

Rapport d'avancement sur

Prévision Numérique du Temps

Résultat attendu 2 - Extension du Système Local d'Alerte Précoce pour les Inondations

Activité R2.2. Suivi et prévision des débits

Action v. Intégration des prévisions météorologiques numériques pour introduire dans le système la composante météo finalisée à l'alerte des événements orageux intenses

Période 22/06/2023-21/06/2026

Préparé par :

Vieri Tarchiani (IBE-CNR)

Avec la contribution de :

Francesco Pasi (IBE/LaMMA)

Valerio Capecchi (LaMMA)

Youchaou Ousmane Baoua (DMN)

Lazare Sawadogo (ANAM)

Younoussa Adamou Sayri (DMN/IBE)

Rakiswende Thomas Bere (ANAM/IBE)

Ver. 2 du 04/05/2026



Politecnico
di Torino



Consiglio Nazionale delle Ricerche
Istituto per la BioEconomia



Direction de la Météorologie
Nationale
Direction des Ressources en Eau
Niger



AGENZIA ITALIANA
PER LA COOPERAZIONE
ALLO SVILUPPO

Sommaire

1. Contexte	4
2. Activités réalisées	6
2.1 Atelier de formation 2023	7
2.2 Pre-test 2023	7
2.3 Atelier de formation 2024	10
2.4 Test 2024	11
2.4.1 Niger	11
2.4.2 Burkina Faso	13
2.5 Stage de recherche en Italie	14
3. Vérification WRF	15
3.1 JAS 2023-2024	15
3.1.1 Hindcast	15
3.1.2 Méthodes d'évaluation	17
3.1.3 Résultats et Comparaison des Modèles	18
3.2 Ateliers de restitution des résultats à la mi-parcours	20
4. MOLOCH	21
5. Test opérationnel WRF et MOLOCH 2025	25
5.1 Chaines opérationnelles WRF et MOLOCH 2025	25
5.2 Briefings de suivi et évaluation	27
5.3 Kits Installation WRF et MOLOCH	27
6. Transfert de MOLOCH à ANAM et DMN	27
6.1 Conventions MOLOCH et Visite en Italie de ANAM et DMN	27
6.2 Transfert de MOLOCH à l'ANAM	28
6.3 Transfert de MOLOCH à la DMN	29
5 Climatologie haute résolution Afrique de l'Ouest	30
6 Conclusions	33
Annexes	35
Annexe 1, Bibliographie	35
Annexe 2, Ressources on-line pour la formation des Equipes	36
Annexe 3, Composition des Equipes	37

Liste des figures

Figure 1, Interface de visualisation WRF DMN	8
Figure 2, Disponibilité des différents runs à la DMN en 2023	8
Figure 3, Configurations de WRF, au Niger et Burkina en 2023	9
Figure 4, Microphysique de WRF au Niger, Burkina et Italie en 2023	9
Figure 5, Prévision du 15 août 2024.....	11
Figure 6, Prévision du 03 septembre 2024	12
Figure 7, Paramètres disponibles en 2024.....	12
Figure 8, Fenêtres utilisées au Burkina Faso en 2024	13
Figure 9, Domaine utilisé pour la vérification de WRF	16
Figure 10, Configuration WRF-Niger	16
Figure 11, Configuration WRF-Burkina	16
Figure 12, Scores de verificationn ponctuelle	17
Figure 13, Fraction skill score	18
Figure 14, Scores deterministes	18
Figure 15, Fractional Skill Scores JAS 2023 et 2024	19
Figure 16, Cas d'étude 20 aout 2024	20
Figure 17, MOLOCH vs WRF	23
Figure 18, Cas d'étude MOLOCH en 2024	24
Figure 19, Plan d'opérationnalisation MOLOCH	24
Figure 20, Interface de visualisation chaines WRF et MOLOCH	25
Figure 21, Exemple de visualisation WRF (gauche) et MOLOCH (droite).....	26
Figure 22, Exemple de diagramme de Taylor de vérification	26
Figure 23, Signature des conventions, Florence 14 octobre 2025	28
Figure 24, Interface de visualisation pour l'ANAM	29

1. Contexte

La Direction de la Météorologie Nationale du Niger (DMN) et l'Institut de Bioéconomie du Conseil National des Recherches d'Italie (IBE-CNR) collaborent depuis plus d'une quarantaine d'années dans le cadre de programmes bilatéraux Niger-Italie et multilatéraux avec l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) dont IBE-CNR assure un des Centres Régionaux de Formation (RTC).

La mise en œuvre récente des projets ANADIA Niger et ANADIA2 a permis de renforcer cette collaboration et d'accroître les capacités et les compétences de la DMN dans la fourniture de services climatiques pour la réduction des risques de catastrophe (inondations et sécheresse) et pour un meilleur rendement agricole. C'est dans cette même logique de réduction des risques liés aux inondations et d'augmentation de la résilience de la population face aux changements climatiques que le projet trilatéral SLAPIS Sahel a été soumis à la Coopération italienne. Son approbation permet de mettre à l'échelle l'approche SLAPIS, développé dans le cadre de ANADIA2, pour l'alerte précoce contre les inondations sur l'ensemble du bassin de la Sirba et d'autres tributaires du Niger moyen.

SLAPIS Sahel est un projet de Recherche appliquée et de formation, financé par l'Agence Italienne de Coopération au Développement. Le projet est réalisé par le Polytechnique de Turin en collaboration avec l'Institut de Bioéconomie du conseil National des recherches d'Italie (IBE-CNR), la Direction de la Météorologie Nationale (DMN) du Niger, la Direction des Ressources en Eau (DRE) du Niger, l'Agence Nationale de la Météorologie (ANAM) du Burkina Faso et la Direction Générale des Ressources en Eau (DGRE) du Burkina Faso.

L'un des objectifs de SLAPIS Sahel est le renforcement des capacités en Prévision Numérique du Temps (PNT) comme support de l'alerte précoce hydrologique. En effet, la DMN et l'ANAM ont opté pour le choix stratégique de développer une chaîne de prévision numérique du temps basée sur le modèle WRF (Weather Research and Forecasting) qui est un modèle climatique régional, utilisé à la fois en recherche et en prévision opérationnelle du temps, développé principalement au National Center for Atmospheric Research (NCAR, Etats-Unis).

Dans le cadre du projet SLAPIS Sahel, les prévisions numériques du temps devraient être intégrées dans le système d'alerte précoce des crues éclair, afin de contribuer à la vigilance des crues de la Sirba et du fleuve Niger.

Pour ce faire, le Niger et le Burkina Faso bénéficient de l'appui de l'IBE-CNR, un partenaire du Consorzio LaMMA qui assure le service météorologique régional de la région Toscana en Italie. LaMMA aussi utilise le modèle WRF en trois différentes configurations :

1. Le modèle WRF_GFS_12km fonctionne sur une grille lambertienne à résolution de 12 km sur une large zone couvrant toute la région méditerranéenne avec 50 niveaux verticaux et une paramétrisation des cumulus. Les données sur les conditions aux limites sont obtenues à partir du modèle global GFS (Global Forecasting System) du National Centre for Environmental Prediction (NCEP) à une résolution de 0,25 degré.
2. Le modèle WRF_GFS_3km fonctionne sur une grille lambertienne de 3 km de résolution sur une zone couvrant la péninsule italienne avec 50 niveaux verticaux sans paramétrage des cumulus (convection explicite). Les données sur les conditions aux limites sont obtenues à partir du modèle global GFS (Global Forecasting System) du National Centre for Environmental Prediction (NCEP) à une résolution de 0,25 degré.

3. Le modèle WRF_ECM_3km fonctionne sur une grille lambertienne de 3 km de résolution sur une zone couvrant la péninsule italienne avec 50 niveaux verticaux sans paramétrage des cumulus (convection explicite). Les données sur les conditions aux limites sont obtenues à partir du modèle global IFS (Integrated Forecasting System) du Centre européen (ECMWF) à une résolution de 0,125 degrés.

Avec le WRF-12km, 2 runs par jour (00 et 12 UTC) sont effectués avec les données GFS avec un horizon de prévision de 120 heures pour le run de 00 et 132 heures pour le run de 12 heures afin de toujours avoir 5 jours de prévision complets. Avec le WRF-3km, 4 runs par jour (00, 06, 12 et 18 UTC) sont effectués avec chacune des deux initialisations (GFS et IFS), pour un total de 8 runs par jour, avec un horizon de prévision de 48 heures pour le run de 00, 42 heures pour le run de 06, 60 heures pour le run de 12 et 54 heures pour le run de 18, de sorte qu'il y a 2 jours complets de prévision pour tous les runs.

Déjà avant le démarrage du projet SLAPIS Sahel, mais dans la perspective de son implémentation, IBE-CNR et DMN avaient réalisé un diagnostic afin d'établir un plan pour le renforcement des capacités de la DMN en PNT. Le diagnostic, réalisé en janvier 2023, a permis de mettre en évidence que la DMN:

- dispose d'une Division Prévisions Météorologiques, dotée de prévisionnistes, d'une salle de prévision météorologique et d'un studio météo média pour la réalisation du bulletin météo télévisé ;
- possède un réseau de 130 stations automatiques tout type confondu, dont actuellement 16 transmettent les données en temps réel ;
- reçoit des produits d'observation météo à travers la station PUMA/AMESD (affichage de cartes), EUMETCAST (affichage de cartes) et le site web ogimet (données numérique) ;
- accède aux produits de PNT à travers RSMC Dakar, MISVA. UKMET Office, ACMAD (RDT), NOAA (GFS); ECMWF, MeteoFrance (Arpege), AGRHYMET CCR-AOS
- La DMN a une infrastructure de calcul composée d'un HPC ou super ordinateur avec un nœud maître de 48 cœurs et 3 nœuds de traitement de 96 cœurs chacun. Les nœuds sont connectés entre eux avec Infiniband (NVIDIA® Mellanox® SB7800 switch). En total le HPC a 288 cœurs, 768 Go de RAM et 6To de disque dur. Pour la sauvegarde des données, le HPC dispose d'un espace de stockage de 376 cœurs, 896 Go de RAM et 104 espaces de disque.
- bénéficie d'un débit internet de 20 Mbit/s en fibre optique.
- dispose de trois ingénieurs prévisionnistes, quatre ingénieurs informaticiens et deux techniciens informaticiens, 5 ingénieurs météo stagiaires et de deux informaticiens stagiaires.
- utilise une version de WRF installée pour des fins de test mais elle n'est pas opérationnelle

A la suite du diagnostic, un plan de renforcement des capacités en PNT de la DMN a été élaboré pour être mis en œuvre dans le cadre du projet SLAPIS Sahel. L'objectif était de doter la DMN d'une chaîne opérationnelle de PNT basée sur WRF assurant 2 runs par jours avec horizon de prévision de 3 jours et une résolution spatiale de 2,5 km. Les données sur les conditions aux limites sont obtenues à partir du modèle global GFS (Global Forecasting System) du National Centre for Environmental Prediction (NCEP) à une résolution de 0,25 degré.

Le plan prévoyait 4 étapes :

1. La première étape est préalable à toutes les autres. Elle inclue l'encadrement de base des prévisionnistes et des informaticiens de la DMN sur WRF. Il s'agira d'identifier les personnes ressources auprès de la DMN et de leur permettre de suivre des cours de formation à distance qui sont conseillés par IBE/ LaMMA (voir annexe 1). Cette étape inclue aussi la réhabilitation/réparation de l'infrastructure informatique du centre de calcul au besoin. Pour ce faire, La DMN s'est engagé à donner un accès à distance au serveur pour vérifier l'installation de tous les paquets software nécessaires.
2. La deuxième étape prévoit l'installation de la dernière version de WRF, la création des procédures de téléchargement des données sur les conditions au contour de GFS, la formation des prévisionnistes et des informaticiens, l'exécution sous forme de test pendant 6 mois (incluant au moins quelque mois de saison des pluies). Cette étape se réalisera en partie sur place à Niamey et en partie à distance.
3. La troisième étape concerne la vérification des résultats du test. Pour ce faire, il faudra un stagiaire auprès de la DMN dédié à l'analyse des résultats. Il sera encadré par les experts de IBE/LaMMA à distance.
4. La quatrième étape sert au réglage fin du modèle et se réalisera en partie sur place et en partie à distance.

Une fois la chaîne prête en pré-opérationnel et le personnel formé, une période de test opérationnel pendant une saison de pluies est prévue avant de passer à la phase suivante, d'assimilation des données observées par la DMN.

Au Burkina Faso, l'ANAM (Agence Nationale de la Météorologie) s'est engagée déjà depuis 2018 à opérationnaliser une chaîne de prévisions numériques avec le modèle WRF à travers plusieurs initiatives parmi lesquelles le projet HYDROMET de la Banque Mondiale et le projet CREWS de l'Organisation Météorologique Mondiale.

Les infrastructures et équipements informatiques incluent un High Performance Computing (HPC) ou super ordinateur, qui est très performant et fonctionne sous un environnement almalinux 8.8 avec deux réseaux (1 interne en infini-bande et un réseau ethernet). Ce HPC a été acquis en 2018 mais il a commencé à être opérationnel en juin 2023. De façon spécifique, il fonctionne avec 10 nœuds de calcul totalisant 480 cœurs de 2 nœuds de stockage de 130 To de stockage utile. EN 2025 le cluster de l'ANAM sera renforcé avec 2 nœuds supplémentaires.

Le modèle WRF (ARW) est opérationnel au Burkina Faso depuis juin 2023 avec 2 Runs sur un domaine nesté (9 Km et 3 Km de résolution). Les différents paramètres de sortie sont utilisés dans le domaine de la Prévision Numérique du Temps (PNT). Des perspectives de développement d'autres applications ont été proposées dont entre autres l'opérationnalisation d'autres modèles comme : WRF-Solar, WRF-CHEM (poussière, pollution, santé, énergie, ...) et le WRF-Hydro couplé (inondations -SLAPIS-). De plus, l'ANAM est appuyé par le NordCap avec la mise à disposition d'un expert en WRF. Mais la principale difficulté est l'insuffisance de formation dans le domaine de la maintenance et de l'exploitation du modèle.

