l'intermédiaire de phénomènes physiques, chimiques et biologiques tels que le rayonnement, le cycle de l'eau, le cycle du carbone, le transfert de chaleur, de mouvement, etc. Le climat en tant que tel est la résultante aux échelles locales/régionales de ces processus, ce qui explique la complexité et la diversité des climats existants sur Terre (Lespinas, F., 2008).

La circulation générale est le mouvement à l'échelle planétaire de la couche d'air entourant la terre qui redistribue la chaleur provenant du soleil en conjonction avec la circulation océanique. C'est l'ensemble des grands mouvements horizontaux et verticaux de l'atmosphère sur toute l'étendue du globe (Eric et Bernard, 2001). Le moteur principal des mouvements atmosphériques est le soleil. Celui-ci fournit de l'énergie à la Terre, essentiellement aux très courtes longueurs d'ondes et dans le proche infrarouge, que l'atmosphère capte et redistribue (Figure 1.4). Une partie seulement de ce rayonnement traverse l'atmosphère, tandis que la majorité est absorbée et/ou renvoyée vers la surface par les nuages et les molécules de Gaz à Effet de Serre (GES: vapeur d'eau, dioxyde de carbone, méthane, oxyde nitreux, ozone, etc.). La fraction du rayonnement qui est renvoyée vers la surface terrestre contribue à réchauffer celle-ci ainsi que les basses couches de l'atmosphère, créant une température annuelle moyenne de 14°C à la surface du globe au lieu de -18° C qui devrait normalement s'observer sans effet de serre (Sadourny, 1994).

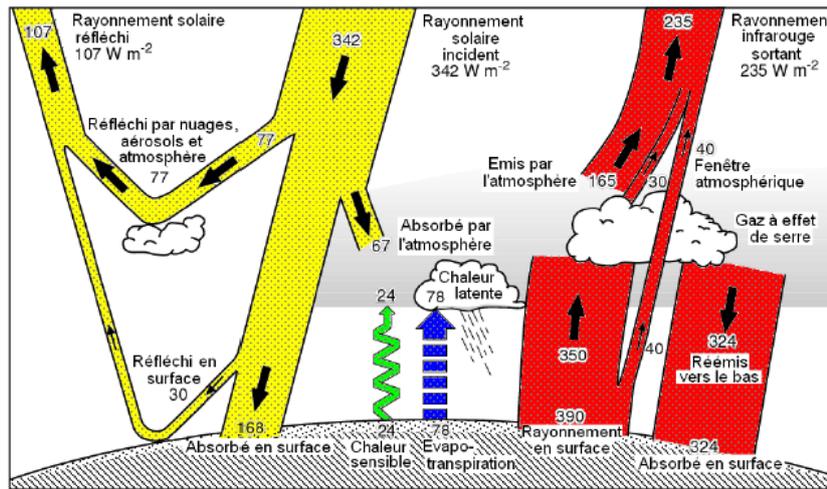


Figure 1.4: Bilan énergétique de la Terre (en $W \cdot m^{-2} \cdot an^{-1}$). Source : Kielh et Trenberth (1997).

L'énergie de la Terre réchauffe à son tour l'air ambiant. Des mouvements ascendants se créent, mais en s'élevant, l'air se refroidit, environ $1^{\circ} C$ tous les 100 m dans la troposphère, ce qui le rend instable en atteignant la tropopause. L'air redescend alors vers le sol. Cette circulation constitue un courant de convection. De telles boucles de circulation portent le nom de cellule. Les différentes cellules sont disposées en bandes selon les latitudes : c'est une organisation zonale. Le modèle de circulation générale proposé comporte trois cellules de convection dans chaque hémisphère : une cellule équatoriale dans le sens direct dite cellule de Hadley (Plakhova et al., 2019), une cellule à circulation inverse de la précédente dite cellule de Ferrel et une cellule polaire à nouveau à circulation directe. L'Afrique de l'Ouest étant située dans la région équatoriale, rassemble les cellules de Hadley. L'air est surchauffé par le soleil et est allégé puis il s'élève vers le haut de la troposphère et aspire l'air situé tout autour. Il engendre ainsi des vents qui convergent vers l'équateur. Sous l'influence de la force de Coriolis, l'air venant du nord est dévié vers la droite, celui venant du sud l'est vers la gauche (ce sont les alizés). Le courant ascendant des alizés se charge en humidité lors de son passage au-dessus des océans. En traversant la troposphère il se refroidit et s'assèche par condensation dans les hautes altitudes, et il perd progressivement de la vitesse. Il ne parvient pas à dépasser l'altitude de la tropopause qui est très stable, mais son débit massique doit être conservé. Ceci n'est possible que si sa trajectoire se courbe sous la forme de vents horizontaux orientés, soit vers le nord, soit vers le sud, selon l'hémisphère, formant ainsi deux cellules convectives. Ces courants ne restent pas dans le plan zonal, car bien avant qu'ils atteignent les pôles, la force de Coriolis a pour effet de dévier leurs trajectoires, systématiquement vers l'est, dans l'hémisphère nord comme dans l'hémisphère sud. Cette pseudo-force, les empêche donc de demeurer dans les plans méridiens et impose une circulation atmosphérique en hélice au sein de cette cellule de Hadley. L'influence de la force de Coriolis limite

ainsi l'étendue de cette cellule de Hadley à des latitudes voisines de plus ou moins 30° C (Ringard 2014).

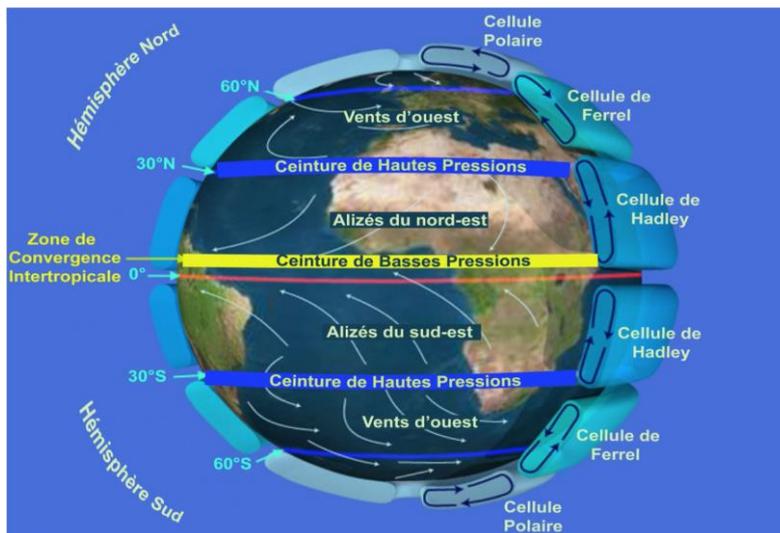


Figure 1.5: Représentation schématique de la circulation atmosphérique globale. Adapté de Srinivasan (2006).

1.2.2. Les éléments majeurs de la mousson en Afrique de l'Ouest

La circulation de mousson africaine s'organise à l'échelle régionale autour d'éléments clés du mouvement en haute et moyenne troposphère (le Jet d'Est Tropical et le Jet d'Est Africain), ainsi qu'en basse troposphère (le flux de mousson et l'harmattan). Elle implique une zone de confluence en basses couches connue sous le nom de Front Intertropical (FIT) ainsi que deux principales structures convectives : la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT), caractérisée par un maximum de température potentielle équivalente (Θ_e), et la dépression thermique saharienne associée à un maximum de température potentielle (Θ). La figure 1.6 représente un schéma regroupant tous les composants clés du système de mousson africain et les interactions entre elles. La figure 1.7 reprend les mêmes éléments pour une vision plus globale en trois dimensions.

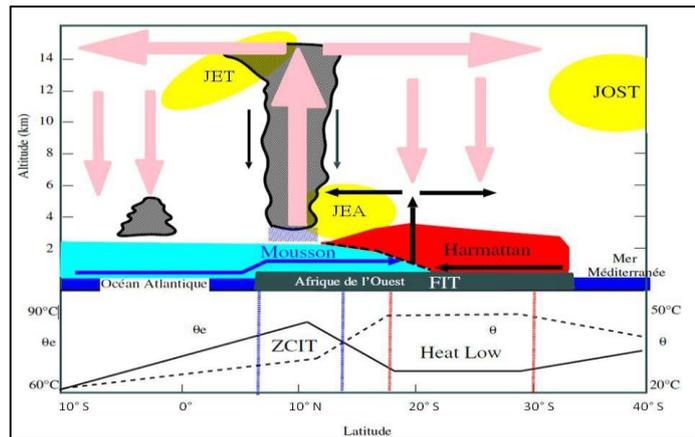


Figure 1.6: Schéma conceptuel de la MAO selon une coupe moyenne zonale et profils méridiens de température potentielle θ et température potentielle équivalente θ_e dans la couche limite. D’après (Drigeard, 2014)

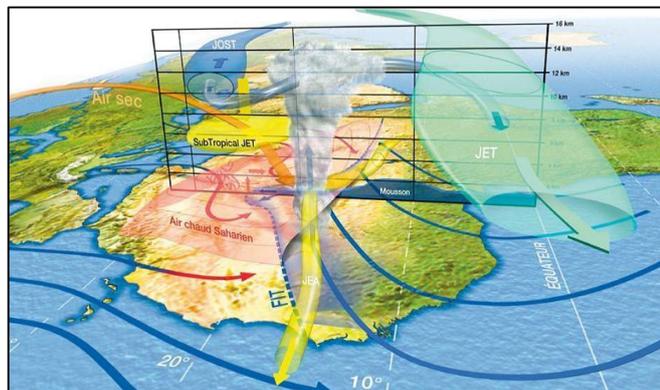


Figure 1.7: Représentation 3D des différentes composantes de la circulation de la mousson Ouest-africaine. D’après (Drigeard, 2014).

1.2.2.1 Le flux de mousson

La mousson Ouest Africaine est une réponse dynamique et hydrique de l’atmosphère au différentiel énergétique entre l’océan et le continent. Concrètement, les alizés de l’Atlantique Sud dirigés par les hautes pressions de l’anticyclone de Sainte-Hélène se chargent d’humidité et prennent une orientation sud-ouest sous l’effet de la force de Coriolis après avoir traversé l’équateur. De forts contrastes existent entre les eaux de l’océan Atlantique à faibles variations thermiques et les régions désertiques du Sahara. En effet, l’établissement de la dépression thermique du Sahara et l’anticyclone de Saint Héléne au-dessus de l’Océan produisent d’importants gradients nord-sud de pression, d’humidité et de température et donc d’énergie statique humide dans les basses couches. Ceux-ci sont renforcés par un refroidissement des eaux lié aux remontées d’eaux froides et aux ondes équatoriales et qui s’installe en mai dans le golfe de Guinée. Une circulation divergente cellulaire est produite dans toute la troposphère

Généralités sur la géographie, le climat de l’Afrique de l’ouest et la prévision numérique du temps

par le différentiel énergétique. Elle couple dans les basses couches la divergence des flux de l’Atlantique du Sud et Equatorial à leur convergence au-dessus du continent qui alimente la convection humide. L’intensification des gradients de flux d’énergie a lieu au printemps et précède la migration des maxima de convergence du flux d’humidité et donc des précipitations. La pénétration du flux d’humidité, donc du flux de mousson, à l’intérieur du continent correspond à une relaxation des gradients horizontaux et verticaux d’énergie. Ceci définit les différents types de temps et les saisons de pluies (figure 1.8) centrées sur mai-juin et septembre-octobre en régions guinéennes, sur juillet-août en régions soudano-sahéliennes et explique la distribution quasi-zonale des isohyètes annuelles caractérisées par une forte diminution vers le nord (de 1500-2000 mm sur le golfe de Guinée à 100 mm vers 20° N).

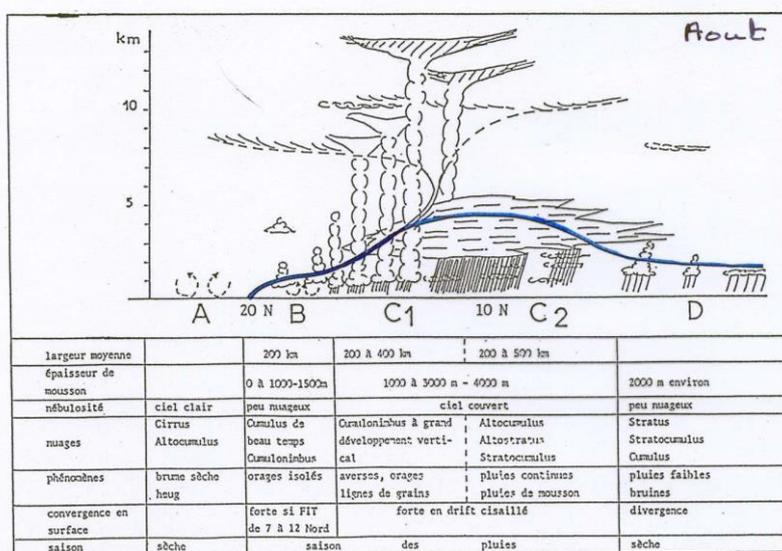


Figure 1.8: Coupe méridienne de la troposphère de l’Afrique de l’Ouest en juillet-août et types de temps associés (Dhonneur, 1974).

Venant de l’océan Atlantique, le flux de mousson est chargé d’humidité et alimente les cellules de convection profonde au niveau de la ZCIT. Il est représenté en bleu clair sur la figure 1.6 et joue un rôle capital pour l’agriculture, essentiellement tributaire des précipitations. Ainsi la mise en place de la mousson est déterminante dans les régions sahéniennes. Elle s’opère par une transition brusque des précipitations entre 5° et 10° N.

Les gradients d’énergie entre l’océan et l’atmosphère jouent un rôle non seulement dans la circulation de basses couches mais également dans la circulation de la moyenne troposphère marquée par la présence du Jet d’Est Africain (JEA).

1.2.2.2 Le flux d'harmattan

Présent en basse troposphère également, l'harmattan est associé aux alizés du nord-est. C'est un flux sec, en provenance de l'Afrique du nord, chaud en été et froid en hiver. Il est particulièrement intense en hiver (jusqu'à 8 m/s en moyenne), période à laquelle il est associé à une circulation anticyclonique située sur la Lybie et beaucoup plus faible en été (3 à 5 m/s) quand il est associé à une dorsale anticyclonique localisée sur le bassin méditerranéen (Beucher, 2010). Sur la figure 1.6 ce flux est représenté en rouge.

1.2.2.3 Le Front Inter Tropical

La rencontre du flux de mousson, avec le flux d'Harmattan crée une zone de confluence en basses couches, appelée Front Inter Tropical (FIT) ou InterTropical Discontinuity (ITD) dans le monde anglo-saxon. Il est représenté en pointillés noirs sur la figure 1.6. Comme on le voit sur ce schéma, le FIT présente une structure inclinée. C'est le cas au cœur de la mousson d'été, mais l'inclinaison disparaît en hiver, lorsque ce front se retire vers la côte (Beucher, 2010).

1.2.2.4 Le Jet d'Est Africain (JEA)

C'est un courant atmosphérique de moyenne troposphère, situé au-dessus des flux de mousson et d'Harmattan (comme l'indique la figure 1.6), aux environs de 650 hPa. En période intense de mousson, il se situe entre 13° N et 15° N et il peut atteindre la vitesse de 11 m/s au-dessus de l'Afrique de l'Ouest. Le JEA a une origine thermique, liée au gradient méridien de température (Burpee, 1972; Thorncroft et Blackburn, 1999) et d'humidité entre le Sahara (chaud et sec) et le golfe de Guinée (plus froid et humide). Ce gradient génère un cisaillement vertical de vent d'est, qui joue un rôle très important dans la formation des lignes de grains tropicales ou d'autres systèmes convectifs.

1.2.2.5 Le Jet d'Est Tropical (JET)

Il s'agit d'un courant de haute troposphère dont le cœur est situé entre 100 et 200 hPa. Il se positionne sur l'Afrique de l'Ouest vers 10° N entre fin juin et début septembre. Sa vitesse moyenne en période de mousson est de 15 à 18 m/s. Le JET tient son origine dans le contraste thermique de la haute et moyenne troposphère au-dessus de l'océan indien et de la surface terrestre (montagnes du Tibet). A grande échelle le JET est alimenté par la mousson indienne via l'une des cellules de Walker appelée « mousson transverse ». Cette cellule permet de transporter de l'énergie potentielle sur des distances importantes, ce qui participe au maintien du JET jusqu'en Afrique de l'est. D'autre part, ce courant atmosphérique se renforce sur l'Afrique de l'Ouest grâce au chauffage thermique de surface qui se produit au niveau du désert du Sahara. Le JET est aussi renforcé par les circulations divergentes au sommet de la ZCIT.

1.2.2.6 Le Jet d'Ouest SubTropical (JOST)

Le Jet d'Ouest SubTropical est un courant d'air rapide et confiné que l'on trouve dans l'atmosphère. Il est situé à proximité de la tropopause, entre la troposphère (où la température décroît avec l'altitude) et la stratosphère (où la température croît avec l'altitude), généralement entre 7 et 16 kilomètres au-dessus du niveau de la mer. Il peut atteindre jusqu'à 30 ou 40 m/s et se localise à environ 30° N de latitude en période de mousson. Le JOST est plus intense en hiver boréal qu'en été boréal.

1.2.2.7 La Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT) et les Mesoscale Convective System (MCS)

La Zone de Convergence Intertropicale est une zone de convections profondes correspondant aux ascendances maximales. Considérée comme limite entre les deux (2) cellules de Hadley nord et sud, la ZCIT constitue une véritable barrière donnant à chaque hémisphère son autonomie énergétique.

Sur l'Afrique de l'Ouest elle se situe en été vers 10° N de latitude et est le siège de l'activité convective la plus intense à travers la formation de systèmes nuageux de méso-échelle appelés MCS (*Mesoscale Convective Systems*). Les systèmes convectifs peuvent être divisés en 3 grandes parties sur la base de leurs capacités à s'alimenter continuellement en masses d'air instable et humide :

- Les systèmes unicellulaires (ou isolés) : ce sont des nuages constitués d'une cellule unique avec des précipitations au sol limitées. Leur durée de vie est de quelques heures avec une forte signature diurne.
- L'orage multicellulaire : c'est un système qui est composé de plusieurs cellules convectives à différents stades de développement. Pour qu'un orage multicellulaire se forme, on doit être en présence d'une atmosphère marquée par une forte humidité dans les basses couches, un fort cisaillement de vent dans les basses couches et un environnement instable sur le plan thermodynamique.
- Les systèmes convectifs de méso-échelles : ce sont les systèmes convectifs les plus développés. Selon Houze (1979) : « un système convectif de méso-échelle est un système nuageux qui apparaît en association avec des orages produisant une zone continue de précipitations d'extension horizontale de l'ordre de 100 km ou plus dans au moins une direction ». Ces systèmes regroupent les lignes de grains qui sont responsables de la majeure partie de la pluviométrie annuelle en Afrique de l'Ouest et peuvent aussi se transformer en cyclones sur l'Atlantique du nord.

1.2.2.8 La Dépression Thermique Saharienne

Encore appelée Saharan Heat Low (SHL) en anglais, elle se positionne à environ 20° N, position où l'activité convective dite « sèche » est très intense. Cette convection a pour rôle d'évacuer verticalement l'excédent d'énergie des basses couches. C'est une zone d'ascendance moins développée verticalement que la ZCIT car elle est limitée par la subsidence de grande échelle liée à la circulation méridienne (cellule de Hadley) de l'hémisphère nord.

1.2.2.9 Les Ondes d'Est Africaines

Les ondes d'Est Africaines sont des systèmes tropicaux qui sont associés à une perturbation, une ondulation dans le champ de vent en basse ou moyenne troposphère et qui se déplacent d'est en ouest. Ce sont des perturbations d'échelle synoptique que l'on observe entre la surface et la moyenne troposphère (vers 500 hPa) depuis l'Afrique de l'Est sur le Soudan, la Centrafrique, le Tchad jusqu'au large des côtes guinéennes et sénégalaises en passant par le Niger, le Nigeria, le Burkina Faso, le Mali, *etc.*

Il faut également noter que la mousson Ouest Africaine s'établit selon 3 phases (**Sultan et Janicot, 2003**) :

- La pré-onset : qui correspond à l'installation de la mousson sur la zone guinéenne. Elle se déroule en moyenne autour du 14 Mai, et correspond à la première augmentation nette des précipitations sur la zone guinéenne.
- L'onset appelé saut de mousson ; elle est caractérisée par une phase de déclin de la convection centrée sur la zone guinéenne avant que celle-ci ne redémarre dans la zone Sahélienne. Au cours de l'onset, la ZCIT passe d'une position centrée sur 5° N en Mai-Juin à une latitude de 10° N pour Juillet-Aout (voir figure 1.9).
- Phase d'établissement de la mousson, durant cette phase on assiste à l'installation totale de la mousson dans la zone Sahélienne, donc au cœur de la saison de pluies : de fortes précipitations.
- La phase de retrait correspond à la fin de la mousson dans la zone Sahélienne, donc fin des pluies au niveau du Sahel et se produit vers septembre et octobre ; et correspond à la seconde saison des pluies dans la zone guinéenne.

