

Amélioration des prévisions météorologiques au Sénégal avec le modèle WRF

Massara DIAKHATE^{1*}, Samo DIATTA¹, Youssouph SANE², Habib SENGHOR², Emmanuel D POAN³, Abdou Aziz COLY⁴

¹Laboratoire d'Océanographie, des Sciences de l'Environnement et du Climat (LOSEC), Ziguinchor, Senegal

² Agence National Aviation Civil et la Météorologie (ANACIM), Dakar Yoff, Dakar BP 8184, Senegal

³Agence Nationale de la Météorologie, Avenue de la Paix, Somgandé, 01, Ouagadougou BP 576, Burkina Faso

⁴ Laboratoire d'Environnement, Informatique, Télécommunications et Energies Renouvelables, Université Gaston Berger de Saint Louis, Saint Louis, Senegal

[*massdiakhate16@gmail.com](mailto:massdiakhate16@gmail.com)

INFORMATIONS SUR L'ARTICLE

Historique de l'article:

Reçu le : 1 janvier 2024

Reçu en format révisé le : 17 août 2025

Accepté le : 04 octobre 2025

Keywords: ENACTS, weather forecasting, regional model (WRF), forecast skill, West African Monsoon, parameterization scheme, precipitation, GFS.

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

ABSTRACT

Precipitation forecasting plays a key role in vital sectors such as agriculture, livestock, and fisheries. However, the complexity of the West African monsoon, characterized by strong spatio-temporal variability, makes its modeling particularly challenging. This study evaluates eight configurations of the WRF model, combining different physical parameterization schemes such as cumulus convection, microphysics, radiation, planetary boundary layer, and land surface processes, in order to identify the optimal setup for predicting precipitation over Senegal. The WRF model, forced by GFS data, is used to simulate two rainfall events (5 September 2020 and 2 August 2021) with a 24-hour forecast lead time (from 06 UTC to 06 UTC the following day). A three-domain nested approach is adopted: 36 km for West Africa, 12 km for an intermediate domain, and 4 km for Senegal. The results are evaluated using ENACTS data and observations from 66 rain gauge stations. All configurations generally reproduce the observed precipitation patterns, despite some biases. However, model sensitivity remains strongly influenced by the choice of the cumulus scheme, while the microphysics and land surface schemes have a more limited effect. The combination of the G3D cumulus scheme, Thompson microphysics, and Noah-MPLS land surface scheme seem to be the most effective for predicting precipitation. These findings highlight the importance of selecting appropriate physical parameterizations to improve precipitation forecasting in Senegal with the WRF model, particularly during extreme weather events.

RESUME

La prévision des précipitations joue un rôle essentiel pour des secteurs clés tels que l'agriculture, l'élevage et la pêche. Cependant, la complexité de la mousson ouest-africaine, marquée par une forte variabilité spatio-temporelle, rend sa modélisation particulièrement difficile. Cette étude évalue huit configurations du modèle WRF, combinant différents schémas de paramétrisation tels que la convection des cumulus, la microphysique, le rayonnement, la couche limite planétaire et de surface, afin d'identifier la configuration optimale pour simuler les précipitations au Sénégal. Le modèle WRF, forcé par les données du GFS, est utilisé pour simuler deux épisodes de fortes pluies (les 5 septembre 2020 et 2 août 2021) avec une échéance de 24 h (de 06 TU à 06 TU le lendemain). Une approche à trois domaines imbriqués a été adoptée : 36 km pour l'Afrique de l'Ouest, 12 km pour une zone intermédiaire et 4 km pour le Sénégal. Les résultats sont évalués à partir des données ENACTS et de 66 stations pluviométriques. Ils montrent que toutes les configurations reproduisent globalement bien les précipitations observées, malgré certains biais. Toutefois, la sensibilité du modèle demeure fortement influencée par le choix du schéma de cumulus, tandis que la microphysique et le schéma de surface exercent un effet plus limité. La combinaison du schéma de cumulus G3D, de la microphysique Thompson et du schéma de surface Noah-MPLS apparaît comme la plus performante pour la simulation des précipitations. Ces résultats soulignent l'importance du choix des paramétrisations physiques pour améliorer la prévision des précipitations avec WRF, notamment lors d'événements météorologiques extrêmes au Sénégal.

1. 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 (Mathon et al., 2002 ; Lebel et al., 2003, Augustin et al., 2023 ; Nkrumah et al., 2023 ; Djakouré et al., 2024), 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 permettent 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.

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 agricole, pêche, élevage, santé, énergie etc.

Grâce à l'évolution de la technologie, la prévision du temps devient de plus en plus précise. Un modèle météorologique est d'une grande complexité avec un nombre important de processus et d'interactions atmosphère-océan-biosphère. Ces modèles, n'ont pas 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 et difficile à prévoir. Cette difficulté de le 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 (Parker et al., 2020). 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 ; GIEC, 2022).

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. Ce travail s'inscrit dans l'opérationnalisation du système de prévision et vise à déterminer la configuration simulant le mieux les précipitations au Sénégal. Pour ce faire nous avons testé et évalué différentes configurations du modèle WRF.

L'article est structuré comme suit : La section 2 décrit les méthodologies employées, incluant la configuration des simulations, les jeux de données de forçage et d'observation, ainsi que les paramétrisations physiques testées. La section 3 présente les données utilisées pour l'étude. La section 4 présente les résultats, avec une analyse détaillée des précipitations simulées pour les deux journées d'étude, incluant des évaluations spatiales, temporelles et statistiques (scores de performance, diagrammes de Taylor, analyse du cycle diurne). La section 5 discute des résultats obtenus, de l'impact des différentes paramétrisations sur la performance du modèle et des implications pour la prévision opérationnelle au Sénégal. Enfin, la section 6 conclut sur les principaux enseignements de l'étude et propose des perspectives pour de futures recherches et applications opérationnelles.

