

Prévision des rendements du sorgho au Burkina Faso par l'approche du modèle de culture

« sarra-o »

Moussa WAONGO¹,
Gilles BAGRE²,
Aimé Sévérin KIMA³,
Agali ALHASSANE⁴,
Sanoussi ATTA¹

Résumé

Cette étude a évalué la performance du modèle de culture SARRA-O pour la prévision opérationnelle des rendements du sorgho au Burkina Faso dans le but d'accroître la résilience du secteur agricole face aux fluctuations climatiques et à l'insécurité alimentaire récurrente. Les données de prévisions saisonnières journalières du modèle ECMWF sur la période 1991-2020 ont servi à alimenter SARRA-O qui utilise des données satellitaires (TAMSAT v3.1) et de réanalyses (ERA5) pour pallier l'insuffisance des données météorologiques au sol. Les simulations combinant données observées et prévisions saisonnières ont révélé un gradient nord-sud marqué par des rendements variant de 200 kg/ha en zone sahélienne à plus de 2 200 kg/ha en zone soudanienne. Les prévisions initialisées en août et en septembre ont présenté des performances satisfaisantes avec des coefficients de détermination (r^2) supérieurs à 0,8, des erreurs relatives moyennes (RRMSE) inférieures à 20%, et une absence de différence statistiquement significative, démontrant ainsi la capacité du modèle à fournir des alertes précoces fiables deux à trois mois avant la récolte. Toutefois, les prévisions de juillet ont surestimé significativement les rendements, particulièrement en zone sahélienne (155%), nécessitant l'amélioration des méthodes de correction de biais et de descente d'échelle pour étendre la fenêtre temporelle d'anticipation et renforcer l'utilisation opérationnelle de SARRA-O dans les systèmes d'alerte précoce et de gestion anticipée des crises alimentaires au Sahel.

Mots-clés : SARRA-O, prévision des rendements, sorgho, prévisions saisonnières, ECMWF, Burkina Faso

¹ Département Formation et Recherche, Centre Régional AGRHYMET, BP 11011 Niamey, Niger

² Agence Nationale de la Météorologie (ANAM), BP 576 Ouagadougou, Burkina Faso

³ Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles (INERA), BP 8645 Ouagadougou, Burkina Faso

⁴ Unité Coordination Scientifique, Centre Régional AGRHYMET, BP 11011 Niamey, Niger

*Auteur correspondant : Moussa WAONGO, moussa.waongo@cilss.int ; ORCID : [0009-0007-6665-5623](https://orcid.org/0009-0007-6665-5623)

Predicting Sorghum Yields in Burkina Faso with the SARRA-O Crop Model

Abstract

This study evaluated the performance of the SARRA-O crop model for operational sorghum yield forecasting in Burkina Faso, with the aim of enhancing the resilience of the agricultural sector to climate fluctuations and recurrent food insecurity. Daily seasonal forecast data from the ECMWF model for the period 1991-2020 were used to drive SARRA-O, which incorporates satellite data (TAMSAT v3.1) and reanalysis products (ERA5) to compensate for the scarcity of ground-based meteorological observations. Simulations combining observed data and seasonal forecasts revealed a pronounced north-south gradient, with yields ranging from 200 kg/ha in the Sahelian zone to over 2,200 kg/ha in the Sudanian zone. Forecasts initialized in August and September demonstrated satisfactory performance, with coefficients of determination (r^2) exceeding 0.8, relative root mean square errors (RRMSE) below 20%, and no statistically significant differences, thereby demonstrating the model's ability to provide reliable early warnings two to three months before harvest. However, July forecasts significantly overestimated yields, particularly in the Sahelian zone (155%), highlighting the need to improve bias correction and downscaling methods to extend the anticipation window and strengthen the operational use of SARRA-O in early warning systems and anticipatory food crisis management across the Sahel.

Keywords: SARRA-O, yield forecasting, sorghum, seasonal forecasts, ECMWF, Burkina Faso

Introduction

Les changements climatiques continuent de perturber la stabilité écologique et économique en Afrique de l'Ouest, avec l'augmentation des températures et les fluctuations des précipitations qui menacent la résilience des écosystèmes et la productivité agricole (Pachauri, 2008 ; GIEC, 2014). La région du Sahel, où l'agriculture dépend fortement des précipitations, fait face à une vulnérabilité particulière à ces perturbations climatiques, entraînant des baisses significatives des rendements agricoles et exacerbant l'insécurité alimentaire et la pauvreté qui touchent plus de 70 % de la population agricole (FAO, 2011 ; Ozer et al., 2009 ; PNUD, 2014).

Au Burkina Faso, l'agriculture demeure un pilier de l'économie nationale, employant environ 63 % de la population active et contribuant à 16,3 % du PIB (INSD, 2023). Malgré l'expansion de l'exploitation aurifère, l'agriculture continue d'être l'activité principale de subsistance. Cependant, ce secteur est fortement impacté par les aléas climatiques, particulièrement les sécheresses et inondations récurrentes qui causent des déficits de production céréalière, affectant

directement les revenus des ménages (Ouédraogo, 2012) et la sécurité alimentaire (Guissou et al., 2014). Le défi d'assurer un accès alimentaire adéquat pour la population devient de plus en plus aigu face à ces risques climatiques (MAAH, 2019), nécessitant des solutions adaptées localement pour renforcer la résilience du secteur agricole (Sultan et al., 2015).

Relever ces défis nécessite des outils d'aide à la décision robustes pour le suivi des cultures et la prévision des rendements afin d'anticiper et de répondre de manière appropriée aux crises alimentaires potentielles (Kouadio, 2007). Bien que plusieurs initiatives aient été mises en œuvre au Burkina Faso pour améliorer la résilience agricole incluant des programmes nationaux d'adaptation climatique (MEEA, 2025 ; MERH, 2015), des pratiques agricoles innovantes et adaptées (Kaboré et al., 2019) et des variétés améliorées (Bandaogo et al., 2020), l'utilisation de modèles agronomiques représente une approche clé non seulement pour surveiller le développement des cultures mais aussi pour prévoir les rendements agricoles et anticiper la gestion des crises alimentaires (FAO, 2016).

Diverses méthodes de prévision des rendements ont été développées au Burkina Faso, incluant des approches basées sur les corrélations entre les rendements historiques et les facteurs explicatifs (Bronne, 2008 ; Sankara, 2020), ainsi que des modèles mécanistes tels qu'AquaCrop et SARRA-H (Traoré et al., 2010 ; Wellens et al., 2013). Ces outils permettent le suivi agrométéorologique des cultures à travers les bilans hydrique, carboné et phénologique (Jahel et al., 2015). Cependant, ces modèles, bien que robustes en termes de prévision de rendement, nécessitent un nombre important de données d'entrée et un calibrage minutieux, posant des contraintes pour les utilisateurs compte tenu des défis de disponibilité des données au Burkina Faso. Le suivi traditionnel basé sur des enquêtes de terrain et des carrés de rendement reste gourmand en ressources (MARAH, 2023). En outre, la crise sécuritaire limite davantage l'accès à certaines zones de production pour la collecte de données (FAO et PAM, 2019 ; MAAH, 2019).

Pour répondre à ces besoins des utilisateurs, le Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), en collaboration avec le Centre Régional AGRHYMET (CRA), a développé le modèle SARRA-O un outil convivial accessible au public avec des données d'entrée téléchargeables depuis le serveur File Transfer Protocol (FTP) du CRA. Ce modèle permet à la fois le

suivi des cultures et la prévision des rendements agricoles, utilisant des données satellitaires ou de réanalyses librement accessibles pour pallier l'insuffisance des données des stations météorologiques (CIRAD, 2019). SARRA-O a démontré des résultats satisfaisants dans la prévision des rendements du maïs au Mali (Sanogo, 2019) et du mil au Niger et au Sénégal (Houngnibo et al., 2023 ; Sal, 2018). Alors que les applications précédentes se sont appuyées sur des données historiques, cette étude se propose d'utiliser des données de prévisions saisonnières journalières provenant de grands centres climatiques, spécifiquement l'ECMWF, pour améliorer les capacités de prévision opérationnelle. Elle vise à simuler les rendements observés et prédits du sorgho à l'aide du modèle SARRA-O, à évaluer sa performance pour la prévision opérationnelle des rendements, et à proposer un système opérationnel de prévision des rendements du sorgho au Burkina Faso