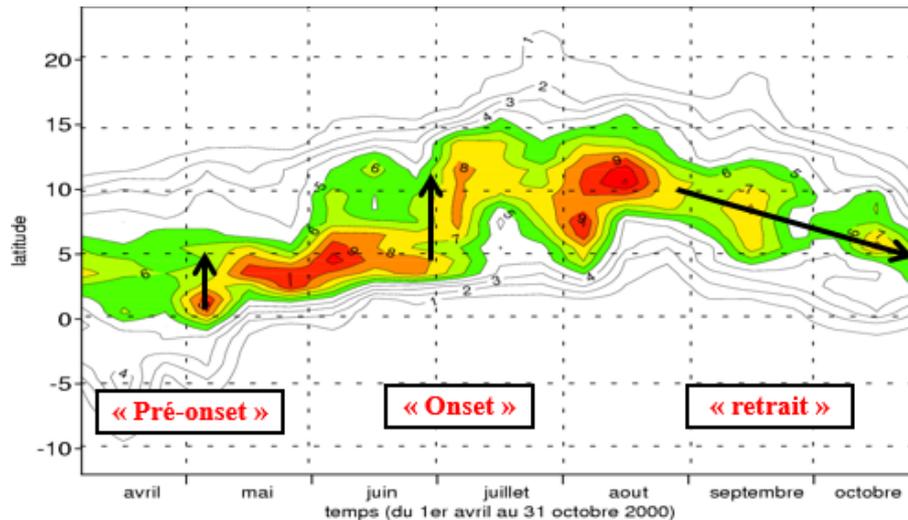


Figure 1.9: *Pluies journalières (en mm.jour-1) moyennées entre 10°E et 10°W. D'après Sultan et Janicot (2003)*

1.3. Cas du Sénégal

Le Sénégal est un pays de l'Afrique de l'Ouest et couvre une superficie de 196 722 km². Il se situe entre 12 ° et 17 ° de latitude nord et 11° et 18° de longitude ouest de longitude (Figure 1.10) et est situé sur la côte pacifique du continent, entre la Mauritanie, le Mali, la Guinée et la Guinée-Bissau. Un gradient climatique selon un axe nord-sud illustre la variabilité spatiale de l'abondance des précipitations dans le pays. Le nord du Sénégal est sous climat sahélien (moins de 300-400 mm de pluies par an), l'intérieur du pays est caractérisé par les deux domaines climatiques sahélo-soudanien (400-700 mm/an) et soudanien (700-1000 mm/an), le sud est quant à lui sous climat soudano-guinéen et sub-guinéen avec des précipitations allant de 1000 mm à 1250 mm par an environ (Bouali et al. 2009) . Deux saisons se distinguent au long de l'année : la saison sèche marquée principalement par une absence de précipitations dans la majeure partie du pays, et la saison des pluies ou hivernage (Juin-Octobre) caractérisée par l'arrivée de la mousson africaine (Muller et al. 2010 ; Salack et al. 2011). La saison des pluies a lieu entre les mois de juin et octobre selon les régions, avec un pic de précipitations atteint au mois d'août (figure 1.9). La variabilité interannuelle des pluies est élevée, avec des cumuls annuels pouvant varier du simple au double selon les années.

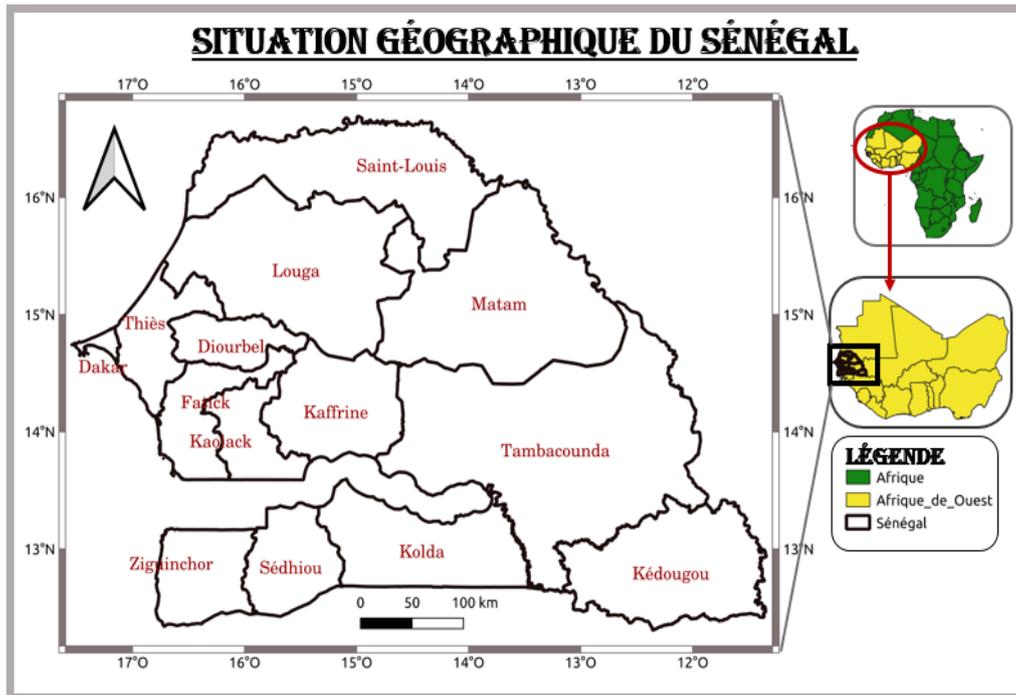


Figure1.10 : Carte de la zone d'étude

1.4. Généralité sur la prévision numérique du temps (PNT) et les schémas de paramétrisation physique

1.4.1 Aspects généraux de la PNT

La PNT est une science qui utilise un système informatique pour simuler le comportement de l'atmosphère afin de déterminer son état futur. Elle est utilisée soit comme un laboratoire numérique pour étudier les processus atmosphériques et mieux les comprendre, soit comme un outil d'aide à la prévision du temps ou du climat (Malardel, 2018). Depuis son apparition, la PNT est en perpétuelle évolution au rythme des avancées technologiques. Elle est devenue de nos jours un outil incontournable pour les prévisionnistes et pour tous ceux qui s'intéressent à l'évolution des phénomènes météorologiques.

1.4.1.1 Modélisation de l'atmosphère

L'atmosphère en tant que fluide géophysique est régie par des équations physiques permettant de décrire ses processus. Les lois de base qui décrivent l'évolution de l'état de l'atmosphère sont celles de la mécanique des fluides. Ce sont des équations qui font intervenir des processus à des échelles très différentes, de l'échelle de la planète à celle de la goutte de pluie, ainsi que les interactions avec la surface sous-jacente (sol, mer, couverture végétale) et l'espace.

1.4.1.1.1 Notion d'échelle

Les excitations extérieures (variation de l'énergie solaire, interaction avec la surface terrestre ou océanique, etc.) que subit l'atmosphère créent en son sein une forte variabilité dans l'espace et dans le temps. En réaction à ces excitations, des circulations se mettent en place, en général dans le but d'une homogénéisation de l'état du fluide, d'un retour vers l'état d'équilibre. Les dimensions spatiales et temporelles de ces circulations peuvent varier de la taille de la planète à moins d'un millimètre et de plusieurs années à moins d'une seconde figure 1.11 (Malardel, 2009).

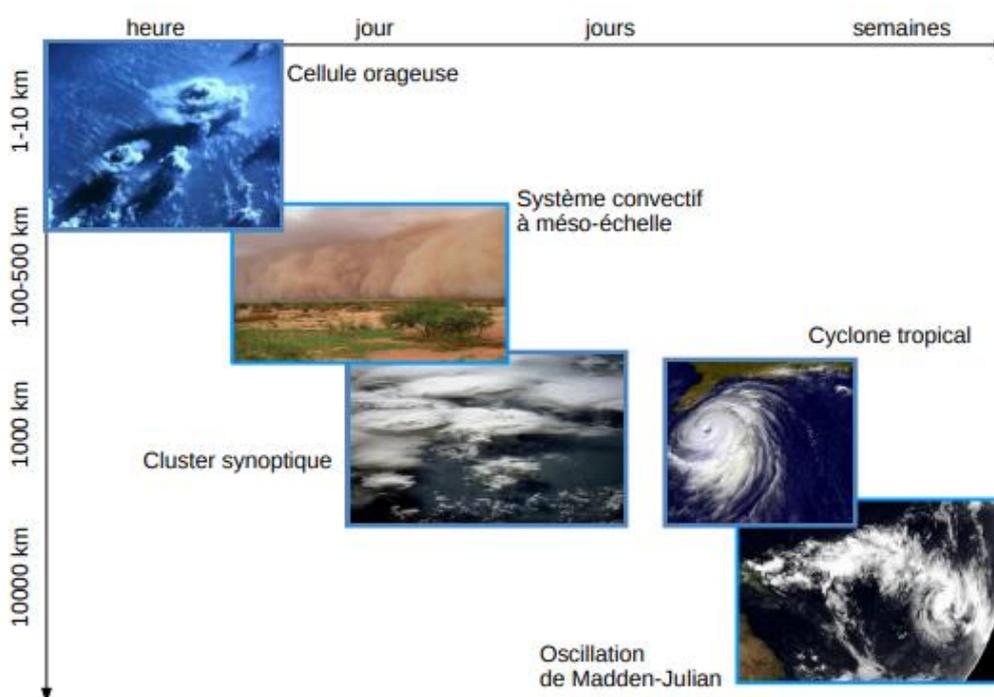


Figure 1.11: Les diverses échelles de mouvement et les phénomènes météorologiques associés avec leurs échelles de temps et d'espace. (Rio et al., 2014)

1.4.1.1.2 Les caractéristiques des modèles

La connaissance des caractéristiques d'un modèle peut s'avérer importante pour un exploitant en météorologie opérationnelle. Elles sont prises en compte lors de l'interprétation des sorties de modèle et permettent donc de juger de la crédibilité de ces dernières.

➤ La résolution horizontale

Les modèles de PNT découpent l'atmosphère en un nombre discret de points à la surface de la terre et dans l'atmosphère. Ces points sont les nœuds d'un maillage couvrant la surface de la terre et divisant toute l'atmosphère en un grand nombre de boîtes empilées : ce sont les points de grilles. La résolution horizontale Δx est la distance séparant deux points de grilles successifs sur le plan horizontal.

➤ **la résolution verticale et le nombre de niveaux**

A l'image du plan horizontal, le profil vertical de l'atmosphère est divisé en un certain nombre de couches. Contrairement aux grilles horizontales qui sont généralement de même taille, le maillage vertical peut varier avec l'altitude. Le nombre de couches déterminent le nombre de niveaux du modèle.

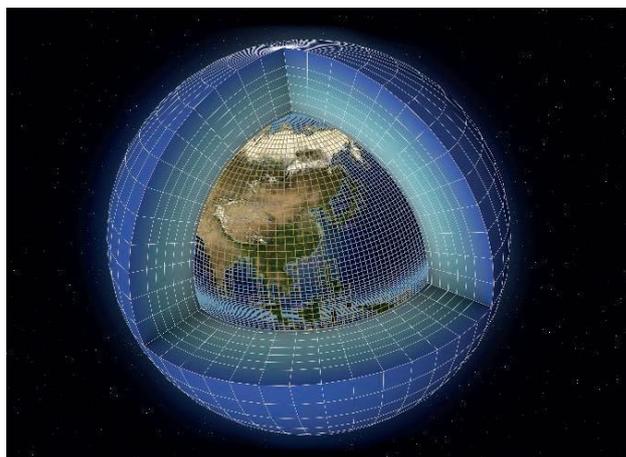


Figure 1.12 : Image montrant la discrétisation en 3D de l'Atmosphère terrestre

Source : Valérie Masson-Delmotte, © IPSL et CEA

➤ **La résolution temporelle**

La détermination de l'état futur de l'atmosphère à partir d'un état de départ donné s'opère de proche en proche par intégration numérique. Deux états consécutifs de l'atmosphère sont séparés d'un pas de temps Δt . Ce pas de temps représente la résolution temporelle du modèle et doit satisfaire la condition de stabilité.

1.4.1.2 Les modèles atmosphériques

Les modèles atmosphériques sont composés de deux parties : une partie dynamique et une partie physique.

1.4.1.2.1 La partie dynamique

Cette partie décrit en général une évolution d'un fluide laminaire (pas de turbulence), isolé de l'extérieur (évolution adiabatique, sans interaction avec la surface, ni avec l'espace), et sans changement d'état (Malardel, 2009). Elle contient les équations qui permettent de calculer explicitement les processus d'évolution de l'atmosphère selon l'échelle décrite par la résolution du modèle. Ces calculs dépendent du choix des variables pronostiques (le vent, la pression, la température et l'humidité), de la géométrie horizontale choisie pour le modèle, de la coordonnée verticale choisie (coordonnée verticale isentropique Θ , coordonnée vertical sigma, coordonnée hybride) ainsi que des méthodes numériques.

1.4.1.2.2 La partie physique

Quelle que soit la résolution d’un modèle, les processus physiques et les échelles de mouvement ne peuvent pas totalement être résolus explicitement pour des raisons de coût de calcul ou parce qu’ils sont mal connus pour être représentés. La physique d’un modèle englobe tous les processus physiques qui influent sur les équations d’évolution de l’atmosphère, mais non pris en compte dans la partie dynamique. Ces processus impactent cependant la qualité des simulations et des prévisions dans le cas de modèles opérationnels.

Il est donc nécessaire d’en tenir compte à travers des paramétrisations physiques qui permettent d’inclure implicitement ces processus. La paramétrisation est une modélisation des effets collectifs moyens de phénomènes d’échelle fine localisés à l’intérieur d’une maille de grille en fonction des conditions de grande échelle. Les phénomènes les plus courants qui font l’objet de paramétrisation sont :

- ❖ Les termes d’échanges entre l’atmosphère et les autres composantes du système climatique (sol, océan, biosphère, cryosphère) ;
- ❖ Les tendances des champs atmosphériques dues au bilan radiatif ;
- ❖ La chaleur latente libérée (ou utilisée) dans les changements de phase de l’eau,
- ❖ L’effet moyen des flux turbulents associés aux processus non décrits à l’échelle de la maille.

La contribution de la physique intervient comme l’ajout de tendance « physique » aux différentes équations d’évolution. La physique est un ensemble de petits modèles souvent très simplifiés, permettant d’évaluer l’effet moyen sur une maille des processus non résolus explicitement par la dynamique et qui interagissent (figure 1.13). Nous avons :

- Le rayonnement,
- Les changements d’états des différents hydrométéores décrits par le modèle,
- Les précipitations de grande échelle,
- La végétation,
- Le flux d’évaporation,
- Le flux à l’interface sol-atmosphère (flux de chaleur sensible et latente, frottement...)
- Le Couplage océan-atmosphère,
- La paramétrisation de la convection peu profonde et profonde
- Les Gaz et aérosols

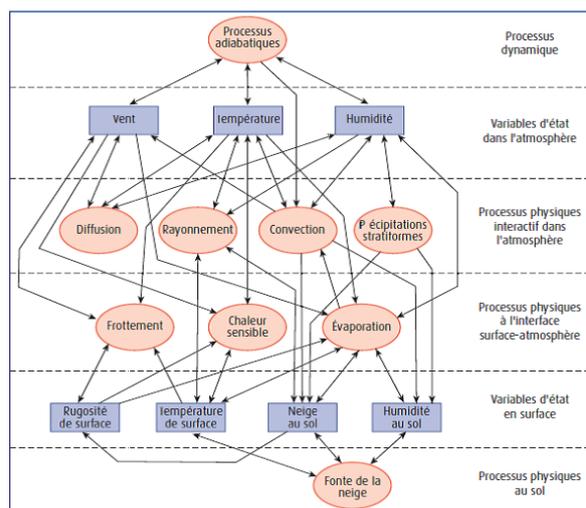


Figure 1.13: Schéma conceptuel des interactions physiques dans les modèles de PNT (D'après Louis, 1980).
Source : *Voitus 2017*

1.3.1.2.3 Les modèles globaux et régionaux

Suivant la taille du domaine d'intérêt de la simulation, on distingue deux ensembles de modèles de prévision numérique du temps, à savoir les modèles globaux et les modèles régionaux.

➤ Les modèles globaux

Un modèle global est caractérisé par un domaine de prévision qui couvre le globe terrestre entier. La simulation d'un tel modèle nécessite d'énorme quantité de données d'entrée donc des ressources informatiques conséquentes. Pour amoindrir cette exigence de coût informatique on opte pour de faibles résolutions (dizaine de kilomètres). Malheureusement de telles résolutions ne permettent pas de prendre en compte les aspects de surface ainsi que certains phénomènes (onde de relief, brise, etc.) caractérisés de phénomènes sous-maille.

En revanche, cette prise en compte de la totalité de la sphère terrestre a pour avantages la mise en évidence des phénomènes tels que les interactions entre les deux (02) hémisphères et la représentation réaliste des interactions entre le bilan radiatif et la circulation générale de l'atmosphère.

➤ Les modèles régionaux

Les modèles régionaux sont encore appelés modèles à aire limitée (Limited Area Model ou LAM) car effectuant un zoom sur une région délimitée particulière du globe, objet d'intérêt météorologique. La réduction du nombre de points de calcul consécutive à la réduction de la zone d'intérêt dans ces modèles à aire limitée permet d'augmenter la résolution et d'optimiser les paramétrisations pour cette région, sans toutefois rendre les coûts informatiques (temps de calcul et de stockage) exorbitants. D'où une meilleure prise en compte des états de surface (la

Généralités sur la géographie, le climat de l’Afrique de l’ouest et la prévision numérique du temps topographie, l’occupation du sol) et des phénomènes sous-maille, en particulier la convection, les nuages et la turbulence dans la couche limite.

Une des limitations des modèles régionaux est la nécessité de coupler la solution sur les bords du domaine limité avec la solution fournie par un modèle global de résolution plus faible. Les techniques de couplages sont des sources d'erreurs importantes qui se propagent à l'intérieur du domaine d'intérêt et limitent ainsi la durée de ce type de prévisions (Malardel, 2018). Il convient d'introduire dans le modèle sur domaine limité un terme de dissipation, destiné à atténuer les perturbations (erreurs) engendrées par le forçage des champs sur la frontière. On aboutit ainsi aux modèles emboîtés qui constituent la base des systèmes de prévision opérationnels dans la plupart des services météorologiques (Coiffier,2009).

Le modèle WRF utilisé dans cette étude, fait partie de la gamme des modèles à aire limitée. Il est développé par un consortium américain, il peut être configuré à différentes échelles de la modélisation atmosphérique (de la dizaine de km à moins d’un km).