2. Méthodologies

Le modèle WRF (Skamarock et al., 2019) version 4.1.2 avec le noyau ARW est utilisé pour simuler deux journées météorologiques (05 septembre 2020 et 02 août 2021). Ces épisodes se caractérisent par des précipitations particulièrement intenses, en particulier celui du 5 septembre 2020 qui a affecté l'ensemble du Sénégal (Diedhiou et al., 2024,). En effet, l'événement du 05 septembre 2020 a causé de fortes inondations généralisées causant des dommages considérables et causant des perturbations sur la vie des populations impactées (Reuters, 2020). Au total, 1475 ménages ont été impactés, soit 7270 personnes impactées (IFRC, 2022).

Tableau 1 : Schémas de paramétrisation utilisés pour les simulations. Les chiffres entre parenthèses 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) | Chen et al. (2013) |
| | Unified Noah et Rapid Update Cycle (RUC) | Smirnova et al., (2000) |
| Rayonnement de courtes et de grandes longueurs d'onde | RRTMG (4) | Iacono et al. (2008) |
| Couche limite planétaire | Mellor-Yamada Janjic (MYJ) (2) | Janjic (1994) |
| Microphysique des nuages | Morrison-2 moment (M2) (10) | Hong and Pan (1996, MWR) |
| | New Thompson (TS) (8) | Thompson et al. (2004) |
| Convection | Tiedtke (TK) (6) | Tiedtke (1989, MWR), Zhang, Wang and Hamilton (2011, MWR) |
| | Grell 3D (G3D) (5). | Grell and Devenyi (2002, GRL) |

L'analyse de ces événements offre l'opportunité d'évaluer de manière ciblée l'influence des schémas de paramétrisation du modèle WRF sur la simulation des pluies extrêmes, tout en limitant la complexité des comparaisons entre simulations. Certes, le nombre de journées testées reste restreint, mais leur sélection repose sur leur caractère exceptionnel et représentatif des épisodes pluvieux intenses au Sénégal, ce qui confère une réelle pertinence à cette approche ciblée. Nous avons utilisé trois domaines (d01, d02 et d03) avec une grille horizontale respective de 36 km, 12 km et 4 km (figure1), en configuration one-way nesting. Pour choisir le domaine d'étude il faut :

- ❖ s'assurer que le domaine choisi prend en compte les principales caractéristiques dynamiques, telles que le Saharan Heat Low (SHL), le African Easterly Jet (AEJ) et le Tropical Easterly Jet (TEJ), notamment dans le cas de l'Afrique de l'Ouest..
- ❖ veiller à utiliser des configurations de "nesting" autorisées d'après Skamarock et al. (2008).
- ❖ éviter de poser les limites du domaine sur les montagnes.
- ❖ élargir le domaine de sorte que les limites du découpage ne soient pas sur les frontières de la zone d'étude afin d'éviter des zones tampons.

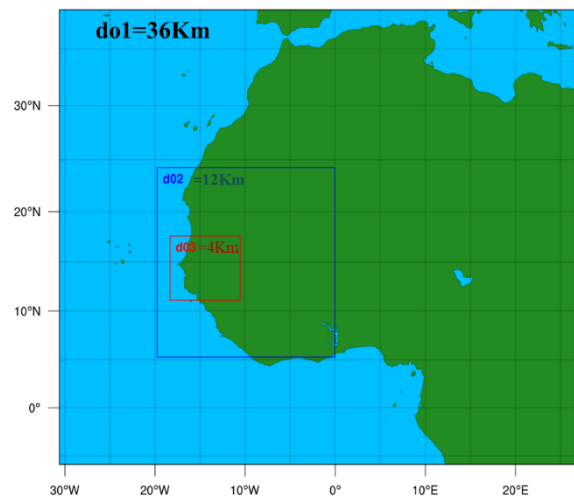


Fig.1. Domaine de simulation du modèle WRF

Pour évaluer les performances de WRF nous avons utilisé six (06) paramétrisations physiques (tableau1) avec deux schémas pour le modèle de surface (*Unified Noah model* NoahMP-LSM, *Unified Noah et Rapid Update Cycle* RUC), deux schémas pour la microphysique des nuages (*Morrison-2 moment* M2, *New Thompson* TS), deux schémas pour la convection des cumulus (*Grell 3D* G3D, *Tiedtke* TK), un schéma pour le rayonnement à grande longueur d'onde (RRTMG-LW), un schéma pour le rayonnement à courte longueur d'onde (RRTMG-SW), et un schéma pour la couche limite planétaire (*Mellor-Yamada Janjic* MYJ). En effet, le choix est basé sur les études de Cretat et al., 2010 ; Flaounas et al., 2011 ; Drigeard, 2014 ; Noble et al., 2014 ; Igri et al., 2018 et Solano et al., 2024 qui portent sur l'évaluation des schémas de paramétrisations sur la zone tropicale et particulièrement sur l'Afrique de l'Ouest.

Tableau 2 : Les combinaisons possibles des schémas de paramétrisation utilisés pour les simulations, représentées en parenthèses par WRF1 à WRF8

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

Cette étude a permis de tester 8 configurations utilisant les paramétrisations physiques listées dans le tableau 2. Une configuration correspond à la combinaison d'un schéma pour chacune des différentes paramétrisations physiques. Afin d'évaluer l'effet de la modification des paramétrisations de la microphysique des nuages, du modèle de surface et de la convection sur les précipitations, nous comparons respectivement :

- ❖ WRF1 à WRF2, WRF3 à WRF4, WRF5 à WRF6, WRF7 à WRF8 pour voir l'effet de la microphysique ;
- ❖ WRF1 à WRF5, WRF2 à WRF6, WRF3 à WRF7, WRF4 à WRF8 pour voir l'effet du modèle de surface;
- ❖ WRF1 à WRF3, WRF2 à WRF4, WRF5 à WRF7, WRF6 à WRF8 pour voir l'effet du schéma de convection.

3. Données

Pour réaliser cette étude, il est nécessaire d'utiliser des données de forçage pour les simulations et des observations pour la validation.

3.1 Les données de forçage

Le modèle WRF est adapté pour intégrer différents types de données (analyses ou réanalyse, prévisions, etc.), pouvant provenir de modèles globaux tels que le GFS, IFS ou UKMET. Dans cette étude, les données de conditions initiales et aux limites sont issues d'analyses du GFS, disponibles chaque six (06) heures.

Les données d'analyse et de prévision de GFS sont disponibles en points de grilles couvrant le globe entier à une résolution horizontale de 0.5° (environ 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 (Wang et al., 2019).