I. Matériel et méthodes

I.1. Zone d'étude

Le Burkina Faso, situé en Afrique de l'Ouest, au cœur du Sahel, s'étendant entre les latitudes 9,39° à 15,08° nord et les longitudes 5,52° ouest à 2,41° est, constitue la zone d'étude. Il se distingue par trois principales zones climatiques séparées par les isohyètes 600 et 900 mm : la zone sahélienne au nord (pluviométrie < 600 mm), la zone soudano-sahélienne (pluviométrie entre 600 mm et 900 mm) au centre et la zone soudanienne (pluviométrie > 900 mm) au sud (Sivakumar, 1987) (Figure 1). Le pays connaît un régime pluviométrique unimodal avec une saison des pluies s'étendant de mai à octobre, durant laquelle les vents de mousson du sud-ouest, chargés d'humidité, dominent, le mois d'août étant généralement le plus pluvieux de l'année (Nicholson, 2013). La saison sèche s'étend de novembre à avril, période pendant laquelle l'harmattan, un vent sec et chaud du nord-est, souffle sur le territoire national vers l'Atlantique sud. Le régime thermique présente une distribution bimodale caractérisée par deux périodes de chaleur intense : la première autour de mars-avril avec des températures maximales dépassant fréquemment les 40 °C, et la seconde, moins marquée, en octobre, tandis que les températures les plus basses sont observées entre novembre et février (Bouniol, 2021, Sivakumar, 1987). L'amplitude thermique diurne est plus prononcée dans la zone sahélienne que dans les autres zones agroclimatiques, avec une amplitude thermique annuelle de 11,3 °C à Dori, contre 8,5 °C à

Ouagadougou et 5,7 °C à Bobo-Dioulasso (Sivakumar, 1987). Au plan pédologique, les sols du Burkina Faso ont un faible niveau de fertilité. Ils ont une capacité de rétention en eau limitée, ainsi que de faibles teneurs en éléments minéraux majeurs (phosphore, potassium, azote) et en matière organique (Bado,2006) constituant ainsi des contraintes fondamentales pour la production agricole.

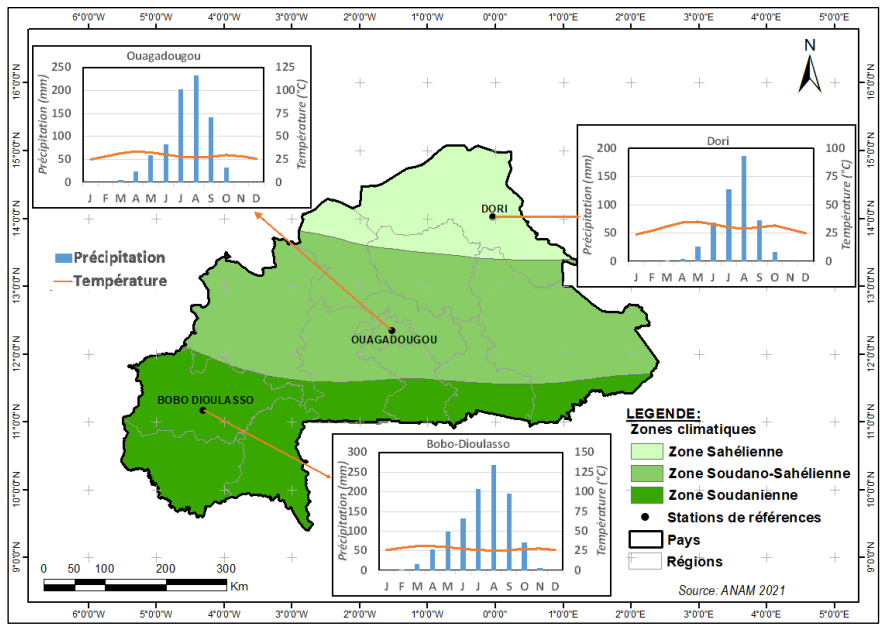


Figure 1 : Zones climatiques du Burkina Faso

1.2. Matériel végétal

Le sorgho (*Sorghum bicolor* L. Moench) a été sélectionné pour cette étude car il représente la principale culture du Burkina Faso en termes de production et de superficie emblavée (MARAH, 2024). Il constitue la principale céréale de consommation de la population, avec une consommation annuelle moyenne estimée à 90 à 100 kg par habitant (MAHRH, 2021, Reardon, 1993), et joue un rôle clé dans l'industrie agroalimentaire à travers la production de farine, de bière et d'autres produits alimentaires (Barro/Kondombo, 2010). Par conséquent, l'identification des zones déficitaires de production de sorgho en corrélation avec une anticipation d'une réponse adéquate pourrait contribuer de manière significative à la lutte contre l'insécurité alimentaire au Burkina Faso. Ainsi, une variété de sorgho de 90 jours, déjà paramétrée dans le modèle, a été utilisée avec une durée de cycle de 1 500 degrés-jours du semis à la maturité physiologique. Sa

phénologie a été décrite en cinq étapes (levée-initiation paniculaire, initiation paniculaire-floraison, floraison-maturité cireuse, et maturité cireuse-maturité totale), ainsi que l'indice de surface foliaire. Les rendements en grain du sorgho en milieu paysan varie de 2 800 kg/ha et de 1 200 kg/ha (TRAORE et al, 2021).

I.2. Données utilisées

I.2.1. Données climatiques

Les données climatiques utilisées dans cette étude proviennent de deux sources principales : les données de réanalyses ERA5 du Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (ECMWF) et les données satellitaires TAMSAT version v3.1 (Maidment et al., 2017). Les données de réanalyses ERA5 (Hersbach et Dee, 2016 ; Hersbach et al., 2020) combinent les données de modèles et les observations mondiales pour créer un ensemble de données complet et cohérent en utilisant les lois de la physique. Caractérisées par une résolution spatiale de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ (environ 28 km), ces données présentent une résolution temporelle horaire et utilisent un système d'assimilation avancé. Pour cette étude, les températures minimale et maximale à 2 mètres, la radiation globale et l'évapotranspiration potentielle ont été extraites au pas de temps journalier pour la période 1991-2020 sur l'ensemble du Burkina Faso, disponibles sur le serveur FTP du Centre Régional AGRHYMET (CRA). Les données pluviométriques satellitaires TAMSAT ont été retenues en raison de leur meilleure concordance avec les données stations comparativement aux autres produits satellitaires disponibles (Garba et al., 2023 ; Maidment et al., 2017). Utilisées par les pays membres du CILSS pour le modèle SARRA-O, ces données couvrent également la période 1991-2020 au pas de temps journalier avec une résolution spatiale plus fine de $0,0375^\circ \times 0,0375^\circ$ (environ 4 km).

En complément des données historiques, des prévisions saisonnières journalières du modèle ECMWF ont été utilisées pour la prévision opérationnelle des rendements. Ces prévisions offrent une vue prospective des changements climatiques sur plusieurs semaines ou mois, basées sur des variations prévisibles des composants à évolution lente, notamment les températures de surface des bassins océaniques (C3S, 2018). Disponibles en libre accès sur le portail Copernicus Climate Change Service, elles couvrent les mois de juillet, août et septembre de la période 1991-2020, incluant les 25 ou 51 membres d'ensemble selon les années, à une résolution de $1^\circ \times 1^\circ$ (environ

111 km). Les variables utilisées comprennent les températures minimales, maximales et de point de rosée à 2 m, la vitesse du vent à 10 m, ainsi que la radiation globale.

1.2.2. Données agronomiques et pédologiques

En complément des données climatiques qui constituent les seules variables dynamiques du modèle SARRA-O, plusieurs données statiques et auxiliaires ont été intégrées dans cette étude pour assurer une simulation réaliste du développement phénologique et du rendement du sorgho (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). Les données d'altitude provenant d'ERA5-Land, téléchargées sur le site du Copernicus Climate Change Service (C3S) à une résolution de $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ (environ 11 km) pour l'ensemble du territoire burkinabè, ont été utilisées pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle, paramètre déterminant dans l'évaluation des besoins hydriques de la culture aux différents stades phénologiques. Les données pédologiques correspondent aux classes de texture du sol selon le système USDA pour l'Afrique à une profondeur de 0-20 cm, adaptées du modèle iSDAsoil pour une utilisation dans SARRA-O (Lavarenne, 2023). Cette profondeur correspond à la zone d'enracinement principale durant les phases végétative et reproductive précoce du sorgho, bien que le système racinaire de cette espèce puisse s'étendre jusqu'à 1,5 mètre de profondeur, lui conférant une remarquable tolérance au stress hydrique (Armanh-Agyeman et al., 2002). Ces données ont été préalablement alignées avec le produit de précipitation TAMSAT v3.1 par mise à l'échelle de la résolution originale de 30 m à $0,0375^\circ$ (environ 4 km), puis encodées en 7 ou 8 chiffres selon les 12 classes de texture nécessaires au modèle.