2. Activités réalisées

En février 2023, bien que le projet SLAPIS Sahel n'ait pas encore officiellement démarré, la DMN, l'IBE-CNR et le consortium LaMMA ont pris l'initiative de lancer les activités prévues dans le plan en

mobilisant leurs propres ressources humaines et financières. Pour cette phase préparatoire, l'IBE-CNR et LaMMA ont déployé deux experts – l'un spécialisé en prévision météorologique, l'autre en modélisation – et une mission a été organisée au Niger. Parallèlement, la DMN a constitué une équipe interne dédiée au modèle WRF et a organisé, à ses propres frais, une session de formation en février 2023.

2.1 Atelier de formation 2023

Les travaux de cette formation se sont déroulés du 27 février au 3 mars 2023 à Niamey Niger avec la présence de 15 participants dont 10 de la DMN, 3 de IBE-CNR, un de l'Université de Niamey (UAM) et un du Centre Régional AGRHYMET (CRA). L'objectif principal de cette formation était de :

- Etablir une équipe mixte nigéro-italienne pour opérationnaliser la chaîne de prévision WRF au Niger ;
- Installer et paramétrer le modèle WRF sur le Niger ;
- Fournir une formation de base dans la gestion du modèle.

A la suite des 5 jours de formation, l'équipe WRF a été mise en place avec des tâches spécifiques dédiées aux sous équipes d'experts en informatique, en modélisation et en interprétation des produits, les trois sous-équipes ont été appuyées par les experts italiens, de l'UAM et du CRA.

La formation a aussi permis de rédiger une feuille de route pour le pré-test de WRF pendant la saison 2023, en particulier il s'agissait, à partir du 1^{er} d'Avril de vérifier la disponibilité des prévisions des runs de 00h et 12h et sur un tableau Google sheet reportant les jours de chaque moi noter "OUI" ou "NON" des RUNS effectués ou pas.

Pour ce faire, une procédure a été adoptée au cas où le modèle n'a pas tourné "non" les prévisionnistes avertissent par email les modélistes afin que des dispositions soient prises. Les modélistes quant à eux, ils doivent signaler le problème et la nature de l'erreur dans le tableau.

A l'issue de cette formation, des recommandations ont été adressées à la. En particulier il s'agit de : : remplacer l'onduleur de 10 KVA par un onduleur de 20 KVA pour sécuriser le calculateur de la DMN ; refaire le câblage du réseau informatique de la salle du calculateur ; procéder à l'acquisition des accessoires (cartes d'extension et fibre optique de connexion) pour l'exploitation du switch infini Band pour l'optimisation des performances du calculateur.

2.2 Pre-test 2023

Suite à cette formation, le modèle WRF peut tourner en pré-test avec une résolution de 4 kilomètres sur l'ensemble du pays en 4 runs (00h, 6h, 12h et 18h). Les produits de prévision étaient accessibles à travers une interface html.

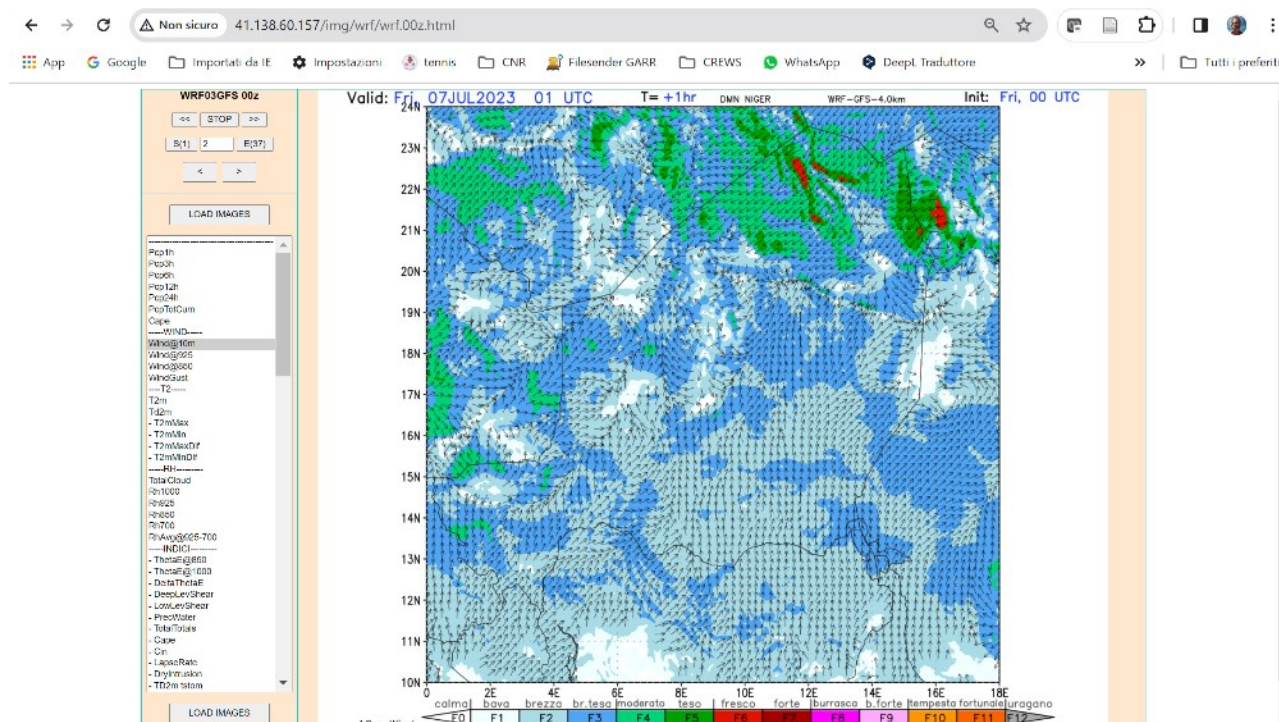


Figure 1, Interface de visualisation WRF DMN

Le modèle a commencé à tourner au début du mois de juillet quand les onduleurs ont été remplacés pour éviter des problèmes de sécurisation du HCP en cas de coupure de l'électricité. Le modèle a tourné jusqu'en début du mois d'août quand un autre problème sur le HPC a bloqué le WRF jusqu'en début septembre et depuis lors il a tourné régulièrement. A la fin de la saison, le nombre limité de prévisions réalisées n'ont pas permis de faire une vérification statistiquement significative.

date	Run 00_06_12_18	problème
07/07/23 au 03/08/23		bonne réception
10/08/23 au 05/09/23		d'internet, électricité, inaccessibilité au serveur
06/09/23 au 11/10/23		bonne réception

Figure 2, Disponibilité des différents runs à la DMN en 2023

Au Burkina, WRF était aussi en phase de pré-test et il a tourné sur HPC pour la première fois pendant l'hivernage 2023. Malheureusement, à cause d'un crash, les produits WRF 2023 ont été complètement perdus empêchant toute vérification.

NIGER	BURKINA
<pre> &physics mp_physics ra_lw_physics ra_sw_physics radt sf_sfclay_physics sf_surface_physics bl_pbl_physics bldt cu_physics cudt isfflx ifsnow icloud surface_input_source num_soil_layers sf_urban_physics / </pre>	<pre> = 2, = 1, = 1, = 15, = 1, = 2, = 1, = 0, = 1, = 5, = 1, = 1, = 1, = 1, = 1, = 4, = 0, &physics mp_physics ra_lw_physics ra_sw_physics radt sf_sfclay_physics sf_surface_physics bl_pbl_physics bldt cu_physics cudt isfflx ifsnow icloud surface_input_source num_soil_layers sf_urban_physics = 3, = 1, = 1, = 30, = 1, = 2, = 1, = 0, = 1, = 5, = 1, = 0, = 1, = 1, = 1, = 4, = 0, 3, 1, 1, 30, 1, 2, 1, 0, 1, 5, 0, 0, 0, 1, 0, 0, </pre>

Figure 3, Configurations de WRF, au Niger et Burkina en 2023

NIGER 2	BURKINA 3	ITALIE 8
mp_physics (max_dom)	microphysics option	
0	no microphysics	5 Ferrier scheme: A scheme that includes prognostic mixed-phase processes. This scheme was recently changed so that ice saturation is assumed at temperatures colder than -30C rather than -10C as in the original implementation. This scheme is well tested for WRF-NMM, used operationally at NCEP.
1	Kessler scheme: : A warm-rain (i.e. no ice) scheme used commonly in idealized cloud modeling studies.	6 WSM 6-class graupel scheme: A new scheme with ice, snow and graupel processes suitable for high-resolution simulations. This scheme has been preliminarily tested for WRF-NMM.
2	Lin et al. scheme: a sophisticated scheme that has ice, snow and graupel processes, suitable for real-data high-resolution simulations.	7 Goddard GCE scheme (also uses gsfcgce_hail, gsfcgce_2ice)
3	WRF Single-Moment (WSM) 3-class simple ice scheme: A simple efficient scheme with ice and snow processes suitable for mesoscale grid sizes.	8 Thompson graupel scheme: a scheme with six classes of moisture species plus number concentration for ice as prognostic variables. This scheme has been preliminarily tested for WRF-NMM.
4	WRF Single-Moment (WSM) 5-class scheme. A slightly more sophisticated version of option 3 that allows for mixed-phase processes and super-cooled water. This scheme has been preliminarily tested for WRF-NMM.	

Figure 4, Microphysique de WRF au Niger, Burkina et Italie en 2023

2.3 Atelier de formation 2024

Un séminaire de formation action sur le WRF a été organisé du 13 au 16 février 2024 à Niamey au Niger par le projet SLAPIS Sahel.

Ce séminaire a regroupé les experts en prévisions météorologiques, hydrologiques et en modélisation du Burkina Faso, du Niger et de l'Institut de BioEconomie d'Italie. Le modèle WRF étant déjà opérationnel au Niger et au Burkina Faso, ce séminaire fut un rendez-vous d'échange de connaissances et d'expériences afin d'affiner davantage les prévisions météorologiques et de dégager les pistes d'amélioration du modèle.

De façon spécifique, ce séminaire a regroupé 24 participants dont trois (3) de l'Agence Nationale de la Météorologie du Burkina Faso, deux (2) de l'Institut Bio-économie de l'Italie, deux (2) du Centre Régional AGRHYMET un (1) de l'Université Abdou Moumouni, deux (2) de la Direction des Ressources en Eau du Niger et quatorze (14) de la Direction de la Météorologie Nationale.

Ce Séminaire visait à partager les expériences des équipes du Burkina Faso, de l'Italie et du Niger dans l'opérationnalisation du modèle WRF et de discuter des possibilités d'amélioration de la performance du modèle. Spécifiquement, les objectifs visés étaient d' :

- approfondir la connaissance sur le modèle WRF et de son architecture des équipes du Burkina Faso et du Niger ;
- évaluer la performance du modèle WRF au Burkina Faso et au Niger ;
- prendre en compte les attentes des prévisionnistes, modélisateurs et spécialités du réseau du Burkina Faso et du Niger ;
- discuter sur la configuration du modèle WRF tant pour le Burkina Faso que pour le Niger ;
- dégager les stratégies d'amélioration conjointe de la performance du WRF ;
- élaborer un plan d'actions conjoint aux deux pays (Niger et Burkina Faso).

Après 4 jours de travaux les principaux résultats atteints ont été :

- 1) Compréhension des principaux problèmes : La DMN a rencontré des difficultés dans la mise en œuvre du WRF au Niger depuis 2023 qui étaient liées principalement aux coupures d'électricité, mise en veille automatique du système d'exploitation et de l'instabilité du réseau internet. Ces problèmes justifient les 45 jours de run du modèle WRF pendant toute la saison 2023. Des solutions ont été trouvées pour certaines contraintes et d'autres sont en cours d'évaluation. Une meilleure exploitation de WRF est espérée au cours de l'année 2024. L'ANAM qui a tourné le WRF pendant la saison 2023 a quant à elle perdu tous les produits de ce dernier à cause d'un crash du nœud de stockage du HCP. C'est pourquoi, aucune vérification sur la qualité des prévisions n'a été faite.
- 2) Elaboration d'un plan d'action conjoint pour la vérification des prévisions dans les deux pays. Ce plan d'action s'articulait sur l'utilisation des données de précipitations de CHIRPS et de TAMSAT mergées avec les observations locales (mergées) pour la vérification des prévisions. Aussi, il prévoyait de refaire tourner le modèle pour la saison 2023 avec les configurations du Burkina et du Niger. L'outil de validation prévu était un script sur R. Pour ce qui concerne les prévisions 2024, la validation du WRF à long terme aurait porté sur les paramètres vent, température et l'humidité en plus de la pluviométrie.
- 3) Formulation de recommandations à l'endroit de la DMN et de l'ANAM, en particulier mettre en place des équipes dédiées à l'évaluation de WRF et les mettre dans les conditions de finaliser ce travail ; définir et partager une feuille de route conjointe qui décrit succinctement les tâches

et responsabilités des équipes mises en place au niveau national (Burkina Faso & Niger) ; renforcer les capacités des cadres sur le hardware HPC et l'administration système (formation certifiante) ; renforcer le système de conditionnement des salles serveur ; mettre en œuvre un système d'alerte et extinction incendies ; opérationnaliser le système de messagerie d'alerte pour le calculateur, mettre en place une cellule de permanence de suivi du calculateur et d'autres équipements sensibles.

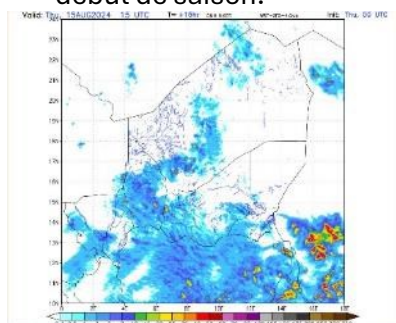
- 4) Formulation des recommandations à l'endroit du Projet SLAPIS Sahel : Renforcer les capacités de la DMN et de l'ANAM sur le WRF ; Augmenter le domaine Niger à l'Ouest de 2 degrés ; Activer sur le site du WRF Niger des nouvelles fonctions et paramètres et améliorer la page de visualisation html avec la vérification des variables à cartographier ; ajouter à la page de visualisation html les prévisions des modèles de GFS, ICON, ECMWF ; faire une étude de faisabilité de la mise en place d'un modèle WRF (domaine & configuration) qui couvre le Niger et le Burkina sur un cloud en parallèle aux systèmes existants dans les deux pays ; étudier les possibilités d'utilisation de l'Intelligence Artificielle dans les prévisions météorologiques des deux pays.