3.2 Les données d'observation

Les données de références utilisées dans cette étude sont issues du projet Enhancing National Climate Services (ENACTS) qui vise à améliorer l'accessibilité, la qualité, la couverture et la compréhension des données climatiques dans la prise de décision.

Les produits ENACTS combinent des données provenant de stations météorologiques au sol et celles estimées par satellite TAMSAT, de modèles altimétriques numériques et de produits de ré-analyse climatiques (Faniriantsoa et al., 2022; Maidment et al., 2017). Les données ainsi générées sont de qualités et d'une fine résolution (4 km).

Les données d'observation de stations météorologiques ont été également utilisées pour évaluer la qualité des prévisions.

La figure 2 donne une vue d'ensemble des principales stations et postes pluviométriques du Sénégal

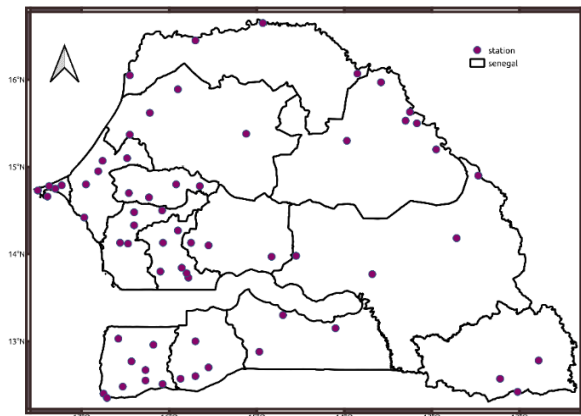


Fig.2. Localisation des stations et postes pluviométriques

Des scores de vérification tels que l'erreur quadratique moyenne (RMSE) (Chai et al., 2014), l'erreur absolue moyenne (MAE) (Willmott et al., 2005), la corrélation (r) (Wilks 2011), le Biais (Willmott 1982), la table de contingence et le diagramme de Taylor sont utilisées pour l'évaluation la performance du modèle.

4. Résultats

Les résultats présentés dans cette étude concernent le domaine du Sénégal avec 4 km de résolution.

4.1 Cas de l'événement météorologique du 05 septembre 2020

4.1.1 Distribution spatiale des précipitations

Pour voir la meilleure configuration, les simulations sont comparées aux observations (ENACTS). Les champs de précipitations simulées pour l'événement du 05 septembre 2020 sont représentés sur la figure 3 en comparaison avec les observations ENACTS.

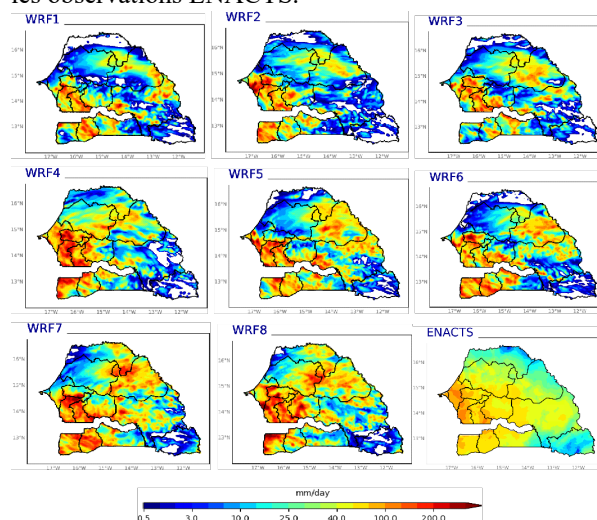


Fig.3. Cumul des précipitations simulées par WRF (modèle à 4 km de résolution) pour la journée météorologique du 05 septembre 2020 – comparaison qualitative avec ENACTS (obs)

Le modèle WRF montre de fortes précipitations au centre et au sud pour toutes les configurations en accord avec ENACTS. Au nord, les configurations WRF4, WRF5, WRF7 et WRF8 montrent plus de précipitations comparées à ENACTS. Avec l'utilisation du schéma de modèle de surface Noah MP LSM dans les différentes configurations (WRF1 à WRF4), les simulations montrent de faibles précipitations au centre-est du pays (Kédougou, Tambacounda), ce qui se rapproche de ENACTS.

Toutes les configurations utilisées surestiment les précipitations sur la majeure partie du pays (Figure 4), avec un biais particulièrement marqué dans le centre est. Le schéma convection G3D surestime moins comparé à TK. Le schéma microphysique des nuages M2 présente une surestimation moins importante que TS. De même, le schéma de surface NoaMP-LSM surestime moins que RUC. Par ailleurs, les combinaisons G3D_M2 (WRF1 et WRF5) et TK_TS (WRF4 et WRF8) montrent un écart plus faible par rapport à ENACTS sur la façade est, comparativement aux autres configurations.

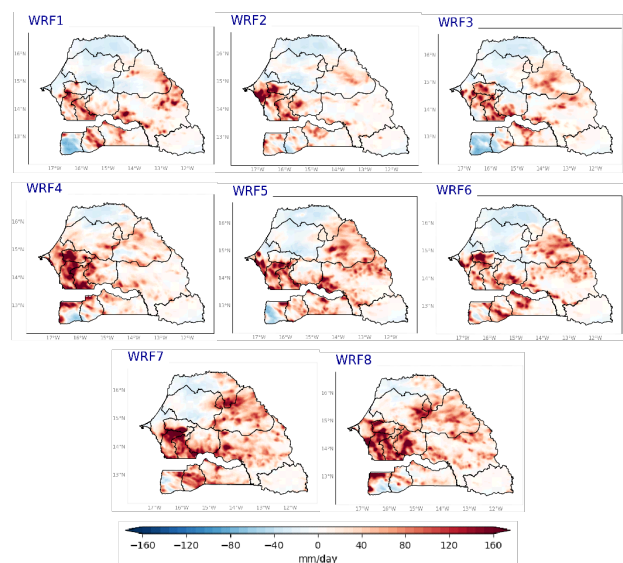


Fig.4. Différence entre le cumul des précipitations de WRF (4 km de résolution) par rapport à ENACTS pour la journée météorologique du 05 septembre 2020

4.1.2. Analyse des scores

La performance du modèle WRF est évaluée sur quatre zones climatologiques (nord, centre, est et sud) du Sénégal comme illustré à la figure 5.