1.4.2 Les schémas de paramétrisation physique

La paramétrisation physique est une partie essentielle dans la modélisation des phénomènes atmosphériques. Elle représente un moyen de combler les lacunes de la partie dynamique en permettant une prise en compte des processus physiques ignorés par le cœur dynamique. Elle consiste à représenter l'impact d'un processus particulier, d'une dimension inférieure à la résolution du modèle, sur l'évolution temporelle des variables d'état du modèle, à savoir les valeurs moyennes de la température, de l'humidité ou du vent. Cette paramétrisation repose sur une description approximative des caractéristiques moyennes de ce processus au sein d'une colonne du modèle. Cette description fait intervenir de nouvelles équations mathématiques qui font elle-même intervenir de nouvelles variables internes à la paramétrisation, qui caractérisent l'état du processus : intensité de la turbulence dans une maille du modèle, fraction de la maille couverte par des nuages. (Hourdin 2011)

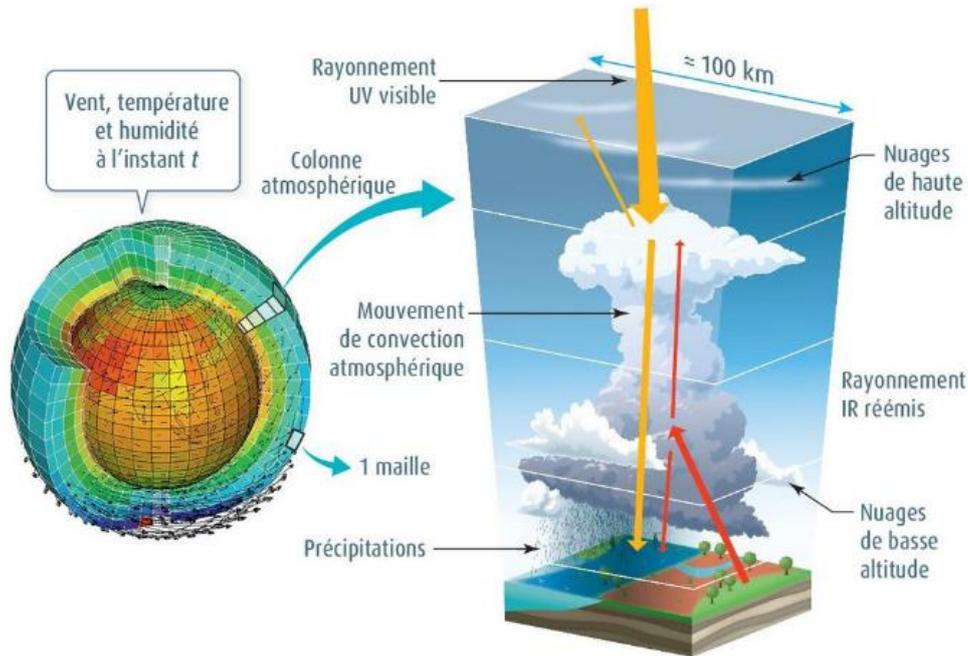


Figure 1.14 : Schéma d'une maille contenant en partie des nuages. Source : (« Le Manuel numérique max - Belin Education »)

1.4.2.1 La paramétrisation de la couche limite

Cette paramétrisation permet de tenir compte des échanges avec les surfaces terrestres sous-jacentes (terre, mer, glace...), qui font intervenir des processus d'échelles très fines et très rapides de type turbulent. Elle est représentée par des lois de régression statistique qui ont pu être établies et validées par l'expérience et qui permettent de relier l'effet collectif des petits tourbillons et des microcirculations dans les premières centaines de mètres au-dessus de la surface à l'évolution moyenne du vent, de la température et de l'humidité dans cette couche (Malardel, 2018). Ces lois statistiques sont à la base de petits modèles, appelés schémas de paramétrisation de la couche limite, intégrés au modèle de PNT. Les schémas de la couche limite contrôlent essentiellement la turbulence sur toute la colonne d'air, y compris en haute atmosphère.

1.4.2.2 La paramétrisation de la microphysique des nuages

Les changements de phase de la vapeur d'eau en gouttelettes ou cristaux de glace qui peuvent ensuite s'évaporer ou fondre ne peuvent pas être décrits explicitement par les équations moyennées. Pour les représenter, à nouveau, il faut adopter une autre famille de paramétrisations basées sur des descriptions statistiques du comportement de populations de gouttes ou de cristaux (Malardel, 2018). La complexité de ces phénomènes de très petite échelle a amené la communauté scientifique à développer deux approches distinctes dans leur paramétrisation (Khain et Lynn, 2007).

L’approche dite « *bin* » ou spectrale représente une microphysique détaillée, mais elle nécessite des temps de calcul considérables et elle est le plus souvent utilisée dans des modèles à très petite échelle à une ou deux dimensions. Elle permet de résoudre explicitement la distribution en taille des particules. Selon la complexité du schéma, le nombre de catégories peut varier de deux (eau nuageuse et pluie) à six (eau nuageuse, pluie, neige, glace nuageuse, *graupel* et grêle).

1.4.2.3 La paramétrisation de la convection

Le modélisateur rencontre une difficulté supplémentaire pour représenter les nuages qui sont trop petits pour être créés par les ascendances dues à la vitesse verticale moyenne. Des paramétrisations spécialisées pour décrire les nuages de faible extension horizontale tels que les cumulus ou les cumulonimbus traitent à la fois les fluctuations de vitesse verticale et les changements de phase de l’eau. Ces paramétrisations, connues sous le nom de schémas de convection gèrent la convection sous maille, la distribution verticale de chaleur et d’humidité, et participent activement au calcul des précipitations convectives. Elles constituent un des éléments clés pour représenter les échanges énergétiques dans les régions tropicales et ainsi assurer le maintien des équilibres climatiques dans le modèle.

1.4.2.4 La paramétrisation du rayonnement

Il est également nécessaire de paramétrer l’ensemble des interactions entre l’atmosphère d’une part et, d’autre part, le rayonnement solaire qui vient de l’espace et le rayonnement infra-rouge qui est principalement émis par la surface terrestre. Ces effets doivent être largement simplifiés pour rendre la paramétrisation du rayonnement compatible avec les contraintes de production des prévisions dans les centres opérationnels.

Ce chapitre nous a permis d’appréhender le domaine d’étude sur ses aspects géographiques et météorologiques. En effet, il ressort que l’Afrique de l’ouest est dominée par un relief relativement plat (300 m d’altitude en moyenne) où s’élèvent quelques massifs montagneux. Son sol se compose en grande partie de socle précambrien. Quant à son climat et à sa végétation, ils sont organisés en bandes zonales. Son système de mousson est un système couplé faisant intervenir à la fois des interactions dynamiques et des aspects énergétiques à travers des éléments clés. Aussi des éléments de compréhension sont relatifs à la prévision numérique du temps ainsi aux schémas de paramétrisation. Muni de ces informations, disposer de données de départ de qualités, d’une bonne méthodologie et d’outils efficaces permettra d’aborder sereinement les simulations du modèle WRF. Le prochain chapitre développera ces aspects.

Chapitre 2 : Données, méthodologies et outils

Dans ce chapitre, nous présentons les différentes données utilisées dans le cadre de cette étude notamment celles qui ont servi au forçage du modèle WRF version 4.1.2 (Shamarock et *al.*, 2019) ainsi que celles qui ont été utilisées pour la validation des différentes simulations. Il s'en suivra une présentation de la méthodologie adoptée, ainsi que les paramètres statistiques utilisés pour l'évaluation.

2.1 Les données

Les données météorologiques constituent la matière première de toute œuvre de simulation atmosphérique. Dans le cas d'une modélisation sur un domaine limité, ces données interviennent depuis le forçage aux limites latérales du domaine, en passant par l'élaboration de l'analyse jusqu'à la validation des sorties du modèle. C'est pour cela qu'il faut accorder une attention particulière à la qualité des différentes données employées dans la simulation atmosphérique.

2.1.1 Les données liées aux conditions initiales et au forçage

La simulation des cas réels dans un modèle à aire limitée comme WRF nécessite que des données soient fournies à pas de temps réguliers (par exemple chaque 6h) aux frontières du domaine. La qualité de ces données, dites données de forçage aux limites, conditionne la solution du modèle régional (Laprise, 2008 ; Pohl et *al.*, 2011). En plus, un état de départ décrivant au mieux les conditions réelles de l'atmosphère sur le domaine d'intérêt est indispensable pour une bonne exécution du modèle. Le modèle WRF est adapté pour intégrer différents types de données (analyses ou réanalyses, prévisions, etc.), pouvant provenir d'un modèle global (GFS, IFS, UKMET, etc.) appelé « modèle coupleur ».

Dans ce travail, les données de conditions initiales et aux limites sont issues des données d'analyses du *Global Forecast System* (GFS). Le GFS est un modèle de prévision météorologique global produit par le *National Center for Environmental Prediction* (NCEP). Ce dernier met à la disposition des utilisateurs des données de dizaines de variables atmosphériques et de variables terre-sol, telles que les températures, les vents, les précipitations, l'humidité, la concentration atmosphérique d'ozone etc.

Les données d'analyse et de prévision de GFS sont disponibles en points de grilles couvrant le globe entier à une résolution horizontale de 0.25° (~28 kilomètres) avec 64 niveaux verticaux. Les analyses sont produites à 00H, 06H, 12H et 18H UTC par jour et les prévisions sont faites à un intervalle de 3 heures de 0 à 240 heures et à un intervalle de 12 heures de 240 à 384 heures. Les données GFS utilisées dans notre travail ont été téléchargées sur le site du *Research Data Active* (RDA) via le lien <https://rda.ucar.edu/datasets/ds084.1/#!access>

2.1.2 Les données géographiques ou statiques

Il est également nécessaire de décrire avec précision les conditions de surfaces (végétation, relief, sol, etc.) dans la mise en œuvre d'un modèle à aire limitée. Le modèle WRF modélise les interactions quasi instantanément (quelques secondes) entre les basses couches atmosphériques et la surface par l'intermédiaire d'un couplage avec un modèle de surface (*Land Surface Model* ou LSM) (Chen et Dudhia, 2001). Ces transferts sont déterminants dans la dynamique de la couche limite atmosphérique et dans la simulation des températures et des précipitations. On remarque que l'organisation spatiale des éléments de surface est statique dans les modèles régionaux, bien que chaque classe d'occupation du sol (forêts feuillus, résineux, cultures, ...) suive un cycle saisonnier via l'évolution par exemple de l'indice foliaire. Les données géographiques utilisés ici proviennent des serveurs de l'*University Corporation of Atmospheric Research* (UCAR) et téléchargeables dans un format compressé à l'adresse https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/get_sources_wps_geog.html.

Selon la classification des catégories d'occupation des terres, on distingue deux ensembles de données de surface utilisables au choix. Il s'agit des données du MODIS IGBP (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer/International Geosphere-Biosphere Program*) et les données de l'*United States Geological Survey*). Castel et al. (2010) ont montré que les données de surface dérivées du satellite MODIS permettaient de réduire de plus de 20 % les biais sur les précipitations. Le gain est dû à une occupation du sol plus réaliste dans MODIS (Lawrence et Chase, 2007) par rapport à l'USGS (Loveland et al., 2000). De ce fait, le choix des données pour notre étude a été porté sur celles de MODIS IGBP.

2.1.3 Les données de vérification

Les données de références utilisées dans cette étude sont les données issues du projet « Enhancing National Climate Services (ENACTS) ». ENACTS est un projet de service climatologique qui vise à améliorer l'accessibilité, la qualité, la couverture et la compréhension des données climatiques afin que les connaissances climatiques puissent être utilisées dans la prise de décision.

L'initiative est dirigée par l'institut international de recherche sur le climat et la société (IRI) et est active dans onze pays africains et deux régions. L'IRI travaille aux côtés des agences météorologiques nationales, des ministères de la santé, de l'Organisation mondiale de la santé et d'autres agences pour apporter les connaissances climatiques aux décideurs nationaux.

Les produits ENACTS combinent des données provenant de stations météorologiques au sol et celles estimées par satellite, de modèles altimétriques numériques et de produits de ré-analyse climatiques. Les données ainsi générées sont d'une haute résolution (4 km). Elles sont partagées via des plateformes

en ligne spécifiques à chaque pays appelées « Maprooms », qui permettent aux utilisateurs d'accéder et de visualiser facilement les produits ENACTS.

Les données de stations de l'Agence Nationale de l'Aviation Civil et de la Météorologie (ANACIM) ont été également utilisées pour évaluation la qualité des prévisions des cas d'étude. La figure 2.1 donne une vue d'ensemble des principaux stations et postes pluviométrique du Sénégal.

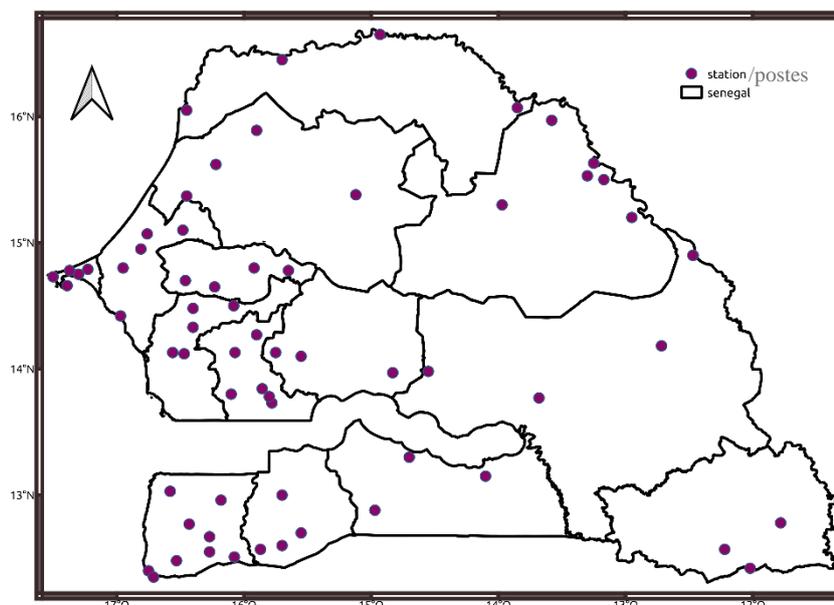


Figure 2.1 : Localisation des stations et postes pluviométriques retenues pour évaluer le modèle WRF

2.2 L'Outil et la méthodologie

2.2.1 Description du modèle WRF

Le modèle WRF (Skamarock et al., 2019) est un modèle atmosphérique de méso-échelle conçu pour la recherche et la prévision numérique du temps. Il a été développé suite à une collaboration entre plusieurs institutions américaines dont le « National Center for Atmospheric Research » (NCAR), la « National Oceanic and Atmospheric Administration » (NOAA), l'« Air Force Weather Agency » (AFWA), le « Forecast Systems Laboratory » (FSL) et la « Federal Aviation Administration » (FAA). Il est régulièrement mis à jour grâce à une communauté d'utilisateurs internationaux très active. Depuis sa première diffusion publique en 2000, WRF est sans doute devenu le modèle atmosphérique le plus utilisé au monde (Powers et al., 2017). Il permet d'étudier le comportement de l'atmosphère à des échelles spatiales allant de quelques mètres à quelques centaines de kilomètres. Parmi ces études, nous pouvons distinguer :

- ✓ La prévision météorologique

Données, méthodologies et outils

- ✓ La simulation idéalisée
- ✓ La paramétrisation de l'atmosphère
- ✓ L'assimilation de données
- ✓ Le processus de couplage

De plus, le modèle WRF est un modèle climatique à aire géographique limitée. Il résout explicitement les équations de la mécanique des fluides et les principaux processus physiques en lien avec le climat à savoir :

- ✓ Les échanges et transferts radiatifs aux courtes et grandes longueurs d'onde
- ✓ Les mouvements et turbulences dans la couche limite planétaire
- ✓ Les schémas de convection et microphysique des nuages
- ✓ L'interaction eau, sol, végétation et pôle urbain avec les basses couches de l'atmosphère.

Dépendant de l'utilisation qu'on en fait, le modèle WRF comporte deux cœurs avec des utilisations spécifiques (Figure 2.2):

- Le cœur Advanced Research WRF (ARW) de NCAR, destiné à la recherche expérimentale, utilise une résolution verticale et horizontale très fine. Ce cœur est une plateforme de recherche sur la simulation numérique régionale du climat.
- Le cœur « Non hydrostatic Mesoscale Model » (NMM) est utilisé directement pour la phase opérationnelle du traitement des données. Il est développé par la NOAA/NCEP. Ce cœur est exécuté avec une résolution de 4 km, surtout sur de petits domaines géographiques afin d'avoir des résultats optimaux.

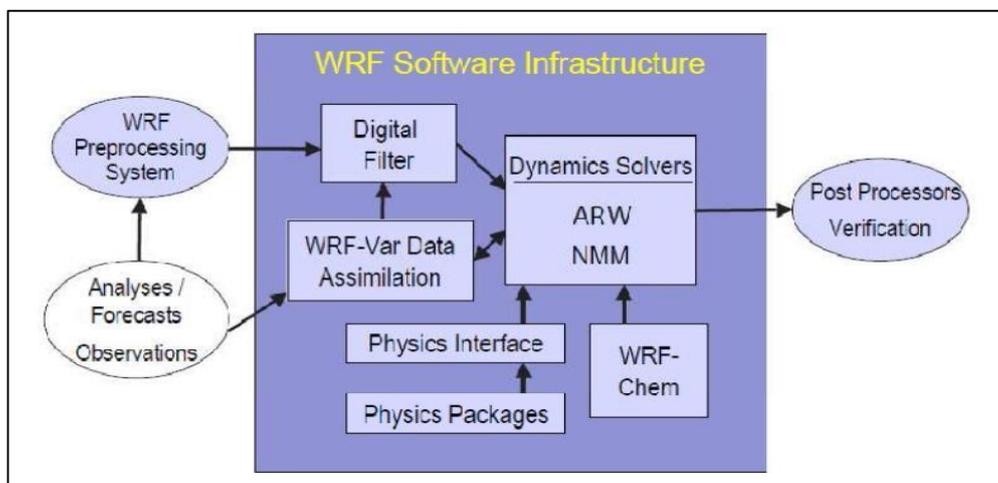


Figure 2.2: Les composantes du système de WRF (Skamarock et al., 2019)

Il faut noter que le modèle WRF permet une descente (réduction) d'échelle par emboîtement successif de plusieurs domaines, dont la résolution augmente (d'un facteur 2 à 5) au fur et à mesure entre le domaine à maille large (domaine-parent) et le domaine à maille relativement petite (domaine-fils) comme illustré sur la figure 2.3. Cette technique est appelée « *nesting* » et implique des échanges entre le « domaine-parent » et le « domaine-fils ». Ces échanges peuvent se faire, au choix, uniquement dans un sens (du domaine le plus large vers le domaine le plus fin) ou bien dans les deux sens. On parle alors respectivement de « *one-way nesting* » ou de « *two-way nesting* ». Quel que soit le type d'imbrication utilisé, les conditions aux limites des domaines emboîtés sont données par le domaine-parent, tandis que le domaine le plus grand est le seul à être forcé par un modèle à plus grande échelle. Dans le cadre de notre étude, nous avons appliqué le « *one-way nesting* ».

Le modèle WRF soutient l'emboîtement horizontal, ce qui permet d'obtenir des données à haute résolution en présentant une grille additionnelle ou des grilles dans la simulation. L'exécution d'emboîtement du modèle est d'une manière semblable aux réalisations des autres modèles à méso échelle. Pour les simulations de grille imbriquée unidirectionnelle et bidirectionnelle, le rapport de la distance de la grille horizontale parente à la distance de la grille horizontale enfant (le rapport de raffinement spatial) doit être un entier. De plus, les grilles imbriquées au même niveau (c'est-à-dire les enfants qui ont le même parent) peuvent avoir différents ratios de raffinement spatial et temporel. Par exemple, sur la Figure 2.3 (b), la résolution horizontale de la grille pour le domaine 1 peut être de 90 km, tandis que le domaine 2 peut être de 45 km et le domaine 3 peut être de 30 km.

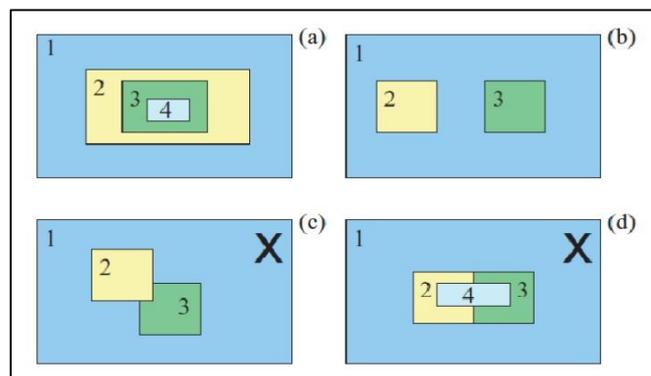


Figure 2.3: Configuration d'emboîtement autorisées et non autorisées (Skamarock et al., 2019)

2.2.2. Les schémas de paramétrisation physique du WRF

Comme dans la plupart des modèles météorologiques, le modèle WRF prend en compte un grand nombre de schémas de paramétrisation regroupés en cinq (5) catégories à savoir le rayonnement, la couche limite, la microphysique des nuages, la convection et les modèles de surface terrestre. Les modèles de surface terrestre (MST) utilisent les informations atmosphériques du schéma de la couche

de surface, le forçage radiatif du schéma de rayonnement et le forçage des précipitations des schémas microphysiques et convectifs. Les informations internes sur les variables d'état de la terre et les propriétés de la surface terrestre sont également utilisées pour fournir des flux de chaleur et d'humidité au-dessus des points terrestres, des points de glace et de mer. Ils ne fournissent aucune tendance, mais mettent à jour les variables d'état de la terre qui comprennent la température au sol (peau), le profil de température du sol, le profil d'humidité du sol, la couverture de neige et éventuellement les propriétés de la canopée. Il n'y a pas d'interaction horizontale entre les points voisins dans le MST et il peut donc être considéré comme un modèle de colonne unidimensionnel pour chaque point de grille terrestre WRF.