2.4 Test 2024

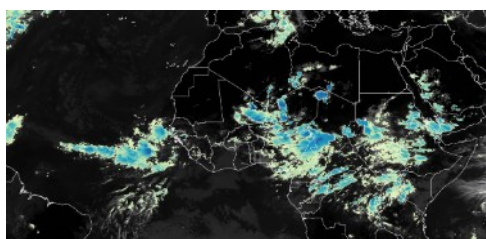
Avant le démarrage de la saison des pluies 2024, l'équipe nigero-italienne a modifié la paramétrisation de WRF au Niger en utilisant le "NCAR Tropical Physics Suite for WRF" qui en principe devrait mieux représenter la microphysique des régions tropicales par rapport à l'ancien Lin et al. scheme. Suite à une période d'« observation » la nouvelle paramétrisation a été retenue et a tournée en opérationnel le long de la saison 2024. Au Burkina Faso le WRF a tourné avec la configuration WRF Single Moment (WSM) comme d'ailleurs en 2023.

2.4.1 Niger

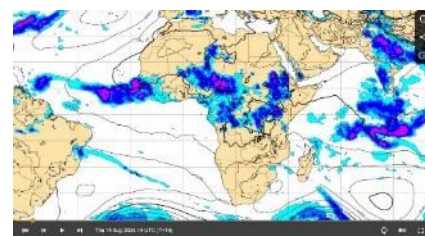
Le modèle WRF a tourné régulièrement deux RUNS par jour (00h et 12h) à 4km de résolution de mars 2024 au 3 septembre quand le cluster de la DMN a eu un problème d'alimentation électrique et est tombé en panne. De par les analyses découlant de l'évaluation du modèle WRF Niger, au cours de la période Juin-Juillet Août-Septembre pour le paramètre précipitation, il ressort que le modèle arrive à détecter les systèmes convectifs surtout les événements extrême (Fig. 1, le 15 Août 2024 et Fig. 2, le 03 Septembre 2024). Toutefois, il faut noter que le modèle sous-estime le paramètre précipitation en début de saison.



A : modèle WRF à 15 UTC avec run de 00



B : image satellitaire 2024081515Z



C : modèle ECMWF 2024081515Z

Figure 5, Prévision du 15 août 2024

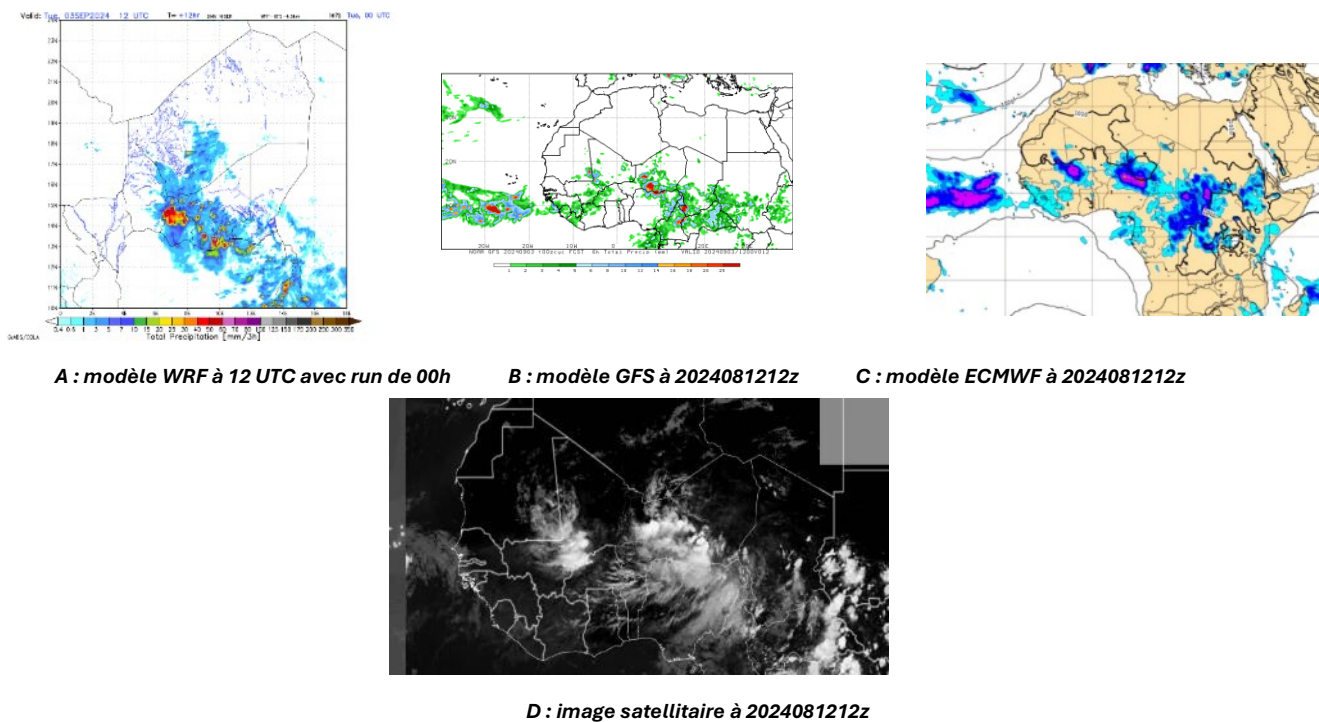


Figure 6, Prévision du 03 septembre 2024

Au cours de ladite période, on a aussi procédé à un suivi des paramètres. Il faut constater que les paramètres en vert sont ceux qui sont disponibles et ceux en rouge ne le sont pas.

Precipitation	
PCP 1h	
PCP 3h	
PCP 6h	
PCP 12h	
PCP 24h	
PcpTotcum	

Temperature	
T2m	
TD2m	
T2m Max	
T2m Min	

Indices	
Precipitable Water	
K-index	
lifted index	
CAPE	
ThetaE@850	
ThetaE@1000	
DeltaThetaE	
DeepLeVShear	
LowLeVShear	
TotalTotals	
CIN	
Lapsrate	
DryIntrusion	
TD2m tstom	

Vent	
wind 10 mm	
wind 925 m	
wind 850 m	
rafale de vent	

Humidité	
RH 1000	
RH 925	
RH 850	
RH 700	
RhAveraage 925-700	

Figure 7, Paramètres disponibles en 2024

A la fin de la saison les données mergées CHIRPS et TAMSAT sont disponibles au Niger grâce au travail effectué par les différentes équipes des prévisionnistes. Toutefois, certaines difficultés ont été soulignées, en particulier :

- Indisponibilité du server à partir de septembre liée à des problèmes du système d'exploitation sous licence;
- Indisponibilité/faible débit de la connexion internet pour le server par moments.

Des recommandations ont aussi été formulées :

- Accessibilité à tous les paramètres ;
- Avoir une animation sur les paramètres ;
- Accessibilité au run de 06h ;
- Superposition des paramètres.

2.4.2 Burkina Faso

Au Burkina Faso, l'ANAM a utilisé de manière opérationnelle le modèle WRF pendant l'hivernage 2024 dans le cadre du volet météorologique du projet SLAPIS. Globalement, l'utilisation du modèle WRF a permis de fournir des prévisions à haute résolution, essentielles pour anticiper les phénomènes météorologiques intenses caractéristiques de cette période de l'année.

Au début de la campagne agricole, le supercalculateur (HPC) a été inopérant pendant quelques jours, mais ce problème a été très vite résolu, permettant de reprendre la production des prévisions rapidement. Le modèle a été exécuté deux fois par jour à 9 Km et 3 Km de résolution: un run à 00h afin que les sorties soient disponibles au plus tard à 08h, et un autre run à 12h pour que les sorties soient disponibles vers 22h. Ces prévisions ont été utilisées par les prévisionnistes pour anticiper les orages et les épisodes de fortes précipitations, avec des cartes de précipitations prévues, de vent, et des indicateurs d'instabilité jouant un rôle essentiel dans l'élaboration des bulletins météorologiques et les alertes.

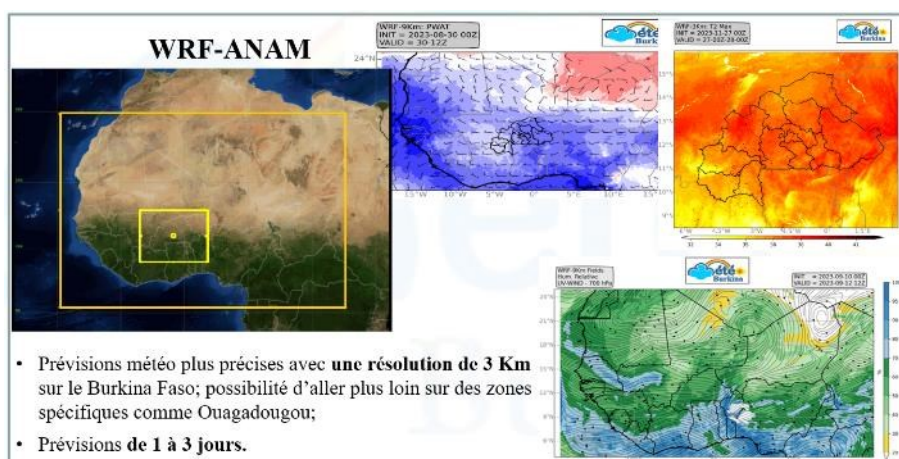


Figure 8, Fenêtres utilisées au Burkina Faso en 2024

En termes de difficultés, il a été constaté que les sorties du modèle prenaient plus de temps que prévu avant d'être disponibles, ce qui a parfois impacté la rapidité d'utilisation des prévisions par les équipes.

Pour l'avenir, plusieurs besoins ont été identifiés afin de renforcer l'opérationnalisation du modèle WRF. Il serait nécessaire de garantir une meilleure disponibilité du HPC, notamment par des mesures de maintenance préventive, pour minimiser les interruptions. En outre, des formations supplémentaires pour les prévisionnistes et les techniciens de maintenance sont recommandées afin de renforcer leurs capacités à interpréter les sorties du modèle, à maintenir le matériel, et à intégrer efficacement les prévisions dans les bulletins météorologiques. Une évaluation continue des performances du modèle est également cruciale pour ajuster les paramètres et ainsi augmenter la précision des prévisions. Ces améliorations permettront de maximiser l'impact du modèle WRF lors des prochaines saisons des pluies.

2.5 Stage de recherche en Italie

Afin de mieux supporter la DMN et l'ANAM dans l'opérationnalisation de WRF dans ses pays respectifs, IBE-CNR en accord avec les partenaires a décidé d'ouvrir deux positions de bourse de recherche destinées à un modélisateur de l'ANAM et un de la DMN afin qu'ils puissent se déplacer à Florence et travailler avec les collègues de IBE-CNR/LaMMA pour une période de 15 mois. L'objectif principal est de leur permettre de s'imprégner profondément dans la gestion, paramétrage, utilisation de WRF et des différents environnements de programmation tels que LINUX, Python, R. En particulier, les activités à réaliser étaient l'appui à la mise en œuvre de la modélisation météorologique numérique dans les services météorologiques nationaux du Niger et du Burkina Faso ; la prévision à posteriori de différentes configurations microphysiques, l'évaluation et la validation des produits de prévision météorologique ; la calibration et le réglage des modèles ; la création d'un manuel d'exploitation pour la gestion et la maintenance des modèles et la création d'ensembles de données climatologiques. En cours de route, les objectifs ont été enrichie avec le propos de doter DMN et ANBAM d'un deuxième modèle de prévision numérique, le modèle MOLOCH développé par le CNR. L'avis de bourse a été publié le 17 juillet 2024 et la sélection a pris fin le 11/09/2024 avec l'assignation à M. Younoussa Adamou Sayri de la DMN et M. Thomas Bere de l'ANAM. Le stage a débouté le 12 novembre 2024 et a pris fin le 13 février 2026. Parmi les résultats principaux on peut citer :

- Amélioration des compétences dans l'installation, gestion et utilisation de modèles numériques de prévision météorologique
- Réalisation de routines pour la vérification des prévisions météorologiques avec observations multi-source (stations et satellites)
- Evaluation des performances de WRF Niger et WRF Burkina sur JAS 2023 et 2024
- Evaluation des performances de MOLOCH et WRF Niger sur JAS 2025
- Installation, configuration et opérationnalisation end-to-end de MOLOCH au Burkina Faso
- Réalisation de kits d'installation automatisé de WRF et MOLOCH complets de guide
- Rédaction et soumission de 2 articles scientifiques

La plupart de ces résultats seront présentés dans les chapitres suivants.

3. Vérification WRF

Des prévisions météorologiques précises et fiables sont un outil stratégique pour le Burkina Faso et le Niger, dont les économies dépendent fortement des précipitations pour l'agriculture, l'hydrologie, la santé et la gestion des risques climatiques. Les deux pays ont investi dans des calculateurs haute performance (HPC) pour générer des prévisions numériques du temps à haute résolution (3 km au Burkina Faso et 4 km au Niger) depuis 2023. Les deux chaînes de prévision WRF du Niger et du Burkina ont des configurations différentes et aucune des deux a été jamais évaluée d'une manière systématique et quantitative. L'objectif de cette activité est d'évaluer la performance des deux chaînes de prévision. La vérification permet de mieux comprendre les faiblesses et les forces des systèmes de prévision, ce qui permet une utilisation plus complète des informations contenues dans les prévisions. Malheureusement les produits de prévision pour les années passées sont incomplets ou absentes. Par conséquent, il est nécessaire de recalculer en hindcast les prévisions avec les deux configurations qui seront appelées WRF_Niger et WRF_Burkina pour simplicité.

3.1 JAS 2023-2024

L'évaluation des performances du modèle WRF (Weather Research and Forecasting Model) pour les mois de juillet-août-septembre (JAS) des années 2023 et 2024 a été réalisé pendant le stage de R. Thomas BERE et Younoussa Adamou Sayri à Florence avec l'encadrement et le support de Francesco Pasi et Valerio Capecchi.

3.1.1 Hindcast

Le LaMMA a mis à disposition de l'équipe un cluster composé par 8 nodes, chacun de 32 processeurs pour un total 256 processeurs Intel(R) Xeon(R) Gold 6130 CPU @ 2.10GHz à 32 cores. Sur le cluster la version 4.1 de WRF est installé. Le domaine utilisé (Figure 9) couvre l'ensemble du territoire du Niger et du Burkina Faso, s'étendant au Sud jusqu'au Golfe de Guinée et à l'Est jusqu'au Tchad.