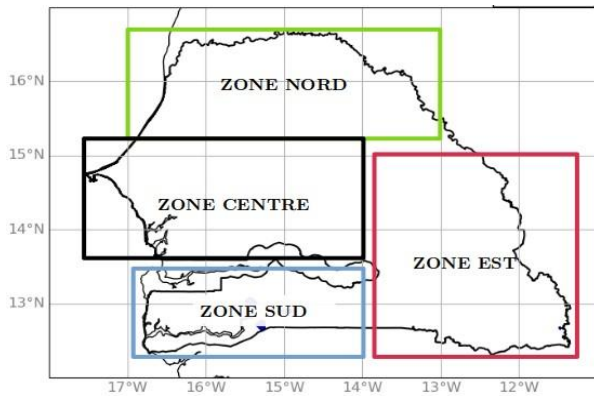


Fig.5. Découpage du Sénégal en zones climatologiques: source ANACIM

La figure 6 présente les résultats des scores (Corrélation, Biais, RMSE, MAE) de WRF par rapport aux observations ENACTS pour le cas du 05 septembre 2020 (Cas 1).

En moyenne sur le Sénégal, les biais sont positifs sauf pour les configurations WRF1, WRF2, et WRF3. La sous-estimation est plus marquée avec le schéma de surface Noah-MP LSM. Ainsi, la configuration WRF6, qui utilise le schéma G3D, présente la valeur de biais la plus faible. Par contre, la configuration WRF7, associée au schéma de convection TK, enregistre la valeur de biais la plus élevée..

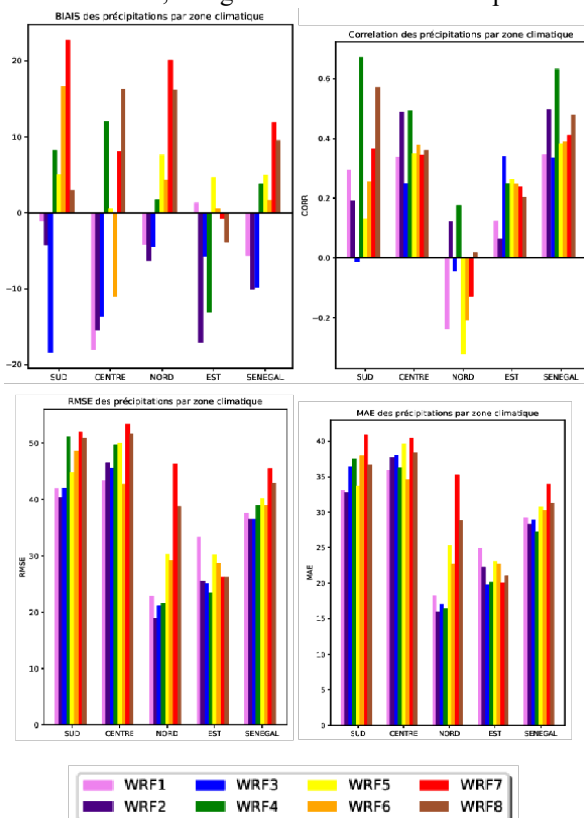


Fig.6. Évaluation des scores des différentes configurations du modèle WRF par rapport à ENACTS sur le domaine 4 km

On note des corrélations positives pour l'ensemble des configurations testées sur le Sénégal. Avec le schéma de

surface Noah-MP LSM, la combinaison avec TS reproduit mieux le champ de précipitations sur le pays que celle avec M2 (WRF2 et WRF4).

L'analyse de la RMSE et du MAE montre que le modèle présente moins d'erreurs au nord lorsqu'il utilise le schéma de surface Noah-MP LSM, tandis que pour le schéma RUC les erreurs sont plus marquées. À l'échelle du Sénégal, Noah-MP LSM génère globalement moins d'erreurs. Celles-ci sont encore réduites lorsqu'il est combiné avec le schéma microphysique TS..

4.2 Cas de l'événement météorologique du 02 août 2021

4.2.1. Distribution spatiale des précipitations

Les champs de précipitations simulés pour l'événement du 02 août 2021 sont présentés sur la figure 7 en comparaison avec les observations ENACTS. Le modèle WRF reproduit de fortes précipitations au centre-ouest et au sud-ouest du Sénégal ainsi que de faibles précipitations au nord, et ce, pour toutes les configurations.

Cependant, les configurations WRF7 et WRF8 génèrent également de fortes précipitations à l'est, non observées par ENACTS et absentes dans les autres configurations. À noter que la configuration WRF2 restitue mieux que les autres les faibles précipitations observées par ENACTS dans la partie orientale du Sénégal.

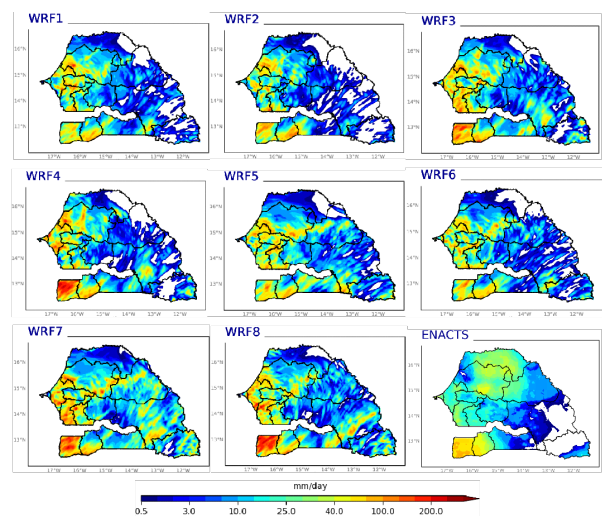


Fig.7. Cumul des précipitations simulées par WRF (modèle à 4 km de résolution) pour la journée météorologique du 02 Août 2021 – comparaison qualitative avec ENACTS (obs)

Pour évaluer la qualité des simulations, l'écart par rapport à ENACTS est calculé et illustré sur la figure 8. Les résultats montrent que toutes les configurations physiques utilisées surestiment les précipitations à l'est, à l'ouest et au sud du pays. En revanche, une sous-estimation est observée au nord pour cette journée. Cette surestimation est moins prononcée avec l'utilisation du schéma de convection G3D. De plus, le schéma de surface RUC surestime moins que Noah MP-LSM sur la partie est,

contrairement à la partie ouest. Enfin, la modification du schéma de microphysique des nuages n'induit que de légères différences, avec un écart relativement faible à l'ouest pour la deuxième configuration.