Les paramètres phénologiques intégrés dans SARRA-O reflètent la division tripartite du cycle de développement du sorgho : les phases végétative, reproductive et de maturation des graines (Chantereau et al., 2013 ; IRAD, 2023). La phase végétative, s'étendant de la germination à l'initiation paniculaire, présente une durée variable de 25 à 80 jours selon la sensibilité photopériodique et le nombre de feuilles. La phase reproductive, période critique de 20 à 32 jours durant laquelle les besoins en eau et en nutriments sont maximaux, est suivie de la phase de maturation des graines d'une durée de 30 à 35 jours en zone tropicale. Cette caractérisation phénologique est essentielle pour simuler précisément la réponse de la culture aux variations climatiques. Les caractéristiques agroclimatiques, notamment les dates moyennes de

début et de fin de saison pour la période 1991-2020, ont été fournies par le CRA et calculées selon les critères de PRESASS (2020). Ces dates délimitent la fenêtre temporelle optimale pour l'installation de la culture et conditionnent l'accomplissement complet du cycle phénologique du sorgho dans les conditions pluviométriques de la zone d'étude.

1.3. Le modèle de culture SARRA-O

Le Système d'Analyse Régionale des Risques Agroclimatiques Ocelet (SARRA-O) version Sarrao_1.11.jar est la version spatialisée du modèle de culture SARRA-H, développée par le CIRAD en collaboration avec le CRA au sein de la plateforme de modélisation Ocelet (Jahel et al., 2015). Le modèle SARRA-O fonctionne en intégrant trois types de données d'entrée : (1) des données météorologiques spatialisées issues de satellites et de réanalyses ; (2) des cartes thématiques vectorielles incluant les classes de texture des sols et les dates de début et fin de saison des pluies ; et (3) des paramètres agronomiques définissant les caractéristiques variétales et les stratégies culturales par zone agro-climatique. L'interface du modèle permet de configurer les simulations en spécifiant la période d'analyse, le type de culture (maïs, sorgho, mil), la durée du cycle cultural et le niveau d'intensification agricole, avec une option d'intégration des prévisions saisonnières. Le semis est effectué dans le modèle selon un critère hydrique où l'eau disponible dans le réservoir de surface doit être supérieure ou égale à 10 mm, le semis étant considéré réussi si la culture n'est pas soumise à un stress hydrique trop important durant sa période juvénile de 20 jours (Lavarenne et al., 2025). Le niveau d'intensification I4 (très bonnes conditions) a été retenu pour cette étude, reflétant une situation optimale en termes de qualité des semences, de travail du sol, de gestion des mauvaises herbes et de fertilité. Les sorties de simulation, comprenant les rendements estimés, les dates de semis effectives et les anomalies, sont ensuite exportées sous forme de fichiers géoréférencés et visualisées dans QGIS pour produire des cartes d'aide à la décision.

Cette variété de sorgho a été calibrée et validée dans le modèle SARRA-H au sein d'environnements contrôlés dans diverses régions agroclimatiques en Afrique (Mali, Burkina Faso, Niger, Sénégal) ainsi que sur d'autres continents, et validée en milieu paysan grâce à des enquêtes et mesures de terrain (Alhassane, 2009 ; Baron et al., 2008). La Figure 2 présente les étapes de simulation du développement et de la croissance des plantes avec SARRA-O

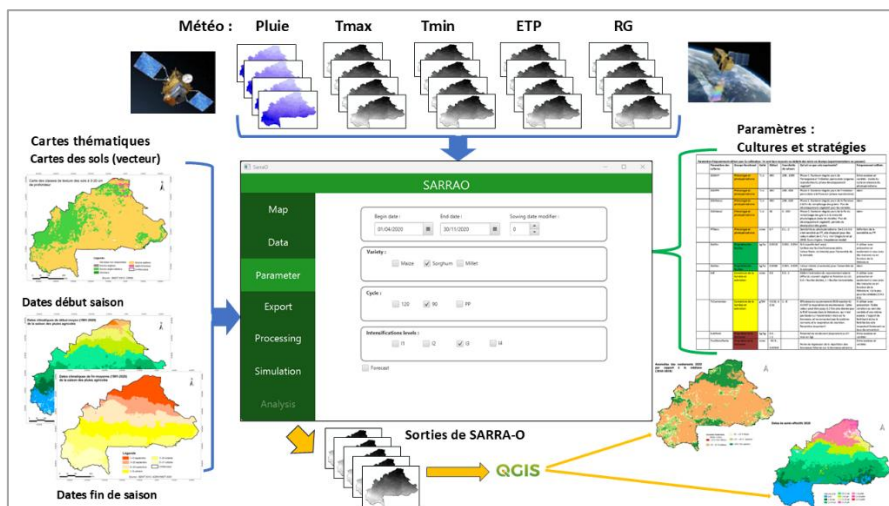


Figure 2 : Etapes de simulation et de traitement et avec le modèle de culture SARRA-O

I.4. Méthodes

I.4.1 Simulation des rendements du Sorgho

Pour simuler les rendements grains du sorgho sur la période 1991-2020 au Burkina Faso, les paramètres climatiques (précipitations, températures minimale et maximale, radiation globale et évapotranspiration potentielle), les caractéristiques pédologiques et les pratiques agricoles (variétés cultivées, dates de semis, niveau d'intensification et fin de saison) de chaque saison, ont été intégrés dans SARRA-O (CIRAD, 2019). Les données de l'évapotranspiration potentielle ont été calculées à partir des données ERA5-Land à une résolution de $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ (Allen et al., 1998).

Les simulations historiques ont couvert la période du 1er avril au 30 novembre pour chaque année entre 1991 et 2020. Elles ont utilisé uniquement les données observées : TAMSAT v3.1 pour les précipitations et ERA5 pour les autres variables climatiques, téléchargées depuis le serveur FTP du CRA. Ces simulations ont fourni les rendements grains de référence. Quant aux simulations de prévision, elles ont été initiées en juillet, août et septembre de chaque année selon un principe hybride. Les données observées (TAMSAT v3.1 et ERA5) ont été utilisées du début de saison jusqu'à la date d'initialisation. Les prévisions saisonnières journalières du modèle ECMWF ont ensuite été appliquées jusqu'au 30 novembre. Pour chaque année, les simulations ont été réalisées sur l'ensemble des membres du modèle ECMWF (25

ou 51 membres selon les années). Ensuite, des moyennes ont été calculées grâce à un script développé sous Matlab pour obtenir les rendements prévus. L'issue de cette étape permet ainsi d'évaluer la capacité du modèle SARRA-O à prévoir les rendements du sorgho deux mois avant la récolte et d'identifier les zones potentiellement déficitaires pour une alerte précoce. Les étapes de simulation des rendements prévus sont présentées dans la Figure 3.

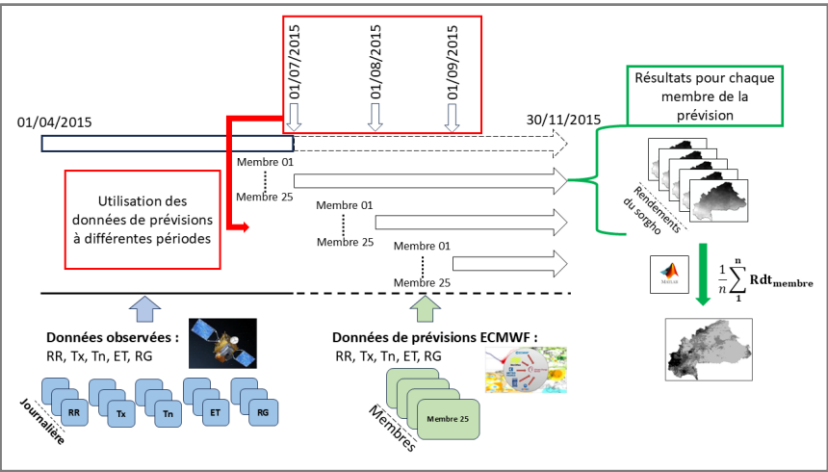


Figure 3 : Étapes de simulation des rendements prévus dans le modèle SARRA-O (cas de l’année 2015)

I.4.2 Évaluation de la performance du modèle SARRA-O

L'évaluation de la performance du modèle SARRA-O a été réalisée en utilisant plusieurs métriques statistiques calculées à partir des paires de rendements simulés et prévus sur la période 1991-2020. Un traitement pixel par pixel a ensuite été effectué à l'aide d'un script développé sous Matlab. Le coefficient de détermination (r^2) (Eq. 1), défini comme le carré du coefficient de corrélation de Pearson, a été utilisé pour décrire la proportion de la variance totale des données observées et expliquées par le modèle. Le coefficient de détermination varie de 0 à 1 et les valeurs les plus élevées indiquent une meilleure concordance entre les valeurs observées et prévues (Chicco et al., 2021).

$$r^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (R_i - \hat{R}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R}_i)^2} \tag{Eq. 1}$$

Où R_i est le rendement simulé pour l’année i , $\hat{R}_i$ est le rendement prévu pour l’année i , $\bar{R}_i$ représente la moyenne des rendements simulés sur les n années et n est le nombre d’années de simulations.