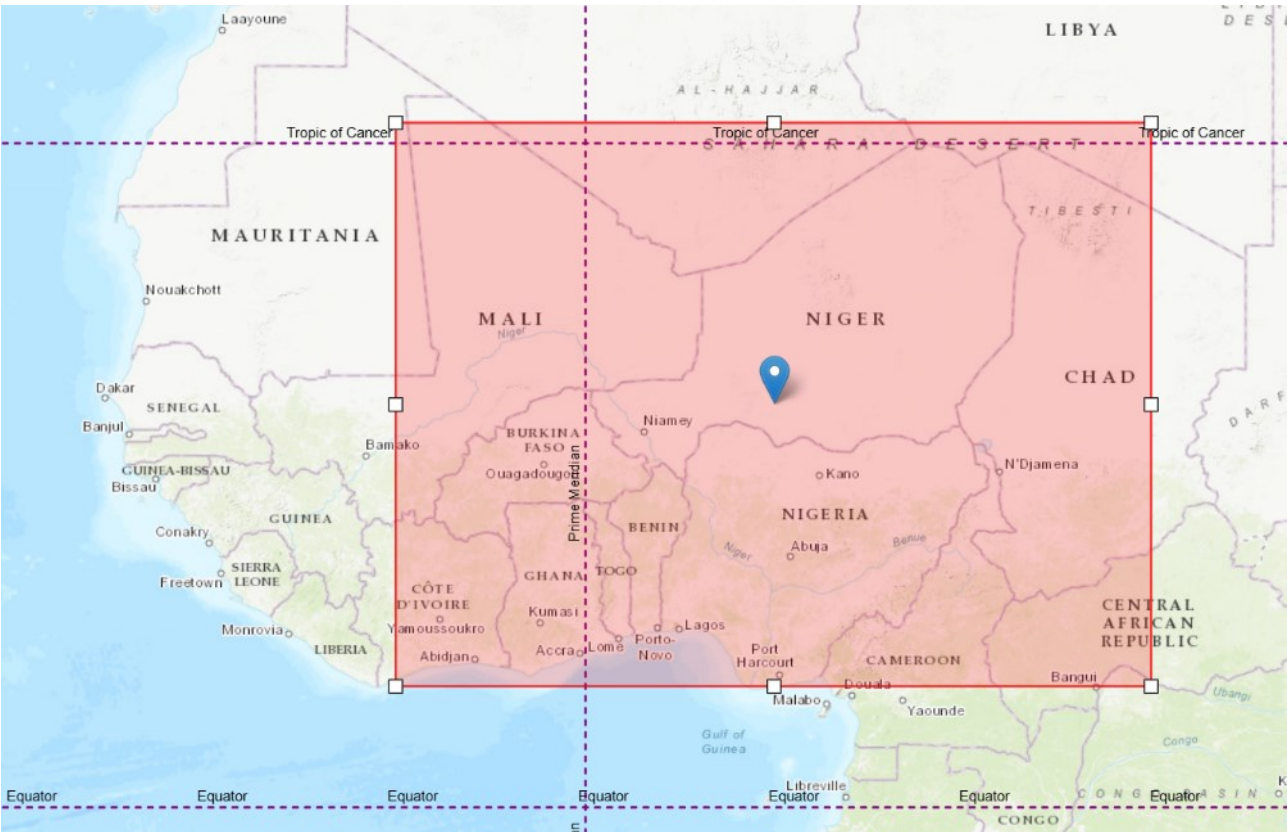


Figure 9, Domaine utilisé pour la vérification de WRF

Les données d’initialisation sont celles du modèle global GFS et le run de 18h est utilisée avec une simulation de 36h. Les cumuls 00h-00h sont utilisés pour la comparaison avec les estimations satellitales tandis que les cumuls 06h – 06h sont utilisés pour la comparaison avec les données stations.

Deux configurations différentes de WRF sont utilisées (Figure 10 et Figure 11). De la configuration du Burkina on a retenu seulement celle à 3 km (colonne de droite).

<pre>1 &physics 2 physics_suite = 'tropical' 3 ! hysics_suite = 'tropical', les paramètres sont configurés comme suit : 4 ! mp_physics = 0, 5 ! cu_physics = 16, 6 ! ra_lw_physics = 4, 7 ! ra_sw_physics = 4, 8 ! bl_pbl_physics = 1, 9 ! sf_sfclay_physics = 91, 10 ! sf_surface_physics = 2, 11 radt = 15, 12 bldt = 0, 13 cudt = 5, 14 icloud = 1, 15 num_land_cat = 21, 16 sf_urban_physics = 0, 17 fractional_seaice = 1, 18 /</pre>	<pre>1 &physics 2 mp_physics = 8, 8, 3 ra_lw_physics = 4, 4, 4 ra_sw_physics = 4, 4, 5 radt = 9, 3, 6 sf_sfclay_physics = 2, 2, 7 sf_surface_physics = 2, 2, 8 bl_pbl_physics = 2, 2, 9 bldt = 0, 0, 10 cu_physics = 1, 0, 11 cudt = 5, 5, 12 isfflx = 1, 13 ifsnow = 0, 14 icloud = 1, 15 surface_input_source = 1, 16 num_soil_layers = 4, 17 sf_urban_physics = 0, 0, 18 maxtens = 1, 19 maxens = 3, 20 maxens2 = 3, 21 maxens3 = 16, 22 ensdim = 144, 23 / 24 25 &fdda</pre>
Figure 10, Configuration WRF-Niger	Figure 11, Configuration WRF-Burkina

Des prévisions sont extraites seulement les variables d'intérêt, mais le reste est sauvegardé pour d'analyses ultérieures.

3.1.2 Méthodes d'évaluation

Un aspect crucial du travail a été la définition de la méthodologie de vérification des prévisions, c'est-à-dire le processus d'évaluation de la qualité des prévisions avec les observations réelles. Deux approches différentes ont été retenus. D'une part la comparaison ponctuelle entre prévisions et observations des réseaux officiels de DMN et ANAM. De l'autre, la comparaison des prévisions avec des estimations satellitales de précipitation comme CHIRPS, et TAMSAT. Dans le premier cas, il s'agit d'extraire des raster de la prévision le paramètre souhaité (dans notre cas la précipitation cumulée sur 24h de 06h à 06h) avec la méthode du nearest neighbour. Puis, pour toutes les couples prévu/observé calculer les différents scores de compétence utilisés pour évaluer les modèles (Figure 12), notamment l'Erreur Moyenne (ME), l'Erreur Absolue Moyenne (MAE), l'Erreur Quadratique Moyenne (RMSE) et le coefficient de corrélation de Pearson, ainsi que les indices binaires (bias, POD, CSI, FAR).

Vérification basée sur les données stations:

- Traitement des précipitations en tant que variables continues:

- Erreur moyenne : $ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_k - o_k) = \bar{y} - \bar{o}$
- Erreur absolue moyenne (MAE) : $MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_k - o_k|$
- Coefficient de corrélation

- Traitement des précipitations en tant que variable binaire:

- Biais: $B = \frac{a+b}{a+c}$
- Probabilité de détection : $POD = \frac{a}{a+c}$
- Critical Success Index: $CSI = \frac{a}{a+b+c}$
- Ratio des fausses alarmes
 $FAR = \frac{b}{a+b}$

		Observations	
		yes	no
Prévisions	yes	Succès (a)	Fausse alarmes(b)
	no	Manquées(c)	Rejets corrects (d)

7

Figure 12, Scores de vérification ponctuelle

Dans le deuxième cas, la vérification spatiale a été réalisée avec le **Fraction Skill Score (FSS)**. Cette approche adresse le problème de la "double pénalité" : une prévision peut être considérée comme mauvaise si elle place correctement une averse, mais avec un léger décalage spatial. Pour surmonter cette difficulté, le FSS est calculé en comparant les fractions de zones où un seuil de précipitation est dépassé dans les prévisions et les observations, sur des grilles identiques (Figure 13). Cela permet d'évaluer la capacité du modèle à prévoir la distribution spatiale des précipitations, plutôt que de se focaliser uniquement sur la précision ponctuelle. Le FSS aide à mieux évaluer la qualité des prévisions à haute résolution.

Vérification spatiale

Fraction skill score:

- Prévisions et observations sont aux mêmes grilles

$$I_o = \begin{cases} 1 & O_r \geq q \\ 0 & O_r < q \end{cases}, I_m = \begin{cases} 1 & y_r \geq q \\ 0 & y_r < q \end{cases}$$

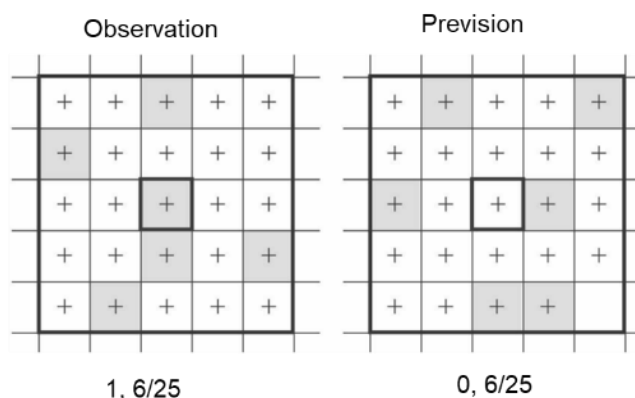


Figure 13, Fraction skill score

3.1.3 Résultats et Comparaison des Modèles

Une analyse comparative détaillée des performances des trois modèles de prévision des précipitations (GFS, WRF-Burkina Faso et WRF-Niger) a été réalisée sur la périodes JAS 2023 et 2024. Les résultats permettent une évaluation nuancée des forces et faiblesses de chaque modèle.

- **Métriques déterministes (ME, MAE, corrélation) :** Les résultats (Figure 14) ont indiqué que, en utilisant les métriques déterministes telles que l'Erreur Moyenne (ME), l'Erreur Absolue Moyenne (MAE) et la corrélation, la configuration du modèle WRF du Niger tendait à offrir les meilleurs résultats.

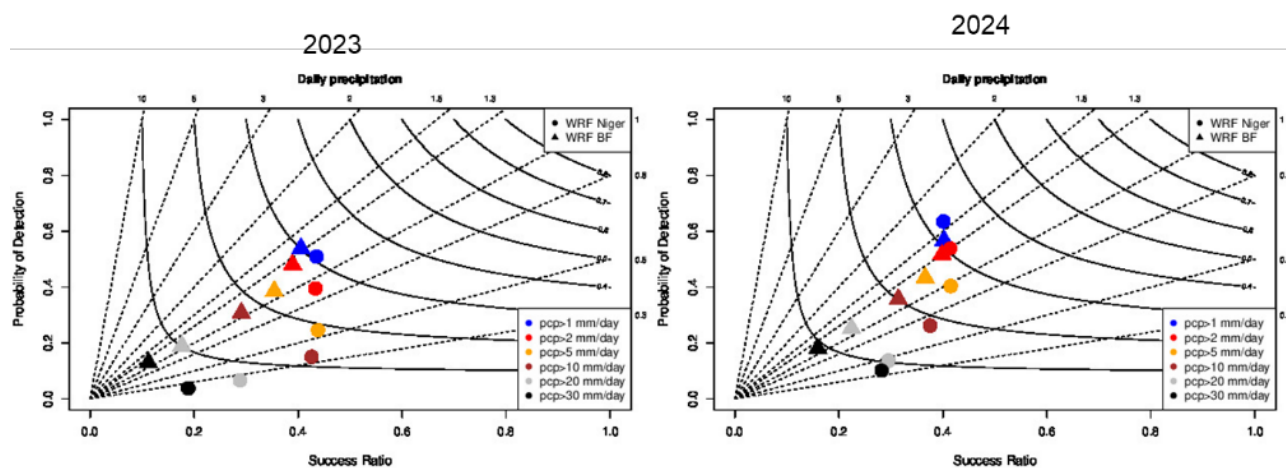


Figure 14, Scores deterministes

- **Fraction Skill Score (FSS) :** Cependant, l'analyse basée sur le Fraction Skill Score (Figure 15) a suggéré que la configuration de WRF qui tourne au Burkina Faso semblait meilleure en termes de prévisions significatives à faibles échelles pour des cumuls importants de précipitations.

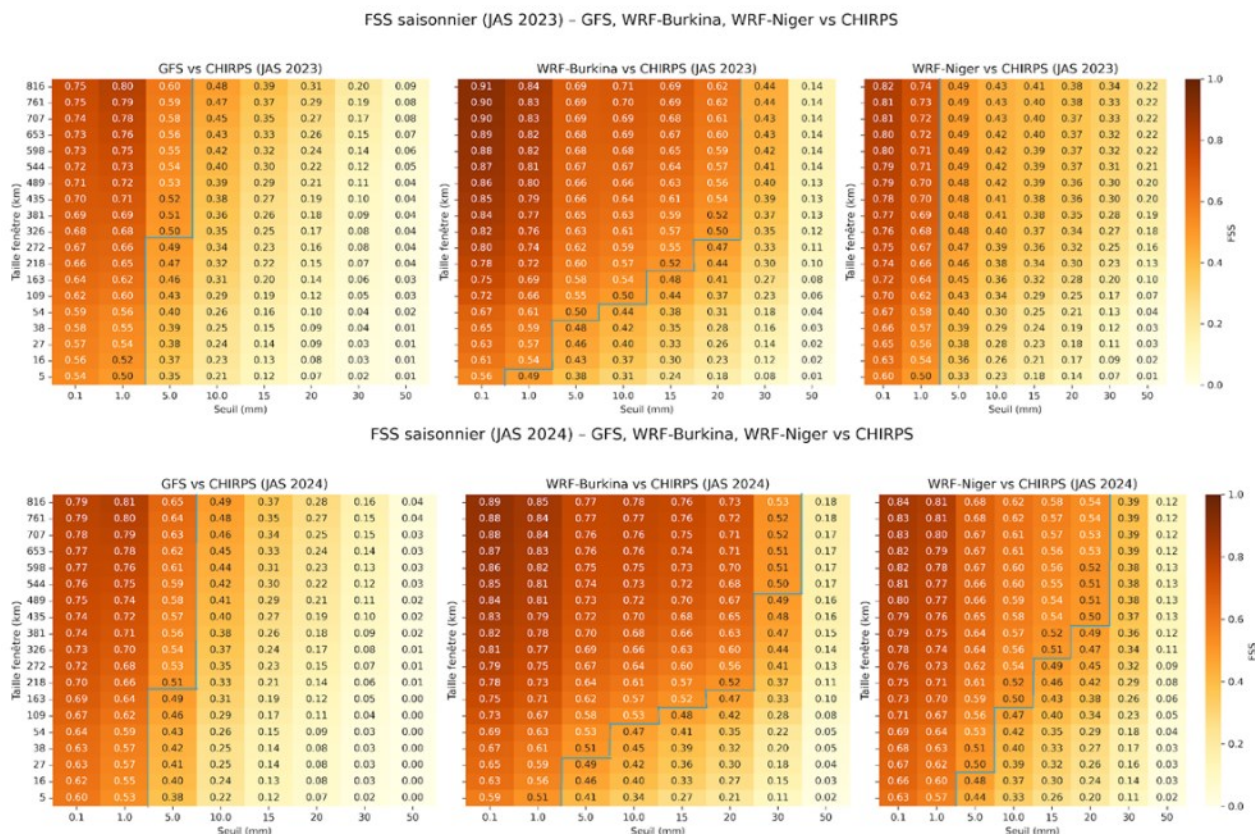


Figure 15, Fractional Skill Scores JAS 2023 et 2024

- **Comparaison globale** : De manière générale, les deux modèles WRF (Burkina Faso et Niger) ont démontré des performances supérieures à celles du modèle global GFS.
- **Analyse des cas d'étude** : L'analyse a inclus des études de cas spécifiques (par exemple, les événements des 20 et 30 août 2024) pour illustrer les performances des modèles dans des situations météorologiques particulières. Ces études de cas (Figure 16) ont permis d'examiner comment les modèles capturent les caractéristiques spatiales et temporelles des précipitations, notamment les pluies convectives.