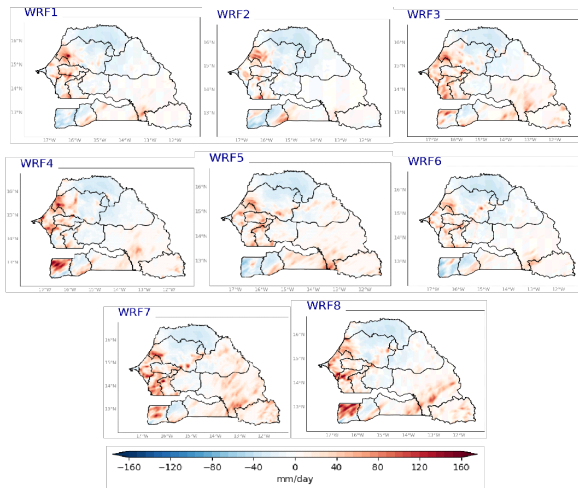


Figure 8 : Différence entre le cumul des précipitations simulées par le modèle WRF dans dom3 (4 km de résolution) par rapport à ENACTS pour la journée météorologique du 02 Août 2021

4.1.2. Analyse des scores

Comme précédemment, les indicateurs de performance utilisés pour évaluer le modèle sont faits selon le même découpage (figure 5). La figure 9 présente les valeurs de la corrélation, du biais, de la RMSE et du MAE pour les différentes simulations de WRF pour le cas d'étude du 02 août 2021 (Cas 2).

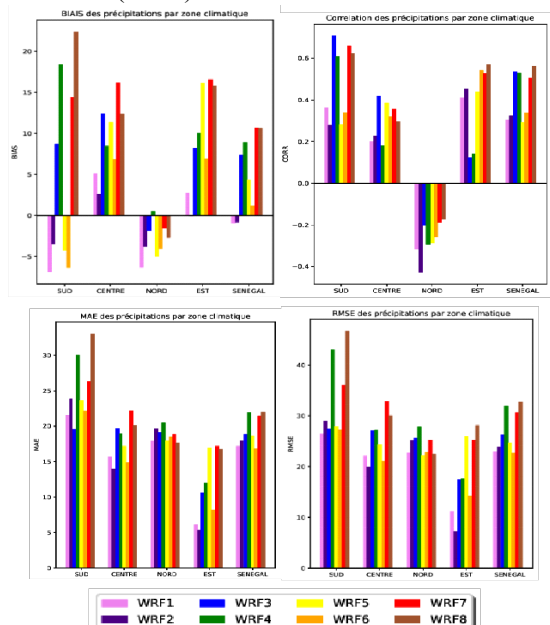


Fig.9. Scores de différentes configurations du modèle WRF par rapport à ENACTS pour domaine 4Km

L'ensemble des simulations présente des biais positifs dans les zones centre et est, ainsi que sur l'ensemble du

Sénégal, sauf pour WRF1 et WRF2 qui affichent de faibles biais négatifs. Les simulations avec les différentes configurations surestiment la quantité de précipitations dans les zones centre et Est et dans l'ensemble du Sénégal (sauf pour WRF1 et WRF2). Le biais est moins important avec l'utilisation du schéma de cumulus GR3D comparativement à TK. Cependant, le schéma de cumulus GR3D combiné avec la microphysique TS donne un biais plus faible que lorsqu'on l'associe avec le schéma de microphysique M2. Au sud, le schéma de cumulus G3D a tendance à sous-estimer les précipitations contrairement à TK qui surestime.

Les corrélations sont positives dans l'ensemble des zones délimitées et pour toutes les configurations sauf au Nord où elles sont négatives. 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. 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. Au sud le modèle représente mieux les précipitations surtout avec le schéma de cumulus TK.

Quant au RMSE et au MAE, 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. Le schéma de cumulus G3D montre moins d'erreurs comparé avec TK. L'erreur est plus faible à l'Est.

4.2. Vérification des simulations : Table 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. Les éléments de la table de contingence ont été produits en se basant sur les observations de 66 stations (figure 2) au Sénégal et des simulations de WRF. Les valeurs de POD, FAR et BIAS et de l'exactitude (Accuracy), calculées à partir de cette table, ne varient pas significativement selon les différents pourcentages de membres définis par les seuils de précipitation.

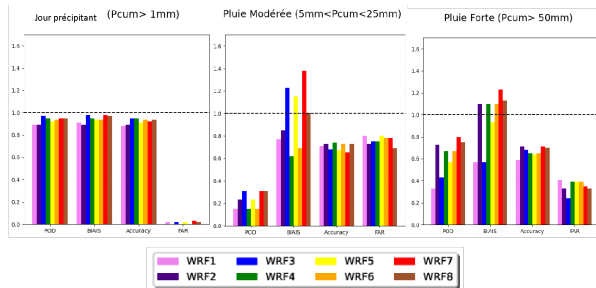


Figure 10 : Récapitulatif des moyennes des scores de vérification pour la journée météorologique du 05 septembre 2020

Ces résultats pour les journées météorologiques du 05 septembre 2020 et du 02 août 2021 sont présentés respectivement dans les figures 10 et 11.

Pour les précipitations supérieures à 1 mm, toutes les configurations donnent de bons scores avec de faibles valeurs de FAR, mais montrent des valeurs de BIAIS, d'exactitude et de POD proche de 1. Pour les pluies modérées (5 mm < P < 25 mm), le modèle WRF parvient à les détecter avec un taux de bonne prévision qui dépasse 50% ; cependant le modèle présente une valeur élevée de FAR et une valeur faible de POD. Les valeurs élevées de FAR et les faibles valeurs de POD sont observées pour les précipitations supérieures à 50 mm. 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 ($P > 50\text{mm}$). L'utilisation de New Thompson (TS) comme schéma de microphysique donne le meilleur score comparativement à M2.