L'erreur quadratique moyenne relative (RRMSE) (Eq. 2) a été calculée pour apprécier l'écart moyen entre les valeurs simulées et prédites. Cet écart est évalué en pourcentage par rapport à la moyenne des rendements simulés (Chicco et al., 2021). Les petites valeurs de RRMSE témoignent d'une bonne prédiction par le modèle, tandis que l'erreur quadratique moyenne relative (RRMSE) évalue cet écart en pourcentage par rapport à la moyenne des rendements simulés (Chicco et al., 2021).

$$\text{RRMSE (\%)} = \left(\frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (R_i - \hat{R}_i)^2}}{\bar{R}_i} \right) \times 100 \quad (\text{Eq. 2})$$

Où R_i est le rendement simulé pour l'année i , $\hat{R}_i$ est le rendement prévu pour l'année i , n représente le nombre d'années de simulations et $\bar{R}_i$ le rendement moyen observé.

Enfin, le test non paramétrique de Wilcoxon a été appliqué au seuil de significativité de 5 % pour déterminer si les deux séries dépendantes (rendements simulés et prévus) diffèrent significativement l'une de l'autre, en testant l'hypothèse nulle selon laquelle il n'existe pas de différence en termes de tendance centrale entre les deux séries. Ce test se base sur les rangs des écarts absolus entre les valeurs plutôt que sur leurs valeurs moyennes, permettant ainsi une évaluation robuste de la capacité prédictive du modèle SARRA-O indépendamment des hypothèses de distribution des données.

II. Résultats

II.1 Date de début et de fin de saison pluvieuse au Burkina Faso

L'analyse des dates moyennes de début et de fin de saison agricole sur la période 1991-2020 (Figure 4) révèle une forte variabilité spatiotemporelle marquée par un gradient latitudinal nord-sud caractéristique des zones climatiques du Burkina Faso. Les dates d'installation de la saison (Figure 4a) s'étalent sur une période de trois mois, de la première décade d'avril à la première décade de juillet, avec un démarrage précoce dans la zone soudanienne (première décade

d'avril à première décade de mai), intermédiaire dans la zone soudano-sahélienne (deuxième décade de mai à première décade de juin), et tardif dans la zone sahélienne (deuxième décade de juin à première décade de juillet). Les dates de fin de saison (Figure 4 b), déterminées à partir du bilan hydrique intégrant les précipitations, la réserve utile du sol et l'évapotranspiration, s'échelonnent sur deux mois (première décade de septembre à la troisième décade d'octobre) et suivent également un gradient latitudinal. La zone sahélienne connaît une fin de saison plus précoce (1er au 20 septembre), suivie de la zone soudano-sahélienne (21 septembre au 10 octobre) et de la zone soudanienne (11 au 31 octobre). Cette distribution spatiale des dates de début et de fin de saison conditionne directement la durée de la saison culturale, plus courte au nord (75-90 jours) et plus longue au sud (150-180 jours), influençant ainsi le choix variétal du sorgho et les pratiques agricoles adaptées à chaque zone agroclimatique. Ces dates climatologiques constituent des paramètres essentiels pour le modèle SARRA-O, servant de repères temporels pour initialiser et clôturer les simulations du cycle cultural.

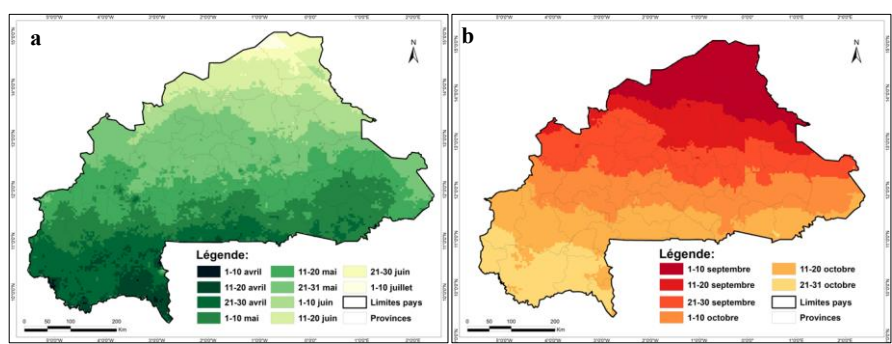


Figure 4 : Dates moyennes de début (a) et de fin (b) de saison utilisée dans le modèle SARRA-O sur la période (1991-2020)

II.2 Evapotranspiration moyenne au Burkina Faso

L'analyse de l'évapotranspiration potentielle (ETP) moyenne sur la période 1991-2020 révèle une distribution spatiale caractérisée par un gradient latitudinal nord-sud inversement proportionnel à celui des précipitations, avec des valeurs de demande climatique croissantes vers les régions septentrionales du Burkina Faso (Figure 5). Cette répartition géographique délimite trois zones agroclimatiques distinctes présentant des niveaux d'évapotranspiration différenciés. La zone sahélienne,

située dans la partie nord du pays, enregistre les demandes climatiques les plus élevées avec des valeurs quotidiennes comprises entre 9 et 11 mm/jour, reflétant des conditions d'aridité marquées et un déficit hydrique potentiel important pour les cultures. La zone soudano-sahélienne, en position intermédiaire, présente des demandes climatiques modérées oscillant entre 8 et 9 mm/jour, tandis que la zone soudanienne, au sud du pays, affiche les valeurs les plus faibles variant entre 6 et 8 mm/jour, traduisant des conditions hydriques relativement plus favorables au développement des cultures. Cette variation spatiale de l'ETP constitue un paramètre déterminant dans la modélisation agronomique, car elle influence directement le bilan hydrique des cultures et conditionne les besoins en eau du sorgho tout au long de son cycle phénologique. Son impact est particulièrement critique durant les phases reproductives et de remplissage des grains, périodes où la demande évaporative atteint son maximum et où tout déficit hydrique peut entraîner des pertes de rendement irréversibles.

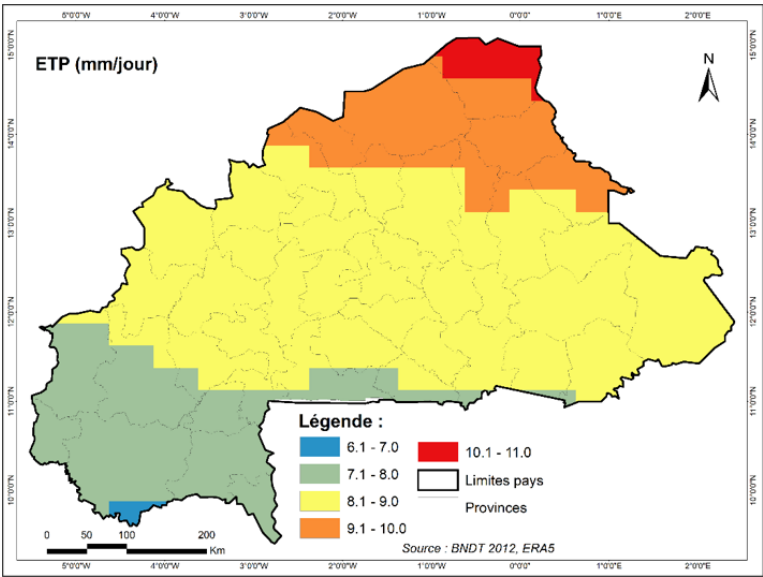


Figure 5 : Évapotranspiration potentielle moyenne au Burkina Faso sur la période 1991-2020

II.3 Prévision des rendements moyens à l'aide de SARRA-O

Les simulations de rendements du sorgho de 90 jours réalisées avec le modèle SARRA-O sur la période 1991-2020, utilisant à la fois les données journalières observées et les prévisions saisonnières, ont révélé une forte variabilité spatiale étroitement corrélée à la distribution des précipitations et aux zones agroclimatiques du Burkina Faso. Les rendements moyens simulés à partir des données observées (Figure 6a) ont présenté un gradient nord-sud marqué, avec des valeurs extrêmement faibles dans les parties Est et Nord du pays, légèrement supérieures à 200 kg/ha, caractéristiques de la zone sahélienne où le déficit pluviométrique constitue la principale contrainte limitant sévèrement la production agricole. À l'opposé, les rendements moyens culminent à plus de 2 200 kg/ha dans le sud-ouest du pays, zone soudanienne bénéficiant d'un climat plus humide et de sols plus favorables au développement du sorgho. La zone soudano-sahélienne, en position intermédiaire, affiche des rendements traduisant une transition progressive entre ces deux extrêmes. À l'échelle nationale, le rendement moyen s'établit autour de 1 039 kg/ha sur la période d'étude, avec des moyennes zonales respectives de 833 kg/ha, 960 kg/ha et 1 256 kg/ha dans les zones sahéliennes, soudano-sahélienne et soudanienne, illustrant ainsi les disparités régionales de productivité agricole.

