



Application en hydrologie des données de précipitations satellitaires maillées dans le contexte Ouest Africain : comparaison de la performance des produits « Top-down » et « Bottom-up » à travers la modélisation avec SWAT

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR 2iE AVEC GRADE DE
MASTER
SPECIALITE GENIE DE L'EAU, DE L'ASSAINISSEMENT ET DES AMENAGEMENTS
HYDRO-AGRICOLES

Présenté et soutenu publiquement le 18 juillet 2025 par

Gyskel NGONGA TCHAPNDA (20220180)

Directeur de mémoire : Prof. Harouna KARAMBIRI, Professeur Titulaire (CAMES), 2iE

Encadrant 2iE : Dr. Roland YONABA, Maître-Assistant (CAMES), 2iE

Structure d'accueil : Laboratoire Eaux, Hydro-Systèmes et Agriculture (LEHSA) / 2iE

Jury d'évaluation du mémoire :

Président du jury : Prof. Harinaivo ANDRIANISA

**Membres et correcteurs : Dr. FOWE TAZEN
Dr. Axel BELEMTUGRI**

Promotion [2024/2025]

DEDICACE



REMERCIEMENTS

C'est avec toute ma gratitude et ma reconnaissance que j'adresse mes remerciements à :

- L'ensemble de l'équipe d'encadrement de l'**institut 2iE**, le cadre et la qualité des enseignements offerts m'ont fait grandir tant intellectuellement, qu'humaine ;
- Mon Directeur de Mémoire, Prof. Harouna KARAMBIRI pour son appui dans le cadre de ce mémoire ;
- Mon encadrant, Dr. Roland YONABA, pour le partage de connaissance, sa convivialité, son professionnalisme, sa disponibilité et ses encouragements tout au long de ce mémoire ;
- Au Laboratoire Eaux, Hydro-Systèmes et Agriculture (LEHSA) de l'institut 2iE pour m'avoir accueilli dans le cadre de ce mémoire ;
- A l'ingénieur Mme NGONGA née NKEPSEU M. Rosine S., ma maman pour toute son affection, son soutien, sa présence, ses conseils, ses expériences, sa force, son éducation, ses prières, qui ensemble m'ont mené jusqu'ici et me porteront encore plus loin, j'en suis convaincu, dans ma réussite professionnelle et personnelle ;
- À ma famille, mon Père, mon petit frère, mes cousins, ma tante et tous les autres pour votre soutien, vos encouragements et vos prières qui ont su me redonner de la force durant tout ce parcours ;
- À mes compagnons de jeunesse, camarades et amis, principalement, l'Ing. DJOUKENG B. Uriel Vanel et le Médecin Dentiste NDONGO Patrick Raoul, pour leur présence, nos moments de partage de vision, de réflexion qui ont su apporter leur touche d'originalité à l'auteur de ce mémoire ;
- À l'ensemble des personnes rencontrées tout au long de ce parcours, promotionnaires, camarades, communautés, aînés et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin dans le cadre de ce mémoire, veuillez trouver dans ces dernières lignes l'expression de ma gratitude.

Que l'**Éternel** vous rende votre bienveillance.

RESUME

Dans le contexte du Sahel Ouest Africain (SOA), la rareté des données de mesures hydrométéorologiques, caractérisée par des réseaux de mesures au sol souvent très lacunaires, représente un défi majeur pour la compréhension et la gestion des ressources en eau. Face à cette problématique, les produits de précipitations satellitaires maillées offrent une alternative cruciale.

Ce mémoire évalue l'application en hydrologie de ces produits, en comparant spécifiquement les performances des approches "Top-down" et "Bottom-up" via la modélisation avec le modèle SWAT. L'étude a été menée sur trois bassins versants au Burkina Faso (Mouhoun à Dapola, Nakanbé à Wayen, Sirba à Garbey Kourou), qui souffrent de lacunes importantes dans les données de débits observés. La période d'étude s'étend principalement de 2007 à 2024, bien que la disponibilité des données observées présente des variations.

Les résultats indiquent que, pour la reproduction des pluies, RFE2 ("Top-down") offre le meilleur ajustement moyen aux observations, tandis que CCI ("Bottom-up") se distingue par sa capacité à capter les extrêmes. Concernant les simulations hydrologiques des débits : les performances sont optimales sur le Mouhoun (KGE médians supérieurs à 0.50). Sur le Nakanbé, l'optimisation établit qu'aucun produit ne traduit fidèlement les écoulements à long terme. Sur la Sirba, ASCAT ("Bottom-up") présente les meilleurs résultats globaux, les produits "Bottom-up" étant comparativement meilleurs sur ce bassin. L'analyse du bilan hydrologique confirme la prédominance de l'évapotranspiration (40% à 78% des précipitations). Cependant, des surestimations de la recharge profonde (notamment par ARC2, atteignant près de 30% des précipitations sur le Mouhoun, contre un attendu régional de 5-15%) suggèrent un biais lié à la calibration mono-objectif sur les débits.

L'étude valide le potentiel de ces produits pour la modélisation hydrologique en Afrique de l'Ouest, tout en soulignant la différenciation des performances selon l'approche, le bassin et la variable étudiée, et la nécessité de faire preuve de prudence dans l'interprétation des bilans hydrologiques obtenus par calibration mono-objectif.

Mots clés :

- Modèle SWAT
- Modélisation hydrologique
- Produits satellitaires maillés
- Sahel Ouest Africain
- « Top-down » vs « Bottom-up »

ABSTRACT

In the West African Sahel (WA), the scarcity of hydrometeorological measurement data, characterized by often highly incomplete ground-based measurement networks, represents a major challenge for understanding and managing water resources. Faced with this problem, gridded satellite precipitation products offer a crucial alternative.

This thesis evaluates the application of these products in hydrology, specifically comparing the performance of top-down and bottom-up approaches using SWAT modeling. The study was conducted on three watersheds in Burkina Faso (Mouhoun in Dapola, Nakanbé in Wayen, Sirba in Garbey Kourou), which suffer from significant gaps in observed flow data. The study period primarily spans 2007 to 2024, although the availability of observed data varies.

The results indicate that, for rainfall reproduction, RFE2 ("Top-down") offers the best average fit to observations, while CCI ("Bottom-up") stands out for its ability to capture extremes. Regarding hydrological simulations of flow rates: performance is optimal on the Mouhoun (median KGE greater than 0.50). On the Nakanbé, optimization establishes that no product faithfully reflects long-term flows. On the Sirba, ASCAT ("Bottom-up") presents the best overall results, with "Bottom-up" products being comparatively better in this basin. Analysis of the hydrological balance confirms the predominance of evapotranspiration (40% to 78% of precipitation). However, overestimations of deep recharge (notably by ARC2, reaching nearly 30% of precipitation on the Mouhoun, compared to a regional expectation of 5-15%) suggest a bias related to the single-objective calibration on flow rates.

The study validates the potential of these products for hydrological modeling in West Africa, while highlighting the differentiation of performances according to the approach, the basin and the variable studied, and the need to exercise caution in the interpretation of hydrological balances obtained by single-objective calibration.

Keywords:

- Gridded satellite products
- Hydrological modeling
- SWAT model
- Top-down vs. Bottom-up
- West African Sahel

LISTE DES ABREVIATIONS

ANAM-BF	: Agence Nationale de la Météorologie du Burkina Faso
ARC2	: Africa Rainfall Estimate Climatology version 2.0
ASCAT	: Advanced Scatterometer
BV	: Bassin Versant
CCI	: Climate Change Initiative
CHIRPS	: Climate Hazards group InfraRed Precipitation with Stations version.2
C/V	: Calibration – Vallidation
DGRE	: Direction Général des ressources en Eau
DTM	: Digital Terrain Model
FABDEM	: Forest And Buildings removed Copernicus DEM
FAO	: Food and Agriculture Organisation
FDC	: Flow Duration Curve
GPM	: Global Precipitation Measurement
NASA	: National Aeronautics and Space Administration
NetCDF	: Network Common Data Form
PSP	: Produits Satellitaires de Précipitations
RFE2	: Rainfall Estimate version 2
SOA	: Sahel Ouest Africain
SIG	: Système d’Information Géographique
SM2RAIN	: Soil Moisture to Rain
SWAT	: Soil and Water Assessment Tool
SWAT-CUP	: Soil and Water Assessment Tool - Calibration and Uncertainty Program
TAMSAT	: Tropical Applications of Meteorology using Satellite data and ground- based observation
URH	: Unité de Réponse Hydrologique
USDA-ARS	: United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service

SOMMAIRE

Dédicace	i
Remerciements	ii
Résumé	iii
Abstract	iv
Liste des abréviations	v
Liste des tableaux	vii
Liste des figures	viii
I. Introduction.....	1
II. Hypothèses et objectifs	2
II.1. Hypothèses	2
II.2. Objectifs	2
III. Revue de la littérature.....	4
III.1. Cadre Global Sur L'estimation Des Précipitations Dans Le Sahel Ouest-Africain.....	4
III.2. Précipitations en zone sahélienne : caractéristiques et défis de mesure	4
III.3. Données de précipitations satellitaires : principes et classifications	6
III.4. Précision et performance des produits satellitaires en Afrique de l'Ouest	7
III.5. Modélisation hydrologique et intégration des données satellitaires	9
IV. Matériels et méthodes	11
IV.1 Zone d'étude	11
IV.2 Données de l'étude.....	12
IV.3 Outils de traitement.....	16
IV.4 Processus de modélisation hydrologique	17
V. Résultats	29
V.1. Précision de la reproduction des pluies par les produits satellitaires.....	29
V.2. Calibration – Validation (C/V)	31
V.3. Performances statistiques des différents produits	35
V.4. Signatures hydrologiques.....	38
V.5. Bilan hydrologique.....	40
VI. Discussions.....	43
VII. Conclusion et perspectives	46
VIII. Bibliographie	48

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Description des produits <i>Top-down</i>	13
Tableau 2 : Description des produits <i>Bottom-up</i>	14
Tableau 3 : Périodes de débits observées pour les stations exutoires de chaque bassin versant.....	16
Tableau 4 : Période de calibration-validation pour les différents BVs et par produits	18
Tableau 5 : Paramètres du modèle SWAT pour l'analyse de sensibilité.	22
Tableau 6 : Valeurs satisfaisantes des critères d'évaluation.....	26
Tableau 7 : Bilan hydrologique sur le Mouhoun.....	40
Tableau 8 : Bilan hydrologique sur le Nakanbé.....	40
Tableau 9 : Bilan hydrologique sur la Sirba.....	41

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Carte des zones climatiques du Burkina et des bassins versants étudiés.....	11
Figure 2 : Taux de lacunes sur les observations de débits (2007-2024)	18
Figure 3 : Bilan hydrologique du modèle SWAT, source :(Arnold et al. 2012).....	20
Figure 4 : Pluies moyennes mensuelles sur chaque bassin versant.....	30
Figure 5 : Résultats de calibration-validation sur le Mouhoun à Dapola.....	32
Figure 6 : Résultats de calibration-validation sur le Nakanbé à Wayen	33
Figure 7 : Résultats de calibration-validation sur la Sirba à Garbey-Kourou	34
Figure 8 : Performances des simulations satisfaisantes sur toutes les périodes d'étude de chaque BV par produits.	35
Figure 9 : Métriques du Top-10% des meilleures simulations.....	37
Figure 10 : Ajustement des courbes de débits moyen mensuel des produits par rapport à celle des observés	39
Figure 11 : Les Courbe de débits classés pour chaque produit et par bassin versant.....	39

I. INTRODUCTION

L'étude des processus qui régissent le cycle de l'eau par le biais de la modélisation hydrologique est essentielle pour une meilleure compréhension de ces phénomènes et pour la mise en place d'actions adéquates visant à préserver les ressources en eau. Dans le contexte de l'Afrique de l'Ouest, et plus particulièrement du Sahel Ouest Africain (SOA), la rareté des données mesurées constitue un défi majeur, avec des réseaux de mesures souvent très lacunaires. Face à ces contraintes, les produits de précipitations satellitaires offrent une alternative cruciale pour appréhender le phénomène des précipitations.