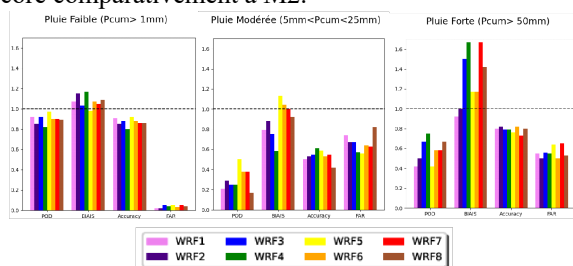


Fig 11 : Récapitulatif des moyennes des scores de vérification pour la journée météorologique du 02 août 2021

4.3. 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 ; Traoré et al., 2022 ; Sagna et al., 2023). Une simulation précise de l'amplitude et de la phase du cycle diurne des précipitations au Sénégal est importante pour la modélisation climatique, en raison du rôle des alertes liées aux fortes pluies.

Pour examiner la variation diurne, les valeurs simulées par le modèle WRF pour toutes les configurations, ainsi que les observations issues des stations de Sangalkam (ouest) et Djiredji (sud), sont représentées par pas de 6 heures. La figure 12 correspond à la journée météorologique du 05 septembre 2020 et la figure 13 à celle du 02 août 2021.

Malgré la complexité du signal diurne des précipitations, le modèle WRF reproduit globalement bien les observations, à l'exception des configurations WRF1, WRF5, WRF6 et WRF7 pour la station de Djiredji, où la précipitation commence à être observée vers 12 heures. 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 représentés pour obtenir l'amplitude et la phase correcte. Le modèle présente des écarts sur la quantité par rapport aux observations. 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). Contrairement à celle de sangalkam où le modèle n'a pas capté le signal pour le cas du 05 septembre 2020.

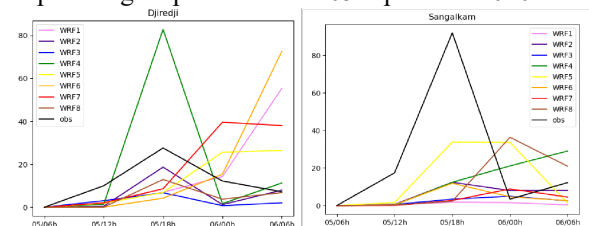


Figure 12 : Variation diurne des précipitations observées et du modèle WRF pour la journée météorologique du 05 septembre 2020

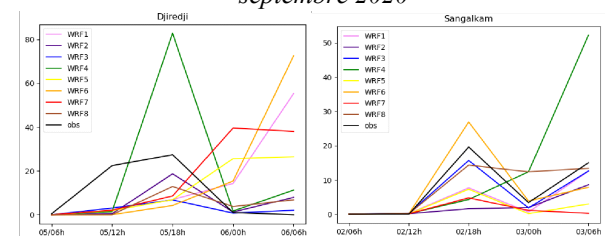


Fig.13. Variation diurne des précipitations observées et du modèle WRF pour la journée météorologique du 02 août 2021

4.4. Analyse du diagramme de Taylor

Le diagramme de Taylor est un diagramme mathématique 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.

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 sur le Sénégal à 4 km de résolution. Les figures 14 et 15 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 des différentes configurations WRF, normalisée en le divisant par l'écart type σ des observations ENACTS. L'erreur quadratique moyenne 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 deux 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 paramétrisation.

❖ Cas du 05 septembre 2020

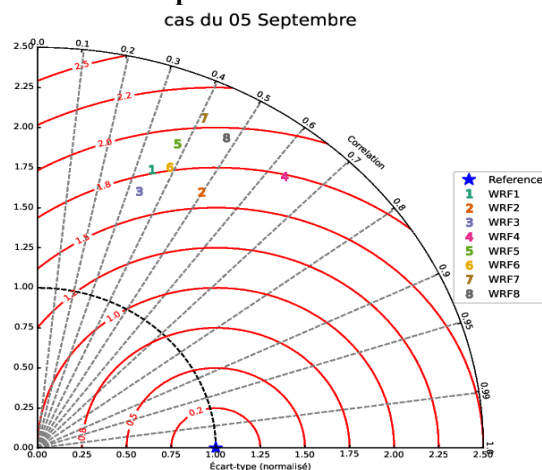


Fig.14. Diagramme de Taylor entre le modèle WRF et ENACTS (obs)

Tableau 3. Les quatre statistiques différentes pour la journée météorologique du 05 septembre 2020

Tableau 3: Tableau 3. 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 |

Pour cet événement, les configurations WRF2, WRF3 et WRF4 sont les plus proches des observations. WRF4 présente la corrélation la plus élevée (0,632) mais surestime les précipitations de 3,820 mm ; WRF2 enregistre la RMSE la plus faible (36,421 mm) tout en sous-estimant les observations de 10,058 mm ; et WRF3 présente l'écart type le plus faible (1,699) mais surestime de 9,792 mm. La variation des précipitations est principalement influencée par le choix du schéma de surface terrestre. Parmi les schémas testés, Noah-MP LSM reproduit le mieux les précipitations. Combiné avec le schéma de microphysique M2 dans WRF2 et WRF4, il fournit des résultats plus proches des observations.