L'analyse comparative des rendements prévus à partir des données de prévisions saisonnières a montré une performance variable selon le mois d'initialisation de la prévision. Les rendements prévus à partir des mois d'août (Figure 6c) et septembre (Figure 6 d) ont présenté une répartition spatiale similaire à celle des rendements observés, suggérant une capacité satisfaisante du modèle couplé à capturer les patterns de productivité lorsque les prévisions sont initialisées en milieu ou fin de saison agricole. En revanche, les prévisions initialisées à partir du mois de juillet (Figure 6 b) ont surestimé considérablement les rendements, notamment dans la zone sahélienne où la moyenne prévue a atteint 2 122 kg/ha contre 833 kg/ha pour les rendements observés, soit une surestimation d'environ 155 %. Cette divergence s'explique probablement par l'incertitude plus élevée des prévisions saisonnières en début de saison et par la sensibilité du modèle SARRA-O aux variations temporelles des précipitations durant les phases critiques du développement du sorgho, particulièrement les phases reproductives et de maturation où les besoins en eau sont maximaux.

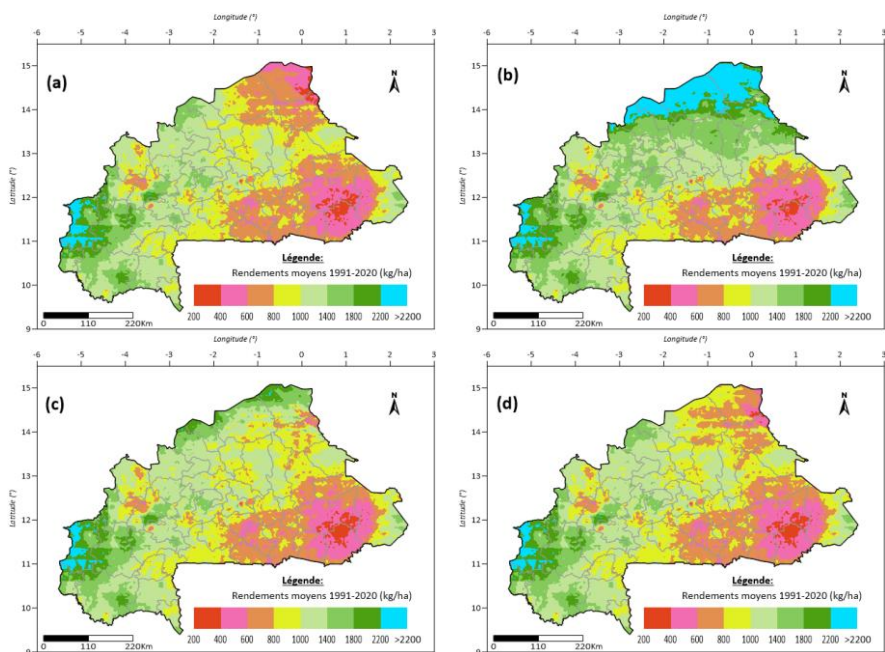


Figure 6 : Rendements moyens simulés (a) et ceux prévus à partir des mois de juillet (b), août (c) et de septembre (d) sur la période 1991-2020

II.4 Analyse de la précision des prévisions de rendement du sorgho au Burkina Faso

L'analyse du coefficient de détermination (r^2) a révélé une amélioration progressive et substantielle de la précision des prévisions au fur et à mesure de l'avancement de la saison agricole. Les prévisions initialisées en juillet (Figure 7a) ont présenté des valeurs de r^2 globalement faibles, particulièrement dans la zone sahélienne où elles demeurent inférieures à 0,4, indiquant une faible capacité à expliquer la variabilité des rendements observés en début de saison. Cette performance limitée s'explique par l'incertitude élevée des prévisions saisonnières lorsqu'une grande partie du développement phénologique du sorgho reste à accomplir. La performance s'améliore nettement pour les prévisions d'août (Figure 7 b), avec des valeurs de r^2 permettant d'expliquer plus de 80 % de la variabilité des rendements observés dans la majeure partie du territoire. Cette amélioration notable coïncide avec l'accomplissement de la phase reproductive du sorgho, période critique où les besoins hydriques sont maximaux. En septembre (Figure 7c), la précision atteint son optimum avec des coefficients de détermination

largement supérieurs à 0,8 sur l'ensemble du pays, grâce à l'intégration quasi-complète des paramètres météorologiques observés durant la saison et à l'achèvement de la phase de maturation des graines, permettant au modèle SARRA-O de fournir des prévisions particulièrement fiables.

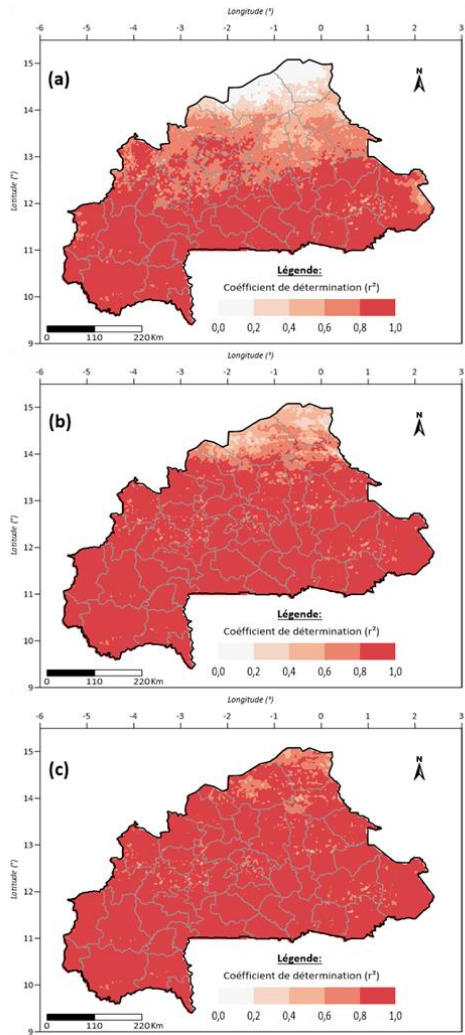


Figure 7 : Coefficient de détermination (r^2) entre les rendements simulés et ceux prévus à partir des prévisions de juillet (a), août (b) et septembre (c) sur la période 1991-2020

II.5 Analyse de la fiabilité des prévisions de rendement du sorgho au Burkina Faso

L'erreur quadratique moyenne relative (RRMSE) a confirmé la tendance d'amélioration progressive tout en révélant des disparités spatiales importantes. Les prévisions de septembre (Figure 8c) ont affiché des erreurs relatives moyennes inférieures à 10 % dans la plupart des zones, témoignant d'une excellente précision en fin de saison, excepté dans l'extrême nord sahélien où les erreurs étaient supérieures à 50 %. Les prévisions de juillet (Figure 8a) ont présenté les erreurs les plus importantes, fréquemment supérieures à 100 % dans la zone sahélienne, indiquant que les rendements prévus peuvent être plus du double des rendements observés. Cette surestimation majeure reflète l'incapacité des prévisions précoces à anticiper les épisodes de sécheresse durant les phases critiques du développement du sorgho. Les prévisions d'août (Figure 8 b) ont été en position intermédiaire avec des erreurs moyennes inférieures à 20 % sur la majeure partie du territoire. Néanmoins, des erreurs élevées persistent dans la partie septentrionale, soulignant la difficulté à prévoir avec exactitude dans ces zones sahéliennes caractérisées par une forte variabilité spatio-temporelle des précipitations. Le test de Wilcoxon, réalisé au seuil de significativité de 5 %, a montré l'absence de différence statistiquement significative entre les rendements observés et prévus sur la majeure partie du territoire, particulièrement pour les prévisions d'août (Figure 8 b) et septembre (Figure 8c). Cette concordance statistique témoigne de la robustesse du modèle SARRA-O à capturer les dynamiques de productivité du sorgho en milieu et fin de saison. En revanche, les prévisions de juillet (Figure 8a) ont révélé des divergences significatives, notamment dans la zone sahélienne, des différences significatives entre rendements observés et prévus en début de saison ($p\text{-value} < 0,05$).

III. Discussion

L'agriculture burkinabè, secteur clé de l'économie, est tributaire des précipitations (INSD, 2023). Les résultats de la présente étude justifient l'intérêt de recourir au modèle SARRA-O pour améliorer la précision des prévisions de rendements. En effet, les prévisions de rendements réalisées à partir des mois d'août et septembre, avec des coefficients de détermination supérieurs à 0,8 et des erreurs relatives moyennes inférieures à 20 %, démontrent la capacité opérationnelle du modèle à fournir des alertes précoces deux à trois mois avant la récolte. Ces

performances sont nettement supérieures à celles obtenues par Coulibaly et al. (2020) au Mali avec le modèle AgroMetShell.