Malgré ce potentiel, la problématique de cette étude réside dans la nécessité d'évaluer spécifiquement la performance hydrologique de ces produits satellitaires dans le contexte des bassins versants du Burkina Faso, une région stratégique regroupant trois des principales zones climatiques du Sahel Ouest-Africain (SOA). Les bassins ciblés (Mouhoun à Dapola, Nakanbé à Wayen et Sirba à Garbey Kourou) souffrent de lacunes importantes dans les données de débits observés, ce qui rend la modélisation hydrologique classique particulièrement difficile. Cette fragmentation des données de référence au sol accentue l'urgence d'une évaluation rigoureuse de l'applicabilité et de la fiabilité des produits satellitaires maillés pour une gestion efficace des ressources en eau dans ces conditions.

Dans le cadre de ce mémoire, nous évaluerons la performance hydrologique de produits de précipitations satellitaires maillés dans un contexte sahélien, en considérant la zone climatique et la fiabilité des données d'entrée. Cette évaluation des performances mettra l'accent sur la comparaison entre les produits « top-down » et les produits « bottom-up » ; ces derniers ne disposant que de peu d'études de leurs performances dans le contexte visés, malgré leurs potentialités contrairement aux produits « top-down » qui ont déjà fait l'objet d'une multitude d'étude dans divers contextes.

II. HYPOTHESES ET OBJECTIFS

II.1. Hypothèses

Notons que de nombreuses études de modélisation hydrologique à partir de produits satellitaires divers et à l'aide de différents modèles hydrologiques ont déjà été menées dans le Sahel Ouest Africain. Nous avons le cas de Kouakou et al. (2023) qui étudie la performance d'un ensemble de 15 produits de précipitations (basé sur des précipitations satellitaires, des réanalyses et des mesures au sol) associé à une méthode de régionalisation à l'aide du modèle conceptuel GR2M, dans le contexte ouest-africain et central, ils arrivent à des conclusions satisfaisantes sur la performance des produits CHIRPS, GPCP et TAMSAT, mais moins bonne pour des produits tels que ARC2 et CPC. L'étude de Dembélé et al. (2020) dans bassin de la Volta classe les produits TAMSAT, CHIRPS et PERSIAN-CDR comme certains des meilleurs produits pour reproduire des processus hydrologiques tels que les débits d'écoulement, l'évapotranspiration réelle, l'humidité du sol et le stockage sous terrain. D'autres auteurs s'intéressent plus aux produits qui suivent l'approche bottom-up, à l'instar des études de Brocca et al. (2019) qui ont démontré de meilleures performances des produits SM2RAIN-ASCAT face aux produits tels que GPCC et IMERG dans des zones de données rares d'Afrique et d'Amérique du Sud. De plus l'étude de Brocca et al. (2020) pour des bassins d'Afrique de l'Ouest, présente également des résultats fiables en termes de prédictions des débits fluviaux des produits SM2RAIN-GPM.

C'est donc autour des interrogations pouvant découler de cet état des faits, que nous formulons donc les hypothèses de recherche suivantes :

- *Hypothèse 1* : La performance en modélisation hydrologique des produits top-down face aux produits bottom-up est différenciée ;
- *Hypothèse 2* : Les produits de précipitations satellitaires permettent une reproduction appréciable des signatures et du bilan hydrologique.

II.2. Objectifs

En rappelant que la modélisation hydrologique consiste, à l'aide de modèles informatiques, à reproduire les processus qui régissent le cycle de l'eau à travers l'espace et le temps, dans le but de permettre une meilleure compréhension de ceux-ci et de mettre en place des actions adéquates pour la gestion et la préservation des ressources en eau ; notons que la performance et la fiabilité des modèles hydrologiques sont fonctions de plusieurs facteurs que sont (1) le type de modèle,

(2) les paramètres du modèle, (3) la zone climatique étudiée, (4) la continuité et la fiabilité des données d'entrée (Gosset et al. 2013; Massazza et al. 2020). Dans le cadre de ce mémoire, notre intérêt est porté principalement sur les facteurs (3) et (4) ; sachant que les facteurs (1) et (2) ont fait l'objet d'une analyse sous-jacente pour l'atteinte de notre objectif principale ; qui est de **comparer les performances hydrologiques des produits « top-down » face aux produits « bottom-up » dans le contexte du SOA à travers la modélisation avec SWAT**. Pour ce faire nos objectifs spécifiques, afin d'établir d'affirmer ou infirmer nos hypothèses sont de :

- Comparer les performances de reproduction de débits, obtenues à partir du forçage de différents produits de précipitation satellitaire sur différents bassins versants ;
- Comparer les signatures et les bilans hydrologiques obtenus à partir du forçage avec différents produits de précipitation satellitaire.

III. REVUE DE LA LITTERATURE

III.1. Cadre Global Sur L'estimation Des Précipitations Dans Le Sahel Ouest-Africain

Il est indéniable que la gestion intégrée des ressources en eau, ressource vitale, est un problème majeur du Sahel Ouest Africain (Ndehedehe et al. 2019). Ce problème de gestion naît d'une mauvaise maîtrise des processus hydrologiques de la zone, en particulier du phénomène de précipitation, principale source d'eau (Bakary et al. 2018; Ganiyu et al. 2025). Bien que, l'on dispose de station de mesures de précipitations dans le Sahel Ouest Africain, celles-ci sont inégalement répartis et sont en nombre restreint, ce qui rend les informations fournies plus qu'insuffisante pour des estimations de qualité (Bodian et al. 2016; Ndehedehe et al. 2019). Ces multiples lacunes, entraînent davantage d'incertitude dans la prédiction des phénomènes hydrologiques ; ce qui laisse la zone à la merci des aléas du climat, sans réelle possibilité d'anticipation (Maidment et al. 2017).

Cependant, nous notons la mise en place de dispositif de mesures des précipitations par observation satellitaire de résolution spatiale plus étendue, à l'aide de capteurs infrarouges et d'ondes embarqués, dit produits satellitaires de précipitations (PSP) (Hounguè et al. 2021; Yonaba et al. 2024), qui d'après de nombreuses études (Dembélé et al. 2020), offrent de bon résultat d'estimation des précipitations. Ces produits, disponibles gratuitement sur des plates formes internet, semblent offrir une meilleure approche de l'estimation des précipitations avantageuses pour le Sahel Ouest Africain, sujet aux manques de moyens, principalement économique pour la mise en place de réseau de mesure au sol plus étendus, nécessaire pour palier à la mauvaise maîtrise des phénomènes hydrologiques.

III.2. Précipitations en zone sahélienne : caractéristiques et défis de mesure

III.1.1. Climat et régime de précipitations

Le climat du Sahel Ouest Africain est caractérisé par une forte variabilité, tant intra-saisonnière qu'interannuelle des précipitations. Le Sahel se situe dans une zone de transition climatique entre le désert saharien au nord et les régions plus humides au sud. La saison des pluies au Sahel est généralement courte et concentrée, s'étendant de juin à octobre dans la région du fleuve Sénégal. On observe un gradient pluviométrique nord-sud, avec des quantités de pluie annuelles très

faibles au nord (environ 80 mm dans la partie nord du bassin du fleuve Sénégal) et augmentant vers le sud (pouvant atteindre 2000 mm plus au sud du bassin). Les vents chauds et secs de l'Harmattan venant du Sahara et les vents humides de la mousson du sud-ouest venant de l'océan Atlantique jouent également un rôle.

Des études montrent une faible distribution des précipitations pendant les mois de janvier, février, mars, novembre et décembre, avec un pic de précipitations généralement observé en août et septembre. Les pluies sont de natures très variables et souvent dus à des systèmes convectifs. La variabilité interannuelle des précipitations au Sahel est très élevée. Des études ont montré que la variabilité des précipitations explique une part significative des changements dans les débits des rivières de la région.

La compréhension de cette variabilité est cruciale pour la gestion des ressources en eau, l'agriculture et la prévision des risques hydrologiques (inondations et sécheresses) dans cette région particulièrement vulnérable aux changements climatiques. La rareté et la discontinuité des réseaux de mesure au sol rendent souvent nécessaire l'utilisation et l'évaluation de produits de précipitations satellitaires pour compléter les informations disponibles.

III.1.2. Contraintes liées aux mesures conventionnelles des précipitations

Les stations de mesures de précipitations au sol sont les moyens conventionnels de mesures des précipitations à l'aide principalement de pluviomètres et pluviographes. Ces derniers présentent cependant plusieurs limites et/ou contraintes (Brocca et al. 2013; Ganiyu et al. 2025), à savoir :

- Couverture spatiales limités et inégales : les stations de mesures ne permettent en réalité que de capter des précipitations ponctuelles qui seront ensuite assimilé à des superficie inégales, introduisant des incertitudes supplémentaires dans les méthodes d'évaluation ;
- La difficulté à capter les évènements pluvieux en zone montagneuse ;
- La disponibilité continue des données quotidiennes ;
- L'accessibilité des données ;
- L'insuffisance de maintenance des équipements ;
- Manque de moyens financier pour assurer le maintien de certaine station ou pour la mise en service de nouvelle.

III.3. Données de précipitations satellitaires : principes et classifications

III.3.1 Approches d'estimation « Top-down » des précipitations

L'approche « *Top-down* » dite approche descendante, repose principalement sur l'observation des caractéristiques (températures, hauteurs, mouvements, etc.) des nuages avec une couverture spatiale étendue, à l'aide de capteurs (visibles, infrarouges, micro-ondes, etc.) embaqués sur des satellites, fournissant des résolutions temporelles fonction de leurs orbites (géostationnaire ou en orbite basse) (Mankin et al. 2025; Qquenta et al. 2023; Stisen et al. 2009). Ces observations sont ensuite traitées à l'aide de différents algorithmes afin de générer des estimations de précipitations, souvent recalibrés à l'aide d'observation au sol pour améliorer la qualité des données et sont enfin générées sous forme de grilles accessible sur internet (Dembélé et al. 2020; Kouakou et al. 2023).

Les performances de ces produits ont été évalués par diverses études (Abbas et al. 2025; Ganiyu et al. 2025; Kouakou et al. 2023) et permettent de conclure sur l'intérêt de combiner les données satellitaires, les modèles et les mesures au sol et d'appliquer des corrections de quotidiennes, afin de réduire les risques d'incertitude, et avoir des données de bonne qualité pour de meilleurs résultats. Toutefois malgré ces multiples moyens d'amélioration de la qualité des données issues de l'approche *Top-down*, reste sujet à certaines limites comme :

- La disponibilité des observations de précipitations dans de nombreuses régions ;
- Les différences d'échelle entre les pluviomètres à points et les ensembles de données de précipitations basés sur une grille (Ensor et al. 2008; Yates et al. 2006) qui entraîne la production de résultats peu fiables ;
- Les écarts temporels entre les accumulations quotidiennes des pluviomètres et les ensembles de données satellitaires et de réanalyse (Beck et al. 2019; Yang et al. 2020) qui peuvent générer des résultats d'évaluation quotidiens trompeurs.