❖ Cas du 02 août 2021

Lors de cet événement, les configurations WRF1, WRF2, WRF5 et WRF8 se rapprochent le plus des observations. WRF8 obtient la corrélation la plus élevée (0,562) mais surestime les précipitations de 10,651 mm, tandis que WRF6 affiche la RMSE la plus faible (22,693 mm) avec une surestimation légère de 1,145 mm. Les variations de précipitations sont fortement modulées par le schéma de cumulus utilisé. Le schéma G3D s'avère le plus performant pour représenter les précipitations à l'échelle nationale, et son association avec le schéma de microphysique TS, comme dans WRF6, permet de mieux reproduire les observations

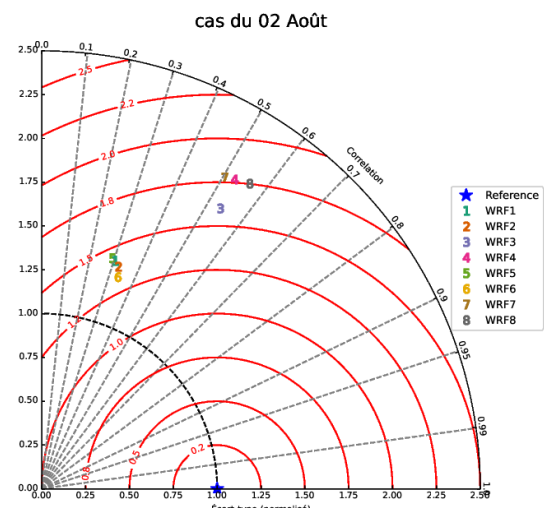


Fig.15. Diagramme de Taylor entre le modèle WRF et ENACTS (obs)

Tableau 4: Tableau 4. 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 |

5. Discussions

Les différentes configurations testées du modèle WRF parviennent, en moyenne, à reproduire le champ des précipitations au Sénégal comparativement aux observations ENACTS (figures 3 et 7). Pour l'événement du 05 septembre, l'analyse des scores montre que WRF4 présente la corrélation la plus élevée, avec un biais faible et la MAE la plus basse sur l'ensemble du pays. Pour l'événement du 02 août 2021, WRF8 affiche la corrélation la plus élevée, tandis que WRF6 présente le biais le plus faible ainsi que la MAE et la RMSE les plus basses sur le Sénégal.

L'analyse des résultats a montré qu'une configuration appropriée améliore significativement les scores des simulations. Les précipitations simulées sont particulièrement sensibles aux schémas de cumulus, tandis que les choix de schémas de microphysique et de surface terrestre ont un impact moindre. Parmi toutes les simulations, les meilleures performances ont été obtenues en combinant le schéma de microphysique TS avec le schéma de cumulus G3D, ce qui a permis d'obtenir des résultats cohérents sur l'ensemble des simulations.

Ces résultats confirment la forte sensibilité du modèle WRF aux paramétrisations physiques pour la simulation des précipitations, en accord avec les conclusions de Klein et al., (2015) ; Solano et al., (2024). Berry (2009) a également montré que l'utilisation du schéma de cumulus G3D dans WRF produit une représentation réaliste du champ de précipitations et une propagation correcte du Jet d'Est Africain vers l'ouest. De même, Igrì et al., (2018) ; Coly et al., (2025) ont observé que la combinaison du schéma de cumulus Tiedtke (TK) avec le schéma de microphysique Thompson (TS) fournit les résultats les plus performants.

Bien que le modèle WRF parvienne à simuler les précipitations, certaines insuffisances persistent par rapport aux observations, notamment concernant la distribution spatiale et les quantités de précipitations. En effet, pour les cas d'étude, les précipitations ont été reproduites de manière imparfaite pour toutes les configurations, avec des décalages spatiaux, de faibles corrélations et des sous ou surestimations localisées. Ces écarts peuvent être liés aux erreurs des conditions initiales (données de forçage), aux conditions aux limites (influence des champs latéraux) ainsi qu'aux paramétrisations physiques elles-mêmes (Flaounas et al., 2011; Cretat et al., 2010). Les erreurs peuvent également provenir des limitations internes du modèle dans la

simulation des Ondes d'Est Africaines, qui influencent la convection profonde en Afrique de l'Ouest (Noble et al., 2014).

Bien que les deux événements sélectionnés reflètent des conditions météorologiques extrêmes, leur nombre restreint limite la portée et la généralisation des résultats. Ces derniers doivent donc être considérés comme des éléments préliminaires sur le comportement du modèle, issus d'une analyse de sensibilité menée sur des études de cas à l'appui d'une configuration pré-opérationnelle, plutôt que comme des conclusions définitives.

6. Conclusion et perspectives

L'objectif de cette étude était d'évaluer la sensibilité du modèle WRF aux paramétrisations physiques dans la simulation des précipitations au Sénégal. Deux épisodes pluviométriques représentatifs des saisons des pluies 2020 et 2021 ont été sélectionnés sur la base des données d'observation in-situ de l'ANACIM. Pour chaque cas, huit configurations du modèle ont été testées, avec initialisation et forçage aux limites latérales par les analyses du GFS.

La comparaison des simulations avec les données ENACTS a permis d'examiner à la fois la distribution spatiale des précipitations et les scores de performance. Les résultats montrent que le modèle WRF reproduit globalement bien les précipitations, bien que les fortes pluies soient systématiquement surestimées. Parmi les configurations testées, celle combinant le schéma de cumulus G3D, le schéma de microphysique Thompson et le schéma de surface Noah-MPLS (WRF2) a fourni la meilleure reproduction des précipitations observées au Sénégal. Ces conclusions soulignent l'importance du choix des paramétrisations physiques pour améliorer la fiabilité des prévisions pluviométriques au Sénégal avec WRF, en particulier dans le contexte de la variabilité spatio-temporelle élevée de la mousson ouest-africaine.

Ces résultats sont encourageants, car ils indiquent un gain de performance du modèle WRF. La configuration WRF2 se distingue particulièrement en reproduisant plus fidèlement les précipitations que la configuration actuellement utilisée en opération à l'ANACIM (WRF4). Cette étude propose ainsi une configuration optimisée pour le Sénégal, capable de mieux représenter l'intensité et la distribution spatiale des précipitations. Elle pourrait être directement exploitée par les services météorologiques nationaux pour améliorer la qualité des prévisions opérationnelles et soutenir la gestion des risques liés aux épisodes pluvieux, notamment dans les secteurs de l'agriculture, de la protection civile et de la planification territoriale.

Il est important de noter que cette analyse se limite à deux journées pluvieuses spécifiques, ce qui restreint la portée et la généralisation des résultats. Des études futures incluant plusieurs années et événements pluviométriques seraient nécessaires pour confirmer la robustesse des conclusions et orienter plus efficacement les applications opérationnelles

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'évaluer le modèle sur des saisons ;
- ❖ d'utiliser d'autres données de forçage (ECMWF ou NCEP2 par exemple) ;
- ❖ de faire l'assimilation de données.