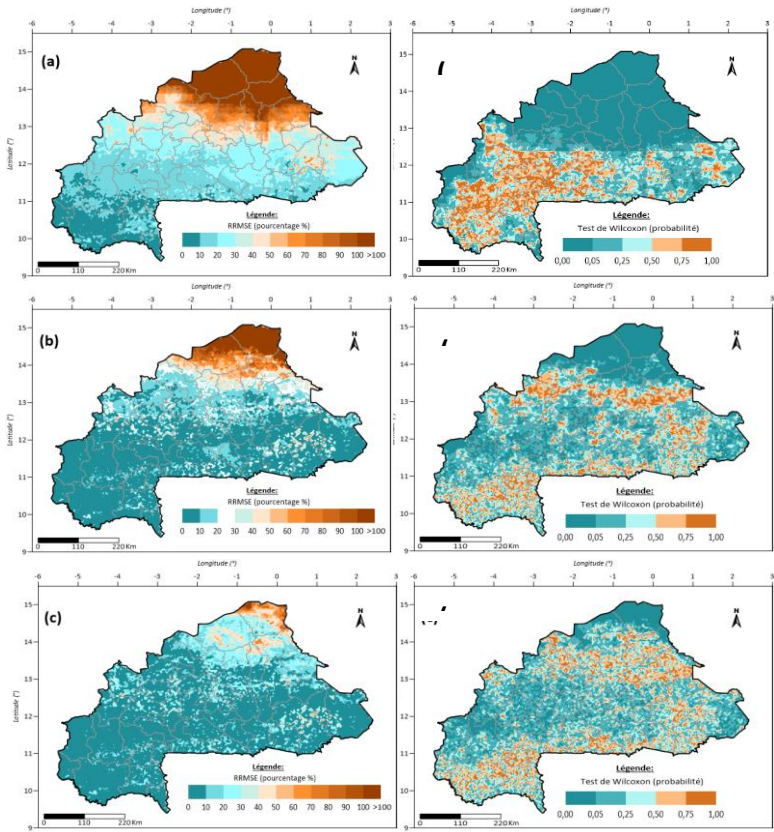


Figure 8 : RRMSE (a,b,c) et test de wilcoxon (d,e,f) entre les rendements simulés et ceux prévus à partir des prévisions de juillet (a, d), août (b, e) et septembre (c,f) sur la période 1991-2020

Ces auteurs ont rapporté des coefficients de détermination en validation croisée de $R^2_{cv} = 0,51$ (RMSE = 144 kg/ha) pour le mil à Ségou et $R^2_{cv} = 0,45$ (RMSE = 137 kg/ha) pour le sorgho à Sikasso. L'amélioration observée dans notre étude pourrait s'expliquer par l'utilisation de prévisions saisonnières journalières du modèle ECMWF plutôt que des données climatiques historiques uniquement, ainsi que par la calibration spécifique des paramètres du modèle SARRA-O aux conditions agro-écologiques du Burkina Faso.

L'analyse de la distribution spatiale des rendements moyens (1991-2020) simulés révèle que les faibles rendements du sorgho au nord et à l'est du pays s'expliqueraient par une plus grande sensibilité à la variabilité pluviométrique dans ces zones arides. Baron et al. (2005)

ont démontré que l'agrégation spatiale des données pluviométriques affecte considérablement des rendements de dans les zones sèches, contre un effet quasi nul en zones humides, en raison d'un biais dans la fraction des précipitations disponible pour la transpiration. Toutefois, Nana et al. (2016) confirment que la pluviométrie n'est pas le seul facteur explicatif. Leurs travaux dans la province du Tuy montrent que la nature du sol, la fertilité des parcelles, les pratiques culturales et le choix variétal contribuent également aux différences de rendements. La répartition temporelle des pluies, notamment l'occurrence de poches de sécheresse pendant les phases critiques de floraison et de formation des grains, s'avère plus déterminante que le cumul pluviométrique total.

Ainsi, la zone sahélienne du pays, dominées par des sols à texture limono-sableuse ont une faible capacité de rétention et exacerbe la contrainte hydrique provoquant ainsi cette faiblesse des rendements. Contrairement aux sols à texture limono-sableuse, les sols limono-argilo-sableux, présents dans la partie sud-ouest du pays, sont plus adaptés pour la culture grâce à leurs grandes réserves utiles (IRAD, 2023 ; Lavarenne, 2023). Conjugués aux bonnes précipitations dans cette région, ces éléments peuvent expliquer en grande partie les rendements élevés observés culminant à plus de 2 200 kg/ha. Les rendements moyens simulés par le modèle SARRA-O à l'aide des données de prévisions saisonnières présentent une bonne adéquation avec les rendements observés pour les mois d'août et septembre. Toutefois, les écarts notables sont observés pour la prévision du mois de juillet, particulièrement dans la zone sahélienne où les rendements moyens sont surestimés d'environ 155 %. Cette variation peut être attribuée à l'utilisation directe des sorties d'ECMWF sans correction au préalable et, dans une moindre mesure, à la méthode de descente d'échelle des données de prévisions, en l'occurrence les précipitations, qui créent des biais importants. Selon Baron et al. (2005), l'utilisation directe des sorties de modèle de circulation générale ne capture pas la fine variabilité des précipitations en particulier au Sahel, conduisant ainsi à une surestimation des rendements pouvant atteindre 10 à 50 %.

Les métriques statistiques utilisées dans le cadre de cette étude permettent d'évaluer la performance du modèle SARRA-O pour la prévision des rendements du sorgho au Burkina Faso, révélant des résultats globalement satisfaisants. Les données de prévisions saisonnières démontrent leur capacité notable à expliquer la variabilité des rendements observés, avec un coefficient de détermination (r^2)

supérieur à 0,8 à partir des mois d'août et de septembre. Ce résultat est similaire à celui de Mishra et al. (2008), qui avaient déjà mis en évidence le potentiel du modèle SARRA-H (apparenté à SARRA-O) pour la prévision des rendements du sorgho au Burkina Faso. Le RRMSE reste faible (inférieur à 20 %) sur la majeure partie du pays pour les prévisions d'août et septembre, et le test de Wilcoxon a révélé que les rendements prévus ne diffèrent pas statistiquement de manière significative de ceux observés. Toutefois, des écarts significatifs sont observés dans la prévision à partir du mois de juillet, s'expliquant d'une part par des biais induits par l'utilisation des prévisions saisonnières sans correction pour prendre en compte les réalités locales. En effet, Baron et al. (2005) ont démontré que le couplage direct des sorties de modèles climatiques globaux avec les modèles de culture à l'échelle parcellaire génère des erreurs systématiques importantes dues à l'incompatibilité d'échelle. L'agrégation spatiale des données pluviométriques entraîne une perte de variabilité pertinente pour la simulation des rendements, notamment concernant le partitionnement des pluies entre ruissellement, évaporation, transpiration, drainage et stockage à l'échelle de la parcelle. Pour une exploitation optimale des données de prévisions saisonnières, l'amélioration des méthodes de traitement doit tenir compte de la correction de biais et de la descente d'échelle spatiale adaptées, comme l'ont démontré plusieurs études similaires réalisées sur le continent africain (Mkuhlani et al., 2022 ; Houngnibo et al., 2023). Il conviendrait de coupler l'approche actuelle à une correction de biais prenant en compte les données observées des stations météorologiques classiques, qui sont d'une meilleure qualité que celles issues directement des satellites ou des réanalyses (Houngnibo, 2018 ; Sal, 2019 ; Waongo et al., 2024). Par ailleurs, l'utilisation des jeux de réanalyses climatiques à plus haute résolution spatiale tels qu'ERA5-Land (11 km de résolution) pourrait améliorer la précision de l'étude, et cette démarche pourrait être étendue à d'autres cultures clés telles que le mil et le maïs.