Dans chacune de ces catégories, plusieurs choix sont disponibles (une dizaine), ce qui démultiplie les configurations physiques possibles du modèle. Il faut noter que le degré de complexité de chacun de ces schémas est varié, impliquant ainsi des temps de calcul plus ou moins allongés. Le choix des paramétrisations à utiliser dépend également de l'objectif de la simulation. Bien que les paramétrisations de la physique du modèle soient classées de manière modulaire, il convient de noter qu'il existe de nombreuses interactions entre elles via les variables d'état du modèle (température potentiel, humidité, vent, etc.) et leurs tendances via les flux de surface.

Ces paramétrisations sont appelées dans un ordre précis à chaque pas de temps et interagissent entre elles durant la simulation (Figure 2.4).

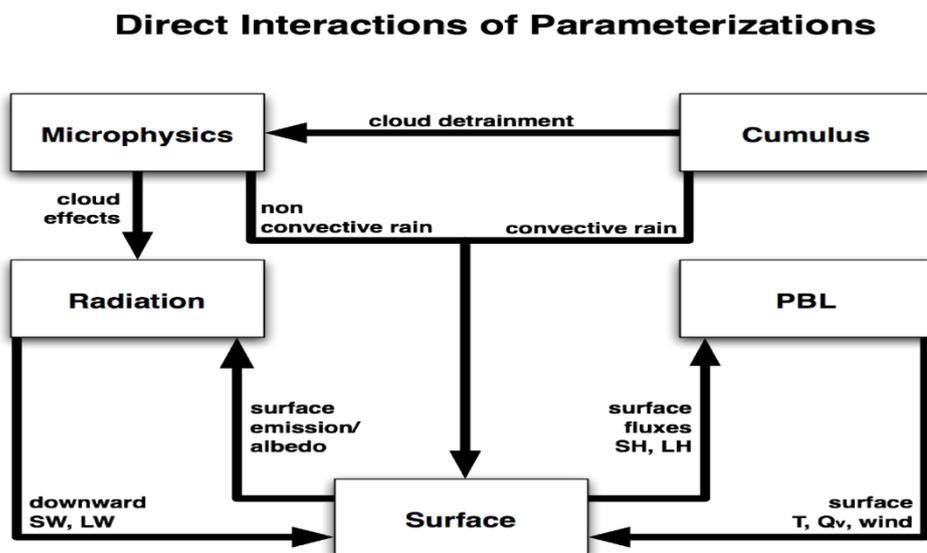


Figure 2.4: Schéma illustratif des interactions entre les différentes paramétrisations physiques présentes dans le modèle WRF (Shamarock et al., 2019).

2.2.3 Le choix des schémas de paramétrisation

Devant la multitude de combinaisons de schémas de paramétrisation physiques disponibles dans le modèle WRF, nous nous sommes basés sur la bibliographie pour ne retenir que les schémas qui semblent les plus adaptés à notre contexte. En effet, plusieurs études ont déjà traité du choix des schémas de paramétrisation sur la zone tropicale et particulièrement sur l’Afrique de l’Ouest (Klein et al., 2015 ; Igri et al., 2018 ; Cretat et al., 2010 ; Drigeard, 2015 ; Flaounas et al., 2009 ; etc.).

De l’étude menée par Klein et al. (2015) sur l’Afrique de l’Ouest où vingt-sept (27) combinaisons de trois schémas de paramétrisation de chacun des processus microphysique, convection et de couche limite planétaire ont été testé ; il est ressorti que les modèles régionaux sont fortement sensibles à la paramétrisation de ces phénomènes sous mailles. Ils ont démontré que ces processus influençaient la distribution spatiale ainsi que les quantités de précipitations dans la région. Quant à Igri et al. (2018), ils ont testé une centaine de combinaisons de schémas physiques des processus de microphysique, de convection, de couche limite planétaire, de rayonnement et de modèle de surface. L’objectif de leur étude est de rechercher la meilleure paramétrisation physique pour représenter les précipitations en Afrique occidentale et centrale. Ils ont conclu entre autres que la répartition spatiale et temporelle des précipitations est sensible au choix des schémas de convection et de microphysique. Leur étude révèle que les distributions spatiales et temporelles des précipitations sont les plus sensibles au choix des schémas de paramétrisation de la convection. Les schémas convectifs « *New Simplify Arakawa-Schubert (NSAS)* » et « *Modified Tiedtke (TK)* » surpassent les autres en produisant une distribution plus réaliste des précipitations. Les schémas microphysiques de *Thompson* et de *Morrison* donnent de meilleurs résultats par rapport aux autres schémas testés. La dépendance des prévisions de précipitations au modèle de surface (LSM) est faible, et le modèle WRF montre de bonnes performances (relatives) lorsque les LSM « *Unified Noah* et *Rapid Update Cycle (RUC)* » sont généralement utilisés. En outre, la prévision des précipitations est peu sensible au choix des schémas de rayonnement et de la couche limite planétaire. Une autre étude de Cretat et al. (2010) ayant consisté à tester la sensibilité de WRF à vingt-sept (27) combinaisons de trois schémas de microphysiques, trois de la convection et trois de la couche limite a conclu également sur une bonne distribution spatiale des précipitations suite à l’utilisation de certaines combinaisons. En effet, elle montre une forte sensibilité des cumuls précipités simulés par WRF à la paramétrisation physique, surtout aux schémas de convection. Les performances de WRF paramétrées avec le schéma de convection Grell sont très encourageantes, car très proches des observations in situ, et du « *Global Precipitation Climatology Project (GPCP)* ». L’étude menée par Flaounas et al. (2009) sur la mousson Ouest-Africaine a exploité deux (2) schémas de couche limite planétaire ou PBL (Mellor-Yamada-Janjic (MYJ), Yonsei

University (YSU)) et trois (3) schémas de convection (Kain-Fritsch (KF), Grell-Freitas (GF), Grell and Devenyi 3D ensemble (G3D)). Elle a montré que les schémas PBL semblent avoir le plus fort effet sur la température, la distribution verticale de l'humidité et la quantité de pluie, tandis que la dynamique et la variabilité des précipitations sont fortement influencées par les schémas de convection. Il ressort particulièrement de cette étude d'une part, le schéma de couche limite planétaire Mellor-Yamada-Janjiic attribue des valeurs d'humidité et de température plus réalistes que la combinaison avec le schéma de Kain-Fritsch qui représentait mieux le début de la mousson ouest-africaine, et d'autre part les schémas Grell reproduisaient des volumes de précipitations meilleurs que Kain-Fritsch.

En se basant sur les études évoquées ci-dessus, nous retiendrons pour notre étude, les schémas de paramétrisation physique résumés dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1: *Schémas de paramétrisation utilisés pour les simulations. Les chiffres entre parenthèse désignent leurs codes de paramétrisation dans le modèle WRF version 4.1.2.*

Processus physique	Schémas	Références
Model de Surface (LSM)	Unified Noah model (2)	<i>Chen et al. (2013)</i>
	<i>Unified Noah et Rapid Update Cycle (RUC)</i>	<i>Smirnova et al., (2000)</i>
Rayonnement de courtes et de grandes longueurs d'onde	RRTMG (4)	<i>Iacono et al. (2008)</i>
Couche limite planétaire	Mellor-Yamada Janjic (MYJ) (2)	Janjic (1994)
Microphysique des nuages	Morrison-2 moment (M2) (10)	<i>Hong and Pan (1996, MWR)</i>
	New Thompson (TS) (8)	Thompson et al. (2004)
Convection	Tiedtke (TK) (6)	<i>Tiedtke (1989, MWR), Zhang, Wang and Hamilton (2011, MWR)</i>
	Grell 3D (G3D) (5).	<i>Grell and Devenyi (2002, GRL)</i>

Tableau 2.2 : Les combinaisons possibles des schémas de paramétrisation utilisés pour les simulations, représentées en parenthèses par WRF1 à WRF8

Configuration	Model de Surface (LSM)	Rayonnement de longueurs d'onde	Couche limite planétaire	Microphysique des nuages	Convection
WRF1	NoahMP-LSM (2)	RRTMG (4)	MYJ (2)	M2 (10)	G3D (5)
WRF2	NoahMP-LSM (2)	RRTMG (4)	MYJ (2)	TS (8)	G3D (5)
WRF3	NoahMP-LSM (2)	RRTMG (4)	MYJ (2)	M2 (10)	TK (6)
WRF4	NoahMP-LSM (2)	RRTMG (4)	MYJ (2)	TS (8)	TK (6)
WRF5	RUC (3)	RRTMG (4)	MYJ (2)	M2 (10)	G3D (5)
WRF6	RUC (3)	RRTMG (4)	MYJ (2)	TS (8)	G3D (5)
WRF7	RUC (3)	RRTMG (4)	MYJ (2)	M2 (10)	TK (6)
WRF8	RUC (3)	RRTMG (4)	MYJ (2)	TS (8)	TK (6)

2.2.4. Simulation avec le modèle WRF-ARW v4.1.2

Dans cette étape, nous intéressons au cas de données réelles pour la simulation. L'étape de simulation se fait en deux processus : le prétraitement ou « Preprocessing » avec le système « WRF Preprocessing System » ou WPS et le calcul avec WRF-ARW.

La configuration du modèle se fait principalement par l'intermédiaire des fichiers «namelist». Pour le fichier correspondant au prétraitement est le fichier «namelist.WPS» (voir annexe) et pour la simulation, elle correspond au fichier «namelist.input» (voir annexe)

Le prétraitement ou « Preprocessing » :

Le prétraitement ou preprocessing regroupe l'ensemble des étapes qui précède la simulation proprement dite. Pour le modèle numérique WRF-ARW, il faut d'abord faire les étapes suivantes avant d'entamer le prétraitement :

- ❖ La Configuration de « namelist.WPS » se fait:
 - ✓ en choisissant le cœur du modèle à utiliser : ici ARW
 - ✓ en choisissant les Cas d'étude : échelle de 24h à partir du 05 septembre 2020 à 06TU jusqu'au 05 septembre 2020 à 06TU et du 02 Aout 2021 à 06TU jusqu'au 03 Aout 2021 à 06TU
 - ✓ en choisissant le pas de temps initialisation qui est de 6h
 - ✓ en définissant le format des fichiers de sortie netCDF

- ✓ en choisissant les positions des domaines

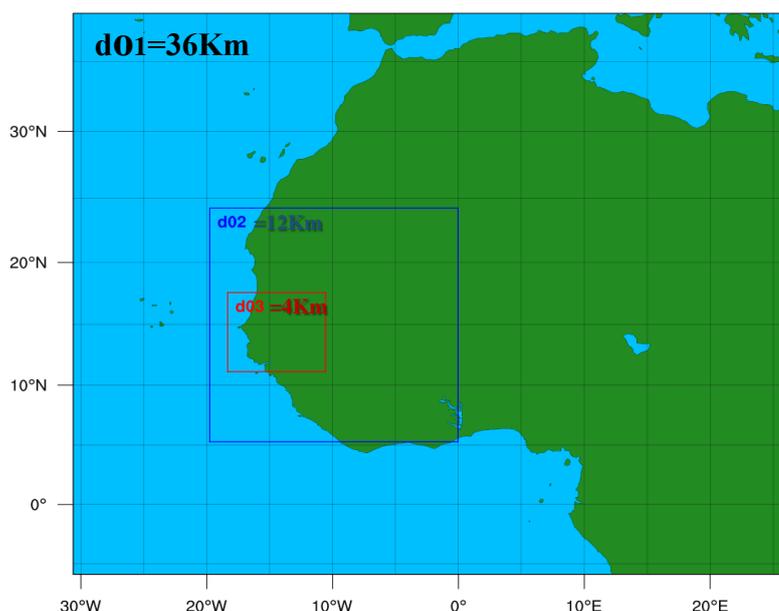


Figure 2.5: *Domaine de simulation*

❖ La Compilation de WRF et de WPS

Le système de fichier WPS est l'outil qui permet de procéder au prétraitement de la simulation avec WRF-ARW. Le système de prétraitement (WPS) est un ensemble de trois programmes dont le rôle collectif est de préparer la donnée d'entrée au programme « real.exe » qui permet d'exécuter les simulations de données réelles. Chaque programme exécute un stade de la préparation :

- ✓ Le « geogrid » permet de définir les domaines choisis et interpole des données géographiques statiques aux grilles ;
- ✓ Le « ungrib » extrait les champs météorologiques des fichiers au format GRIB ;
- ✓ Le « metgrid » interpole horizontalement les champs météorologiques extraits par « ungrib » aux grilles définies par « geogrid ».

❖ Les caractéristiques principales à inclure :

- Les données météorologiques de divers centres météorologiques du monde en grib1 ou grib2.
- Les projections des cartes au système de projection Mercator
- Les emboitements.
- Les interfaces pour entrer d'autres données statiques

2.2.4.2. La Mise en œuvre de WRF :

Les étapes clés de la simulation sont précédées par l'initialisation à partir des fichiers met_em. Les deux étapes (real.exe et wrf.exe) passent également par la configuration du fichier namelist.input. Ce fichier est le nœud du système. Il permet de préciser le pas de temps entre chaque calcul, les schémas physiques retenus, les options de la résolution des équations, le format de sortie, le guidage, etc. Après la configuration des fichiers « namelist.input », il faut passer à la création des fichiers d'initialisation avec real.exe. Une fois le processus terminé, nous devons avoir dans notre répertoire le fichier wrfbdy_d01 et autant de fichiers que de domaines wrfinput_d0<numéro du domaine>. Si les options de guidage sont activées, des fichiers wrffdda_d0<numéro du domaine> sont également créés. A ce stade la simulation climatique peut être lancée. Cette simulation est la dernière étape et est lancée par le fichier wrf.exe. Les résultats ainsi générés sont contenus dans les fichiers wrfout_d<numéro du domaine>_<date de départ> au format NetCDF (.nc). Les étapes d'exécution de real.exe et de wrf.exe se font dans le répertoire « WRFV3/test/em_real ». Notons que le fichier real.exe interpole les données verticales sur les coordonnées des modèles et le fichier wrf.exe produit la prévision du modèle.

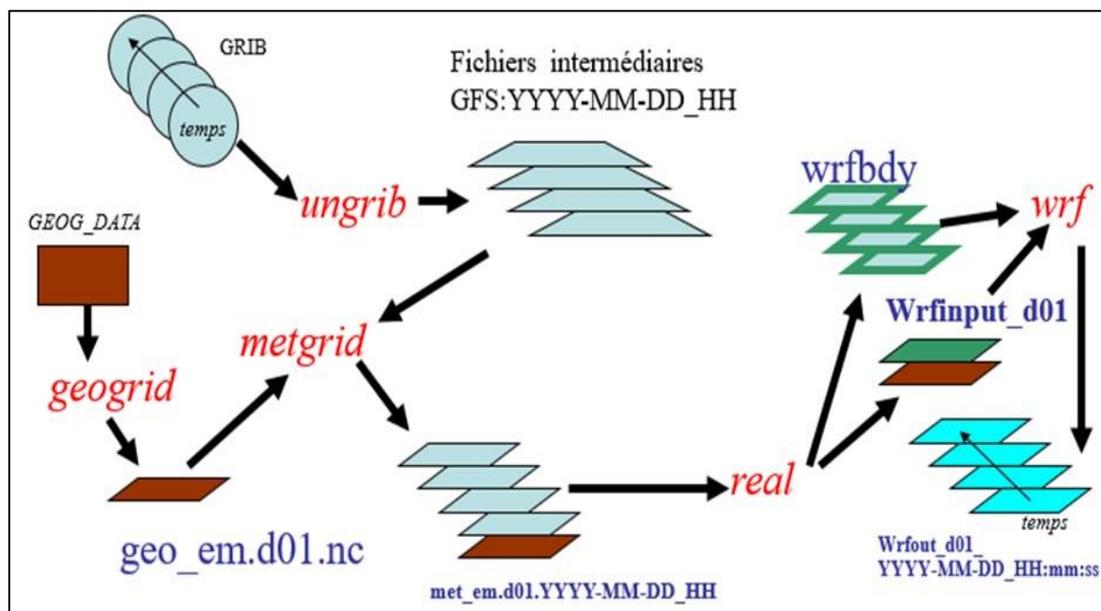


Figure 2.6 : Schéma illustratif de la mise en œuvre de la simulation du modèle WRF. Source Komboigo et Zoungrana, 2018

2.3. Les méthodes statistiques utilisées.

Lorsqu'on modélise un phénomène météorologique, la question que l'on se pose, une fois le modèle établi, est celle de sa fiabilité et de sa pertinence. Pour évaluer les performances d'un modèle, il est possible de faire appel à des indicateurs de performance. En effet, pour quantifier les erreurs de prévision faites par un modèle de prévision numérique du temps, plusieurs paramètres statistiques

(Wilks et al., 2011) appelés scores sont calculés. Parmi ces paramètres on peut citer le biais, l'erreur moyenne absolue (MAE en anglais), la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE en anglais), la corrélation, la régression linéaire simple, la table contingence. Ces paramètres ont été utilisés dans le cadre de ce mémoire.

2.3.1. Le Biais

Une première condition souhaitée dans la vérification d'un modèle est que la moyenne de tous les écarts se rapproche le plus possible de zéro, c'est à dire un modèle sans biais. Cet indicateur nous décrit la fidélité du modèle, en d'autres termes si notre modèle surestime ou sous-estime systématiquement les valeurs observées. Son expression est donnée par l'équation suivante :

$$BIAIS = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n} \quad (2.1)$$

Avec :

n , le nombre de points où l'observation est disponible;

O_i , la valeur observée au point de grille i ;

P_i , la valeur simulée (ou prévue) au point de grille i .

Le biais nous indique des écarts, mais il ne nous donne pas d'information sur la qualité ni l'ampleur des écarts, vu que les valeurs positives et négatives des écarts se compensent dans la moyenne.

2.3.2. L'erreur moyenne absolue ou MAE

La moyenne de la valeur absolue de l'erreur permet d'avoir une idée de la qualité de la prévision indépendamment du type d'erreur réalisé (surestimation, sous-estimation), plus la valeur de la MAE est proche de zéro, meilleur est le modèle. La seule différence entre la MAE et le biais est la valeur absolue des différences entre les valeurs réelles et prédites.

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |(P_i - O_i)|}{n} \quad (2.2)$$

Avec :

* O_i et P_i , comme définit précédemment.

2.3.3. L'erreur quadratique moyenne (ou RMSE)

L'amplitude des écarts peut se caractériser par la moyenne de leurs carrés, afin de les rendre positifs.

L'équation 2.4 permet de calculer cette erreur.

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(P_i - O_i)^2}{n}} \quad (2.3)$$

$$RMSE = \sqrt{Var_P^2 + biais_P^2} = \sqrt{\left(\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})}{n}\right)^2 + \left(\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n}\right)^2} \quad (2.4)$$

Avec :

RMSE, la racine de l'erreur moyenne quadratique,

n, le nombre d'observations,

O_i et P_i , comme définit précédemment.

La racine carrée utilisée dans l'équation (2.3) a pour objectif de revenir à une unité de valeur identique à celle de la variable comparée (par exemple mm pour une analyse sur les précipitations).

L'équation (2.4) nous permet également de visualiser la RMSE en tant que mesure globale de l'*exactitude* du modèle, en prenant en compte à la fois le biais (*fidélité*) et sa variance (*justesse*). Plus la valeur du RMSE est proche de zéro, meilleur est le modèle évalué en termes d'exactitude. Ces indicateurs ne donnent pas néanmoins d'informations sur la contribution de chaque composant d'erreur (biais et variance) séparément. Ainsi, un modèle jugé fidèle à travers un biais proche de zéro peut être très inexact (valeurs de RMSE élevées) du fait de la variabilité des écarts ou de la justesse (valeurs de la variance élevées).