III.3.2 Approches d'estimation « Bottom up » des précipitations

L'approche *Bottom-up*, soit l'approche ascendante, consiste en l'inversion du bilan hydrique du sol pour extraire les précipitations de l'humidité du sol (Brocca et al. 2014). Les données d'humidité du sol sont obtenues par mesure satellitaire à des résolutions spatiales étendues et

continues (Brocca et al. 2014). Cette approche, permet de s'intéresser plus particulièrement à la pluie qui arrive réellement à la surface du sol, détail qu'on ne pouvait affirmer en suivant le principe de l'approche *Top-down*, basé sur l'observation des hydrométéores ; ce qui, du point de vue du principe, annonce une bien meilleur qualité de données (Brocca et al. 2014). De plus, elle permet d'améliorer la qualité d'estimation des précipitation légères qui permet une estimation plus juste des accumulations de précipitations (Kucera et al. (2013).

Notant toutes ces améliorations de l'approche *Bottom-up*, par rapport à l'approche *top-down*, de nombreuses études (Brocca et al. 2013; Qquenta et al. 2023; Yonaba et al. 2024) ont permis d'évaluer ses performances, principalement à traves l'algorithme SM2RAIN (Soil Moisture to Rain). L'étude de Brocca et al. (2013) fait partie des premières études portant sur l'utilisation de l'approche *Bottom-up*, portant sur trois sites ; Ombrie en Italie, Remedhus en Espagne et Valescure en France ; où il a été question de comparer des données d'humidité in situ et satellitaire et ont présenté des résultats de coefficient de corrélation (R), avec les observations quotidiennes, variant entre 0,9 et 0,945 pour les trois sites. Qquenta et al. (2023) ont étudié la comparaison entre un produit *Top-down* et 2 produits *Bottom-up* appliqués au Pérou, zone présentant une faible disponibilité de mesures de pluie au sol, ces 2 derniers produits ont présenté des résultats satisfaisant dans l'estimation des précipitations et les résultats de la modélisation testé à l'aide du modèle conceptuel GR4J ont présenté des valeurs de $KGE > 0,75$ et $NSE > 0,65$. Cependant contrairement à ces études qui démontrent des performance supérieures de l'approche *Bottom-up* à l'estimation des précipitations en Europe et du côté de l'Amérique, d'après Yonaba et al. 2024, celles-ci révèlent des performances moins bonnes que les produits *Top-down* au Burkina Faso, dans le Sahel Ouest Africain. Et, l'analyse de performance de 23 produits satellitaires de précipitations de Satgé et al. 2020, démontre que les produits *Bottom-up*, (produit étudié SM2Rain-CCI), souffre encore de trop nombreuses lacunes spatiales et temporelles en Afrique de l'Ouest. Ce qui pourrait être attribué au manque de précision des produits satellitaires d'humidité du sol (soit la performance des capteurs), aux faibles profondeurs de pénétration (moins d'une dizaine de centimètre).

III.4. Précision et performance des produits satellitaires en Afrique de l'Ouest

Après analyse des principales approches d'estimation satellitaire des précipitations, nous pouvons constater que les produits satellitaires dans le contexte Ouest Africain présentent encore de

multiples insuffisances et nécessite davantage d'expertise technique et analytique afin de mener à bien davantage d'étude et la mise à disposition de moyens plus avancées, pour exploiter le plein potentiel que peuvent offrir ces solutions.

Nous avons pu mettre en évidence, dans les lignes précédentes, la forte dépendance des différentes approches aux observations au sol ; afin de contrôler leur performance de prédiction en termes de données et assurer la fiabilité des processus de calibration et validation des modèles (Abbas et al. 2025; Bennour et al. 2022; Yonaba et al. 2024). Ces derniers nécessitant de capacités d'analyse plus nombreuses afin d'améliorer l'esprit critique et des apports de solutions diverses et innovantes plus adaptées au contexte Africain en général et Ouest Africain en particulier. Surtout compte tenu des faibles performances face aux variations saisonnières et conditions climatiques comme c'est le cas dans le sahel Ouest Africain, où l'on note pour les divers produits satellitaires étudiés une grande variabilité en fonction des saisons et des conditions climatiques et temporels. Soit, les cas des produits tels que TAMSAT, ARC2, PERSIAN-Adj qui sont plus performants en saison des pluies que des produits comme MERRA-2, GSMAP-Adj, CPC-v1 dont les performances sont meilleurs en saison sèche (Satgé et al. 2020). Ou encore comme c'est le cas des produits SM2RAIN-ASCAT par rapport au produits TRMM-RT, ces derniers moins efficaces que les produits SM2RAIN-ASCAT dans la capture des faibles événements pluvieux en saison sèche (Brocca et al. 2014). En outre, (Brocca et al. 2014; Dembélé et al. 2020; Qquenta et al. 2023) permettent de conclure, entre autres que l'efficacité des produits satellitaires de précipitations dépend également des conditions topographiques et climatiques de la zone étudiée. Les régions arides présentant généralement des performances médiocres, mais les produits SM2RAIN-ASCAT et SM2RAIN-CCI ont montrés une grande précision dans des zones arides comme l'Altiplano péruvien et bolivien. Les zones soudanienne et sahélienne ont montré une meilleure performance des produits (Goudiaby et al. 2024).

En ne citant que ces quelques études on peut d'ores déjà entre voir la grande variabilité des produits face aux zones climatiques et aux saisons, ce qui vis-à-vis du contexte Ouest Africain interpelle davantage à une mise en place de techniques diverses et innovantes et à la mobilisation de plus d'expert soucieux de ce contexte pour des analyses critiques en vue d'exploiter le plein potentiel de ces produits. Toutefois, il est à noter que l'un des principaux freins à la mise en place des multiples solutions déjà envisagée reste la disponibilité de financement, ce qui pose la

question de l'importance accorder la résolution du problème de gestion des ressources en eau, ou alors de l'adhésion des divers acteurs aux nouvelles solutions.

III.5. Modélisation hydrologique et intégration des données satellitaires

III.5.1. Evaluation de la performance des produits satellitaires en modélisation hydrologie

L'efficacité de la modélisation hydrologique est fonction de plusieurs paramètres, dont le type de modèle, le paramétrage du modèle, la diversité climatique de la zone étudiée, la disponibilité et la fiabilité des données d'entrée. Concernant ce dernier point, les produits satellitaires viennent apporter une solution concrète du fait de leur grande résolution spatiale et temporelle. De plus, elles permettent de mieux capturer la diversité climatique et des événements météorologiques surtout au sein de bassin versant mal gaugé, comme c'est le cas en Afrique de l'Ouest. Alors il est évident de constater, comme l'on démontré de nombreuses études (Brocca et al. 2020; Dos Santos et al. 2022; Qquenta et al. 2023) des performances assez bonnes de l'utilisation des produits satellitaires de précipitation tels que CHIRPS et ARC2 très performant en Afrique, SM2RAIN-ASCAT qui montre des performances satisfaisantes en Afrique et en Amérique du Sud (en dehors des zones désertiques et des forêts tropicales). Toutefois, il convient de bien noter que les études énoncées présentent bien les limites de ces produits, dont la variation des performances est fonction des saisons et des zones d'études.

III.5.2. Analyse des incertitudes liées aux sources de précipitation satellitaires

Comme il a déjà pu être souligné dans les propos précédents, les incertitudes des sources de précipitations satellitaire représentent un enjeu majeur dans la qualité des résultats de simulation (Bakary et al. 2018). Les produits de précipitation satellitaire sont dans le principe des données indirectes et donc soumise à de multiples sources d'incertitude, à savoir : (i) La capacité des capteurs embarqués qui sont sujet à des limites techniques (Satgé et al. 2019; Awange et al. 2016), (ii) Les intervalles de mesures qui impliquent une difficulté pour les satellites à capter les précipitations légères (Satgé et al. 2020), (iii) les différences d'échelle entre les mesures satellitaires et les mesure de corrections issus des mesures aux sol (Bakary et al. 2018; Satgé et al. 2019), (iv) les incertitudes des méthodes réanalyses.

Conscient de ces limites, de nombreuses études (Bakary et al. 2018; Dembélé et al. 2020; Satgé et al. 2019) se sont intéressées à des moyens de corriger ces erreurs afin d'obtenir des données d'entrée et des données de sortie plus fiables. C'est ainsi qu'on distingue pour les données d'entrée : (i) la combinaison des produits satellitaires aux produits de réanalyse des modèles ou la combinaison des produits satellitaires aux produits de réanalyses des modèles et aux observations au sol dans le but de corriger les erreurs des différents procédés d'acquisition des données par les points forts des méthodes complémentaires associées (Kouakou et al. 2023), (ii) l'amélioration de la qualité des capteurs, avec la mise en service ces dernières décennies des nouveaux capteurs plus performant déjà au correction de source d'incertitude des données d'entrée déjà relevés et dont les performance sont encore à valider pour les différentes zone d'étude (Brocca et al. 2020), (iii) la mise sur pied dans certaines zones de dispositif de mesure de précipitation au sol plus étendues et plus représentatif (exemple) pour améliorer la qualité des données de correction (Gosset et al. 2013), (iv) l'estimation des biais, exemple de la méthode décomposition des biais, afin de détecter les erreurs systématique des données d'entrée et les améliorer avant recalibrage du modèle (Bakary et al. 2018; Yonaba et al. 2024). Et pour les données de sortie : (i) l'analyse d'incertitude des sorties des modèles à l'aide d'algorithmes probabilistes, qui sont couplés au calibrage des modèles afin de tenir compte au mieux des erreurs systématiques difficiles à corriger (soit au niveau des données d'entrée, soit dû à la difficulté de calibrage des paramètres des modèles) (Beven et al. 1992; Chaibou Begou et al. 2016; Hughes et al. 2010), (ii) Le forçage des modèles après estimations et corrections des biais des données d'entrée qui offrent des performances supérieures (Bakary et al. 2018; Faty et al. 2023).