Conclusion

Cette étude a démontré la viabilité opérationnelle du modèle SARRA-O pour la prévision des rendements du sorgho au Burkina Faso en utilisant des données de prévisions saisonnières journalières du modèle ECMWF. Les résultats sur la période 1991-2020 ont révélé que les prévisions initialisées aux mois d'août et de septembre ont présenté des

performances satisfaisantes, avec des coefficients de détermination supérieurs à 0,8, des erreurs relatives moyennes inférieures à 20 % et une absence de différence statistiquement significative avec les rendements simulés à partir des données observées. Ces résultats confirment la capacité du modèle à fournir des prévisions fiables deux à trois mois avant la récolte, constituant ainsi un outil précieux pour les systèmes d'alerte précoce et l'anticipation des crises alimentaires. L'analyse spatiale a mis en évidence un gradient nord-sud marqué des rendements, variant de 200 kg/ha dans la zone sahélienne à plus de 2 200 kg/ha dans la zone soudanienne. Toutefois, les prévisions initialisées en juillet présentent une surestimation significative des rendements, particulièrement en zone sahélienne (155 %), attribuable à l'utilisation directe des sorties ECMWF sans correction préalable des biais et à la méthode de descente d'échelle appliquée aux précipitations. Pour éviter cette surestimation, l'intégration de méthodes de correction de biais combinant données satellitaires et observations des stations météorologiques, ainsi que l'utilisation de réanalyses à plus haute résolution spatiale telles qu'ERA5-Land, serait nécessaire. Au regard de la qualité des résultats,

Cette étude devrait être étendue à d'autres cultures céréalières clés (mil et maïs) du pays et généralisée à l'échelle régionale ouest-africaine dans le cadre des activités du CILSS et du CRA. L'intégration opérationnelle de ce système dans les mécanismes d'aide à la décision existants, accompagnée du développement d'une plateforme web interactive pour la visualisation en temps réel des prévisions et des anomalies, pourrait contribuer significativement à l'amélioration de la résilience des systèmes agricoles face à la variabilité climatique et au renforcement des capacités d'adaptation des communautés rurales sahéliennes.

Remerciements

Les auteurs expriment leur profonde gratitude au Centre Régional AGRHYMET pour la mise à disposition des données climatiques, agroclimatiques et des outils de modélisation nécessaires à cette étude. Nous remercions le Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement pour le développement du modèle SARRA-O et son engagement continu dans l'amélioration des outils d'aide à la décision pour l'agriculture sahélienne.

Nos remerciements s'adressent également à l'Agence Nationale de la Météorologie du Burkina Faso et à l'Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles pour leur collaboration et appui scientifique. Nous exprimons notre reconnaissance au Copernicus Climate Change Service, au Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme et au groupe TAMSAT de l'Université de Reading pour la mise à disposition gratuite des données utilisées dans cette recherche.

Conflit d'intérêt

Les auteurs déclarent qu'ils n'ont aucun conflit d'intérêts en relation avec cette publication. Cette recherche a été menée de manière indépendante dans le cadre des activités institutionnelles du Centre Régional AGRHYMET, de l'Agence Nationale de la Météorologie du Burkina Faso et de l'Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles. Aucun financement spécifique n'a été reçu pour cette étude, et les données utilisées proviennent de sources publiques et librement accessibles.

Contribution des auteurs

M W : Conceptualisation, méthodologie, traitement et analyse des données, rédaction du manuscrit original, révision et édition finale.

G B : Contribution à la méthodologie, collecte et traitement des données climatiques.

A SK : Contribution à l'expertise agronomique sur les besoins en eau du sorgho, validation des paramètres phénologiques, révision du manuscrit.

A A : validation de la méthodologie, révision du manuscrit

S A : Supervision, validation des paramètres phénologiques, approbation de la version finale.

Références bibliographiques

Alhassane, A., 2009. Effets du climat et des pratiques culturelles sur la croissance et le développement du mil (*Pennisetum glaucum* [L.]

R.BR.) au sahel : contribution à l'amélioration du modèle SARRA-H de prévision des rendements. Thèse de doctorat de l'Université de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire. *Physiologie Végétale*, Option : Agrométéorologie. 224 pages.

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Fao, Rome, 300(9), p.D05109.

Armah-Agyeman, G., Loiland, J., Karow, R., Payne, W.A., Trostle, C., Bean, B., 2002. Grain Sorghum.

Bado, B.V., Bationo, A. and Cescas, M.P., 2006. Assessment of cowpea and groundnut contributions to soil fertility and succeeding sorghum yields in the Guinean savannah zone of Burkina Faso (West Africa). *Biology and Fertility of Soils*, 43(2), pp.171-176.

Bandaogo, A.A., Traore, A., Saba, F., 2020. Chapitre 23. Stratégies d'adaptation au changement climatique par l'utilisation de variétés améliorées d'arachide : (zone Ouest du Burkina Faso), in : Sultan, B., Bossa, A.Y., Salack, S., Sanon, M. (Eds.), *Risques climatiques et agriculture en Afrique de l'Ouest*, Synthèses. IRD Éditions, Marseille, pp. 297--304. <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.36529>

Baron, C., Sultan, B., Balme, M., Sarr, B., Traore, S., Lebel, T., Janicot, S., Dingkuhn, M., 2005. From GCM grid cell to agricultural plot : scale issues affecting modelling of climate impact. *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences* 360, 2095--2108. <https://doi.org/10.1098/rstb.2005.1741>

Baron, C., Traoré, S., Agali, A., Sultan, B. and Muller, B., 2008. D3. 1d Farmers yield variability assessment and validation of crop model to predict average regional farmers yield for the main cropped varieties of millet, sorghum and maize: project no. 004089. AMMA African Monsoon Multidisciplinary Analysis. instrument IP. thematic priority: 1.1. 6.3 Global change ecosystems W P3. 1: Land productivity.

Barro/Kondombo, C.P., 2010. Diversités agro-morphologique et génétique de variétés locales de sorgho [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] du Burkina Faso. Eléments pour la valorisation des ressources génétiques locales. Thèse de doctorat de l'Université de Ouagadougou, Burkina Faso. Sciences Biologiques Appliquées, Option : Génétique et Amélioration des plantes. 114 pages.

Bouniol, D., Guichard, F., Barbier, J., Couvreur, F. and Roehrig, R., 2021. Sahelian heat wave characterization from observational data sets. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(11), p.e2020JD034465.

Bronne, C.E., Wellens, J., Diakité, M., Farid, T., Diallo, M., Tychon, B., 2008. Elaboration d'un modèle de prévision des rendements cotonniers dans la province du Houet (Burkina Faso).

C3S, 2018. Seasonal forecast daily and subdaily data on single levels. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/seasonal-original-single-levels?tab=download> (Consulté le 20 juillet 2025).

Chantereau, J., Cruz, J.-F., Ratnadass, A., Trouche, G., 2013. Le sorgho, Quæ, CTA, Presses agronomiques de Gembloux. ed, *Agricultures tropicales en poche*.

Chicco, D., Warrens, M.J., Jurman, G., 2021. The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation.

CIRAD, 2019. Quand la modélisation assiste l'agriculture et prévient les crises alimentaires. Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD). <https://www.cirad.fr/les-actualites-du-cirad/actualites/2019/science/modele-sarra-o> (Consulté le 13 août 2025).

Coulibaly, D., Sanogo, S., Sanogo, C.O., Karembé, M. and Ba, A., 2021. Utilisation de Modèle Agrométéorologique pour la Prévision des Rendements des Céréales au Mali : cas du mil, sorgho et maïs. *Revue des sciences et sciences de l'ingénieur*, 8(1), pp.09-17.

FAO, 2011. Stratégie de gestion des risques de catastrophe en Afrique de l'Ouest et au Sahel. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italie.

FAO, 2016. Early Warning Early Action : FAO's Approach to Disaster Risk Reduction (Rapport technique). Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome, Italie.

FAO, PAM, 2019. Réponse conjointe 2019--2020. Soutenir les activités agricoles et pastorales pendant la contre-saison, afin d'améliorer la sécurité alimentaire des ménages touchés par l'insécurité. Organisation

des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO), Programme alimentaire mondial (PAM), Burkina Faso.

Garba, J.N., Diasso, U.J., Waongo, M., Sawadogo, W., Daho, T., 2023. Performance evaluation of satellite-based rainfall estimation across climatic zones in Burkina Faso. *Theor Appl Climatol* 154, 1051--1073. <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04593-z>

GIEC, 2014. Changements climatiques 2014 : rapport de synthèse : contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. GIEC, Genève (Suisse).

Guissou, R., Kaboré, A., Bayel, B.K., Ilboudo, F., Le, T., Yameogo, S., 2014. Second rapport d'étude diagnostique sur les risques agricoles et alimentaires et les outils de gestion au Burkina Faso.

Hersbach, H., Dee, D., 2016. ERA5 reanalysis is in production. <https://www.ecmwf.int/en/newsletter/147/news/era5-reanalysis-production> (Consulté le 20 août 2025).

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., De Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R.J., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., de Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S., Thépaut, J.-N., 2020. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 146, 1999--2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>

Houngnibo, C.M., 2018. Merging des données d'observations satellitaires et in situ pour les applications agroclimatiques au Bénin (Rapport de stage 2e année). Centre Régional AGRHRYMET (CRA), Niamey, Niger, 46p

Houngnibo, M.C.M., Minoungou, B., Gadedjisso-Tossou, A., Ali, A., Segnon, A.C., Tchoho, M.D.L., Zougmore, R.B., 2023. Translating seasonal forecasts into actionable information for adaptation planning in agriculture and water sectors in West Africa: Approach and application in Niger.