2.3.4. Régression linéaire simple et corrélation

Pour mesurer le degré de liaison ou de la relation entre 2 variables quantitatives en statistique, nous utilisons la corrélation (Rakotomalala 2015). Elle est donnée par l'équation (2.5) suivante :

$$r = \frac{cov(x, y)}{\sqrt{\sigma_x^2 \sigma_y^2}} = \frac{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x - \bar{x})^2 * (y - \bar{y})^2}} \quad (2.5)$$

Ce coefficient est compris entre -1 et 1.

- si r est proche de 0, il n'y a pas de relation linéaire entre x et y
- si r est proche de -1, il existe une forte relation linéaire négative entre x et y
- si r est proche de 1, il existe une forte relation linéaire positive entre x et y

Le signe de r indique donc le sens de la relation tandis que la valeur absolue de r indique l'intensité de la relation c'est-à-dire la capacité à prédire les valeurs de y en fonctions de celles de x .

La covariance mesure la relation linéaire entre deux variables. Elle est similaire à la corrélation entre deux variables, cependant elle est différente pour les raisons suivantes :

Les coefficients de corrélation sont normalisés. Ainsi, une relation linéaire parfaite correspond à un coefficient de 1. La corrélation mesure la force et la direction de la relation linéaire entre deux variables. En somme la corrélation mesure l'intensité de la liaison entre des variables.

2.3.5. Le tableau de contingence

Les tableaux de contingence permettent d'étudier l'association de deux variables et d'en déduire des probabilités conjointes et conditionnelles. Ils indiquent le nombre d'observations de chaque combinaison possible des variables analysées. En prévision, le tableau de contingence compte le nombre d'éléments suivants:

- Succès (ou hit) - évènement prévu et observé
- Évènement manqué (ou miss) - évènement non prévu mais observé
- Fausse alerte (ou false alarm) - évènement prévu mais pas observé
- Rejets corrects (ou correct negative) - évènement non prévu et non observé

Ce tableau permet de visualiser quel type d'erreur a été commis. Une bonne prévision devrait logiquement ne contenir que des succès et des rejets corrects. Le tableau se présente comme suit :

Tableau 2.3 : Présentation d'un tableau de contingence

		Évènement observé		Total
		OUI	NON	
Evènement Prévu	OUI	Succès	Fausse alerte	Prévu
	NON	Manqué	Rejets Correct	Non prévu
Total		Observé	Non observé	Total

Pour construire un tableau de contingence, il faut définir ce qu'est un évènement observé et un évènement prévu. Dans cette étude, trois seuils ont été choisis pour la définition des évènements observés et calculés pour les deux cas étude :

- Prefl = le quantile 1mm des précipitations observées,

- Pref2 = le quantile $5\text{mm} < P < 25\text{mm}$ des précipitations observées,
- Pref3 = le quantile 50mm des précipitations observées.

Pour le Pref2, il permet de déterminer si l'on prévoit de manière correcte ou non les pluies modérées. Dans ce cas, on compte les évènements compris entre les deux seuils (5mm et 25mm). Pour les deux autres cas, dans le contexte de la prévision des précipitations, ce sont les évènements ayant dépassé les seuils de 1mm (jour précipitant) et 50mm (pluies fortes).

Les probabilités conjointes conditionnelles suivantes peuvent être alors définies :

- $$\text{BIAS} = \frac{\text{succès} + \text{fausse alerte}}{\text{succès} + \text{manque}}$$

Le BIAS mesure le ratio entre la fréquence des évènements prévus et des évènements observés. Il indique si le système de prévision a une tendance à sous-prévoir ($\text{BIAS} < 1$) ou à sur-prévoir ($\text{BIAS} > 1$). Il ne mesure pas comment les prévisions correspondent aux observations, mais calcule uniquement les fréquences relatives.

- Probabilité de détection ou $\text{POD} = \frac{\text{Succès}}{\text{Succès} + \text{Manque}}$

La POD ou probabilité de détection est sensible aux "succès", mais ignore les "fausses alertes".

- Taux de bonne prévision ou $\text{Accuracy} = \frac{\text{succès} + \text{rejets corrects}}{\text{succès} + \text{manqué} + \text{rejets corrects} + \text{fausse alerte}}$

Le taux de bonne prévision ou accuracy est sensible aux "succès", sans ignore les "fausses alertes" et "correct négative".

Le score parfait correspond à un « BIAS », un « POD » et un « Accuracy » = 1

- $$\text{Ratio des fausses alertes ou FAR} = \frac{\text{fasse alerte}}{\text{succès} + \text{fasse alerte}}$$

Le ratio des fausses alertes ou FAR ou mesure la fraction des prévus "oui" qui ne se sont pas produits.

Le score parfait correspond à un FAR égale à 0.

Dans cette partie du document, il a été question de présenter les différentes données utilisées (de conditions initiales, de comparaison, etc.), de montrer les procédures employées (choix des cas d'étude et des schémas de paramétrisation, mise en œuvre du modèle utilisé, évaluation des résultats) ainsi que

Données, méthodologies et outils

les différents outils ayant servi à la mise en route des simulations. L'analyse et l'interprétation de la qualité des résultats obtenus (simulations) pour les deux cas études sont l'objet du prochain chapitre.

Chapitre 3 : Résultats et discussions

Ce chapitre est consacré à l'analyse et à la discussion des résultats des simulations. Compte tenu des schémas de paramétrisation physique choisis et des cas d'études sélectionnés, nous avons abouti à un total de seize (16) simulations effectuées, soient huit (8) simulations pour chaque cas d'étude. Ces simulations se distinguent entre eux par la combinaison des six (6) schémas de paramétrisation physiques (configuration) définies dans la section 2.2.3 (tableaux 2.1 et 2.2) du précédent chapitre. Il est donc question par la suite d'examiner les simulations du modèle WRF pour chaque cas d'étude en faisant ressortir la meilleure configuration dans la représentation des précipitations au Sénégal.

3.1. Simulation des précipitations selon les cas d'études

Dans cette étude, nous avons pris l'option de simuler deux événements météorologiques correspondant à des journées météorologiques : le cas du 05 septembre 2020 et celui du 02 août 2020

3.1.1 Cas de l'événement météorologique du 05 septembre 2020

La situation météorologique du 05 septembre 2020 a été particulièrement marquée par une pluviométrie quotidienne de 203 mm enregistrée au niveau de la station de Keur Saloum dans la région de Fatick et environ 110 mm dans la région de Dakar (source l'ANACIM). Elles ont provoqué des inondations dans plusieurs localités du pays qui sont à l'origine des pertes en vies humaines, des milliers d'hectares de terres cultivables englouties par les eaux et plusieurs milliers d'animaux emportés par les eaux etc.. (<https://www.bbc.com/afrique/region-54048951>).

3.1.1.1. Distribution spatiale des précipitations

Pour voir la meilleure configuration, les simulations sont comparées aux observations (ENACTS) mais également aux stations sélectionnées. Les champs de précipitations simulées par le modèle pour l'événement du 05 septembre 2020 (du 05 septembre 2020 à 6h au 06 septembre 2020 à 6h) pour les huit expériences WRF sur le domaine 3 avec 4 km de résolution sont représentées sur la figure 3.1, ainsi que l'observation (ENACTS). Le modèle WRF montre de fortes précipitations au centre, au sud, une partie du nord et un peu à l'est du pays dans le domaine 3 avec une résolution de 4 km (figure 3.1) pour toutes les configurations. Au nord, les configurations WRF4, WRF5, WRF7 et WRF8 montrent plus de précipitations comparées aux autres configurations et ENACTS. Avec l'utilisation de Noah MP LSM comme schémas de modèle de surface (de WRF1 à WRF4), les simulations montrent de faibles précipitations dans la partie est du pays (Kédougou et Tambacounda), ce qui se rapproche plus de ENACTS.

Résultats et discussions

La différence ainsi que les scores (RMSE, MAE, le BIAIS et la corrélation) entre les simulations et les observations ENACTS sont calculées et illustrés respectivement sur les figures 3.2 et 3.3.

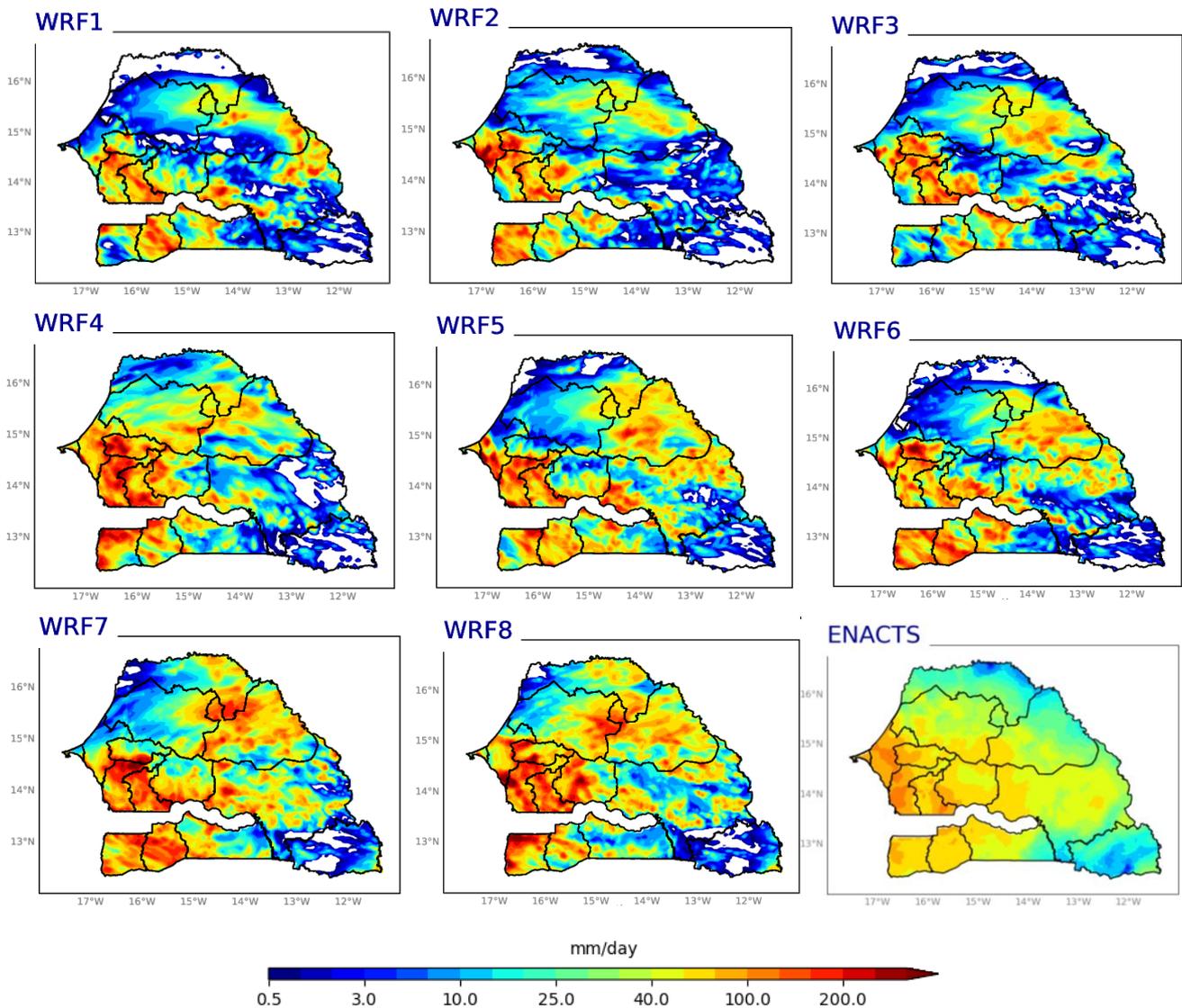


Figure 3.1: Cumul des précipitations simulées par le modèle WRF dans le Domaine 3 (4km de résolution) pour la journée météorologique du 05 septembre 2020 – comparaison qualitative avec ENACTS (obs)

L'analyse des résultats montre que toutes les configurations utilisées ont tendance à surestimer les précipitations sur la majeure partie du pays (Figure 3.2). Les simulations utilisant les schémas de microphysiques TS et M2 présentent de légères différences avec la comparaison de (WRF1 à WRF2, WRF3 à WRF4, WRF5 à WRF6, WRF7 à WRF8). En effet, les précipitations deviennent importantes si on utilise M2 (WRF1, WRF3, WRF5 et WRF7). Les différences entre les simulations deviennent saisissantes d'un schéma de cumulus à l'autre. Les simulations avec Noah MP LSM (de WRF1 à

Résultats et discussions

WRF4) reproduisent plus ou moins l'évènement pluvieux du 05 septembre 2020 au Sénégal, avec une sous-estimation moins marquée. On note plus de surestimation des précipitations au centre et un peu au nord du pays avec TK (surtout WRF7 et WRF8). Les résultats de toutes les simulations WRF (surtout avec GR3D) reproduisent mieux (car surestiment moins) les précipitations à travers le pays comparativement aux données ENACTS.

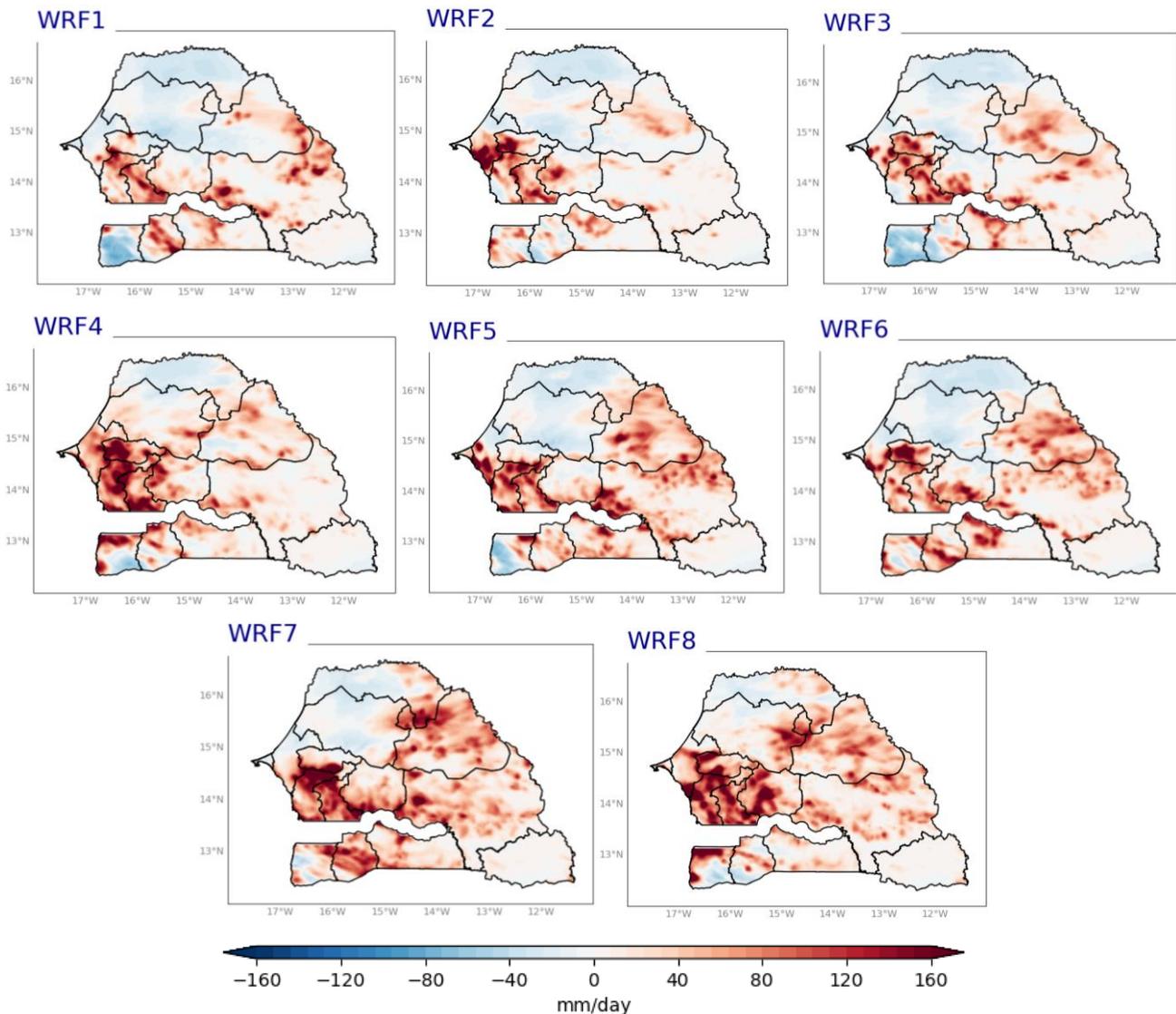


Figure 3.2 : Différence entre le cumul des précipitations simulées par le modèle WRF dans le domaine 3 (4km de résolution) par rapport à ENACTS pour la journée météorologique du 05 septembre 2020

3.1.1.2. Analyse des scores

Pour évaluer les performances du modèle WRF à simuler les précipitations, nous avons également utilisé une répartition géographique de quatre zones climatologiques (nord, centre, sud et est), et tout le Sénégal (figure 3.3). Cette répartition est basée sur la variation de la température et des précipitations

Résultats et discussions

dans ces différentes zones. L'évaluation des simulations par les indicateurs de performances utilisées est faite selon ce découpage.

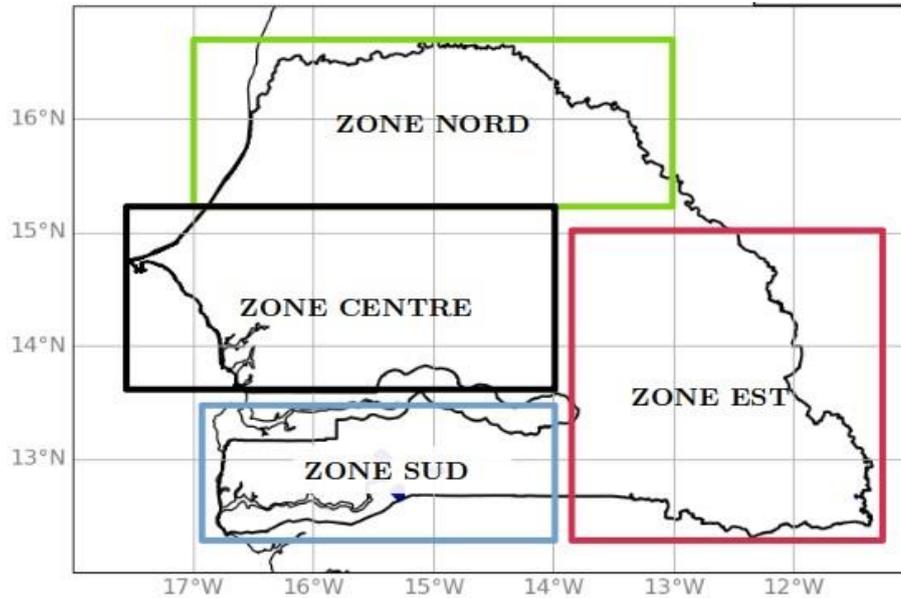


Figure 3.3 : *Découpage du Sénégal en zones climatologiques homogènes à partir des données pluviométriques : source ANACIM*

La figure 3.3 présente les valeurs des corrélations, des biais, des RMSE ainsi que des MAE des simulations de WRF par rapport aux observations ENACTS pour le cas du 05 septembre 2020 (Cas 1) et pour six (6) paramétrisations physiques. Tous les scores ont été calculés sur le domaine couvrant le Sénégal avec 4 km de résolution et les sous zones découpées comme illustrés sur la figure 3.3. Les biais sont tous positifs sauf pour les configurations WRF1, WRF2, et WRF3, ce qui signifie que ces simulations surestiment (sous-estiment) les quantités de pluie par rapport à ENACTS. Sur le Sénégal, ils varient d'environ -10 mm à un peu plus de 12 mm (figure 3.4). La sous-estimation est plus marquée avec Noah MP LSM (de WRF1 à WRF4) choisi comme schéma de modèle de surface. Par contre, le biais est relativement faible quand nous utilisons le schéma de microphysique TS. Ainsi combiné avec le schéma de convection TK (configuration WRF6), le biais est faible avec moins de 2mm, par contre devient plus élevé (plus de 10 mm) avec le schéma G3D correspondant à la configuration WRF7.