RÉFÉRENCES

- Augustin, D., Kouadio, G., & Tchinda, R. (2023). *Impact assessment of the West African monsoon on convective precipitations over the far north region of Cameroon*. *Advances in Space Research*, 72(4), 666–679.
- Chai, T., & Draxler, R. R. (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)?—Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geoscientific model development*, 7(3), 1247–1250.
- 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.
- 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.
- Coly, A. A., Poan, E. D., Sane, Y., Senghor, H., Diouf, S., Ndiaye, O., ... & Gueye, D. (2025). Optimizing WRF Configurations for Improved Precipitation Forecasting in West Africa: Sensitivity to Cumulus and PBL Schemes in a Senegal Case Study. *Climate*, 13(9), 181.
- Diedhiou, S., Rauch, M., Lahat Dieng, A., Bliefernicht, J., Sy, S., Sall, S. M., & Kunstmann, H. (2024). Extreme rainfall in Dakar (Senegal): a case study for September 5, 2020. *Frontiers in Water*, 6, 1439404.
- Faniriantsoa, R., & Hansen, J. (2022). Enhancing ANACIM high-resolution merged historical datasets by generating additional meteorological parameters.
- Djakouré, S., Koffi, B., & Coulibaly, M. (2024). *Mesoscale convective systems and extreme precipitation along the northern coast of the Gulf of Guinea*. *Atmosphere*, 15(2), 194. <https://www.mdpi.com/2073-4433/15/2/194>
- 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
- 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.
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). (2022). *Fiche régionale : Afrique de l'Ouest*. https://cdkn.org/sites/default/files/2022-04/IPCC%20Regional%20Factsheet%202_West%20Africa%E2%80%9393FR_web.pdf
- Hong, S.-Y., and H.-L. Pan, 1996: Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model. *Monthly Weather Review*, 124(10), 2322–2339. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1996\)124](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1996)124)
- 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.
- IFRC (2022). Senegal: Floods in Dakar, Thiès, and Matam Emergency Plan of Action (EPoA) DREF Operation n° MDRSN019—Senegal. ReliefWeb. Available at: <https://reliefweb.int/report/senegal/senegal-floods-dakar-thies-and-matam-emergency-plan-action-epoa-dref-operation-ndeg-mdrsn019>
- Karbou, F., Beucher, F., Bock, O., Lafore, J.-P., Mumba, Z., Ngamini, J.-B., . . . Redelsperger, J.-L. (2012). Prévision et météorologie opérationnelles. *La météorologie*.
- 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 Megha-Tropiques en Afrique de l'Ouest: comparaison des mesures

- aéroportées avec des radars sol et un modèle numérique », 219.
- Maidment, R. I., Grimes, D., Black, E., Tarnavsky, E., Young, M., Greatrex, H., ... & Alcántara, E. M. U. (2017). A new, long-term daily satellite-based rainfall dataset for operational monitoring in Africa. *Scientific data*, 4(1), 1-19.
- Mathon, V. L., & Lebel, T. (2002). Mesoscale convective system rainfall in the Sahel. *Journal of Applied Meteorology*, 1081-1092.
- Noble E, Druyan L. M, Fulakeza M. (2017). The sensitivity of WRF daily summertime simulations over West Africa to alternative parameterisations. Part II : Precipitation. *Mon. Wea. Rev.*, 145(1), 215-233
- Nkrumah, F., Mensah, E., & Adomako, K. (2023). *Classification of large-scale environments that drive the formation of mesoscale convective systems over southern West Africa*. *Weather and Climate Dynamics*, 4(3), 773–788. <https://wcd.copernicus.org/articles/4/773/2023/>
- Parker, D. J., Diop-Kane, M., & Lafore, J. P. (2020). *Météorologie de l'Afrique de l'Ouest tropicale: Le manuel du prévisionniste*.
- Reuters (2020). *Senegal Activates Emergency Floods Aid Plan After Downpour*. London: Reuters.
- Sagna, A., Fall, M., & Ndiaye, P. (2023). *Diurnal variability of mesoscale convective systems in the Sahel region*. *Journal of Climate*, 36(5), 2145–2162. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-22-0567.1>
- Skamarock, W., Klemp, J., Dudhia, J., Gill, D., Liu, Z., Berner, J., et al. (2019). *A description of the Advanced Research WRF Model Version 4*. NCAR Technical Note NCAR/TN-556+STR. <https://doi.org/10.5065/1dfh-6p97>
- Smirnova, TG, JM Brown, SG Benjamin et D. Kim, 2000: Paramétrage du froid processus saisonnier dans le schéma MAPS de surface terrestre. *J. Geophys. Rés.*, 105 (D3), 4077–4086
- Solano-Farias, F., Ojeda, M. G. V., Donaire-Montaño, D., Rosa-Cánovas, J. J., Castro-Diez, Y., Esteban-Parra, M. J., & Gamiz-Fortis, S. R. (2024). Assessment of physical schemes for WRF model in convection-permitting mode over southern Iberian Peninsula. *Atmospheric Research*, 299, 107175.
- Pohl, B., Crétat, 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
- Thompson, G., RM Rasmussen et K. Manning, 2004: prévisions explicites des précipitations hivernales utilisant un schéma de microphysique en vrac amélioré. Partie I: Description et analyse de sensibilité. *Lun. Wea. Tour.*, 132, 519–542
- 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; 2.0
- Traoré, A., Diop, M., & Coulibaly, B. (2022). *Diurnal cycle of precipitation over West Africa: Observations and model evaluation*. *Atmospheric Research*, 275, 106302. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106302>
- Wang, J. A., Sardeshmukh, P. D., Compo, G. P., Whitaker, J. S., Slivinski, L. C., McColl, C. M., & Pegion, P. J. (2019). Sensitivities of the NCEP Global Forecast System. *Monthly Weather Review*, 147(4), 1237-1256. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-18-0239.1>
- Willmott, C. J. (1982). Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 63(11), 1309-1313.
- Willmott, C. J., & Matsuura, K. (2005). Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate research*, 30(1), 79-82.
- Wilks, D. S. (2011). *Statistical methods in the atmospheric sciences* (Vol. 100). Academic press