IV. MATERIELS ET METHODES

IV.1 Zone d'étude

Dans le Sahel Ouest Africain (SOA), le Burkina Faso présente la particularité de regrouper trois des principales zones climatiques du SOA, qui recoupe les 3 principaux bassins versants de notre étude : (1) Le bassin du Mouhoun à Dapola, (2) Le bassin du Nakanbé à Wayen et (3) Le bassin de la Sirba à Garbey Kourou. Ces zones climatiques sont caractérisées ainsi qu'il suit (voir figure 1) :

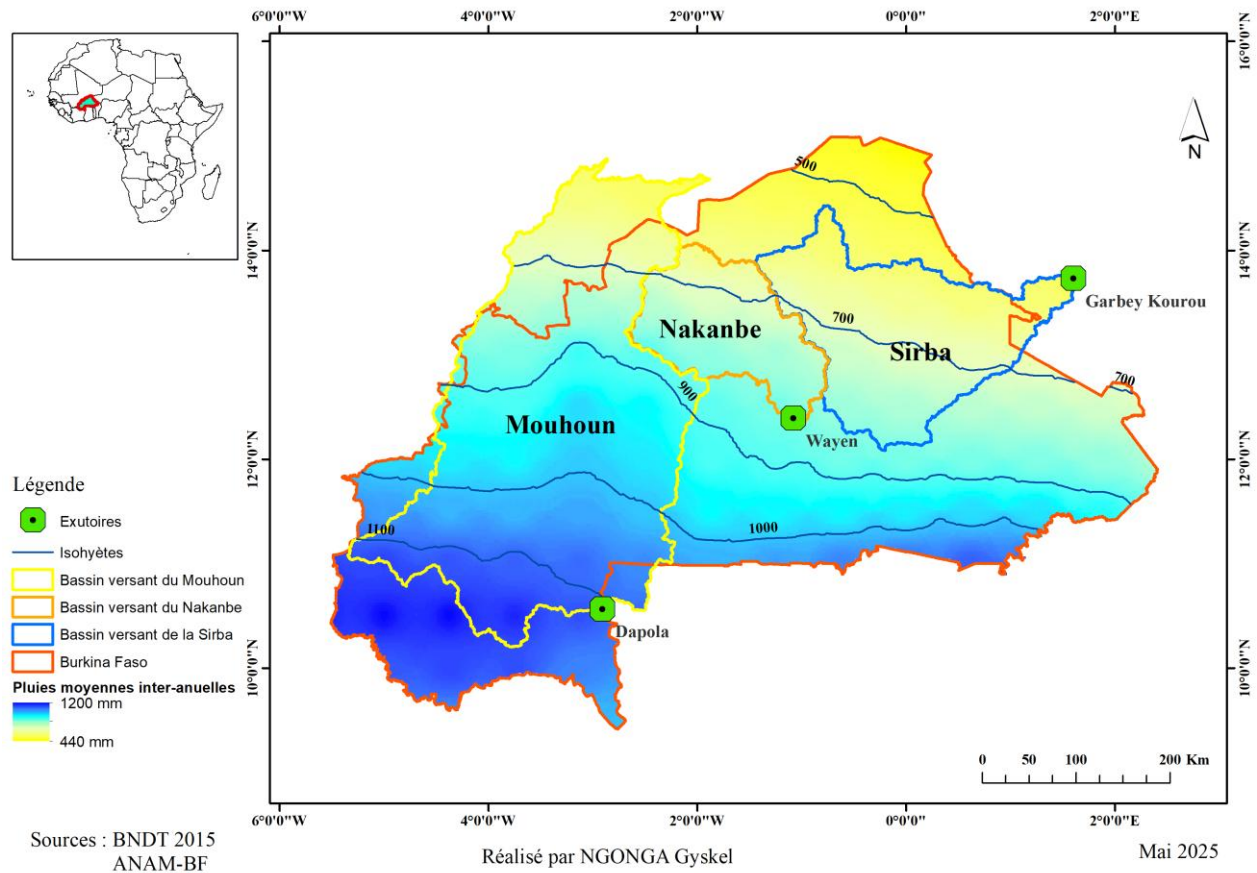


Figure 1 : Carte des zones climatiques du Burkina et des bassins versants étudiés

La carte présente la variation spatiale des pluies sur le Burkina Faso (moyennes de pluies entre 2007 et 2015). La carte recoupe également les bassins versants cibles et permet de mettre en évidence les zones climatiques de ces derniers, qui sont représentatifs du Burkina Faso.

- La zone sahélienne : principalement dans la partie nord du Burkina Faso, c'est la région la plus sèche du Burkina Faso, avec une pluviométrie moyenne de moins de 700 mm/an,

caractérisé par une saison de pluie d'environ 3 mois sur 12 entre juillet et septembre. On la retrouve dans les parties supérieures de nos 3 bassins versants ;

- La zone soudano-sahélienne : présente principalement dans la partie centrale du Burkina Faso. Elle couvre plus de la moitié du territoire avec des précipitations entre 700 et 1000 mm/an, survenant sur un peu plus de 4 mois, généralement entre juin et septembre. Elle constitue la principale zone climatique des bassins du Nakanbé et de la Sirba et la partie centrale du bassin du Mouhoun ;
- La zone soudanienne : essentiellement dans la partie sud du Burkina Faso, avec une pluviométrie moyenne de plus de 1000 mm/an produite par environ 6 mois de pluies allant généralement de mai à octobre. De nos 3 bassins versants, on la retrouve uniquement dans la partie sud du bassin versant du Mouhoun.

IV.2 Données de l'étude

IV.2.1 Données satellitaires de pluies

Notre étude s'intéresse aux données de précipitations satellitaires de 2 types, dont nous avons déjà fait la présentation détaillée dans la revue de la littérature. Les tableau 1 et 2, présente les produits des différentes approches sur lesquelles nous mènerons notre étude :

Tableau 1 : Description des produits *Top-down*

Produits satellitaires	Significations	Sources des données	Résolutions spatiales	Couvertures spatiales	Résolutions temporelles	Couvertures temporelles	Latences	Références
ARC 2	Africa Rainfall Estimate Climatology v2.0	S&M	0,1°	Afrique	Journalière	1983 – A nos jours	2 jours	(Novella et al. 2013)
CHIRPS 2	Climate Hazards group InfraRed Precipitation with Stations v.2	S.M.M	0,05°	Land, 50° N/S	Journalière	1981 – A nos jours	2 semaines	(Funk et al. 2015)
RFE2	Rainfall Estimate, version 2	S&M	0,1°	Afrique	Journalière	2001 – A nos jours	4 heures	(Love et al. 2004)
TAMSAT 3.1	Tropical Applications of Meteorology using Satellite data and ground-based observation v.3.1	S&M	0,0375°	Afrique	Journalière	1983 – A nos jours	~ 1 semaine	(Maidment et al. 2017)

S.M.Mo= satellite, mesure au sol et modèle : soit les données issues de la combinaison d'observation satellitaire, de mesures au sol et de réanalyse de modèle ;
S&M = satellite & mesures au sol : soit des données issues de la combinaison des données d'observation satellitaire et des données de mesures au sol.

Tableau 2 : Description des produits Bottom-up

Produits satellitaires	Significations	Sources des données	Résolutions spatiales	Couvertures spatiales	Résolutions temporelles	Couvertures temporelles	Latences	Références
SM2RAIN-ASCAT	Soil Moisture to Rain applied on Advanced Scatterometer	S&M	0,1°	Mondiale	Journalière	2007 – 2022	2 – 3 jours	(Brocca et al. 2019)
SM2RAIN-CCI	Soil Moisture to Rain applied on ESA Climate Change Initiative	S	0,25°	Mondiale	Journalière	1998 – 2015	Stopped	(Ciabatta et al. 2018)
SM2RAIN-GPM	Soil Moisture to Rain applied on Global Precipitation Measurement	S&M	0,25°	Quasi-mondiale	Journalière	2007 – 2018		(Massari et al. 2020)

S= Satellite : soit les données issues d’observation satellitaire ; S&M = Satellite & mesures au sol : soit des données issues de la combinaison des données d’observation satellitaire et des données de mesures au sol.

IV.2.2 Données de préparation du modèle

Pour la préparation du modèle hydrologique, les données suivantes ont été utilisées :

- Données numériques d'élévation de terrain : qui sont, dans notre cas, des données de type DTM (Digital Terrain Model) de résolution 30 x 30 m et une précision verticale de 1 à 3 m, obtenue à partir du modèle numérique d'élévation Copernicus mondial pour les forêts et les bâtiments (FABDEM, via le site <https://github.com/DahnJ/Awesome-DEM>)..
- Carte des sols : extraite de la carte de sol de la FAO, via le site fao.org, sous forme de fichier raster rééchantillonné pour une résolution de 30 x 30 m.
- Carte d'utilisation des sols : extrait d'une carte d'utilisation des sols globale de 2015, via le site land.copernicus.eu. Ces données ont été téléchargées sous forme de raster de résolution 100 m et rééchantillonnées à 30 x 30 m.
- Données de températures minimales et maximales : données spatialisées, obtenues sur l'étendue de notre zone d'étude sous format NetCDF, via le site de la NASA (power.larc.nasa.gov), traité pour les adapter à notre résolution de 30 x 30m, puis traitées sous R afin de calculer l'ETP via la formule de Hargreaves et Samani (1985).

$$ETP = K \times Ra \times (Ta + 17.8) \times \sqrt{T_{max} - T_{min}} \quad (1)$$

Où : ETP : Évapotranspiration Potentielle [mm/j] ; Ra : rayonnement extraterrestre [MJ/m² .j] ; K : Coefficient empirique (par défaut 0.0135) ; Ta : Température moyenne journalière [°C] ; Tmax & Tmin : Température maximale journalière & Température minimale journalière [°C].

IV.2.3 Données d'observation des stations

Les données d'observation de débits sur nos trois bassins versants ont été obtenues, à la station de Dapola pour le bassin du Mouhoun, à la station de Wayen pour le bassin du Nakanbé et à la station de Garbey Kourou pour le bassin de la Sirba, toutes par le biais de la Direction des ressources en Eau (DGRE) du Burkina Faso. Le tableau 3 présente pour chaque bassin la période de données de débits observés obtenues et la figure 2 présente les lacunes des données de débits aux différentes stations sur la période d'étude allant de 2007 à 2024

Tableau 3 : Périodes de débits observées pour les stations exutoires de chaque bassin versant

Station	Dapola (Mouhoun)	Wayen (Nakanbé)	Garbey Kourou (Sirba)
Taille du bassin versant [km ²]	100500.91	20863.64	38751.88
Périodes de débits observées	1998 - 2024	1998 - 2024	1998- 2017

Chaque bassin versant est désigné ici par le nom de la station à la laquelle ledit bassin versant est étudié. Les périodes sont déduites des fichiers de données de la DGRE du Burkina Faso et le taux de lacunes correspond à celui sur l'ensemble de la période disponible par bassin versant.

IV.3 Outils de traitement

Des outils aux fonctionnalités bien définies et maîtrisées ont été nécessaires à la réalisation de la présente étude, à savoir :

- ArcGIS : logiciel SIG, utilisé pour la réalisation des différentes cartes thématiques et ayant servi de support au modèle hydrologique SWAT ;
- ArcSWAT : extension du modèle SWAT sur ArcGIS, utilisé pour la préparation de modèle hydrologique des différents bassins versants ;
- Google scholar : Plate-forme documentaire, sur laquelle nous avons pu recueillir la plupart des articles et documents ayant servis à notre état de l'art ;
- M.S Access : système de gestion des bases de données relationnelles, utilisé pour le traitement de la base de données SWAT ;
- M.S Excel : logiciel de traitement de données numériques (tableur), ayant servi pour le traitement de fichiers CSV et calculs de bases ;
- M.S Word : logiciel de traitement de texte, utilisé pour la rédaction des différents rapports de progression et du présent mémoire ;
- QGIS : Logiciel SIG, utilisé pour un traitement plus rapide de certaines données SIG ;
- R-Studio : environnement de développement utilisant le langage de programmation R, utilisé pour le traitement des fichiers NetCDF et le traitement et la présentation dynamique des résultats de modélisation ;
- SWAT-CUP : logiciel d'étalonnage et d'analyse d'incertitude destiné au modèle SWAT, utilisé, pour effectuer l'ensemble des processus de calibration et validation sur nos bassins versants ;

- Zotero : logiciel de gestion de référence bibliographique, utilisé afin de constituer notre base de données bibliographique et générer la bibliographie du présent mémoire.