Comparaison des Précipitations du 20 Août 2024 (Simulations, Observations et Stations)

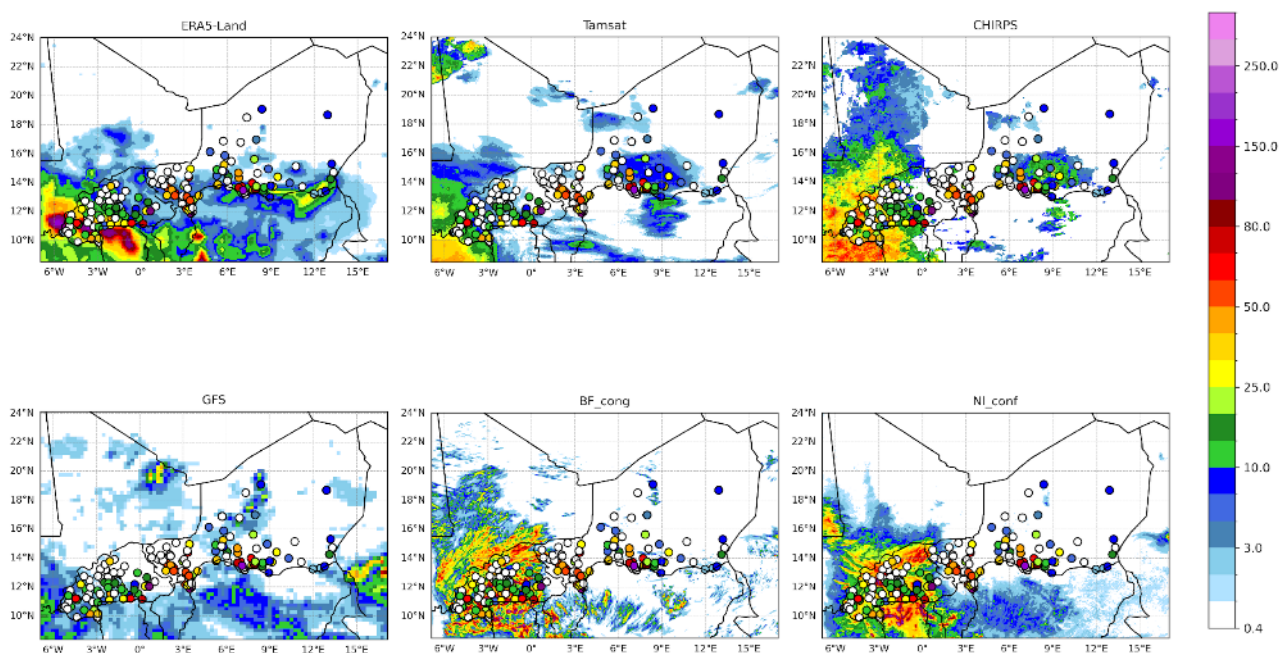


Figure 16, Cas d'étude 20 aout 2024

- **Perspectives :** Comme perspectives d'amélioration, les auteurs ont exprimé le désir de faire tourner les deux modèles WRF en utilisant les données Open du Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (ECMWF).

En conclusion, les résultats ont montré que les modèles WRF, tout en présentant des caractéristiques distinctes, surpassaient le modèle GFS. L'utilisation combinée de métriques déterministes et d'approches de vérification spatiale comme le FSS a permis une compréhension plus complète des capacités et des limites de chaque modèle.

3.2 Ateliers de restitution des résultats à la mi-parcours

Dans le cadre du projet SLAPIS Sahel, deux ateliers de pré-validation du modèle Weather Research and Forecasting (WRF-NIGER) ont été organisés le 16 et le 17 avril 2025 respectivement à l'ANAM du Burkina Faso et à la DMN du Niger.

Le **séminaire de Ouaga** s'est tenu dans la salle de conférence de l'ANAM et a réuni 12 experts de l'ANAM, de l'Université de Ouagadougou et d'Italie. Les objectifs de l'atelier étaient de :

- Présenter les résultats à mi-parcours de la validation du modèle WRF obtenus pendant les premiers 6 mois du stage à Florence de M Thomas R. Bere et M Younoussa Adamou Sayri
- Présenter les résultats de la validation réalisée par l'ANAM à Ouaga
- Présentation de la chaine WRF de backup qui sera mise en place sur le serveur de Florence
- Discuter les perspectives d'amélioration de la chaine opérationnelle à l'ANAM pour le 2025 et le 2026

Le séminaire a offert une vue d'ensemble précieuse des avancées et des défis actuels dans le domaine de la modélisation numérique du temps. Les présentations ont souligné l'importance cruciale de la collaboration scientifique internationale, illustrée par le partenariat fructueux entre l'Agence Nationale de la Météorologie et l'Italie, ainsi que le rôle central des outils de modélisation pour générer des informations météorologiques précises et pertinentes pour diverses applications.

Les discussions qui ont suivi les présentations ont permis d'approfondir plusieurs thématiques clés. Tout d'abord, la nécessité de renforcer les compétences en agrométéorologie par le biais de formations spécialisées a été mise en évidence. Ensuite, l'intérêt grandissant pour les modèles de prévision numérique à haute résolution, à l'instar de MOLOCH, capables d'améliorer significativement la précision des prévisions, a été souligné.

Par ailleurs, les défis complexes posés par la vérification des prévisions, notamment la prise en compte des dimensions spatiales, et la valeur ajoutée des méthodes d'évaluation telles que le Fraction Skill Score (FSS) ont été largement débattus. Enfin, les progrès constants réalisés dans l'évaluation des modèles WRF, ainsi que les perspectives prometteuses offertes par l'utilisation des données du Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (ECMWF) et l'intégration de l'intelligence artificielle, ont suscité un vif intérêt.

En somme, ce séminaire a constitué une plateforme d'échange fructueuse, favorisant le partage de connaissances et d'expériences entre les acteurs de la météorologie. Il a également permis de consolider les liens entre les participants et d'identifier des pistes prometteuses pour de futures collaborations et innovations dans le domaine crucial de la prévision numérique du temps.

Le **Séminaire de Niamey** s'est tenu dans la salle de réunion de la Direction de la Météorologie Nationale (DMN) et a été simultanément diffusée en visioconférence afin que l'équipe de l'institut de BioEconomie d'Italie puisse y prendre part. Elle a réuni, d'une part, les membres de l'équipe WRF de la DMN, des représentants de la Direction des Ressources en Eau et de l'AGRHYMET et d'autre part, les experts de l'Agence Nationale de la Météorologie du Burkina Faso (ANAM) ainsi que ceux de l'Institut de BioÉconomie d'Italie, ces derniers en visioconférence. L'atelier visait comme objectifs principaux :

- Présenter les résultats de la validation du modèle WRF obtenus au cours des six premiers mois du stage à Florence par M. Younoussa Adamou Sayri et M. Thomas Beré.
- Présenter la chaîne WRF de sauvegarde qui sera mise en place sur le serveur de Florence.
- Discuter des perspectives d'amélioration de la chaîne opérationnelle à la DMN pour 2025 et 2026.

L'atelier, qui a vu la participation de 18 personnes en présentiel et 4 en visioconférence, a permis de faire le point sur les progrès réalisés dans le cadre de l'activité relative au développement du modèle WRF au Niger et au Burkina Faso. Les résultats des comparaisons des configurations pour le Niger et le Burkina Faso ouvrent la voie à des améliorations, notamment dans l'ajustement des paramètres des modèles pour mieux refléter les réalités climatiques de chaque pays.

4. MOLOCH

Suite aux discussions initiées lors des ateliers d'Avril 2025 à Niamey et Ouagadougou, portant sur la restitution des résultats préliminaires de la validation du modèle WRF et des perspectives d'amélioration des outils de prévision numérique, un intérêt marqué avait été exprimé par les services

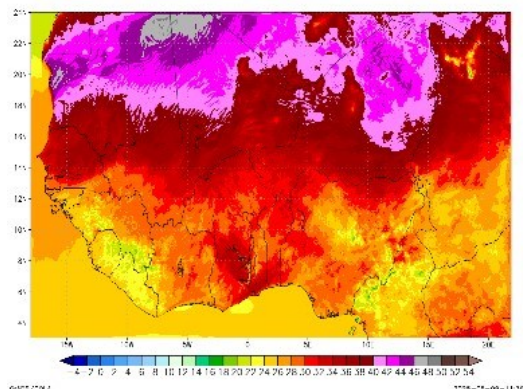
météorologiques du Niger et du Burkina Faso pour le modèle opérationnel MOLOCH. En réponse à cet intérêt et dans le but d'explorer le potentiel de ce modèle pour les opérations de prévision dans la région, un séminaire de présentation dédiée au modèle MOLOCH a été organisée en visioconférence le 19 mai 2025. Ce séminaire a réuni les premiers responsables des services météorologiques du Niger et du Burkina Faso, leurs agents techniques, ainsi que les partenaires italiens impliqués dans les projets de collaboration scientifique et de renforcement des capacités. L'objectif principal de cette rencontre était de fournir une vue d'ensemble détaillée des caractéristiques, des capacités et des applications du modèle MOLOCH et en particulier de :

- Présenter en détail le modèle de prévision météorologique opérationnel ;
- Expliquer les caractéristiques techniques et les capacités de ce modèle ;
- Partager les résultats des tests et des comparaisons avec d'autres modèles ;
- Discuter du chronogramme des activités avenir au cours de la saison.

Le modèle opérationnel MOLOCH, développé par le CNR-ISAC, est utilisé par le LaMMA qui est un consortium entre le gouvernement de la Région Toscane et l'Istituto per la Bioeconomia du Conseil National des Recherches d'Italie, et il est reconnu comme le service météorologique de la Région Toscane. Le modèle MOLOCH a un noyau non hydrostatique, une grille Arakawa C, un système de coordonnées hybrides, un schéma de rayonnement (utilisant celui de ECMWF mis à jour en 2024), un modèle de turbulence et un schéma de sol DROPA. Le schéma de microphysique de MOLOCH utilise 5 hydrométéores et ne comprend pas de paramétrisation de grésil, contrairement à certains schémas de WRF. MOLOCH est utilisé dans diverses applications de prévisions de température et de précipitations pour l'Italie, l'Espagne, la Grèce.). La dernière version de MOLOCH est disponible sur GitLab: <https://gitlab.com/isac-meteo/globo-bolam-moloch>. Pour l'Afrique de l'Ouest, un test effectué a permis de vérifier les domaines de prévision de MOLOCH et WRF, soulignant les différences de résolution et de temps de calcul : modèle MOLOCH est deux ou trois fois plus rapide que le modèle WRF. Un aspect innovant de cette étude est le déploiement du modèle MOLOCH dans la région sahélienne. En effet, ce modèle est principalement utilisé dans les régions de moyenne latitude (Davolio et al., 2020) et, à notre connaissance, peu ou pas de tentatives ont été faites pour exécuter le modèle MOLOCH dans les régions tropicales en utilisant le traitement explicite de la convection.

DOMAIN MOLOCH vs WRF

MOLOCH



RES = 3 km

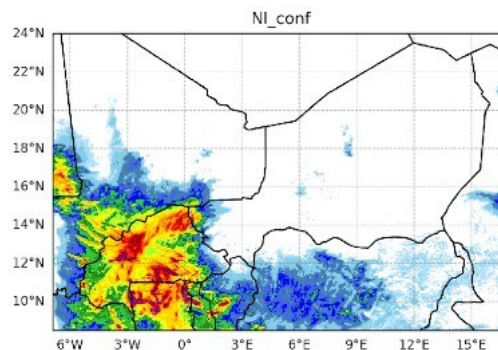
$NX \times NY \times NZ = 1322 \times 702 \times 50$

168 processors

t-step = 45

20 min / 24 hour

WRF



RES = 4 km

$NX \times NY \times NZ = 650 \times 450 \times 50$

228 processors

t-step = 24

50 min / 24 hour

vitesse x 2,5

Figure 17, MOLOCH vs WRF

L'évaluation préliminaire du modèle MOLOCH a été réalisée à travers plusieurs études de cas (Figure 18), en comparant ses prévisions à celles d'autres modèles (WRF, GFS) ainsi qu'aux observations. Pour ce faire, divers outils statistiques ont été mobilisés, notamment le Fraction Skill Score (FSS), le diagramme de performance, le diagramme de Taylor, ainsi que des analyses des cumuls des précipitations. Ces outils ont permis d'apprécier de manière objective la qualité et la fiabilité des prévisions produites par le modèle. À ce niveau, il est ressorti que pour la période JAS 2024, le modèle MOLOCH avait des performances comparables, voire supérieures, à celles du modèle WRF.