L'analyse des corrélations montre qu'elles sont positives pour toutes les différentes configurations sauf pour certaines sur la zone Nord (Figure 3.4). Les simulations de WRF et ENACTS varient dans le même sens pour des corrélations positives et dans le sens opposé pour des corrélations négatives. Nos résultats montrent alors que les quantités de pluie des simulations augmentent dans le même sens que celles de ENACTS sur toutes les zones du Sénégal sauf au nord et cela avec toutes les configurations.

Résultats et discussions

Ils varient d'environ 0.4 à un peu moins de 0.7 pour les simulations utilisant le schéma microphysique TS et entre 0.3 et 0.4 pour celles utilisant le schéma microphysique M2.

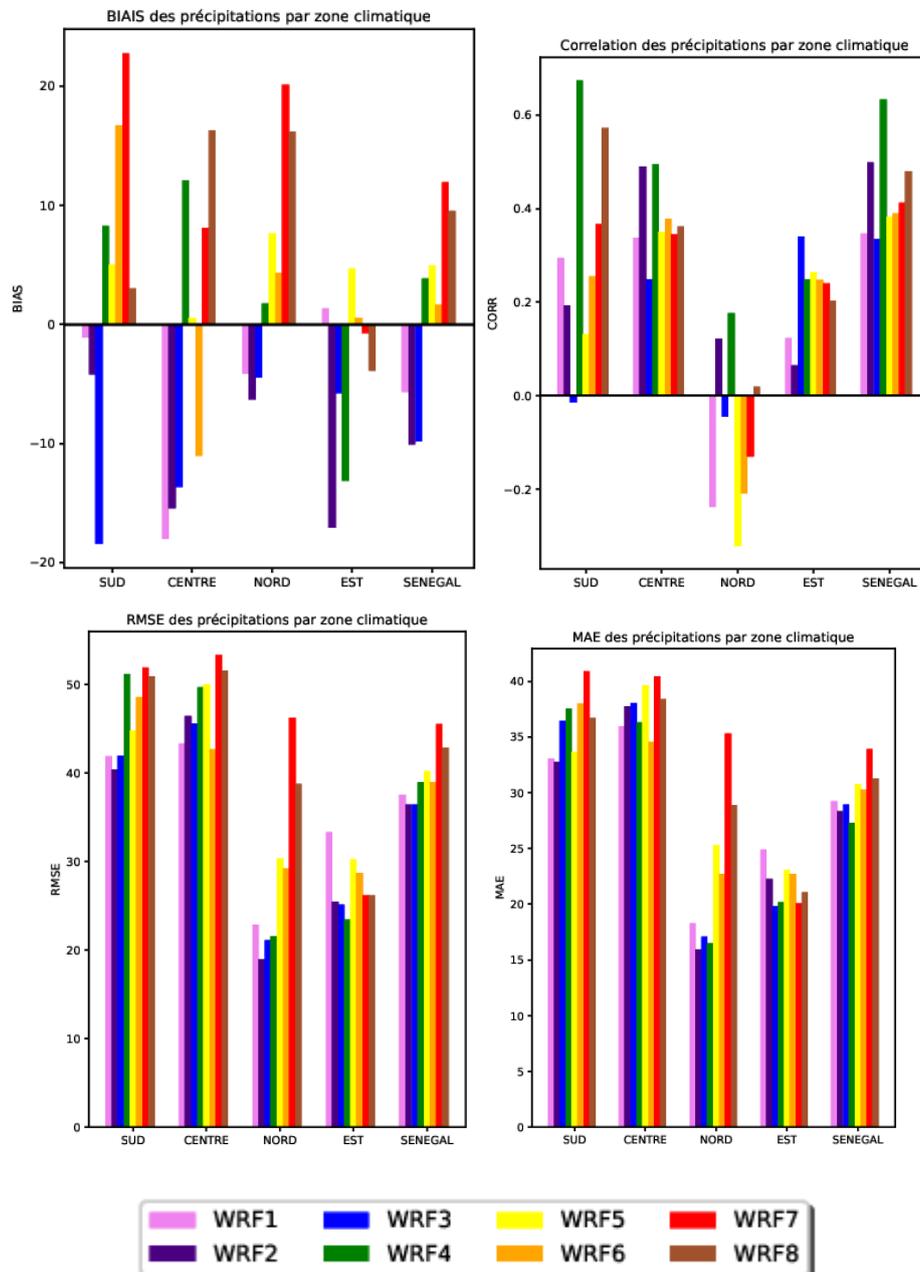


Figure 3.4 : Scores de différentes configurations du modèle WRF par rapport à ENACTS pour domaine 4Km

D'un schéma microphysique à l'autre, la corrélation varie considérablement en le combinant avec le schéma TK (WRF3 et WRF4). Au nord, les précipitations simulées de WRF1, WRF3, WRF5, WRF6, WRF7 et celles de ENACTS évoluent dans le sens opposés ; cela veut dire que des précipitations observées par ENACTS ne sont pas prévus par le modèle ou des précipitations prévus par le modèle ne sont pas réalisés.

Résultats et discussions

Quant au RMSE et au MAE, Ils varient peu avec le Noah MP LSM (respectivement d'environ 37 mm à 39 mm et 27mm à moins de 28mm) qu'avec RUC (respectivement 39 mm à 45 mm et 30 mm 34 mm). Ils varient peu également d'un schéma microphysique à l'autre. Le RMSE est d'environ 38 mm avec G3D-TS et TK-M2 (WRF2 et WRF3) plus faible suivi TK-TS et TK-M2 (WRF4 et WRF6). Quant à la MAE, elle est plus faible avec le WRF4 (environ 39 mm) et plus élevée avec le WRF7 (35 mm) dans toutes les zones.

3.1.2 Cas de l'événement météorologique du 02 Août 2021

3.1.2.1. Distribution spatiale des précipitations

Les champs de précipitations simulées par le modèle pour l'événement du 02 Août 2021 (du 02 Août 2021 à 6h au 03 Août 2021 à 6h) pour les huit expériences WRF dans le domaine 3 avec 4Km de

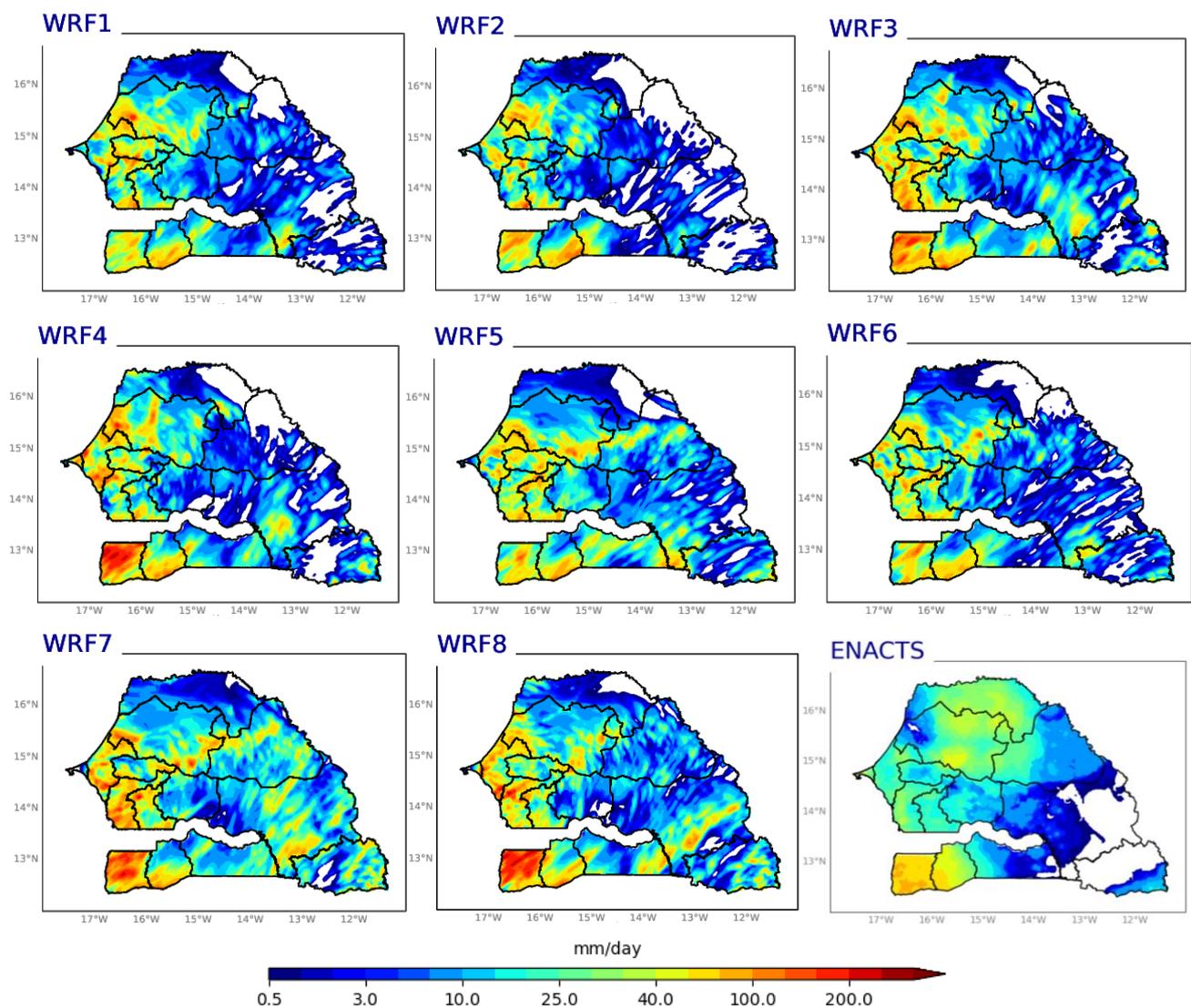


Figure 3.5 : Cumul des précipitations simulées par le modèle WRF dans le domaine 3 (4km de résolution) pour la journée météorologique du 02 Août 2021 – comparaison qualitative avec ENACTS (obs)

Résultats et discussions

résolution, ainsi que pour l'observation (ENACTS) pour cet évènement sont représentées sur la figure 3.5. Le modèle WRF a simulé de fortes précipitations au centre-ouest et au sud-ouest du Sénégal ainsi que de faibles précipitations au Nord du pays (figure 3.5) pour toutes les configurations. Cependant, les configurations WRF7 et WRF8 simulent également de fortes précipitations à l'est et qui ne sont pas montrées par les autres configurations, ni observées par ENACTS. Il faut noter que la configuration WRF2 simule mieux que les autres configurations les faibles précipitations observées par ENACTS dans la partie Est du Sénégal.

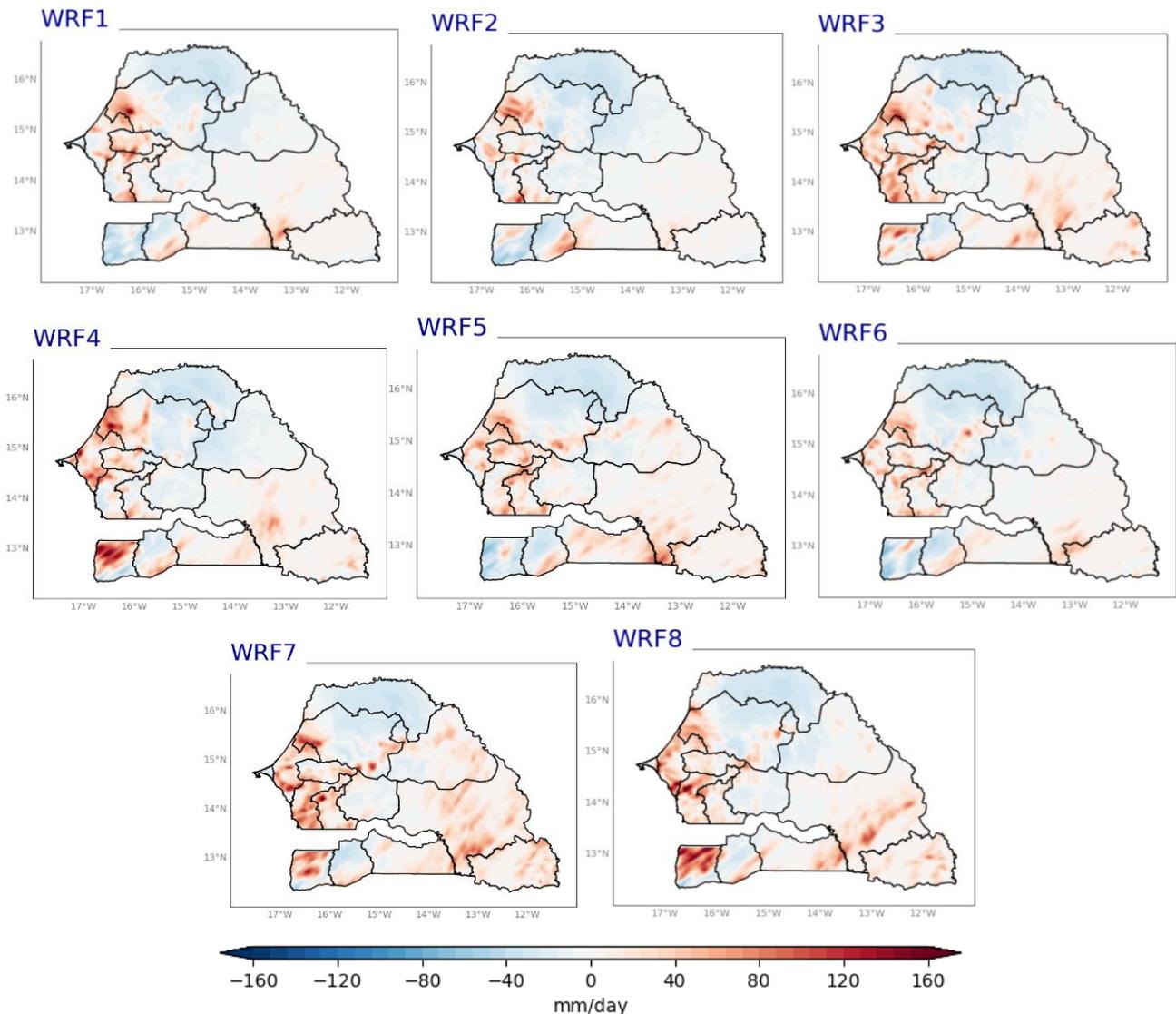


Figure 3.6 : Différence entre le cumul des précipitations simulées par le modèle WRF dans le domaine 3 (4km de résolution) par rapport à ENACTS pour la journée météorologique du 02 Août 2021

Pour évaluer la qualité des simulations, les différences ainsi que les scores (RMSE, MAE, le BIAIS et la corrélation) par rapport à ENACTS sont calculées et illustrées respectivement sur les figures 3.6, 3.7. En effet, comparées aux données ENACTS, il apparaît que toutes les paramétrisations physiques

Amélioration des prévisions météorologiques au Sénégal avec le modèle WRF

utilisées ont tendance à surestimer les précipitations sur la majeure partie du pays (figure 3.6). Les simulations utilisant les schémas microphysiques TS (WRF2, WRF4, WRF6 et WRF8) et M2 (WRF1, WRF3, WRF5 et WRF7) présentent de légères différences. En effet, les précipitations semblent être beaucoup plus intenses car le schéma microphysique M2. Une situation similaire est observée avec les schémas de convection, des différences entre simulations deviennent plus marquées d'un schéma de convection à l'autre. Les simulations avec GR3D (WRF1, WRF2, WRF5 et WRF6) arrivent à reproduire plus ou moins l'évènement pluvieux de ce cas au Sénégal, avec une surestimation moins prononcée. On note également plus de surestimation des précipitations au Nord et une partie du Sud avec le schéma tiedtke (TK). Les résultats de toutes les simulations WRF (surtout avec GR3D) reproduisent mieux (car surestiment moins) les précipitations à travers le pays comparées aux prévisions ENACTS.

3.1.2.2. Analyse des scores

Comme précédemment, les indicateurs de performances utilisées pour évaluer le modèle sont faits selon le même découpage (figure 3.3). La figure 3.7 présente les valeurs des corrélations, des biais, des RMSE ainsi que des MAE des différentes simulations de WRF avec les six (6) paramétrisations physiques et pour le cas d'étude du 02 Août 2021 (Cas 2).

L'ensemble des simulations montrent des biais positifs dans les zones centre et Est mais également quand nous considérons l'ensemble du Sénégal sauf pour WRF1 et WRF2 qui montrent des biais négatives et faibles dans la zone Sénégal (Figure 3.7). Les simulations avec les différentes configurations surestiment alors la quantité de précipitation dans les zones centre et Est et dans l'ensemble du Sénégal (sauf pour WRF 1 et 2). Par exemple sur l'ensemble du Sénégal, ils varient d'environ -02 mm à un peu plus de 12 mm pour les différentes simulations. La surestimation (sous-estimation) est moins marquée avec le schéma de cumulus GR3D utilisé dans WRF 5 et WRF6 (dans WRF1, WRF2). Cependant le schéma de cumulus GR3D combiné avec le schéma de convection TS (WRF6) donne un biais plus faible que lorsqu'on l'associe avec le schéma de convection M2 (WRF5).

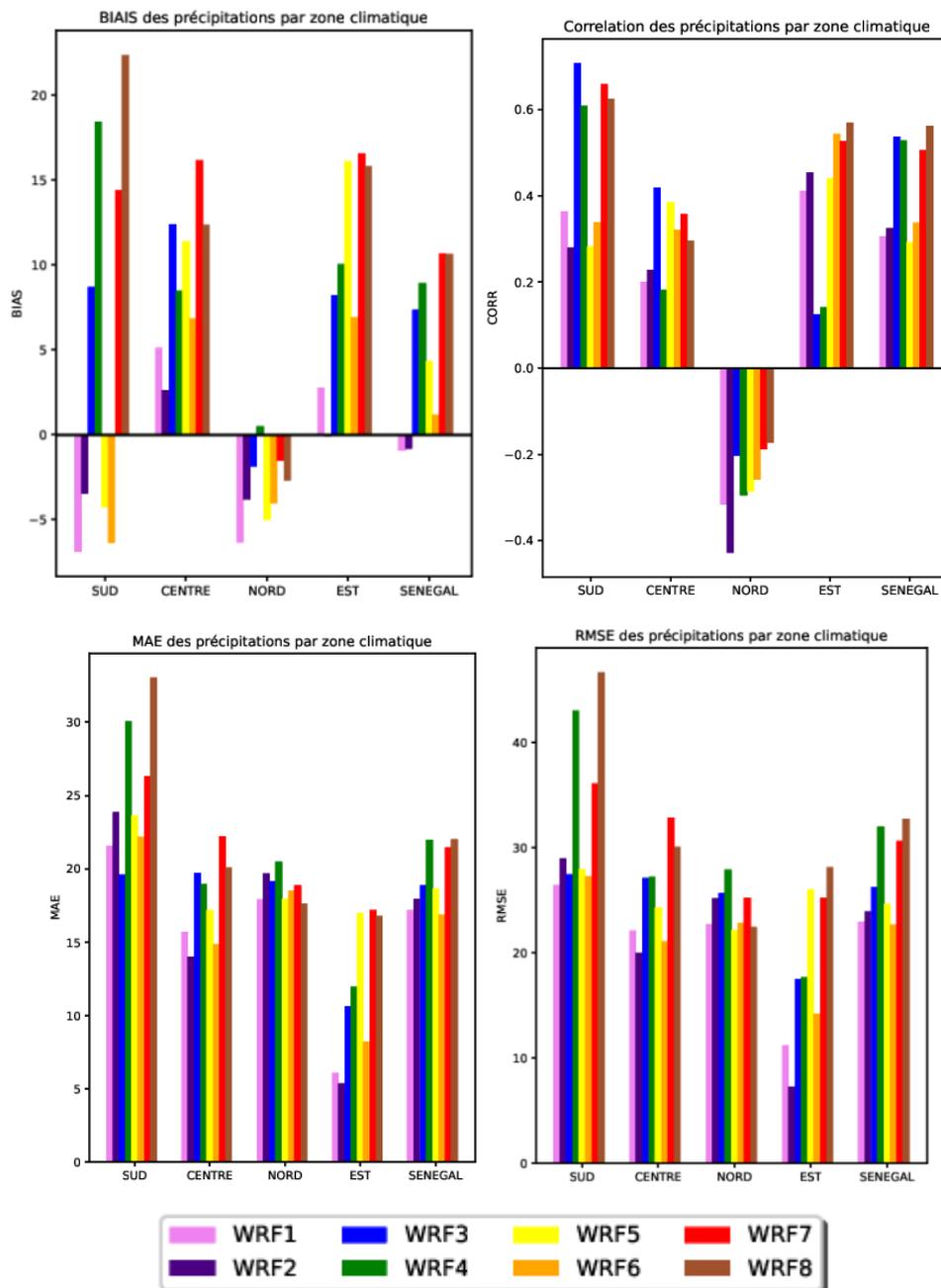


Figure 3.7: Scores de différentes configurations du modèle WRF par rapport à ENACTS pour domaine 4Km

Les corrélations sont positives dans l'ensemble des zones délimitées et pour toutes les configurations sauf au Nord où elles sont négatives (Figure 3.7). Les simulations détectent les précipitations observées par ENACTS dans les zones : Sénégal, Est, Sud et Centre. Par contre pour la zone Nord, nous remarquons que les différentes configurations de WRF ne parviennent pas à simuler la précipitation dans l'ensemble de cette zone comme montré dans la figure 3.7 où dans certaines zones au nord les simulations ne parviennent pas à détecter la précipitation. Sur la zone Sénégal, les valeurs de corrélation sont entre 0.3 et 0.4 pour les simulations utilisant le schéma cumulus GR3D et de 0.5 et 0.6 pour celles utilisant le schéma cumulus TK. Contrairement au biais, les corrélations semblent être

impactées par le schéma de cumulus TK associé au schéma de convection TS avec des corrélations plus élevées en moyenne sur le Sénégal, alors que l'association avec le schéma de convection M2 donne des corrélations faibles.