IV.4 Processus de modélisation hydrologique

IV.4.1 Périodes de mise en route, de calibration et de validation

La modélisation hydrologique comprend de façon intrinsèque trois étapes que sont : (1) La mise en route, étape qui sert à habituer le modèle au processus que l'on souhaite modéliser. Une période de 2 à 3 ans est généralement suffisante pour permettre une bonne chauffe du modèle (à l'image d'un moteur que l'on chauffe avant utilisation plus importante). La période de mise en route ou de chauffe, si l'on se réfère à l'image donnée, a été prise à 2 ans pour notre étude. (2) La calibration ou étalonnage qui consiste en un ajustement des paramètres pris dans un intervalle défini, afin de déterminer le jeu de paramètres qui permet de reproduire au mieux le processus ciblé et elle est indissociable de l'étape de (3) validation qui consiste à confronter les résultats du modèle calibré à une nouvelle série de mesure, afin d'évaluer la transposabilité du jeu de paramètres optimisé, c'est-à-dire d'évaluer la valeur prédictive du jeu de donnée dit calibré. Ces deux étapes indissociables, calibration et validation ont été effectuées sur des périodes recoupées de la période d'étude suivant le schéma de validation appelé test d'échantillonnage fractionnée (*split sample test*), avec 2/3 de la période pour la calibration et 1/3 pour la validation.

En s'intéressant principalement aux périodes de disponibilité de nos produits tels que les présentent les tableaux 1 et 2 ; et à la plage de disponibilité de nos débits observés, la période du produit GPM (allant de 2007 -2018) nous fixe la limite inférieure de notre période d'étude soit l'an 2007, avec une limite supérieure générale sur la plupart de nos produits et observations aux exutoires des bassins versants prise à 2024. Soit donc notre période d'étude allant de 2007 à 2024. Toutefois comme le présente la figure 2, nos observations présentent des lacunes importantes sur certaines périodes, et pour le cas de l'exutoire de la Sirba à Garbey-Kourou les données ne sont disponibles que jusqu'à 2017.

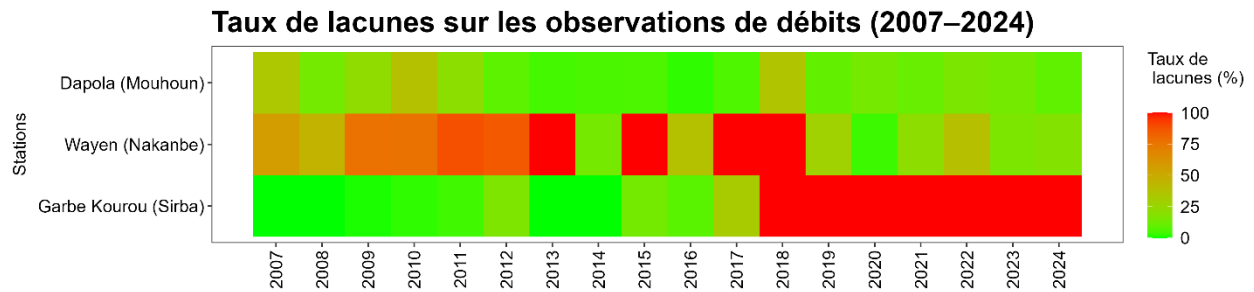


Figure 2 : Taux de lacunes sur les observations de débits (2007-2024)

Compte tenu de ces lacunes aux exutoires et des périodes de disponibilité de nos différents produits nos périodes de calibration-validation (au 2/3 – 1/3) sur les différents bassins et pour les différents produits ont été pris tels que le présente le tableau 4.

Tableau 4 : Période de calibration-validation pour les différents BVs et par produits

Dapola (Mouhoun)						
	Calibration			Validation		
	Période		Nombre d'années	Période		Nombre d'années
TAMSAT	2007	2018	12	2019	2024	6
ARC2	2007	2018	12	2019	2024	6
RFE2	2007	2018	12	2019	2024	6
CHIRPS	2007	2018	12	2019	2024	6
CCI	2007	2012	6	2013	2015	3
GPM	2007	2014	8	2015	2018	4
ASCAT	2007	2017	11	2018	2022	5
Wayen (Nakanbe)						
	Calibration			Validation		
	Période		Nombre d'années	Période		Nombre d'années
TAMSAT	2007	2019	13	2020	2024	5
ARC2	2007	2019	13	2020	2024	5

RFE2	2007	2019	13	2020	2024	5
CHIRPS	2007	2019	13	2020	2024	5
CCI	2007	2011	5	2012	2014	3
GPM	2007	2012	6	2014	2016	3
ASCAT	2007	2016	10	2019	2022	4

Garbey-Kourou (Sirba)

	Calibration			Validation		
	Période	Nombre d'années		Période	Nombre d'années	
TAMSAT	2007	2013	7	2014	2017	4
ARC2	2007	2013	7	2014	2017	4
RFE2	2007	2013	7	2014	2017	4
CHIRPS	2007	2013	7	2014	2017	4
CCI	2007	2012	6	2013	2015	3
GPM	2007	2013	7	2014	2017	4
ASCAT	2007	2013	7	2014	2017	4

NB : Notons que les périodes ainsi définies ne prend pas celles de chauffe.

IV.4.2 *Modèle SWAT*

Développé par l'USDA-ARS (*United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service*), le modèle SWAT (Soil and Water Assessment Tool) est un modèle semi distribué très largement utilisé dans le contexte Africain (YONABA 2020) avec une très large gamme de paramètres permettant de reproduire différents processus physique, chimique et biologique dans un bassin versant. Ce modèle étudie un bassin versant comme un espace subdivisé en sous bassins, eux même subdivisés en unités de réponse hydrologique (URH), considérés comme des éléments homogènes en termes de réponse hydrologique.

Le bilan hydrologique dans SWAT est calculé en deux phases (Abbaspour et al. 2015). La première dite terrestre (land phase) correspondant à la formation de ruissellement (quantité d'eau,

de pesticide, de sédiment, etc.) au sein de chaque URH constituant chaque sous bassins, sur la base des données topographique, de caractéristiques des sols et d'occupations des sols. Ensuite vient la deuxième phase, dite de routage (routing phase ou In-stream phase) dans laquelle les ruissellements formés à la première phase sont mis en inter relation spatiale à travers le réseau hydrographique jusqu'à l'exutoire.

Le bilan hydrologique du modèle SWAT (voir figure 3), pouvant s'effectuer au pas de temps annuel, mensuel ou journalier pour la simulation de la phase terrestre est défini par l'équation :

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (P_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})_i \quad (2)$$

Où : SW_t représente le stock en eau du sol à la fin d'un pas de temps ; SW_0 représente le stock d'eau initial ; P_{day} représente la précipitation tombée au cours du pas de temps considéré ; Q_{surf} représente le ruissellement de surface ; E_a représente l'évapotranspiration réelle ; W_{seep} représente la percolation et Q_{gw} représente l'écoulement de retour issue de la zone non-saturée et qui contribue à l'écoulement total transporté en cours d'eau.

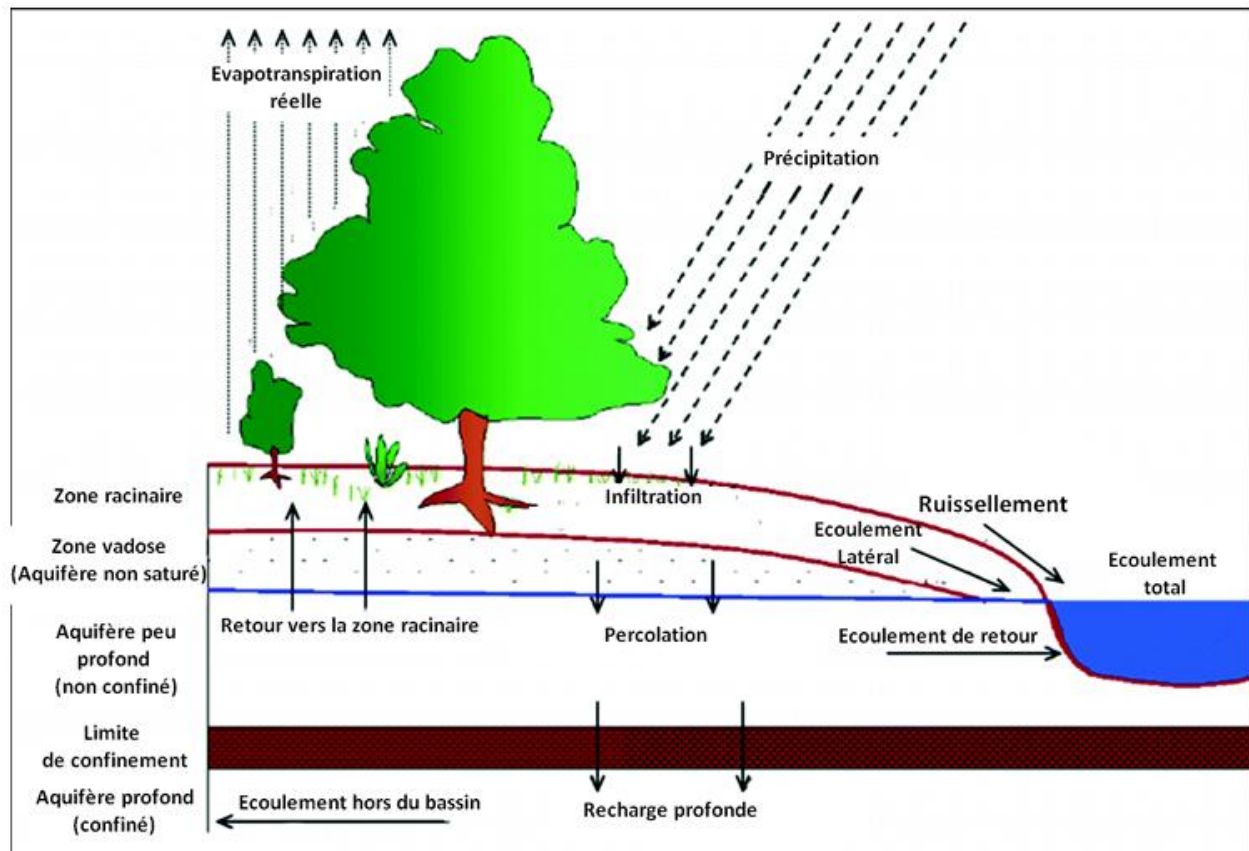


Figure 3 : Bilan hydrologique du modèle SWAT, source :(Arnold et al. 2012)

Le modèle SWAT ainsi défini reste comme beaucoup de modèle sujet à de multiples incertitude lors des opérations de calibration-validation. Afin de faciliter lesdites opérations sur les modèles SWAT des outils spécialisés tel que SWAT -CUP ont vu le jour.