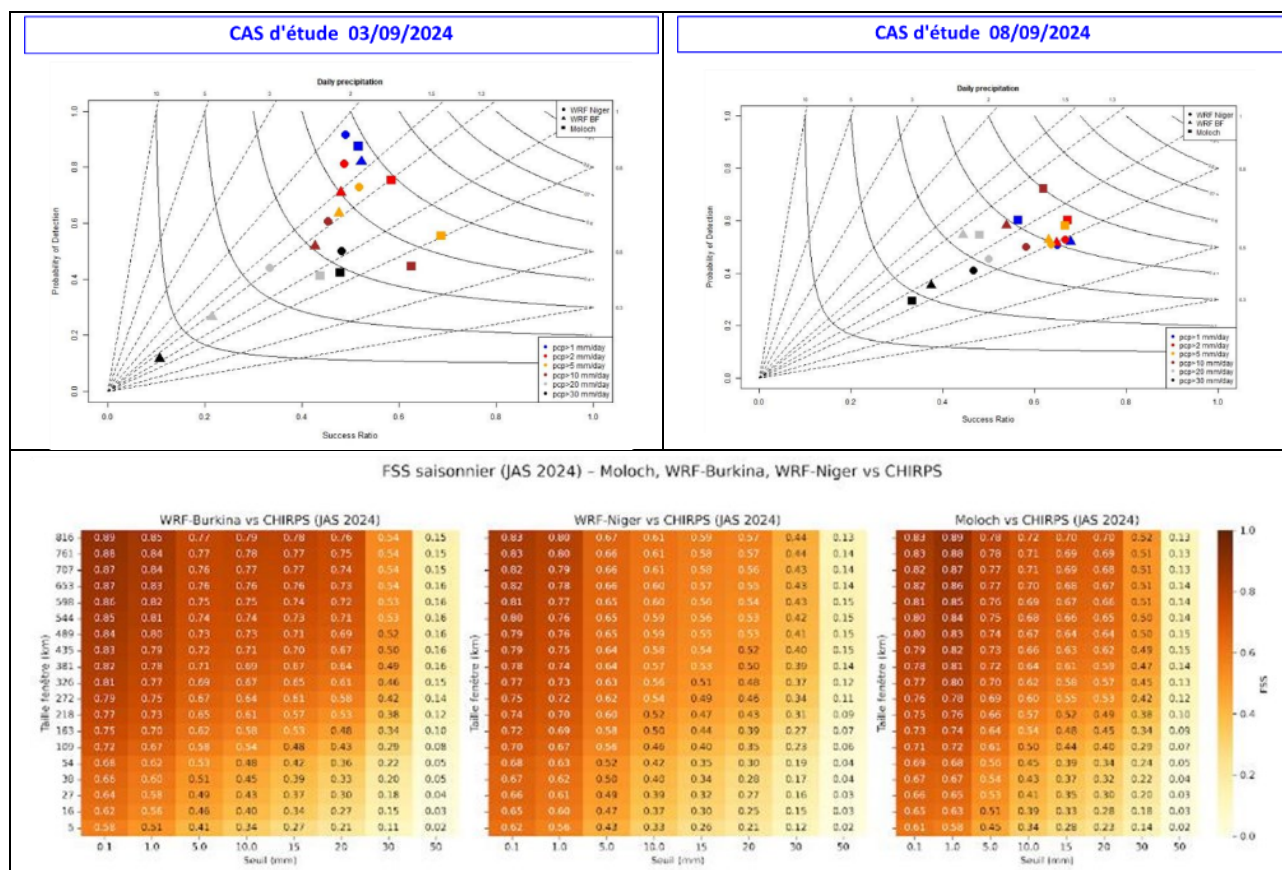


Figure 18, Cas d'étude MOLOCH en 2024

Un plan opérationnel (Figure 19) pour l'utilisation de MOLOCH à partir de juin 2025 et des activités de formation connexes a été dessiné. Il prévoit de faire tourner le modèle en opérationnel à partir du 1er Juin 2025 et de réaliser une plateforme de visualisation accessible à partir d'internet. Deux chaînes opérationnelles seront donc mises en place (WRF et Moloch) qui tourneront deux fois par jour avec les initialisations de 00h et 12h de GFS. En plus MOLOCH sera initialisé aussi avec les données open de ECMWF. A la fin de la période JAS 2025, une évaluation complète de la performance du modèle est prévue sur la période JAS 2025.

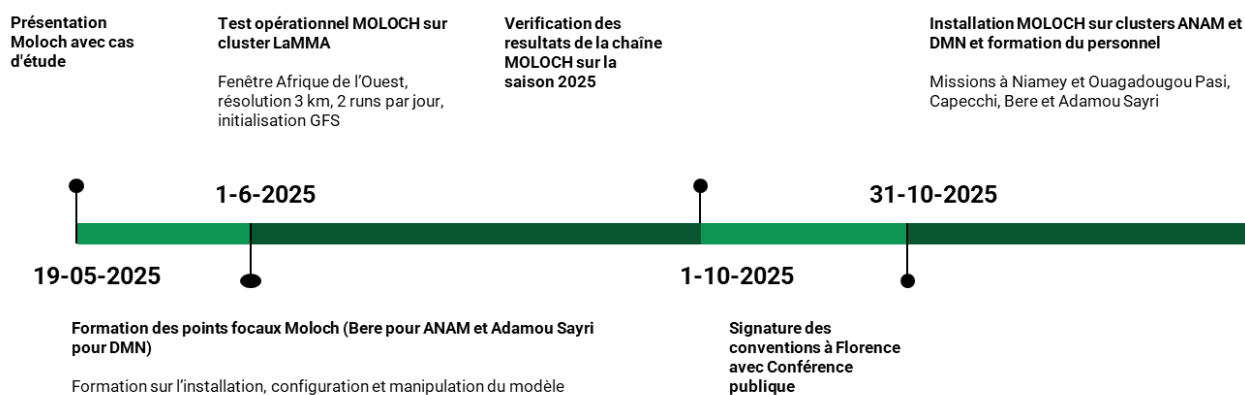


Figure 19, Plan d'opérationnalisation MOLOCH

Pour l'opérationnalisation du modèle au Niger et au Burkina Faso il a été recommandé de signer des conventions avec le LaMMA, ces conventions pourraient être signées durant une cérémonie à Florence dans le mois d'octobre 2025 par les directeurs de ANAM, DMN et LaMMA.

5. Test opérationnel WRF et MOLOCH 2025

5.1 Chaines opérationnelles WRF et MOLOCH 2025

Suite aux discussions initiées lors des ateliers d'Avril 2025 à Niamey et Ouagadougou et du séminaire en ligne sur MOLOCH du 19/05/2025, une chaîne opérationnelle de backup de WRF avec la configuration « Niger » et une nouvelle chaîne opérationnelle de PNT avec le modèle MOLOCH ont été implémentées par l'équipe LaMMA/IBE sur le cluster mis à disposition par le LaMMA. La première version de l'interface de visualisation (<http://149.139.16.6/slapis/>) des produits de PNT a été présentée en visioconférence le 11 juin 2025 (Figure 20).

SLAPIS - SAHEL

MODELE GLOBAL			
WRF04GFS	Wed, 11-06-2025 00 UTC		00 12
MOLO3GFS	mer. 11-06-2025 00 UTC		00 12
ARCHIVE			
WRF04GFS		ARCHIVE IMG	ARCHIVE GRIB
MOLO3GFS		ARCHIVE IMG	ARCHIVE GRIB
EVALUATION			
WRF04GFS	2024		00 12
MOLO3GFS	mer. 11-06-2025 00 UTC		00 12

Figure 20, Interface de visualisation chaines WRF et MOLOCH

L'interface de visualisation est composée de trois parties. La première pour la visualisation des variables générées par les modèles WRF et MOLOCH. A l'état actuel, ces modèles sont initialisés avec les données de GFS, et le MOLOCH aussi avec Open data de ECMWF. Deux runs par jour sont présentées : celle de 00 et celle de 12 heures. Le modèle MOLOCH est tourné à une résolution spatiale de 6 km sur une fenêtre couvrant l'ensemble de l'Afrique au Nord de l'Equateur, tandis que le modèle WRF à une résolution spatiale de 4 km sur une fenêtre couvrant Niger et Burkina Faso.

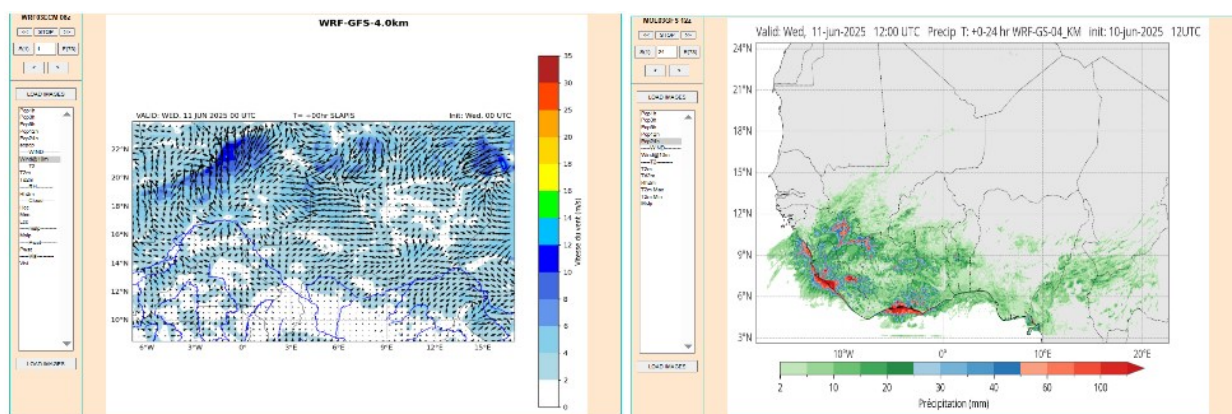


Figure 21, Exemple de visualisation WRF (gauche) et MOLOCH (droite)

La deuxième partie présente les archives des produits en format image et en format grb, qui pourraient être utiles pour les bulletins et aussi pour des ultérieures études de vérification.

La troisième partie est censée récolter les produits d'évaluation de ces modèles par rapport aux données observées de terrain ou de télédétection.

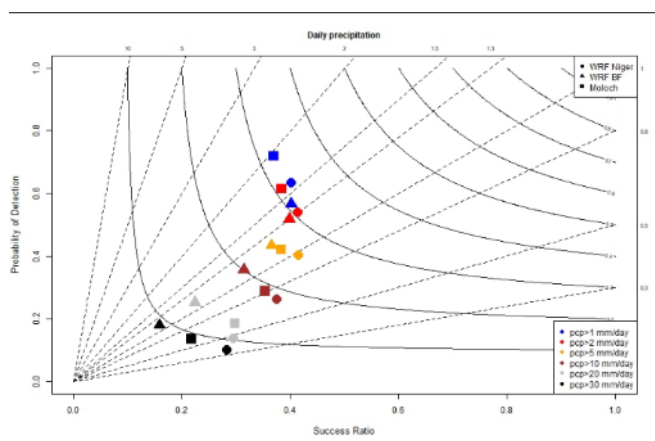


Figure 22, Exemple de diagramme de Taylor de vérification

Les échanges continus avec les équipes de la DMN et de l'ANAM pendant la saison ont permis d'améliorer à fur et à mesure l'interface et les produits :

- 1) Variables à afficher : en debut la plateforme contenait seulement certaines variables de surface. Suite à la recommandation de la DMN d'autres variables déjà identifiées lors des formations de 2023 et 2024 ont été implémentées.
- 2) Codes couleurs : afin d'harmoniser les produits et de faciliter leur utilisation ainsi que leur évaluation, les codes couleurs déjà utilisés par l'ANAM ont été appliqués. Pour les variables qui n'étaient pas encore utilisées des nouvelles codes couleurs ont été proposées.
- 3) Fonds de carte : en préférence ils doivent être en blanc, éventuellement utiliser d'autres repères tels que le réseau hydrographique, en tout cas les fonds des deux chaines sont les mêmes.

- 4) Compléments d'information : des fichiers d'explication des chaînes opérationnelles et des produits d'évaluation, ainsi que du contexte seront préparés et publiés sur la page.

5.2 Briefings de suivi et évaluation

Afin d'assurer le suivi du test, mais aussi une évaluation qualitative et des feedbacks pour l'amélioration, des briefings ont été organisés régulièrement durant la saison 2025 jusqu'à 15 jours. Les équipes de DMN, ANAM, IBE et LaMMA y ont participé. La logique a été que l'équipe de Florence présentait les améliorations réalisées dans la période et les équipes de l'ANAM et de la DMN, qui avaient utilisé les produits de prévision mis à disposition, en évaluaient qualitativement la qualité et proposaient des améliorations. Pour faciliter les échanges entre les équipes, les briefings réguliers étaient gérés à tour par les deux stagiaires Bere et Adamou Sayri.

5.3 Kits Installation WRF et MOLOCH

À l'issue de la formation-action à Florence de M Bere et M. Adamou Sayri, les participants ont créé des kits d'installation pour les modèles WRF (v4.7.1) et MOLOCH. Ces kits incluent des scripts automatisés pour l'installation, accompagnés par un manuel. Les Kits ont été publiés sur GitHub et sont disponibles gratuitement aux liens suivants :

WRF <https://github.com/slapis-git/install-wrf-home>

MOLOCH <https://github.com/slapis-git/install-moloch-home>

6. Transfert de MOLOCH à ANAM et DMN

6.1 Conventions MOLOCH et Visite en Italie de ANAM et DMN

Afin de supporter le transfert et l'opérationnalisation de MOLOCH au Burkina Faso et au Niger, déjà en mai 2025 il avait été envisagé de signer des conventions entre DMN et ANAM d'un côté et LaMMA de l'autre. Une visite en Italie des Directeurs de ANAM et DMN a été donc envisagée et s'est concrétisée entre le 11 et le 19 octobre 2025. Les délégations étaient composées par :

Niger : Mme Aissatou Sitta (Directrice DMN), M. Youchaou Ousmane Baoua (Point focal SLAPIS à la DMN)

Burkina Faso : Mme Kiswendsida Alice Ouedraogo (Secrétaire Générale Adjointe, Ministère de l'Administration Territoriale et de la Mobilité), Mme Mariam Tidiga (Directeur Général ANAM), M. Lazare Sawadogo (Point focal SLAPIS à l'ANAM)

La première étape de la visite a été la rencontre institutionnelle auprès de CNR/LaMMA le lundi 13 octobre. Dans la salle de réunions du LaMMA, les Directeurs ont présenté leurs institutions respectives :

- Dr. Beniamino Gioli IBE-CNR

- Dr. Bernardo Gozzini LaMMA
- Dr. Mariam Tidiga ANAM
- Dr. Aissatou Sitta DMN

Par la suite il y a eu la visite de la salle Météo du LaMMA et la présentation du processus d'alerte en vigueur dans la Région Toscana. Dans l'après midi, il y a eu une session technique marquée par quatre présentations :

- Réseaux de suivi de la qualité de l'air (Maurizio Bacci /IBE)
- Modèles de qualité de l'aire opérationnels au LaMMA (Giulio Betti/LaMMA)
- Nowcasting phénomènes météorologiques intenses à travers les foudres (Claudio Tei/LaMMA)
- Suivi de la sécheresse (Ramona Magno/IBE)

La signature des conventions, est intervenue le jour 14 octobre à marge de la conférence « Coopération Internationale en Météorologie Appliquée pour la réduction des risques hydroclimatiques ». Cette conférence organisée par CNR-IBE, LaMMA et la Région Toscana a rassemblé des représentants des services météorologiques italiens et africains, des chercheurs, des organisations internationales et des agences de coopération afin de partager leurs expériences, de consolider leurs partenariats et de discuter des orientations futures en matière de prévisions opérationnelles dans la région. A la fin, il y a eu la signature des nouveaux accords de collaboration entre les institutions italiennes et africaines, réaffirmant l'engagement en faveur de partenariats à long terme qui vont au-delà des cycles de projet.