INSD, 2023. Plaquette des principaux indicateurs du 5e Recensement Général de la Population et de l'Habitation (RGPH) de 2019. Ouagadougou, Burkina Faso, 62 pages. <https://www.insd.bf/sites/default/files/2023-07/PLAQUETTE%20DES%20PRINCIPAUX%20INDICATEURS.pdf>

IRAD, 2023. Itinéraires techniques pour la multiplication de semences certifiées de sorgho pluvial. Institut de Recherche Agricole pour le Développement (IRAD). Garoua, Cameroun. <https://www.cifor-icraf.org/fr/ressources/publication/38615/>

Jahel, C., Baron, C., Vall, E., Bégué, A., Coulibaly, K., Karambiri, M., Castets, M., Dupuy, S. and Lo Seen, D., 2015. Land pressure and agrarian mutation, spatial modelling of farming systems evolution from plot to regional scale in West Burkina Faso. European Society of Agronomy. <https://agritrop.cirad.fr/577911/>

Kabore, P.N., Barbier, B., Ouoba, P., Kiema, A., Some, L., Ouedraogo, A., 2019. Perceptions du changement climatique, impacts environnementaux et stratégies endogènes d'adaptation par les producteurs du Centre Nord du Burkina Faso. Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement. <https://doi.org/10.4000/vertigo.24637>

Kouadio, A.L., 2007. Prévision de la production nationale d'arachide au Sénégal à partir du modèle agrométéorologique AMS et du NDVI. <https://orbi.uliege.be/handle/2268/79500>

Lavarenne, J., Vaksman, M., Affholder, F., Ferré, M., Nunes, K., Dingkuhn, M., Macena, F.A., Silva, D., Alhassane, A., Traoré, S. and Sultan, B., 2025. SARRA, histoire d'un modèle de simulation des cultures pour les zones intertropicales. Cahiers Agricultures, 240203.

Lavarenne, J., 2023. Map of soil texture class (USDA system) for Africa at 0-20cm depth, adapted from iSDAsoil for use in SARRA-O crop model. <https://doi.org/10.18167/DVN1/YSVTS2>

MAAH, 2019. Comité de prévention sur la situation alimentaire et nutritionnelle, 2ième session de l'année 2019.

MAHRH, 2021. Tableau de bord statistique de l'agriculture, des ressources animales et halieutiques 2021, Burkina Faso, 96 pages. http://cns.bf/IMG/pdf/tableau_de_bord_statistique_2021.pdf

Maidment, R.I., Grimes, D., Black, E., Tarnavsky, E., Young, M., Greatrex, H., Allan, R.P., Stein, T., Nkonde, E., Senkunda, S., Alcántara, E.M.U., 2017. A new, long-term daily satellite-based rainfall dataset for operational monitoring in Africa. *Sci Data* 4, 170063. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.63>

MARAH, 2023. Rapport sur les resultats definitifs de l'enquete permanente agricole (EPA) de la campagne agricole 2023/2024. Ministère de l'Agriculture, des Ressources Animales et Halieutiques (MARAH), Burkina Faso. 9p

MARAH, 2024. Fiche de communication -- Cadre Harmonisé d'analyse et d'identification des zones à risque et d'estimation des populations en insécurité alimentaire au Sahel et en Afrique de l'Ouest. Ministère de l'Agriculture, des Ressources Animales et Halieutiques (MARAH), Burkina Faso.

MEEA, 2025. Plan national d'adaptation aux changements climatiques (PNA) du Burkina Faso (2024-2028). Ministère de l'Environnement et de l'Eau et de l'assainissement (MEEA), Burkina Faso.

MERH, 2015. Plan national d'adaptation aux changements climatiques (PNA) du Burkina Faso. Ministère de l'Environnement et des Ressources Halieutiques (MERH), Burkina Faso.

Mishra, A., Hansen, J.W., Dingkuhn, M., Baron, C., Traoré, S.B., Ndiaye, O., Ward, M.N., 2008. Sorghum yield prediction from seasonal rainfall forecasts in Burkina Faso. *Agricultural and Forest Meteorology* 148, 1798--1814. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.06.007>

Mkuhlani, S., Zinyengere, N., Kumi, N., Crespo, O., 2022. Lessons from integrated seasonal forecast-crop modelling in Africa: A systematic review. *Open Life Sciences* 17, 1398. <https://doi.org/10.1515/biol-2022-0507>

Nana, G., 2016. Analyse de la variabilité spatiale des rendements du maïs (*Zea mays* L.) et du sorgho [*Sorghum bicolor* (L.) moench] dans la province du Tuy, Burkina Faso. *Diplôme d'ingénieur du développement rural, option : agronomie. Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso, Burkina Faso*. 69p

NCAR, 2013. The Climate Data Guide : Regridding Overview. National Center for Atmospheric Research Staf (NCAR). <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-tools/regridding-overview> (Consulté le 13 août 2025).

Nicholson, S.E., 2013. The West African Sahel: A review of recent studies on the rainfall regime and its interannual variability. *International Scholarly Research Notices*, 2013(1), p.453521.

Ouédraogo, M., 2012. Impact des changements climatiques sur les revenus agricoles au Burkina Faso.

Ozer, P., Hountondji, Y.-C., Laminou Manzo, O., 2009. Evolution des caractéristiques pluviométriques dans l'est du Niger de 1940 à 2007. *Geo-Eco-Trop*, 33, 11--30. 20p.

PNUD, 2014. Reducing disaster risk: a challenge for development, UNDP global report. Washington DC, USA. Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD), New York.

Pachauri, R.K. and Reisinger, A. eds., 2008. Bilan 2007 des changements climatiques : Rapport de synthèse. GIEC.

PRESASS, 2020. Guide Méthodologique pour l'élaboration des prévisions agro-hydro-climatologique en Afrique de l'Ouest et au Sahel. Prévisions Saisonnières des caractéristiques Agro-hydro-climatiques de la saison des pluies pour les zones Soudanienne et Sahélienne de l'Afrique l'Ouest et du Sahel (PRESASS), 46p

Reardon, T., 1993. Cereals demand in the Sahel and potential impacts of regional cereals protection. *World Development*, 21(1), pp.17-35.

Sal, N.A., 2019. Evaluation du modèle SARRA-O pour l'estimation et la prévision des rendements du mil dans le bassin arachidier du Sénégal. Mémoire d'ingénieur en agrométéorologie. Centre Régional AGRHYMET, Niamey, Niger. 42 pages.

Sankara, R., 2020. Contribution de l'imagerie satellitaire à la lutte contre l'insécurité alimentaire au Burkina Faso : Prévision de rendements du sorgho (*Sorghum bicolor* L. Moench) à partir des modèles SPIRITS, GeoWRSI et des images du NDVI. Mémoire de Master de spécialisation en gestion des risques et des catastrophes. Université de Liège, Belgique. 45 pages.

Sanogo, A., 2019. Utilisation du modèle SARRA-O pour la prévision des rendements du maïs en culture pluviale au Mali. Mémoire d'ingénieur en agrométéorologie. Centre Régional AGRHYMET, Niamey, Niger. 42 pages.

Sivakumar, M.V. and Gnoumou, F., 1987. Agroclimatology of West Africa: Burkina Faso. International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics.

Sultan, B., Roudier, P. and Traoré, S., 2015. Les impacts du changement climatique sur les rendements agricoles en Afrique de l'Ouest. Les sociétés rurales face aux changements climatiques et environnementaux en Afrique de l'Ouest», Ed. IRD, pp.209-224.

Traore, A., Yameogo, L.P., OlivierDJINDIERE, K.T., BAZONGO, P. and TRAORE, O., 2021. Effets comparés du tourteau de neem [*Azadirachta indica* (A. Juss)] et du compost sur le rendement du sorgho [*Sorghum bicolor* (L. Moench)] en zone Sud-soudanienne du Burkina Faso. J. Appl. Biosci, 163, pp.16834-16845.

Traore, B.S., Alhassane, A., Muller, B., Kouressy, M., Some, L., Sultan, B., Oettli, P., Ambroise, S.L.C., Sangaré, S., Vaksman, M., Diop, M., Dingkhun, M., Baron, C., 2010. Characterizing and modeling the diversity of cropping situations under climatic constraints in West Africa. Atmos.Sci. Let. (2010). <https://doi.org/10.1002/asl.295>

Waongo, M., Garba, J.N., Diasso, U.J., Sawadogo, W., Sawadogo, W.L., Daho, T., 2024. A Merging Approach for Improving the Quality of Gridded Precipitation Datasets over Burkina Faso. Climate 12, 226. <https://doi.org/10.3390/cli12120226>

Wellens, J., Raes, D., Traore, F., Denis, A., Djaby, B., Tychon, B., 2013. Performance assessment of the FAO AquaCrop model for irrigated cabbage on farmer plots in a semi-arid environment. Agricultural Water Management 127, 40--47. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.05.012>