IV.4.3 SWAT-CUP

SWAT-CUP (SWAT-Calibration and Uncertainty Procedures) est un programme autonome de la calibration des modèles SWAT. Il vise à fournir un cadre de décision intégrant cinq procédures de calibrations différentes à savoir : SUFI2 (Sequential Uncertainty Fitting version 2), GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation), ParaSol (Parameter Solution) MCMC (Markov Chain Monte Carlo) et PSO (Particle Swarm Optimization). L'approche de SUFI2 qui est une procédure semi-automatisée, a été retenue dans le cadre de notre étude car elle permet l'ajustement manuel de la plage de paramètres à chaque itération, tout en suggérant une plage optimale à la fin de chaque itération dans le but d'affiner la bande d'incertitude de prédiction à 95% (95PPU) obtenu par échantillonnage hypercube latin. Il permet également de calculer deux indices clés que sont le p-factor et le r-factor, correspondant respectivement au pourcentage des observations encadrées par la 95PPU et à la largeur de la bande d'incertitude à 95% (Abbaspour et al. 2015; 2017).

IV.4.4 Paramètres du modèle

Le choix des paramètres d'un modèle est l'une des plus importante dans l'ensemble du processus de calibration, d'autant plus avec le modèle SWAT, qui dispose d'une large gamme de paramètres afin de saisir au mieux les éléments qui régissent nos processus. Mais le choix d'un trop grand nombre de paramètres pourrait s'avérer problématique tant en termes de longueur de temps d'optimisation que de réelle représentativité. C'est pourquoi un choix minutieux et bien orienté doit être fait afin surtout de permettre au modèle de ne s'intéresser qu'au processus essentielle de notre modèle et éviter, entre autres un risque de baisse de précisions dans la recherche d'optimisation entre des paramètres essentielles et non essentielles. Après une analyse des travaux antérieurs, mené dans le contexte du Sahel Ouest Africain avec le modèle SWAT, nous avons jugé l'ensemble de 28 paramètres de l'étude de Zouré et al. (2023) adéquat pour nos cas d'étude ; paramètres retenus précédemment dans le cadre de l'étude d'un sous bassin du Mouhoun à la station de Dédougou. Ce jeu de paramètre se veut transposable dans le contexte Sahélien d'un bassin à une autre, dans le but de saisir au mieux l'information hydrologique d'un

bassin, comme le présente Zouré et al. (2023) cela en regroupant des paramètres qui rendent compte (1) de la capacité de ruissellement des sols, (2) de la capacité d'écoulement souterrain, (3) des caractéristiques des sols et (4) des écoulements dans les canaux de surface. Toutefois, dans notre contexte d'étude de plusieurs bassins versants, nous avons jugé bon après un premier processus de calibration du modèle avec les 28 paramètres de Zouré et al. (2023) ; d'y associer des paramètres supplémentaires au vu de l'analyse des résultats obtenu par (Souley Tangam et al. 2024) avec des résultats jugé assez satisfaisant sur la Sirba à la station de Garbey-Kourou, (KGE à plus de 0.9 en C/V), suivant nos critères ; montant ainsi notre jeu de paramètre à 31 pour l'étalonnage de nos 3 modèles (Voir tableau 5).

Tableau 5 : Paramètres du modèle SWAT pour l'analyse de sensibilité.

Mode de mise à jour	Noms du paramètre	Description	Plage de variation initiale	Unité
Paramètre de gestion des sols et capacité de ruissellement				
R	CN2	Numéro de courbe de ruissellement	[-1,5 - 0,5]	-
Paramètres de contrôle des écoulements souterrains				
V	ALPHA_BF	Facteur alpha du débit de base	[0 - 1]	Jrs ⁻¹
V	GW_DELAY	Retard des eaux souterraines	[0 - 500]	Jrs
V	SHALLST	Profondeur initiale de l'eau dans l'aquifère peu profond	[0 - 50000]	mm
V	DEEPST	Profondeur initiale de l'eau dans l'aquifère profond	[0 - 50000]	mm
V	GWQMN	Profondeur de l'eau (dans l'aquifère peu profond) déclenchant le reflux	[0 - 5000]	mm
V	GW_REVAP	Coefficient de rééaporassions des eaux souterraines	[0,02 - 0,2]	-
V	REVAPMN	Profondeur de l'eau dans l'aquifère peu profond déclenchant la rééaporassions	[0 - 500]	mm
V	RCHRG_DP	Fraction de percolation des aquifère profonds	[0 - 1]	-
V	GWHT	Hauteur initiale de la nappe phréatique	[0 - 25]	m
V	GW_SPYLD	Rendement spécifique de l'aquifère peu profond	[0 - 0,4]	m ³ .m ⁻³
Paramètres caractéristiques des sols				
R	SOL_Z	Profondeur de la surface du sol jusqu'au fond de	[-1,5 - 0,5]	mm

la couche				
R	SOL_AWC	Capacité en eau disponible de la couche de sol	[-1,5 – 0,5]	mm.m ⁻¹
R	SOL_K	Conductivité hydraulique à saturation du sol	[-1,5 – 0,5]	mm.h ⁻¹
R	SOL_BD*	Densité apparente humide du sol	[-1,5 – 1]	g.cm ⁻³
Paramètres caractéristiques des débits et des chéneaux d'écoulement				
V	CH_N2	Rugosité de Manning pour le cours d'eau principal	[0,01 – 0,3]	s.m ^{-1/3}
V	CH_K2	Conductivité hydraulique effective dans les alluvions du chenal principal	[0,01 – 500]	mm.h ⁻¹
V	ALPHA_BNK	Facteur alpha de débit de base pour le stockage en berge	[0 – 100]	Jrs
V	CH_N1	Rugosité de Manning pour les canaux tributaires	[0,01 – 30]	s.m ^{-1/3}
V	CH_K1	Conductivité hydraulique effective dans les alluvions des canaux tributaires	[0 – 300]	mm.h ⁻¹
R	OV_N	Rugosité de Manning pour les écoulements de surface	[-1,5 – 0,5]	s.m ^{-1/3}
R	LAT_TTIME	Temps de parcours de flux latéral	[-1,5 – 0,5]	Jrs
V	CANMX	Stockage maximal de la canopée	[0 – 100]	mm
R	ESCO	Facteur de compensation de l'évaporation du sol	[-1,5 – 0,5]	-
R	EPCO	Facteur de compensation de l'absorption par les plantes	[-1,5 – 0,5]	-
V	MSK_CO1	Constante de temps de stockage pour un débit normal	[0 – 10]	-
V	MSK_CO2	Constante de temps de stockage pour un faible débit	[0 – 10]	-
V	MSK_X	Pondération du contrôle du débit d'entrée/sortie dans le tronçon d'un chenal	[0 – 0,3]	-
V	TRNSRCH	Fraction de pente du cours d'eau principal entrant dans l'aquifère profond	[0 – 1]	-
R	SLSOIL*	Longueur de la pente pour l'écoulement latéral	[-1,5 – 1]	m
R	SLSUBBSN*	Longueur moyenne des pentes	[-1,5 – 1]	m

*Le mode de mise à jour renseigne sur la façon dont le modèle a été paramétré pour faire varier nos différents paramètres. Soit, **R** = relative : les valeurs de l'intervalle sont prises comme coefficient qui multiplie la valeur existante du paramètre et **V** = replace : les valeurs comprises dans l'intervalle remplacent la valeur du paramètre. La mention (*) indique les 3 paramètres supplémentaires ajouté au jeu de paramètres initialement déduit de l'étude de Zouré et al. 2023.*

IV.4.5 Critères d'évaluation

Afin d'apprécier la performance de nos différents produits de précipitations appliqués à nos modèles hydrologiques, un ensemble de métriques statistiques ont été utilisé pour traduire les performances de nos produits en termes d'ajustement, d'erreur et de biais.

IV.4.5.a. Fonction objectif : le KGE

Le KGE (**Kling-Gupta Efficiency**) est une métrique qui décompose la performance du modèle en 3 composantes principales que sont : la corrélation, le biais et une mesure de la variabilité relative, et la version de 2012 puisse qu'il s'agit d'elle permet de se rassurer que le ratios biais et variabilité ne sont pas corrélé ; cela en utilisant pour la composante de variabilité à la place du ratio des écarts type entre simulés et observés le ratio de la covariance de nos données. Il est donc évident de constater qu'il corrige certaines limites du KGE initialement établie par Gupta et par ricochet, corrige les limites du NSE, **c'est pourquoi nous l'avons retenu comme fonction objectif lors de l'étalonnage de nos modèles.**

Le KGE varie de $-\infty$ à 1, avec pour valeur cible optimale un $KGE = 1$, traduisant un ajustement parfait. D'après Knoben et al. (2019), le KGE ne partage pas les mêmes valeurs seuil que le NSE comme ont tendance à le considérer certains auteurs. Il démontre alors que la valeur traduisant la moyenne entre les observées et les simulés est de $KGE = 1 - \sqrt{2}$, notant de plus que, contrairement au NSE, le KGE n'admet pas de valeur arrêtée marquant le caractère satisfaisant d'un modèle mais il revient à chacun de fixer sa propre limite d'évaluation en fonction de l'objectif visé.

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + \left(\frac{Cv_{sim}}{Cv_{obs}} - 1\right)^2 + \left(\frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}} - 1\right)^2} \quad (4)$$

Où : la composante « r » représente la corrélation linéaire entre les observées et les simulées ; la composante « $\gamma = \frac{Cv_{sim}}{Cv_{obs}}$ » représente la variabilité de la mesure relative, sur la base du ratio des covariance entre simulés et observés et la composante « $\beta = \frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}}$ » représente le biais normalisé.

Compte tenu de résultat de cette étude, nous avons pu fixer des bornes, prisent des références d'ensemble (Moriassi et al. 2015; 2007), pour les différentes composantes du KGE, dans l'optique d'avoir un aperçu globalement acceptable. Soit donc une corrélation acceptable de l'ordre de 0,5, un pourcentage de variation entre la moyenne des simulés par rapport aux observés jugés acceptable de l'ordre de $\pm 10\%$ et un pourcentage de fluctuation de l'écart-type jugé acceptable de

l'ordre de $\pm 20\%$. Nous permettant de donc de définir notre modèle satisfaisant dans l'ensemble pour des $KGE \geq 0,4$.

IV.4.5.b. Autres métriques de performance

Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)

C'est une statistique normalisée qui permet d'évaluer simplement l'ajustement des données simulées par rapport aux données observées. Il indique dans quelle mesure le graphique des données simulées par rapport au graphique des données observées s'ajuste par rapport à la première bissectrice. Le NSE varie entre $-\infty$ et 1, avec pour cible optimale $NSE = 1$, le seuil traduisant la moyenne entre observés et simulés est à $NSE = 0$ et pour un $NSE > 0.5$ cela traduit de performance comportementale d'après Knoben et al. (2019).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{T=1} (Q_{sim}(t) - Q_{obs}(t))^2}{\sum_{i=1}^{T=1} (Q_{obs}(t) - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (3)$$

Où : Q_{sim} correspond aux débits simulés, les sorties du modèle pour les différents produits dans notre cas ; Q_{obs} correspond aux débits observés, les débits mesurés aux différents exutoires ; $\overline{Q_{obs}}$ correspondants à la moyenne des débits observés aux exutoires et T est le nombre total de pas de temps.