Figure 23, Signature des conventions, Florence 14 octobre 2025

6.2 Transfert de MOLOCH à l'ANAM

Pour assurer la prise en main complète du modèle MOLOCH de la part de l'ANAM, une mission de l'équipe italienne a été réalisée à Ouagadougou. L'équipe de IBE était composée par :

- Francesco Pasi (IBE/LaMMA)
- Valerio Capecci (LaMMA)
- Younoussa Adamou Sayri (DMN/IBE)
- Thomas R. Bere (ANAM/IBE)
- Vieri Tarchiani (IBE)

La mission avait l'objectif d'assurer la formation, l'installation et le test du modèle sur le terrain. Elle s'est concrétisée dans une formation-action organisée auprès de l'ANAM du lundi 3 à vendredi 7 novembre 2025 avec les objectifs de :

- former le personnel de l'ANAM sur le modèle MOLOCH,
- transférer les compétences pour son opérationnalisation,
- effectuer l'installation et la paramétrisation du modèle,
- effectuer les premiers tests.

La formation a permis d'installer une première chaine MOLOCH sur le serveur de l'ANAM et de fournir aux prévisionnistes et aux modélisateurs de l'ANAM une bonne compréhension du modèle, de son installation, gestion et des produits à utiliser opérationnellement. Cependant, après la formation-action il y a eu la nécessité d'optimiser la chaine sur le serveur de l'ANAM, ce qui a pris jusqu'au 13 février 2026, quand la chaine complète du preprocessing à la visualisation des produits a été mis en opérationnel. La chaîne se compose d'un modèle à résolution 3 km nested dans un modèle à 9 km initialisé avec les prévisions GFS.

Un visualisateur spécifique pour l'ANAM a aussi été réalisé, ce qui permet aux prévisionnistes de charger les prévisions de MOLOCH des runs à 00 et 12h, et de les comparer aux issues de WRF.

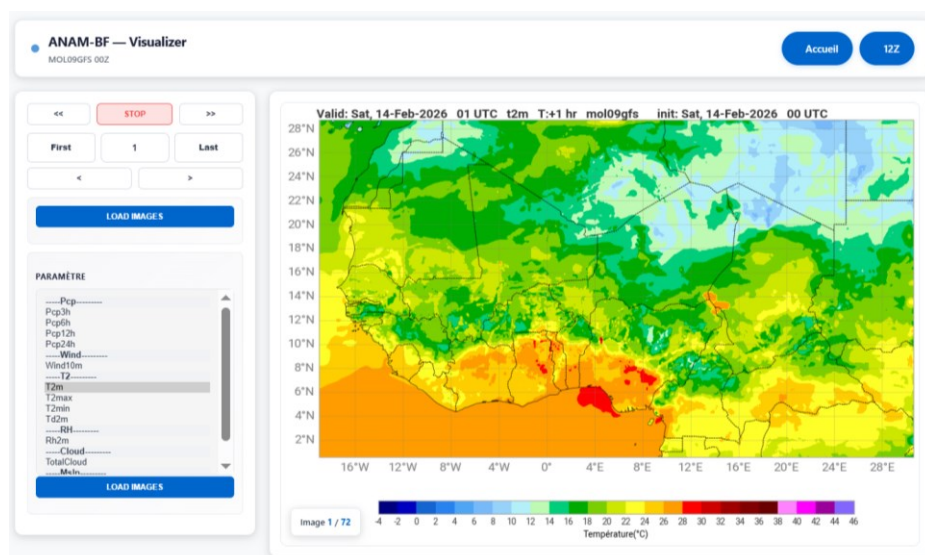


Figure 24, Interface de visualisation pour l'ANAM

6.3 Transfert de MOLOCH à la DMN

Le transfert du modèle MOLOCH à la DMN du Niger était prévu en novembre 2025 comme pour l'ANAM. Cependant des problèmes de hardware sur le cluster de la DMN on conseillé de remporter le transfert au moment où toutes les conditions étaient assurées. La DMN a entrepris une démarche pour assurer la maintenance extraordinaire du serveur, ce qui a été réalisée en janvier 2026. Cependant, des contraintes infrastructurelles ont persisté jusqu'en mars 2026. La Formation-action pour le transfert de MOLOCH à la DMN a été réalisée entre le 18 et le 22 mai 2026 par Younoussa Adamou Sayri et Rakiswende Thomas Bere.

Un visualisateur spécifique pour la DMN a aussi été réalisé, ce qui permet aux prévisionnistes de charger les prévisions de MOLOCH des runs à 00 et 12h, et de les comparer aux issues de WRF.

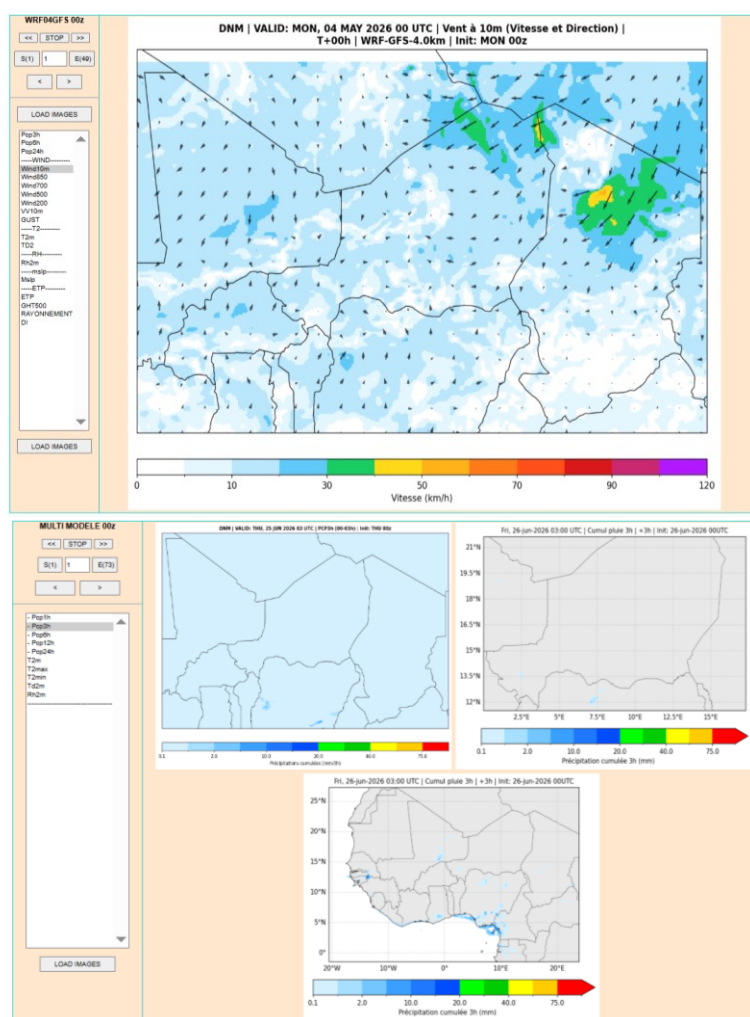


Figure 25, Interface de visualisation pour la DMN

5 Climatologie haute résolution Afrique de l'Ouest

Parmi les objectifs spécifiques du projet SLAPIS Sahel est de générer une simulation rétroactive (hindcast) à haute résolution et de longue durée pour la région d'intérêt. Cela sera réalisé par la réduction d'échelle dynamique des réanalyses ERA5 en utilisant le modèle MOLOCH. Cette initiative s'inscrit dans la continuité du projet spécial ECMWF SPITBRAN 2018-2020, de sa prolongation (2022-2024), ainsi que de plusieurs projets similaires en cours en Italie (Cavalleri et al., 2024). Il a été démontré que, bien que cette simulation rétroactive n'assimile aucune observation, elle fournit des informations climatiques fiables, notamment en ce qui concerne les précipitations, lorsqu'elle est comparée à des réanalyses régionales (Capecchi et al., 2023 ; Cavalleri et al., 2024).

Les objectifs à moyen terme de cette simulation rétroactive sont doubles :

- Développer un jeu de données permettant d'alimenter des services climatiques pour des applications climatologiques, agricoles et surtout hydrologiques ;
- Fournir un jeu de données de référence pour l'entraînement d'un modèle régional de prévision météorologique basé sur l'apprentissage automatique (ML) dans le cadre de l'initiative

Anemoi, servant de base à de futurs produits de prévision climatique basés sur le ML (conformément aux travaux de Nipen et al., 2024).

Bien qu'une résolution accrue et le recours à un traitement explicite de la convection permettent en général d'améliorer la représentation des processus atmosphériques à fine échelle, cela ne permet pas de surmonter les problèmes inhérents tels que les erreurs du modèle et les incertitudes liées aux conditions initiales et aux conditions aux frontières.

Néanmoins, l'aspect innovant de cette activité consiste à évaluer la faisabilité de la réduction d'échelle des données ERA5 dans les régions tropicales et à en analyser la fiabilité. Le modèle MOLOCH a été retenu en raison de sa rapidité exceptionnelle de simulation, entre 2 et 6 fois plus rapide (et donc plus économique) que d'autres modèles (Capecchi, 2021). Or, il est bien établi que la rapidité de simulation est un facteur déterminant lorsqu'il s'agit de réaliser des simulations numériques du temps sur plusieurs décennies.

Pour ce faire, un Projet Spécial de 3 ans a été soumis et approuvé par ECMWF pour avoir les ressources de calcul nécessaires. L'objectif du projet est de réaliser au moins 10 années de simulation pour chaque année du projet, à savoir les périodes décennales suivantes : 2011-2020, 2001-2009 et 1991-2000 respectivement pour la première, la deuxième et la troisième année.

Dans cette perspective, les ressources demandées à ECMWF sont les suivantes :

DOMAINE	SBU's estimées pour simuler 1 jour	SBU's estimées pour simuler 1 année	SBU's estimées pour simuler 10 ans	SBU's demandés pour simuler 10 ans +10% overhead
~500X400 points	~750	~0.27 M	~2.7	~3 M

En 2025, presque toutes les années comprises dans la première période quinquennale (2021-2025) de la reconstitution rétrospective (Hindcast) ont été traitées ; il manque encore 14 mois, soit l'année 2021 dans son intégralité et les mois de septembre et octobre 2025. L'objectif initial de ce projet de trois ans était de produire 30 ans de simulations modélisées. Mais, le domaine d'intégration ayant été défini comme étant nettement plus vaste que prévu initialement, nous prévoyons désormais de réaliser au moins 15 ans de simulations rétrospectives. Les simulations ont été effectuées à l'aide du modèle MOLOCH version 25.1, disponible à l'adresse suivante : <https://gitlab.com/isac-meteo/globobolam-moloch>.

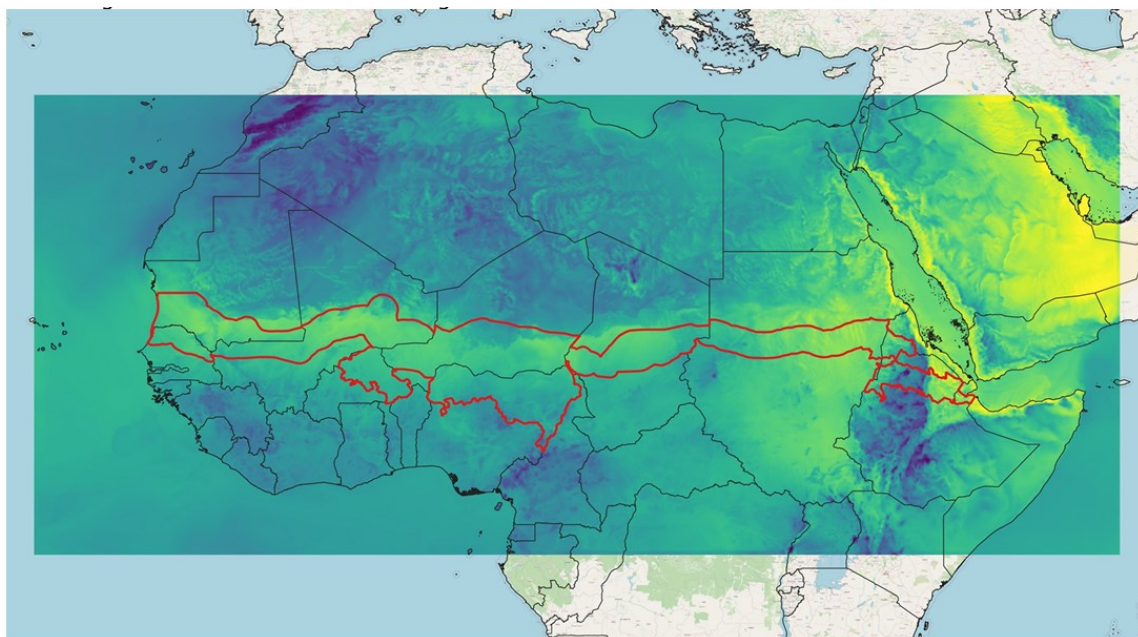


Figure 26, Exemple de données issues de la reconstitution rétrospective MOLOCH. La ligne rouge indique la Grande Muraille Verte (<https://www.unccd.int/our-work/ggwi>)

Les paramètres géographiques sont les suivants : maillage 1922x802, espacement des mailles d'environ 4 km, latitude = (0,0, 33,3), longitude = (-25,0, 53,7), 70 niveaux verticaux. Les paramètres physiques du modèle sont détaillés dans la documentation disponible sur le dépôt GitLab (en italien uniquement) : https://gitlab.com/isacmeteo/globo-bolam-moloch/-/blob/main/modelli_ISAC_corso_utenti.pdf?ref_type=heads

La conception expérimentale du modèle est la suivante : les conditions initiales sont fournies par les données ERA5, les conditions aux limites étant mises à jour toutes les 3 heures. La simulation MOLOCH démarre chaque jour à 18 h 00 UTC et porte sur une période de prévision de 30 heures. Le modèle MOLOCH produit des résultats toutes les heures sur le domaine d'intégration illustré à la figure 1. Les données quotidiennes de la rétrospective MOLOCH sont construites à partir des dernières 24 heures de la simulation du modèle, tandis que les 6 premières heures d'intégration sont considérées comme une période de démarrage et sont donc écartées. Les données proches de la surface (composantes du vent à 10 mètres, température à 2 mètres, précipitations totales, flux de chaleur latente/sensible, etc.) ont été extraites lors de la phase de post-traitement et archivées sur l'ECFS.