Quant au RMSE et au MAE (Figures 3.7), nous constatons qu'ils varient peu d'un schéma de modèle de surface et d'un schéma microphysique à l'autre. Par contre, ils sont influencés par la modification du schéma de cumulus avec des valeurs plus faibles avec les simulations WRF1 et WRF6 qui utilisent GR3D ; alors que les RMSE et MAE montrent des valeurs plus élevées avec WRF4 et WRF8 qui utilisent le schéma de cumulus TK.

3.1. 3. Vérification des simulations : Table de contingence

Comme indiqué dans la partie méthode, les éléments de la table de contingence ont été produits en se basant sur les observations de 66 stations (figure 2.1) sur le Sénégal et des simulations de WRF dans le domaine d03 avec 4Km de résolution. Les valeurs de POD, FAR et BIAS et de l'exactitude (Accuracy): issues de la table de contingence ne diffèrent pas trop selon les différents pourcentages de membres définis selon les seuils des précipitations. Pour les pluies modérées (5mm <P< 25mm), le modèle WRF parvient à les détecter avec un taux de (bonne) prévision qui dépasse 50% ; cependant

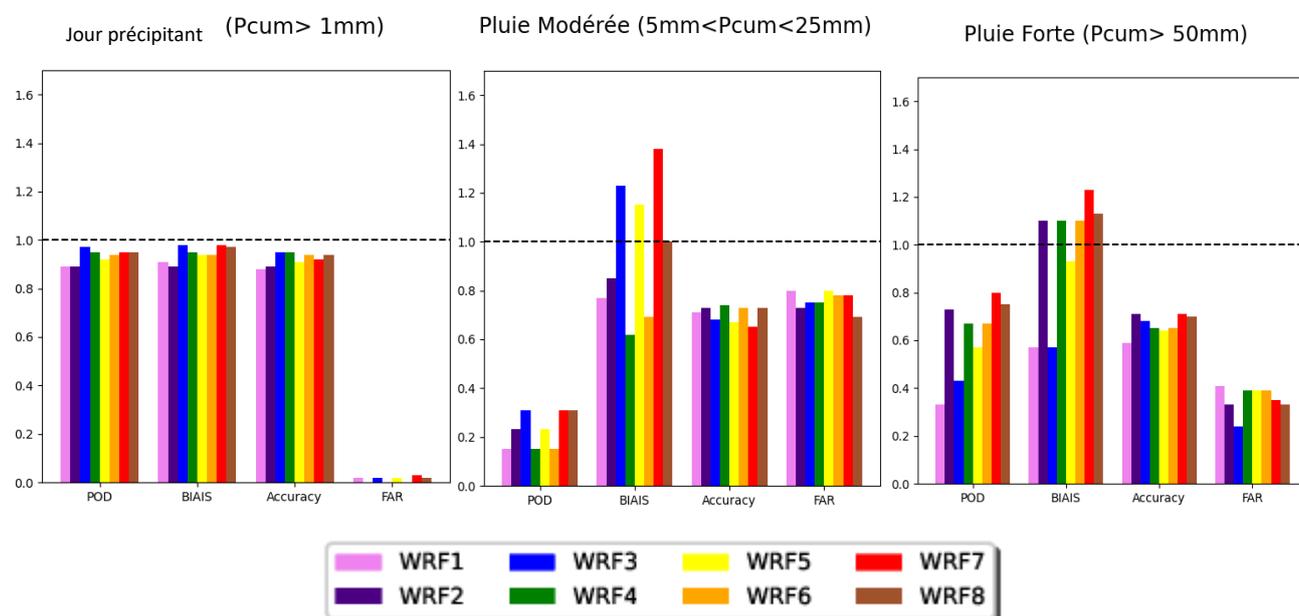


Figure 3.8: Récapitulatif des moyennes des scores de vérification pour la journée météorologique du 05 septembre 2020

le modèle présente une valeur élevée de FAR et une valeur faible de POD (Figure 3.5). La figure 3.5 montre Pour les précipitations supérieures à 1 mm et inférieures à 5 mm, toutes les configurations

Résultats et discussions

donnent de bons scores avec de faibles valeurs de FAR, mais montrent des valeurs de BIAIS, d'exactitude (Accuracy) et de POD proche de 1.

Les valeurs élevées de FAR et les faibles valeurs de POD sont observées pour les précipitations supérieures à 50mm comme montré sur les figures 3.8 et 3.9. Pour ces derniers, le BIAS est supérieur à 1 et montre une tendance à sur-prévoir pour les configurations WRF2, WRF4, WRF7 et WRF8 dans la journée météorologique du 05 septembre 2020 et WRF3, WRF4, WRF5, WRF6, WRF7 et WRF8 dans la journée météorologique du 02 août 2021. Comparé aux pluies modérées, le modèle représente mieux les fortes précipitations ($P > 50\text{mm}$). En comparant WRF1 à WRF2, WRF3 à WRF4, WRF3 à WRF6 et WRF7 à WRF8 L'utilisation de New Thompson (TS) comme schéma de microphysique donne la meilleur score.

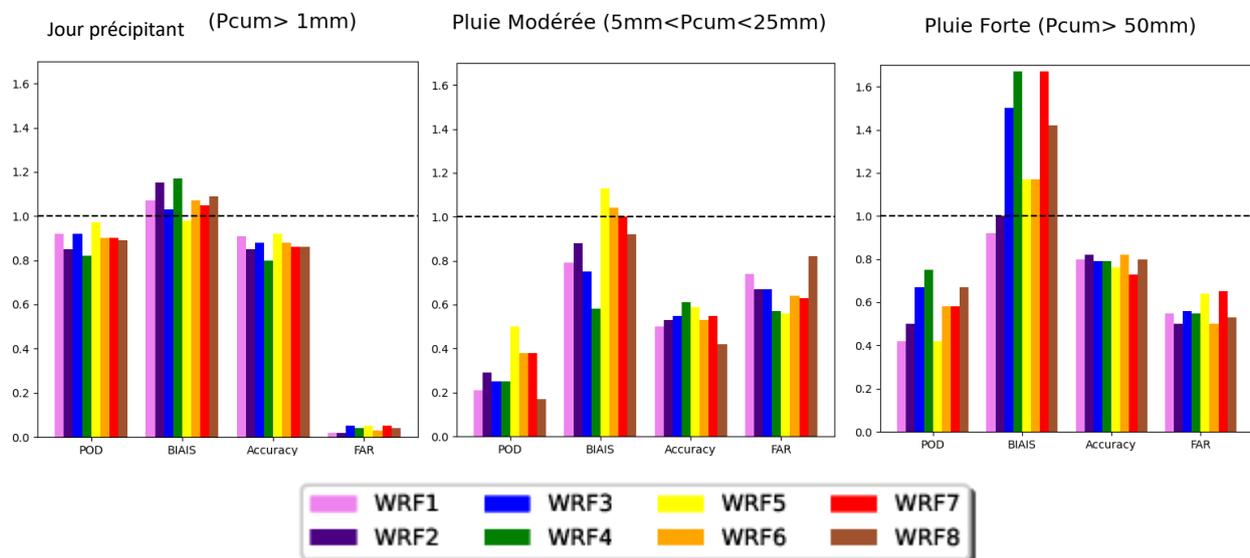


Figure 3.9 : Récapitulatif des moyennes des scores de vérification pour la journée météorologique du 02 août 2021

3.1.4. Analyse de la simulation diurne de la précipitation

Le cycle diurne est l'un des modes de variabilité les plus importants du système climatique tropical (Desboiset coll., 1988). Une simulation précise de l'amplitude et de la phase du cycle diurne des précipitations sus le Sénégal est importante pour la modélisation du climat, en raison du rôle crucial alerte de forte pluie.

Pour examiner la variation diurne des précipitations, des précipitants quotients simulées par le modèle WRF pour toutes les configurations et les précipitations observées dans les stations (sangalkam à ouest et Djiredji au sud) par pas de 6 heures sont représentées dans la figure 3.10 pour la journée

météorologique du 02 Août 2021 et la figure 3.11 pour la journée météorologique du 05 septembre 2020.

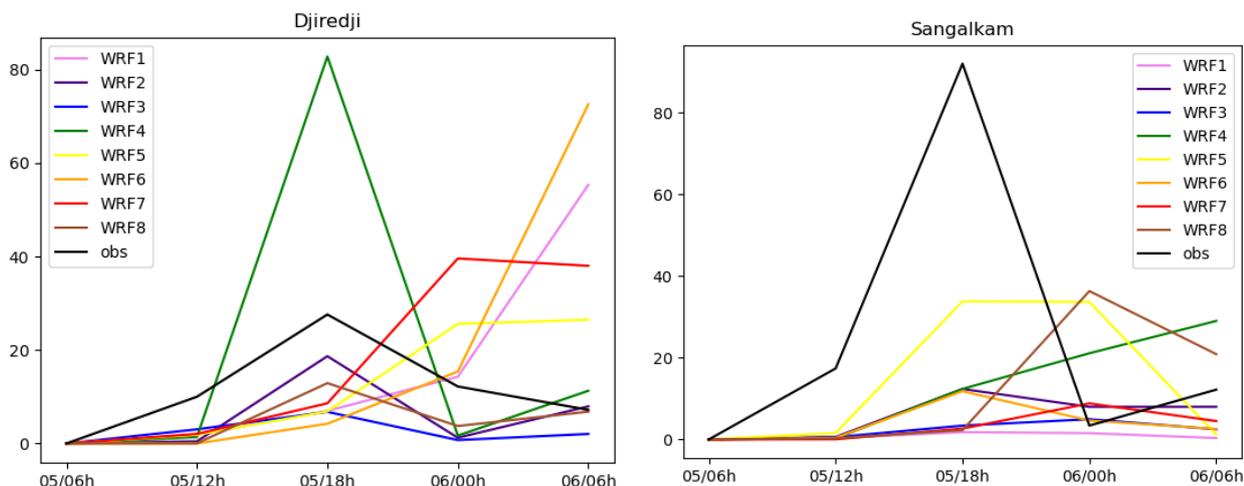


Figure 3.10 : variation diurne des précipitations observation et simulées par le modèle pour la journée météorologique du 05 septembre 2020

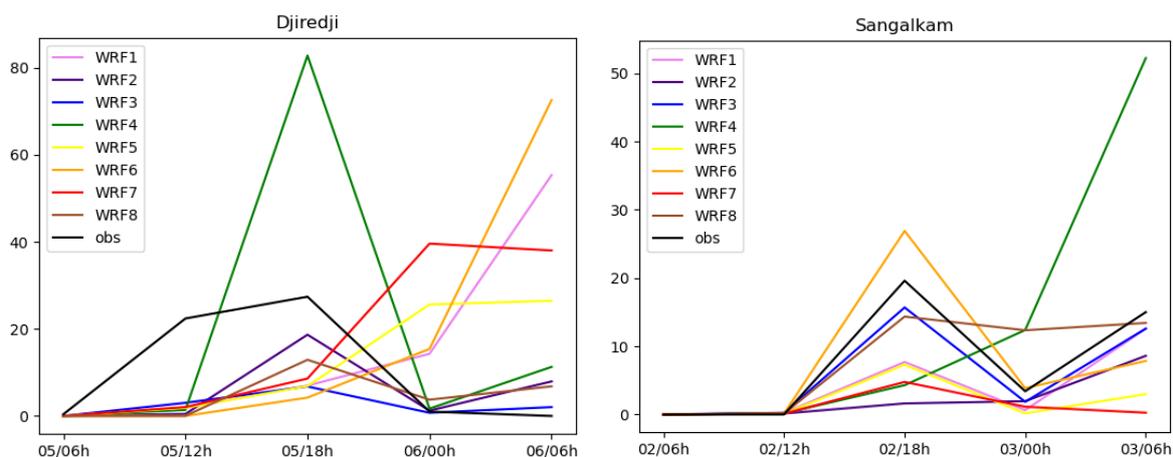


Figure 3.11 : variation diurne des précipitations observation et simulées par le modèle pour la journée météorologique du 02 août 2021

Malgré la complexité du signal diurne des précipitations, on observe que le modèle WRF est en phase avec les précipitations observées sauf pour les configurations WRF1, WRF5, WRF6 et WRF7. Il commence à observer la précipitation vers 12 heure. La capacité du modèle à représenter ce cycle diurne fournit un test intégré pour leurs paramétrisations physiques, car divers éléments impliquant la surface, la couche limite et l'atmosphère libre doivent être correctement représentée pour obtenir l'amplitude et la phase correcte. Le modèle présente des écarts par rapport aux observations, car il produit un cycle

diurne de pluie en phase avec l'insolation, conduisant à un maximum vers midi au lieu de la fin de l'après-midi (Yang et Slingo, 2001).

3.1.5 Analyse du diagramme de Taylor

Le diagramme de Taylor est un diagramme mathématiques conçu pour indiquer graphiquement laquelle de plusieurs représentations approximatives (ou modèles) d'un système, d'un processus ou d'un phénomène est la plus réaliste. Ce diagramme, inventé par Karl E. Taylor en 1994 (publié en 2001) facilite l'évaluation comparative de différents modèles. Il est utilisé pour quantifier le degré de correspondance entre le comportement modélisé et observé en termes de trois statistiques : le coefficient de corrélation de Pearson (R), l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et l'écart type (σ).

Ainsi dans le cadre de cette étude, des comparaisons statistiques des différentes configurations de WRF par rapport aux observations ENACTS ont été évaluées pour la journée météorologique du 05 Septembre 2020 et la journée météorologique du 02 août 2021 dans le domaine 3 à 4 km de résolution. Les figures 3.12 et 3.13 montrent un cadre visuel résumant statistiquement et graphiquement les scores de compétence entre les configurations WRF et les observations ENACTS. La distance radiale à partir de l'origine mesure l'ampleur de chaque écart type σ_n des différentes configurations WRF normalisées en divisant par l'écart type σ des observations ENACTS. L'erreur quadratique moyenne (RMSE) est représentée par les valeurs des arcs de cercles en rouge. La corrélation spatiale entre les différentes configurations WRF et les observations ENACTS, est donnée par la position azimutale de chaque point étiqueté le long de l'arc extérieur. Les tableaux 3.1 et 3.2 montrent les scores statistiques obtenus par chacune des 08 configurations WRF pour les différents cas d'étude. Le diagramme de Taylor permet non seulement d'évaluer la performance du modèle en caractérisant la relation statistique entre les configurations et les observations, mais il nous permet aussi d'évaluer la sensibilité des différents schémas de paramétrisations.

❖ Cas du 05 septembre 2020

Pour cet évènement, le WRF2, le WRF3 et le WRF4 sont plus proche des observations : WRF4 a enregistré la corrélation la plus élevée de 0,632 mais a surestimé la précipitation de 3.820 mm, WRF2 a enregistré le moins RMSE de 36.421 mm et sous-estimé l'observation de 10.058 mm et WRF3 a enregistré un écart type le plus faible de 1.699 mais a surestimé de 9.792 mm. La variation des précipitations est plus influencée par le changement du schéma de modèle terre surface. Parmi ceux utilisés, le Noah MP LSM simule mieux avec la comparaison des configurations WRF1 et WRF5, WRF2 et WRF6 et WRF4 et WRF8. Le Noah MP LSM combiné avec le M2 comme schéma de microphysique dans WRF2 et WRF4 donne des résultats qui se rapprochent plus de observations.

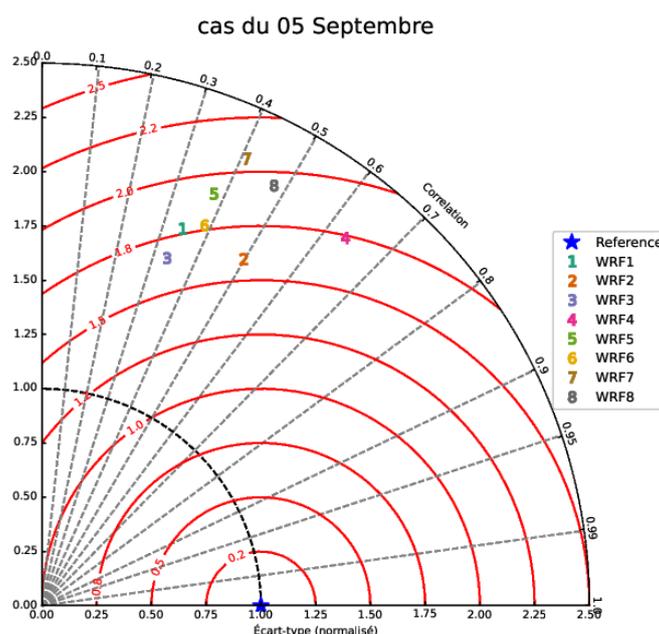


Figure 3.12: Diagramme de Taylor entre les différentes configurations du modèle WRF et les observations ENACTS

Tableau 3.1 : Les quatre statistiques différentes pour la journée météorologique du 05 septembre 2020

Configuration	Biais	Ecart type	RMSE	Corrélation
WRF1	-5.675	1.851	37.569	0.345
WRF2	-10.058	1.842	36.421	0.498
WRF3	-9.792	1.699	36.442	0.334
WRF4	3.820	2.189	38.995	0.632
WRF5	4.923	2.052	40.196	0.381
WRF6	1.605	1.902	39.014	0.389
WRF7	11.935	2.261	45.521	0.412
WRF8	9.498	2.206	42.878	0.479

❖ **Cas du 02 Août 2021**

Pour cet évènement, le WRF1, le WRF2, le WRF5 et le WRF8 sont plus proche des observations : WRF8 a enregistré la corrélation la plus élevée de 0,562 mais a surestimé les précipitations de 10.651 mm, WRF6 a enregistré le moins RMSE de 22.693 mm et surestimé l’observation de 1.145 mm. La

variation de la précipitation est plus influencée par le changement du schéma de cumulus. Parmi ceux utilisés, le Gr3D (WRF1, WRF2, WRF5 et WRF6) simule mieux les précipitations dans le pays. La combinaison avec TS (le schéma de microphysique) comme WRF6 se rapproche plus des observations.