Coefficient de détermination (R^2)

C'est une mesure de régression standard, qui mesure la colinéarité entre les observés et les simulés. Il quantifie la proportion de la variance des données mesurées expliquées par le modèle. Avec un optimum de $R^2 = 1$, traduisant un ajustement parfait, sachant qu'il varie entre 0 et 1, où un $R^2 = 0$ traduit une absence de corrélation linéaire.

$$R^2 = \frac{[\sum_i (Q_{0,i} - \overline{Q_0}) \times (Q_{s,i} - \overline{Q_s})]^2}{\sum_i (Q_{0,i} - \overline{Q_0})^2 \times \sum_i (Q_{s,i} - \overline{Q_s})^2} \quad (5)$$

Où : $Q_{0,i}$ et $Q_{s,i}$ correspondent respectivement au débit observé et simulé à la date i ; $\overline{Q_0}$ et $\overline{Q_s}$ correspondent respectivement au débit moyen des observés et des simulés sur toute la période.

Percent Bias (PBIAS)

C'est une métrique qui donne une appréciation de la tendance moyenne des données simulées à être plus grandes ou plus petites que leurs homologues observées. Il mesure également la surestimation et la sous-estimation du biais et l'exprime en pourcentage. La valeur optimale de PBIAS est 0.0, et pouvant varier entre $]-\infty ; +\infty[$ les valeurs de faible magnitude indiquant une

simulation précise du modèle. Les valeurs positives indiquent un biais de sous-estimation du modèle, et les valeurs négatives indiquent un biais de surestimation.

$$PBIAS = \frac{\sum_i (Q_o - Q_s)_i}{\sum_i Q_{o,i}} \times 100 \quad (6)$$

Où : Q_o représente les débits observés, Q_s représente les débits simulés.

Normalized Root Mean Square Error (NRMSE)

Il est une version normalisée du Root Mean Square Error (RMSE), limitant sa variation entre [0 ; 1] pour mieux apprécier, les différentes performances. Il rend compte de l'erreur que le modèle dans la simulation des débits, sa valeur optimale, traduisant une simulation parfaite est de $NRMSE = 0$.

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\sigma_{obs}} \quad (6) \quad \text{Avec :} \quad RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{sim(i)} - Q_{obs(i)})^2} \quad (7)$$

Où : σ_{obs} représente l'écart-type des observés ; n représente le nombre total des observations ; $Q_{sim(i)}$ représente les débits simulés ; $Q_{obs(i)}$ représente les débits observés.

Tableau 6 : Valeurs satisfaisantes des critères d'évaluation

Critères d'évaluation	Minimum satisfaisant	Valeur Optimale
NSE	0.5	1
KGE	0.41	1
R²	0.5	1
PBIAS (%)	±50	0
NRMSE (%)	50	0

IV.4.6 Signature hydrologique

Une signature hydrologique est une valeur d'indice dérivée de séries de données hydrologiques observées ou modélisées, comme les précipitations, le débit ou l'humidité du sol (McMillan et al. 2017). Elles sont conçues pour extraire des informations pertinentes sur le comportement

hydrologique, notamment pour identifier les processus dominants et déterminer la force, la vitesse et la variabilité spatio-temporelle de la réponse pluie-débit. Nous aurons à établir deux signatures hydrologiques pour chacun de nos bassins versant, à savoir la courbe de débits classés et le courbe de débits moyens mensuels.

La courbe de débit classée (Flow Duration Curve - FDC) est une signature influente de la variabilité du débit, qui décrit le comportement hydrologique. Elle représente graphiquement le débit par rapport au pourcentage de temps pendant lequel ce débit est égalé ou dépassé. La FDC est l'une des méthodes les plus informatives pour visualiser l'ensemble des débits d'une rivière, des débits faibles aux événements de crue. La courbe de débit moyen mensuel, Représente les débits moyens pour chaque mois sur une période donnée, reflétant ainsi la variabilité saisonnière et les schémas de l'équilibre hydrique du bassin

IV.4.7 Bilan hydrologique

Le bilan hydrologique est un concept clé basé sur le principe de conservation de la masse, qui quantifie les gains et pertes d'eau au sein d'un système hydrologique, tel qu'un bassin versant, à travers les diverses transformations du cycle de l'eau (Pandi et al. 2023). Il est essentiel pour une gestion durable des ressources hydriques. Ses principales composantes sont les précipitations, représentant l'apport initial, et l'évapotranspiration réelle (ET), qui correspond à la quantité d'eau consommée sous forme de vapeur depuis la surface du sol, la végétation et les plans d'eau. L'ET est estimée à partir de l'évapotranspiration potentielle, ajustée par des facteurs liés à l'indice foliaire, la profondeur et la teneur en eau du sol disponible. Le ruissellement de surface et le flux latéral (ou écoulement hypodermique) représentent les flux d'eau sur et juste sous la surface. La percolation désigne le mouvement de l'eau vers les couches profondes du sol, contribuant ainsi à la recharge des eaux souterraines et des aquifères. Ce processus est modélisé par des approches de routage de stockage et dépend fortement des propriétés du sol, de l'occupation des sols (LULC) et de la topographie (Pandi et al. 2023). L'analyse de ratios est cruciale pour comprendre la répartition des précipitations : le ratio évapotranspiration/précipitation indique la part de l'eau retournant à l'atmosphère sous forme de vapeur, soulignant la consommation de la végétation ; le ruissellement de surface/précipitation est un indicateur clé du risque d'inondation et d'érosion des sols ; et la recharge/précipitation quantifie la contribution essentielle à la recharge des nappes

phréatiques et au maintien des débits d'étiage, le niveau des eaux souterraines contribuant au débit de base des rivières (Singh et al. 2021).

V. RESULTATS

V.1. Précision de la reproduction des pluies par les produits satellitaires

Dans le contexte de bassins versants non-jaugés dominant dans le SOA, saisir le phénomène de précipitation, qui est le principal moyen de subsistance des populations dont la principale source de denrées provient de l'agriculture pluviale, est des plus essentielle. Les produits de précipitation satellitaire offrent alors une alternative majeure aux différentes difficultés économiques, techniques et socio-politico-culturelles auxquelles peuvent être confronter l'amélioration du jaugeage dans le Sahel Ouest Africain. L'étude de Yonaba et al. (2024) sur la performance des produits satellitaires suivants les deux principales approches, ascendante et descendante, nous donne une vue plus précise de la fiabilité de cette alternative et quelle approche serait plus adaptée à notre contexte. Dans le cadre plus particulier de nos bassins versants une rapide analyse de l'ajustement des produits de précipitation satellitaire par rapport aux mesures au sol permettrait un état des faits plus pertinents (voir figure 4).

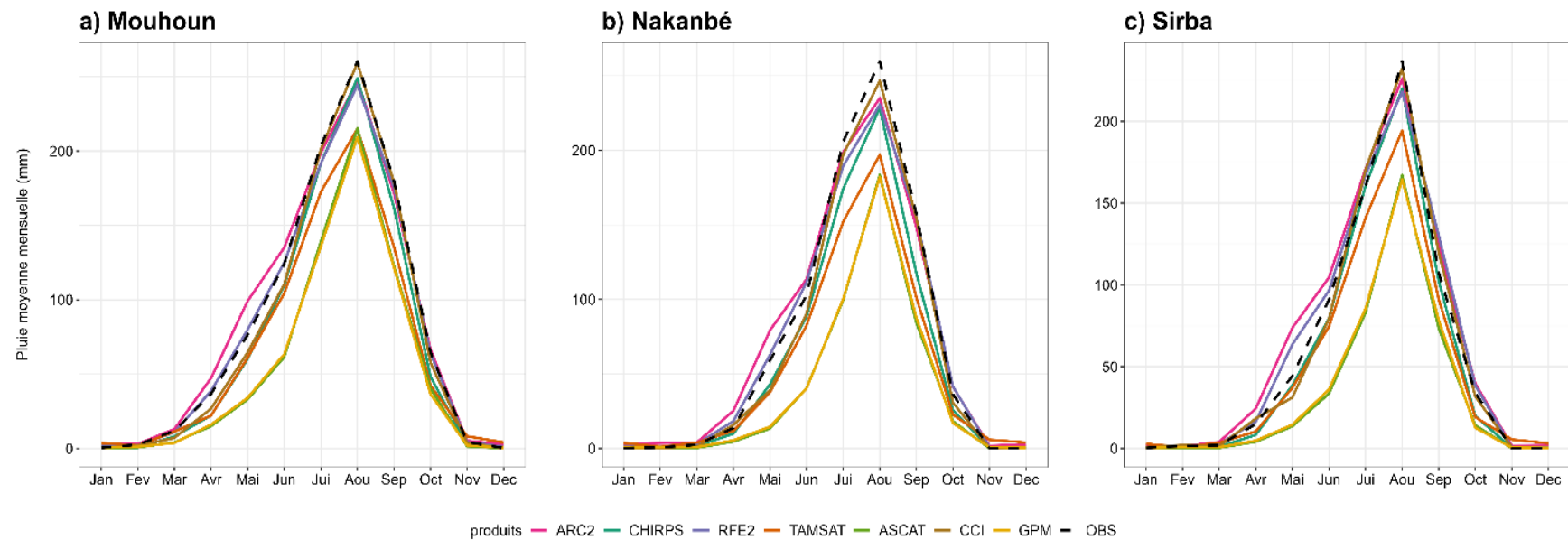


Figure 4 : Pluies moyennes mensuelles sur chaque bassin versant

Rend compte de l'ajustement des différents produits de précipitation face aux mesures au sol des précipitations déduites de stations synoptiques (entre 2007-2015). Considérées comme représentative de nos bassins versant. Les ajustements sur le Mouhoun ont été fait par rapport aux stations de Gaoua, Bobo, Boromo, Ouahigouya et Dédougou, celle du Nakanbé par rapport aux stations de Ouahigouya et Ouagadougou et celle de la Sirba par rapport aux stations de Dori et Fada.

De façon générale sur les trois bassins, RFE2 présente le meilleur ajustement moyen avec des difficultés à reproduire les extrêmes, tout comme le produit CHIRPS qui peine davantage même pour les débits moyens. Mais, tout en restant nettement meilleur que les produits bottom-up qui sont largement en dessous de la moyenne ; à l'exception de CCI qui, en plus d'avoir un bon ajustement comparable à celui de RFE2 dans les différents contextes climatiques de nos bassins versants, semble ne pas avoir de mal à capter les extrêmes des précipitations. Ces résultats rejoignent les conclusions de Yonaba et al. (2024) sur les performances des produits satellitaires au pas de temps mensuel.

V.2. Calibration – Validation (C/V)

Les opérations de calibration-validation à l'aide de l'Outil SWAT-CUP suivant la procédure de SUFI2 est un processus itératif, et les indications de l'auteur note une bonne optimisation des paramètres entre 3 et 4 itérations, chaque itération comprenant au-moins 300 à 500 simulations (pouvant aller jusqu'à 1500 simulations). Dans notre cas, chacune de nos itérations ont été fixées à 500 simulations et le nombre itération sur les périodes de calibration furent fonctions des résultats obtenus pour chaque modèle. Soit pour le Mouhoun, notre fonction objectif, KGE présentait d'excellent résultat dès la deuxième itération, pour un nombre total de trois itérations sur le Mouhoun avec une valeur moyenne des meilleures simulations de chaque produits 0.90. Sur le Nakanbé et la Sirba, l'optimisation fût plus complexe ce qui monta le nombre d'itération par produit à cinq, pour des valeurs maximales moyennes de KGE par produit à 0.69 et 0.80 respectivement sur le Nakanbé et sur la Sirba.