Au cours de l'année 2026, nous prévoyons d'achever la deuxième tranche quinquennale de la reconstitution rétrospective (c'est-à-dire 2016-2020) et de finaliser une partie de la première tranche quinquennale (c'est-à-dire l'ensemble de l'année 2021 et les mois de septembre et octobre 2025). Cependant, comme nous avons configuré un domaine d'intégration du modèle plus vaste que prévu initialement (voir figure 1), l'allocation demandée au titre du SBU a été sous-estimée. Le domaine élargi a été conçu pour englober l'ensemble de la région du Sahel, plutôt que de se limiter aux deux pays directement impliqués dans le projet SLAPIS. Nous pensons que cet ensemble de données plus large pourrait présenter un intérêt significatif pour d'autres pays du Sahel, les services météorologiques nationaux et d'autres parties prenantes régionales. À l'aide de la dernière version du

modèle publiée en décembre 2025, nous prévoyons également de corriger le bug qui empêchait l'extraction des variables de niveaux de pression, celles-ci étant cruciales pour un éventuel apprentissage du modèle basé sur les données.

6 Conclusions

Dans ces trois ans d'activités des résultats importants ont été obtenus, grâce à l'engagement tant des partenaires nigériens et burkinabés que des partenaires italiens (IBE et LaMMA). Cet engagement a permis de réaliser un dense calendrier d'activités de formation-action, dans le cadre de SLAPIS Sahel (qui avaient déjà démarrées avant la date officiel de démarrage du projet) :

1. 27 février au 3 mars 2023, Niamey (Niger), « Renforcement des capacités du personnel de la Direction de la Météorologie Nationale en Prévision Numérique du Temps », 5 jours, 15 participants ;
2. 13 au 16 février 2024, Niamey (Niger), « Formation-Action Performance et réglage du modèle Weather Research and Forecasting (WRF) », 4 jours, 24 participants ;
3. 13 novembre 2024 – 13 février 2026, Florence (Italie), « Stage de longue durée Prévision Numérique du Temps pour l'alerte précoce contre les inondations », 15 mois, 2 participants ;
4. 29 janvier 2025, en ligne, « Réunion de programmation et mise à niveau WRF », 1 matinée, 14 participants ;
5. 16 avril 2025, Ouagadougou (Burkina Faso), « Atelier de validation des produits du modèle WRF », 1 jour, 12 participants ;
6. 17 avril 2025, Niamey (Niger), « Atelier de validation des produits du modèle WRF », 1 jour, 18 participants ;
7. 19 Mai 2025, en ligne, « Séminaire de formation-action sur le modèle opérationnel MOLOCH », 1 jour, 14 participants ;
8. 11 juin 2025, en ligne, « Présentation de l'interface graphique d'accès aux prévisions opérationnelles MOLOCH et WRF », 1 jour, 7 participants.
9. 24 juillet 2025, en ligne, « Réunion de feedback sur les modèles WRF et MOLOCH », 1 matinée, 6 participants.
10. 3 - 7 novembre 2025, Ouagadougou (Burkina Faso), « Formation-Action MOLOCH », 4 jours, 15 participants.
11. 18-22 mai 2026, Niamey (Niger), « Formation-Action MOLOCH », 5 jours, 15 participants.

A ces séminaires formels il faut ajouter aussi les briefings organisés chaque 15 jours pendant la saison JAS 2025 et nombreuses visioconférences de suivi et de coordination entre les 3 équipes.

Du point de vue opérationnel et pratique les résultats principaux peuvent être résumés en :

- Chaîne MOLOCH nesté 3km sur 9km, initialisée avec données GFS, opérationnelle sur le serveur de l'ANAM.
- Chaîne MOLOCH 9km, initialisée avec données GFS, opérationnelle sur le serveur de la DNM.
- Kit installation WRF <https://github.com/slapis-git/install-wrf-home>
- Kit Installation MOLOCH <https://github.com/slapis-git/install-moloch-home>

- Procédures pour l'évaluation des prévisions météorologiques avec observations multi-source
- Convention ANAM-LaMMA
- Convention DMN-LaMMA
- Article scientifique "From training to transformation: co-producing sustainable early warning competence in West Africa" publié par la revue Climate Services
<https://doi.org/10.1016/j.cliser.2026.100659>
- Article scientifique "High-resolution precipitation forecasts over the Sahel: added value and limits of operational WRF modeling" soumis à la revue Meteorological Applications

D'autre part, le principal résultat réside sans aucun doute dans le renforcement des compétences internes d'ANAM et de la DMN en matière de prévision météorologique. Le fait que deux jeunes experts de ces deux institutions aient passé une période aussi longue au sein de l'équipe opérationnelle LaMMA/IBE leur a permis non seulement de développer des connaissances et des savoir-faire techniques, mais surtout de s'approprier de véritables compétences opérationnelles, acquises à travers des cas réels dans un environnement pluridisciplinaire et multiculturel.

Cela doit être compris non seulement d'un point de vue individuel, mais surtout dans une perspective de durabilité institutionnelle. En effet, la création d'une communauté de pratique régionale entre le Niger et le Burkina Faso, avec la participation des collègues italiens, permet d'aborder des problématiques communes, d'échanger des expériences et des solutions, ainsi que de partager des ressources et des outils.

En outre, les deux experts formés en Italie sont à leur tour devenus formateurs de leurs collègues au sein de la DMN et de l'ANAM, favorisant ainsi le transfert des compétences au niveau institutionnel. Ce type d'expérience formative a également été reconnu par l'Organisation météorologique mondiale comme une bonne pratique et a fait l'objet d'un panel lors de la conférence conjointe CALMET XVI et CONECT-3, tenue à Florence en novembre 2025.

Toutefois des faiblesses persistent, surtout pour ce qui concerne le hardware, sa gestion et maintenance. En effet les conditions de travail pour les supercalculateurs doivent être contrôlée avec le plus grand soin. Climatisation et alimentation doivent être parfaitement maîtrisées, chose vraiment difficile tant à Ouagadougou que à Niamey. Si la situation hardware à Ouagadougou est actuellement maîtrisée, à Niamey il y a encore des soucis. En effet, bien que le cluster de la DMN soit actuellement opérationnel et a permis le transfert de MOLOCH avec la configuration envisagée (nesting 3k sur 9 km), des soucis de communication entre les différents nœuds rendent les temps de calcul un peu longs. Pour minimiser ces problèmes, le choix plus prudent serait d'utiliser des serveurs dans le cloud, même si leur coût n'est pas négligeable. En considération de ces défis, le projet, grâce à la collaboration du LaMMA avait mis en place à partir de juin 2025 une chaîne de backup de WRF et aussi une chaîne opérationnelle pour tester le modèle MOLOCH sur l'Afrique de l'Ouest. Vu que les serveurs de ANAM et DMN sont désormais fonctionnels cette chaîne a été supprimée.

Pour les prochains mois, les activités se concentreront sur la finalisation de la vérification de MOLOCH et WRF Niger sur la saison JAS 2025, la progressive optimisation de la chaîne MOLOCH à l'ANAM et la DMN, et l'intégration de l'initialisation basée sur IFS de ECMWF.

Annexes

Annexe 1, Bibliographie

- Capecchi, V. (2021). *Reforecasting Two Heavy-Precipitation Events with Three Convection-Permitting Ensembles*, *Weather and Forecasting*, 36(3), 769-790
- Capecchi, V., Pasi, F., Gozzini, B. et al. *A convection-permitting and limited-area model hindcast driven by ERA5 data: precipitation performances in Italy*. *Clim Dyn* **61**, 1411–1437 (2023)
- Cavalleri, F. et al *Multi-scale assessment of high-resolution reanalysis precipitation fields over Italy*, *Atmospheric Research*, Volume 312, 2024,107734, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2024.107734>.
- Davolio, S., Malguzzi, P., Drofa, O. et al. *The Piedmont flood of November 1994: a testbed of forecasting capabilities of the CNR-ISAC meteorological model suite*. *Bull. of Atmos. Sci.& Technol.* **1**, 263–282 (2020)
- Drofa, O., and P. Malguzzi, 2004: *Parameterization of microphysical processes in a nonhydrostatic prediction model*. *Proc. 14th Int. Conf. on Clouds and Precipitation (ICCP)*, Bologna, Italy, ICCP, 19–23
- Malguzzi, P., G. Grossi, A. Buzzi, R. Ranzi, and R. Buizza, 2006: *The 1966 “century” flood in Italy: A meteorological and hydrological revisitation*. *J. Geophys. Res.*, 111, D24106, <https://doi.org/10.1029/2006JD007111>
- Nipen, TN. et al *Regional data-driven weather modeling with a global stretched-grid*, <https://arxiv.org/abs/2409.02891> (2024)
- Tarchiani, V., Pasi, F., Bere, R.T., Sayri, Y.A., Gozzini, B., Capecchi, V., 2026. *From training to transformation: co-producing sustainable early warning competence in West Africa*. *Climate Services* 42, 100659. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2026.100659>

Annexe 2, Ressources on-line pour la formation des Equipes

Afin de consentir aux personnes ressources de la DMN de profiter à plein des activités de renforcement des capacités sur la modélisation numérique du temps avec le modèle WRF, elles devront préalablement à la mise en œuvre du programme d'activités s'imprégner des concepts de base sur la modélisation numérique et sur le modèle WRF. Des nombreuses ressources sont disponibles sur le web. Ici nous proposons une liste non exhaustive des ressources disponibles, parmi lesquelles au moins la 4 est mandataire.

- 1) Page web de référence de WRF: <https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/>
- 2) Cours annuel synchrone de WRF organisés par NCAR: le prochain est programmé du 30 janvier au 3 février 2023. (<https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/tutorial/tutorial.html>). Pour recevoir les informations sur l'ouverture des inscriptions il faut s'enregistrer à la page <https://mailman.ucar.edu/mailman/listinfo/wrf-news>
- 3) Didacticiel asynchrone online basé sur les ressources du dernier cours synchrone à la page : <https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/OnLineTutorial/index.php>
- 4) Vidéo didacticiels https://www.youtube.com/playlist?list=PLJ_1sjucSSZCTNBRM4D3BfEak-XT7TKJo , très bonne ressource, à suivre en particulier les vidéos 1-5, 7, 9-10. Les vidéos sont en anglais mais très simple et avec les sous-titres aussi en Français. Les présentations des vidéos tutoriels se trouvent aussi sur https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/tutorial/tutorial_presentations_2021.htm
- 5) WRF users guide: https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_v4/contents.html ou bien https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_v4/v4.4/contents.html Les deux liens se réfèrent à la dernière version du modèle la 4.4, que nous proposons d'installer à la DMN.
- 6) Kit installation WRF <https://github.com/slapis-git/install-wrf-home>
- 7) Kit Installation MOLOCH <https://github.com/slapis-git/install-moloch-home>

Annexe 3, Composition des Equipes

Pays	Role	Nom	email
Niger	Modelisateur	Alabe Adam	Kondoma_2014@yahoo.fr
Niger	Modelisateur	Adamou Sayri Younoussa	Sayriyouyou2282@gmail.com
Niger	Modelisateur	Ismael Ouattara	watta522@gmail.com
Niger	Prévisionniste	Ousman Baoua	ousmanebaoua@yahoo.fr
Niger	Prévisionniste	Mme Aminou Nafissa	Nafissadignon85@gmail.com
Niger	Prévisionniste	Mme Abdoul Razak Nadia	Nadiaamadou616@gmail.com
Niger	Prévisionniste	Omar Farouk	Farouko73@yahoo.com
Niger	Administrateur système	Moussa Saadou	S11doumouss1@yahoo.fr
Niger	IT	Mme Gounga Aichatou	gounga.aichatoua@yahoo.fr
Niger	IT	Omar Yahaya	omaryahaya89@gmail.com
Niger	IT	Mohamed Issifou Badjé	mohamedbadje@gmail.com
Niger	Support Modelisateur/Previsionniste	Ibrah Seidou Sanda	ibrahs@gmail.com
Niger	Support Modelisateur/Previsionniste	Abdoul Aziz Saidou Chaibou	abdoulaziz.saidou@yahoo.fr
Italie	Support Modelisateur/Previsionniste	Valerio Capecchi	capecchi@lamma.toscana.it
Italie	Support Modelisateur/Previsionniste	Francesco Pasi	pasi@lamma.toscana.it
Burkina Faso	Administrateur système	Oumar TRAORE	tloumar@hotmail.com
Burkina Faso	Modelisateur	Abdel Aziz T. KONSEIBO	kabdelazizt@yahoo.fr , kabdelazizt@gmail.com
Burkina Faso	Prévisionniste	Alfred Dango	poabalbi@yahoo.fr
Burkina Faso	Prévisionniste	Thomas Bere	bererthomas@gmail.com
Burkina Faso	Prévisionniste	Adaman Yoda	adamouyod@gmail.com
Burkina Faso	Prévisionniste	Isaac Yameogo	isaacyameogo06@gmail.com
Burkina Faso	Prévisionniste	Brahima Komboigo	bkomboigo@gmail.com
Burkina Faso	Prévisionniste	Rayimwende Zoungrana	rayimwendz@yahoo.com
Burkina Faso	Prévisionniste	Guillaume Nakoulma	guinabf@yahoo.fr