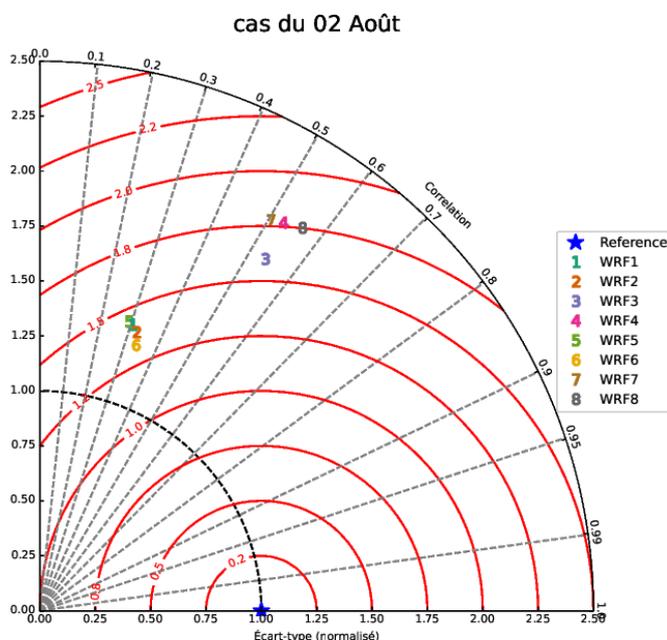


Figure 3.13: Diagramme de Taylor entre le modèle WRF et Taylor entre les différentes configurations du modèle WRF et les observations ENACTS

Tableau 3.2 : Les quatre statistiques différentes pour la journée météorologique du 02 août 2021

Configuration	Biais	Ecart type	RMSE	Corrélation
WRF1	-0.941	0.951	22.990	0.306
WRF2	-0.800	0.932	23.954	0.324
WRF3	7.372	1.319	26.268	0.536
WRF4	8.928	1.446	32.008	0.528
WRF5	4.341	0.956	24.702	0.291
WRF6	1.145	0.892	22.693	0.337
WRF7	10.686	1.431	30.654	0.505
WRF8	10.651	1.465	32.751	0.562

3.2 Discussions

Les différentes configurations testées du modèle WRF arrivent à représenter en moyenne le champ des précipitations au Sénégal comparées aux données d'observations ENACTS (figure 3.1 et figure 3.5). Pour l'évènement du 05 septembre, l'analyse des scores montre que le WRF4 a la corrélation la plus élevée avec moins de biais faible MAE sur le Sénégal. Et pour l'évènement du 02 août 2021 le WRF8 à la corrélation la plus élevée par contre le WRF6 affiche moins de biais avec la plus faible MAE et RMSE sur le Sénégal.

L'analyse des résultats nous a permis de déceler qu'une bonne configuration contribue à améliorer les scores des simulations. Il a été mis en évidence que les précipitations sont fortement sensibles aux schémas de cumulus. Le choix des schémas de microphysiques et schémas de modèle surface terre ont moins d'impact sur les précipitations simulées par rapport aux schémas de cumulus. Parmi toutes les simulations effectuées, les meilleures performances ont été obtenues en utilisant le schéma de microphysique TS et G3D comme schéma de cumulus dans le jeu des paramétrisations physiques. Ainsi, l'utilisation de ces schémas de configurations dans toutes les simulations a permis d'avoir de bons résultats.

Ces résultats nous révèlent donc la forte sensibilité du modèle WRF à la paramétrisation physique dans les simulations de précipitations. Cela rejoint les résultats de l'étude de Klein et al 2015. Berry (2009) qui a montré que l'utilisation du schéma de cumulus GD dans WRF produit une représentation réaliste du champ de précipitations et le Jet d'Est Africain se propageant vers l'ouest. Ces résultats sont aussi en phase avec ceux d'Igri et al., 2018 qui montrent que le schéma de cumulus Tiedtke (TK) combiné au schéma de microphysique Thompson (TS) donne les meilleurs résultats.

Bien que le modèle WRF parvienne à simuler les précipitations, des insuffisances par rapport aux observations subsistent, notamment sur la distribution spatiale et les quantités de précipitations. En effet, les situations des précipitations pour les cas d'étude ont été reproduites de manière pas très satisfaisante pour toutes les configurations avec des déphasages spatiaux, de faibles corrélations et des sous-estimations ou surestimations des quantités des précipitations par endroit. Ces écarts pourraient être liés aux erreurs des conditions initiales (erreurs dans les données de forçage), celles des conditions aux limites (influence des champs latéraux) ainsi qu'aux paramétrisations physiques elles-mêmes (Flaounas et al., 2011; Cretat et al., 2010). Les erreurs émaneraient aussi des déficiences internes du modèle dans la simulation des Ondes d'Est Africaines qui pilotent la convection profonde sur l'Afrique de l'Ouest (Noble et al., 2014).

Conclusion et perspectives

L'objectif de ce travail était de faire un test de sensibilité des paramétrisations physiques du modèle WRF en évaluant les précipitations simulées. A cet effet, deux cas d'étude d'événements pluviométriques ont été sélectionnés sur la base des données d'observations in-situ de l'ANACIM durant la saison des pluies des années 2020 et 2021.

Pour chaque cas d'étude, 8 configurations du modèle WRF ont été testées. Le modèle a été initialisé et forcé aux limites latérales du domaine de simulation par les analyses de GFS.

Les simulations du modèle ont été confrontées aux champs de précipitations des données d'observations ENACTS. Une étude comparative des distributions spatiales des précipitations et des scores pour chaque cas d'étude a été réalisée.

Il en résulte que WRF simule bien dans l'ensemble les précipitations. Cependant, on note une surestimation pour les fortes pluies.

Parmi les configurations qu'on a testées, celle associant le schéma de cumulus G3D, le schéma de microphysique Thompson et les schémas de modèle de surface Noah MP LS a donné de meilleurs résultats pour le Sénégal (WRF2).

Ces résultats sont encourageants puisqu'ils démontrent le gain de performance du modèle WRF. La configuration WRF2 représente mieux les précipitations que celle utilisée en opérationnelle à ANACIM WRF4.

Les résultats obtenus dans cette étude préliminaire sont toutefois encourageants et suggèrent que l'on peut avoir relativement confiance au champ de pluie simulé par le modèle WRF.

En terme de perspectives, il serait aussi pertinent :

- ✚ de faire d'autres tests de sensibilités
- ✚ de faire plusieurs cas d'étude de simulations
- ✚ d'analyser de façon plus approfondie la sensibilité des résultats à la taille du domaine,
- ✚ d'analyser la distance optimale entre l'imbrication d'un domaine père et fils
- ✚ d'utiliser d'autres données de forçage (ECMWF ou NCEP2 par exemple)
- ✚ de faire l'assimilation de données.

Bibliographie

- Beucher, F. (2010). *Manuel de météorologie tropicale: des alizés au cyclone tropical*. Météo-France.
- Bernard, M. C. (2001). *Contribution à l'étude de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'ouest. Analyse des conséquences d'une sécheresse persistante: normes hydrologiques et modélisation régionale* (Doctoral dissertation, Université Montpellier II) 258pp.
- Bouali, L. (2009). *Prévisibilité des précipitations ouest africaines (échelles intrasaisonniers et saisonniers) au travers des simulations type DEMETER et des observations* (Doctoral dissertation, Université de Bourgogne) 160pp.
- Burpee, R. W., 1972 : The origin and structure of easterly waves in the lower troposphere of north Africa. *J. Atmos. Sci.*, 29, 77-90.
- CEDEAO. (2015). *L'agriculture et l'alimentation en Afrique de l'Ouest. Mutations, performances et politiques agricoles*. Abuja (Nigeria) 138pp.
- Chen, Y., SRH Rizvi, X.-Y. Huang, J. Min et X. Zhang, 2013: Caractéristiques de l'équilibre des covariances d'erreur de fond multivariées et de leur impact sur les analyses et les prévisions dans les régions tropicales et arctiques. *Météore. Atmos. Phys.*, 121, 79–98.
- Coiffier, J. (2009). Les bases de la prévision numérique du temps. *Meteorologie*, (67), 60.
- Cretat, J., Pohl, B., & Richard, Y. (2011). Les modèles climatiques régionaux outils de décomposition des échelles spatio-temporelles. *Dixièmes Rencontres de Théo Quant, Besançon (France)*, 11.
- Dhonneur G., 1974 : *Traité de météorologie tropicale*. Météo-France, 151p.
- 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* (Doctoral dissertation, Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II) 219pp.
- Flaounas, E., Bastin, S., & Janicot, S. (2011). Regional climate modelling of the 2006 West African monsoon: sensitivity to convection and planetary boundary layer parametrisation using WRF. *Climates Dynamics*, 36(5-6), 1083-1105. doi:10.1007/s00382-010-0785-3
- Gael, F. M., & Abdellahi, O. Z. (2015). *Evaluation des indices de convection profonde pendant la période de mousson 2014 en Afrique de l'Ouest et du Centre à l'aide du modèle régional WRF-ARW*. *Memoire d'ingenieur EAMAC*

Bibliographie

Grell, GA, & Dévényi, D. (2002). Une approche généralisée du paramétrage de la convection combinant des techniques d'ensemble et d'assimilation de données. *Lettres de recherche géophysique*, 29 (14), 38-1.

Hong, S.-Y. et H.-L. Pan, 1996: Diffusion verticale de la couche limite non locale à moyenne portée modèle de prévision, *Lun. Wea. Tour.*, 124, 2322–2339

Hourdin, Frédéric. 2011. « 7. Les paramétrisations physiques ». In *Le climat à découvert*, édité par Catherine Jeandel et Rémy Mosseri, 162-65. CNRS Éditions. <https://doi.org/10.4000/books.editions-cnrs.11441>.

Houze RA, Hobbs PV, Herzegh PH, Parsons DB. 1979. Size Distributions of Precipitation Particles in Frontal Clouds. *Journal of the Atmospheric Sciences* 36:156-162

Iacono, MJ, JS Delamere, EJ Mlawer, MW Shephard, SA Clough et WD Collins, 2008: Forçage radiatif par les gaz à effet de serre à vie longue: calculs avec les modèles de transfert radiatif de l'ARE. *J. Geophys. Rés.*, 113, D13103

Igri, P., Tanessong, RS, Vondou, DA, Panda, J., Garba, A., Mkankam, FK et Kamga, A. (2018). Évaluation de la performance du modèle WRF dans la prévision des conditions météorologiques à fort impact sur l'Afrique centrale et occidentale : une approche basée sur les ensembles. *Risques naturels*, 93 (3), 1565-1587.

Janjic, ZI, 1994: Le modèle de coordonnées step-mountain eta: développements ultérieurs de la convection, de sous-couche visqueuse et de fermeture de turbulence, *Lun. Wea. Tour.*, 122, 927–945.

Karbou, F., Beucher, F., Bock, O., Lafore, J.-P., Mumba, Z., Ngamini, J.-B., . . . Redelsperger, J.-L. (2012). Prévision et météorologie opérationnelles. *La météorologie*.

Khain, A., & Lynn, b. (2007, November 29). Utilization of spectral bin microphysics and bulk parameterization schemes to simulate the cloud structure and precipitation in a mesoscale rain event. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. doi::10.1029/2007JD008475

Kiehl J.T. et Trenberth K.E., (1997): *Earth's annual global mean energy budget*. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 78, 197-208.

Lafore, J.P and M. W. Moncrieff, 1989 : A numerical investigation of organization and interaction of the convective and mesoscale regions of squall line. *J. Atmos. Sci.*, 46, 521-544

Lafore, J. P. (2007). Premiers résultats de la campagne AMMA : mieux prévoir les précipitations en Afrique de l'ouest. Météo-France. Consulté le 07 10, 2020, sur <http://www.meteofrance.fr/actualites/206886>.

Lebel, T., Diedhiou, A., & Laurent, H. (2003). Seasonal cycle and interannual variability of the Sahelian rainfall at hydrological scales. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D8) 219pp.

Lespinas, F.(2008) : *Impacts du changement climatique sur l'hydrologie des fleuves côtiers en région Languedoc-Roussillon, THÈSE DE DOCTORAT/UNIVERSITÉ DE*

Bibliographie

PERPIGNAN , pp.10-15

Mayaux, Philippe, Etienne Bartholomé, Michel Massart, Christelle Van Cutsem, Ana Cabral, A. Nonguierma, O. Diallo, C. Pretorius, M. Thompson, et M. Cherlet. 2003. « A land cover map of Africa. Carte de l'occupation du sol de l'Afrique ». *European Commission, Joint Research Center, EUR 20665*, 56pp.

Malardel, S. (2009). *Fondamentaux de météorologie à l'école du temps* (éd. 2). Toulouse: Cépaduè.

Malardel, S. (2018). Les modèles de prévision météorologique. *Encyclopédie de l'Environnement*. Consulté le mars 25, 2020, sur <http://www.encyclopedie-environnement.org/?p=2344> 88pp

Noble E, Druyan L. M, Fulakeza M. (2017). The sensitivity of WRF daily summertime simulations over West Africa to alternative parameterizations. Part II : Precipitation. *Mon. Wea. Rev.*, 145(1), 215-233

Martiny, N., Dessay, N., Yaka, P., Toure, O., Sultan, B., Rebaudet, S., . . . Gaudart, J. (2012). Le climat, un facteur de risque pour la santé en Afrique de l'Ouest. *La Météorologie - Spécial AMMA*.

Mathon, V. L., & Lebel, T. (2002). Mesoscale convective system rainfall in the Sahel. *Journal of Applied Meteorology*, 1081-1092.

Kabore, P. N., Ouedraogo, A., Sanon, M., Yaka, P., & Some, L. (2017). Caractérisation de la variabilité climatique dans la région du Centre-Nord du Burkina Faso entre 1961 et 2015. *Climatologie*, 14, 82-95.

Plakhova, T. V., Romanchuk, A. Y., Likhosherstova, D. V., Baranchikov, A. E., Dorovatovskii, P. V., Svetogorov, R. D., ... & Kalmykov, S. N. (2019). Size effects in nanocrystalline thoria. *The Journal of Physical Chemistry C*, 123(37), 23167-23176.

Pohl, B., Crétaf, J., & Camberlin, P. (2011). Testing WRF capability in simulating the atmospheric water cycle over Equatorial East Africa. *Climate Dynamics*, 37(7), 1357-1379.

Powers J. G , Klemp J. B, Skamarock W. C, Davis C. A, Dudhia J, Gill D. O, Coen J. L, Gochis D. J, Ahmadov R, Peckham S. E, Grell G. A, Michalakes J, Trahan S, Wang W, Schwartz C. S, Romine G. S, Liu Z.-Q, Snyder C, Chen F, Barlage M. J, Yu W, Duda M. G. (2017). The Weather Research and Forecasting (WRF) Model : Overview, system efforts, and future directions. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*,98, 1717–1737

Rakotomalala R. (2015). Analyse de corrélation. Cours statistique à l'université de lumière Lyon, 2 , 89.

RINGARD, J. (2013). Etude rétrospective et prospective des vagues de chaleur en Afrique de l'Ouest.

Sadourny, R. (1994). *Le climat de la Terre*. Dominos/Flamarion.

Sadourny R., (1994): *Le climat de la Terre, Flammarion, collection Dominos, Paris*. Sahelian rainfall at hydrological scales. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108.

Bibliographie

Shamarock, W., Klemp, J., Dudhia, J., Gill, D., Liu, Z., Berner, J., . . . Huang, X.-Y. (2019). A description of the Advanced Research WRF Model Version 4. *NCAR Technical Notes*(No. NCAR/TN-556+STR). doi:doi:10.5065/1dfh-6p97

Smirnova, TG, JM Brown, SG Benjamin et D. Kim, 2000: Paramétrage du froid processus saisonniers dans le schéma MAPS de surface terrestre. *J. Geophys. Rés.*, 105 (D3), 4077–4086

Srinivasan M., (2006): <http://sealevel.jpl.nasa.gov/overview/climate-climatic.html>

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.

Thompson, G., RM Rasmussen et K. Manning, 2004: prévisions explicites des précipitations hivernales tion utilisant un schéma de microphysique en vrac amélioré. Partie I: Description et analyse de sensibilité. *Lun. Wea. Tour.*, 132, 519–542

Thorncroft. C. D., and M. Blackburn, 1999 : Maintenance of the African Easterly Jet. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 125, 763-786.

Tiedtke, M., 1989: Un schéma complet de flux de masse pour les paramètres du cumulus isation dans les modèles à grande échelle. *Lun. Wea. Tour.*, 117, 1779-1800. doi: 10.1175 / 1520- 0493 (1989) 117;1779: ACMFSF_i2.0.CO; 2

Colavolpe, C., Voitus, F., & Bénard, P. (2017). Schémas RK-IMEX HEVI pour modèles atmosphériques entièrement compressibles avec advection : analyses et tests numériques. *Journal trimestriel de la Royal Meteorological Society* , 143 (704), 1336-1350.

Wilks D. S. (2011). *Statistical methods in the atmospheric sciences* (Vol. 100). Academic press 4pp.

Xie S. P, Carton J. A. (2004). Tropical Atlantic variability : Patterns, mechanisms, and impacts. *Earth's Climate : The Ocean-Atmosphe*

Annexe

namelist.WPS

```
&share
wrf_core = 'ARW',
max_dom = 3,
start_date = '2021-08-02_06:00:00','2021-08-02_06:00:00','2021-08-02_06:00:00',
end_date = '2021-08-03_06:00:00','2021-08-02_06:00:00','2021-08-02_06:00:00',
interval_seconds = 21600
io_form_geogrid = 2,
/
&geogrid
parent_id = 1, 1, 2,
parent_grid_ratio = 1, 3, 3,
i_parent_start = 1, 34, 14,
j_parent_start = 1, 35, 55,
e_we = 175, 181, 214,
e_sn = 145, 181, 184,
geog_data_res = 'default','default',
dx = 36000,
dy = 36000,
map_proj = 'mercator',
ref_lat = 17.5,
ref_lon = -2,
truelat1 = 10,
truelat2 = 60,
stand_lon = -35.0,
geog_data_path =
'/home/nwp/Build_WRF/data/geog/'
/
&ungrib
out_format = 'WPS',
prefix = 'FILE',
/
&metgrid
fg_name = 'FILE'
io_form_metgrid = 2,
```

namelist.input

```
&time_control
run_days = 0,
run_hours = 24,
run_minutes = 0,
run_seconds = 0,
start_year = 2021, 2021, 2021,
start_month = 08, 08, 08,
start_day = 02, 02, 02,
start_hour = 06, 06, 06,
end_year = 2021, 2021, 2021,
end_month = 08, 08, 08,
end_day = 03, 03, 03,
end_hour = 06, 06, 06,
interval_seconds = 21600
input_from_file = .true.,.true.,.true.,
history_interval = 60, 60, 60,
frames_per_outfile = 1, 1, 1,
restart = .false.,
restart_interval = 10800,
io_form_history = 2
io_form_restart = 2
io_form_input = 2
io_form_boundary = 2
auxinput1_inname =
"met_em.d<domain>.<date>",
history_outname
='/home/nwp/Build_WRF/output/mas/02_08_2021/WRF9/wrfout_d<domain>_<date>.nc'
debug_level = 0,
/
&domains
```

Annexe

```

time_step          = 180,
time_step_fract_num      = 0,
time_step_fract_den     = 1,
max_dom            = 3,
e_we              = 175, 181, 214,
e_sn              = 145, 181, 184,
e_vert           = 51, 51, 51,
p_top_requested    = 5000,
num_metgrid_levels = 34,
num_metgrid_soil_levels = 4,
dx               = 36000, 12000, 4000,
dy               = 36000, 12000, 4000,
grid_id         = 1, 2, 3,
parent_id      = 1, 1, 2,
i_parent_start = 1, 34, 14,
!! i_parent_start = 1, 32, 30,
j_parent_start = 1, 35, 55,
!! j_parent_start = 1, 35, 30,
parent_grid_ratio = 1, 3, 3,
parent_time_step_ratio = 1, 3, 3,
feedback         = 0,
smooth_option    = 0
/
&physics
mp_physics      = 10, 10, 10,
cu_physics      = 5, 5, 5,
ra_lw_physics   = 4, 4, 4,
ra_sw_physics   = 4, 4, 4,
bl_pbl_physics  = 2, 2, 2,
sf_sfclay_physics = 2, 2, 2,
sf_surface_physics = 2, 2, 2,
radt            = 30, 10, 3,
bldt           = 0, 0, 0,
cudt           = 5, 5, 5,
icloud         = 1,
num_land_cat   = 21,
sf_urban_physics = 0, 0, 0,
/
&fdda
/
&dynamics
hybrid_opt     = 2,
w_damping      = 1,
diff_opt       = 1, 1, 1,
km_opt        = 4, 4, 4,
diff_6th_opt   = 0, 0, 0,
diff_6th_factor = 0.12, 0.12, 0.12,
base_temp      = 290.
damp_opt       = 3,
zdamp          = 5000., 5000., 5000.,
dampcoef       = 0.2, 0.2, 0.2
khdif          = 0, 0, 0,
kvdif          = 0, 0, 0,
non_hydrostatic = .true., .true., .true.,
moist_adv_opt  = 1, 1, 1,
scalar_adv_opt = 1, 1, 1,
gwd_opt        = 1,
/
&bdy_control
spec_bdy_width = 5,

```

Annexe

```
specified          = .true.          &namelist_quilt  
/  
&grib2            nio_tasks_per_group = 0,  
/  
                  nio_groups = 1,  
/  
                  /
```