Figure 5 : Résultats de calibration-validation sur le Mouhoun à Dapola

Les différents graphiques présentent l'ajustement et les métriques statistiques de la meilleure simulation par rapport aux observés, de plus les fonctionnalités de SWAT-CUP ont permis de générer des séries de débits simulés continus sur l'ensemble des périodes d'études. La bande d'incertitude à 95% quant à elle n'a été générée que sur les observés. Bien que SWAT-CUP fournisse une bande d'incertitude à 95% sur toute la période d'étude et pour l'ensemble des simulations (le 95ppu No Obs), nous ne nous intéressons qu'à la bande d'incertitude des simulation jugés satisfaisantes qui n'as pu être déduite des 95PPU No Obs.

L'ensemble des résultats jugé satisfaisant sur le Mouhoun présentent comme moyenne des KGE optimum sur l'ensemble des produits des valeurs 0.90/0.80 en C/V, avec des p-factor des meilleures simulations généralement supérieurs à 70%, indiquant une très bonne reproduction des écoulements. Mais, notons également pour les produits ARC2, CHIRPS, TAMSAT, CCI et GPM des valeurs élevés de la largeur de la bande d'incertitude, soit des r-factor > 1.5 (valeur seuil souhaitable pour les débits ($r\text{-factor} \leq 1.5$)) (Abbaspour et al. 2015)). Les produits RFE2 et ASCAT, présentent de façon générale des performances d'ajustements simulés/observés

supérieures, ainsi qu'une largeur de bande plus souhaitable (r -factor < 1.5) tant en calibration qu'en validation. Les deux produits ayant les mêmes tendances en termes de sous estimations (en calibration) et surestimation (en validation des extrêmes d'écoulement).

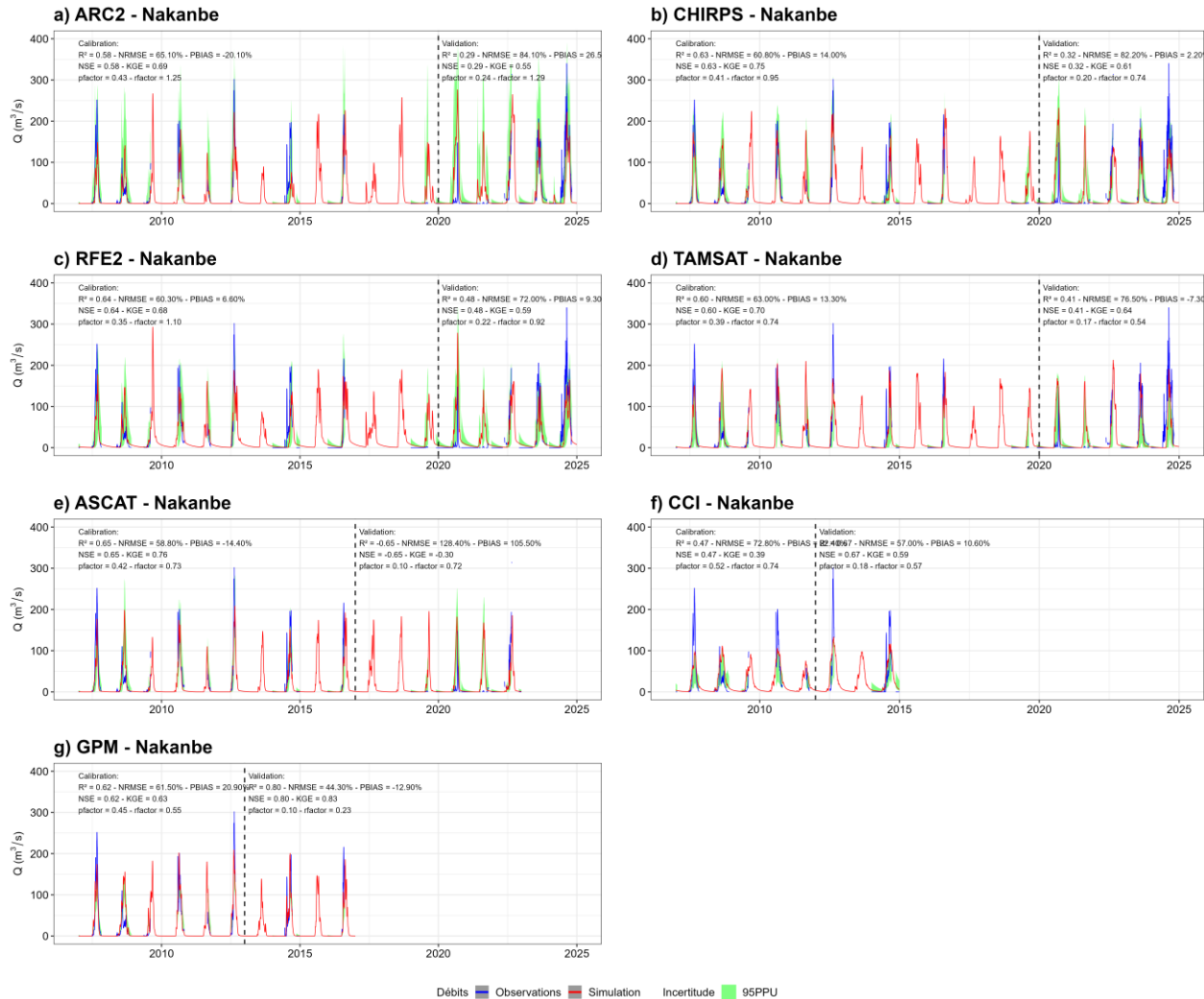


Figure 6 : Résultats de calibration-validation sur le Nakanbé à Wayen

Les différents graphiques présentent l'ajustement et les métriques statistiques de la meilleure simulation par rapport aux observés, de plus les fonctionnalités de SWAT-CUP ont permis de générer des séries de débits simulés continus sur l'ensemble des périodes d'études. La bande d'incertitude à 95% quant à elle n'a été générée que sur les observés.

Sur le Nakanbé, un taux de lacune important est à noter, rendant ainsi l'optimisation des paramètres plus délicate pour l'ensemble des produits. Bien que le r -factor soit dans un intervalle souhaitable, les ajustements des meilleures simulations (p -factor) est assez moindre. Toutefois les produits top-down présentent, du point de vue de la variation d'encadrement des observés entre C/V de meilleure performance que les produits bottom-up. Ces derniers saisissent, en validation

moins de 25% du p-factor obtenu en calibration ; tandis que, l'ensemble de produits top-down arrivent à encadrer en validation en moyenne 50% de la valeur du p-factor obtenu en calibration.

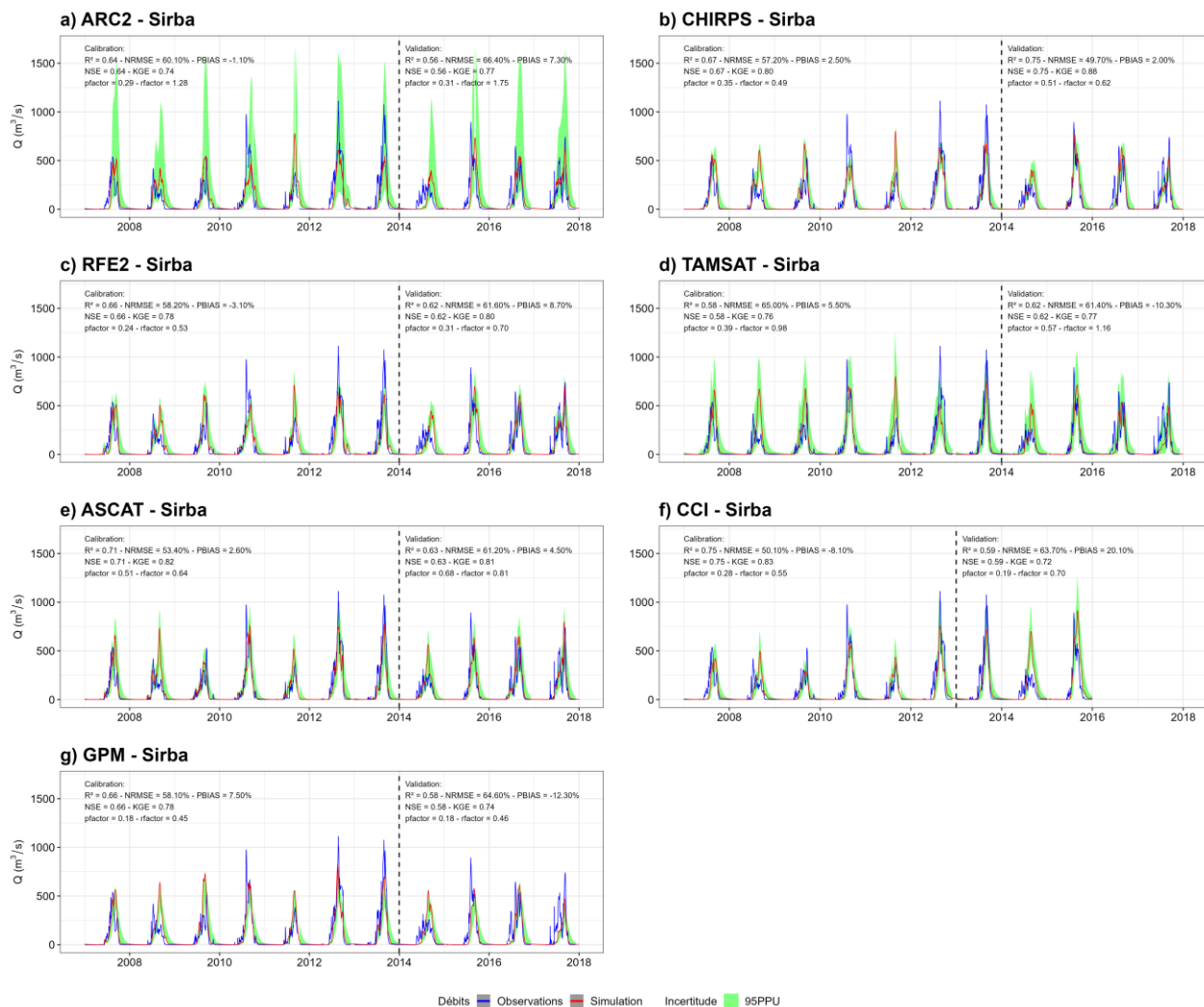


Figure 7 : Résultats de calibration-validation sur la Sirba à Garbey-Kourou

Les différents graphiques présentent l'ajustement et les métriques statistiques de la meilleure simulation par rapport aux observés, de plus les fonctionnalités de SWAT-CUP ont permis de générer des séries de débits simulés continus sur l'ensemble des périodes d'études. La bande d'incertitude à 95% quant à elle n'a été générée que sur les observés.

Sur la Sirba, le produit ASCAT présente sans conteste de meilleurs résultats que l'ensemble des produits. Cependant, les produits top-down présentent une tendance générale supérieure à celle des produits bottom-up (CCI et GPM). Les produits top-down présentent des métriques générales supérieures à celle des produits bottom-up, avec une nette amélioration de performance en validation.

V.3. Performances statistiques des différents produits

Les performances statistiques des différents produits par bassins sont présentées ci-dessous :

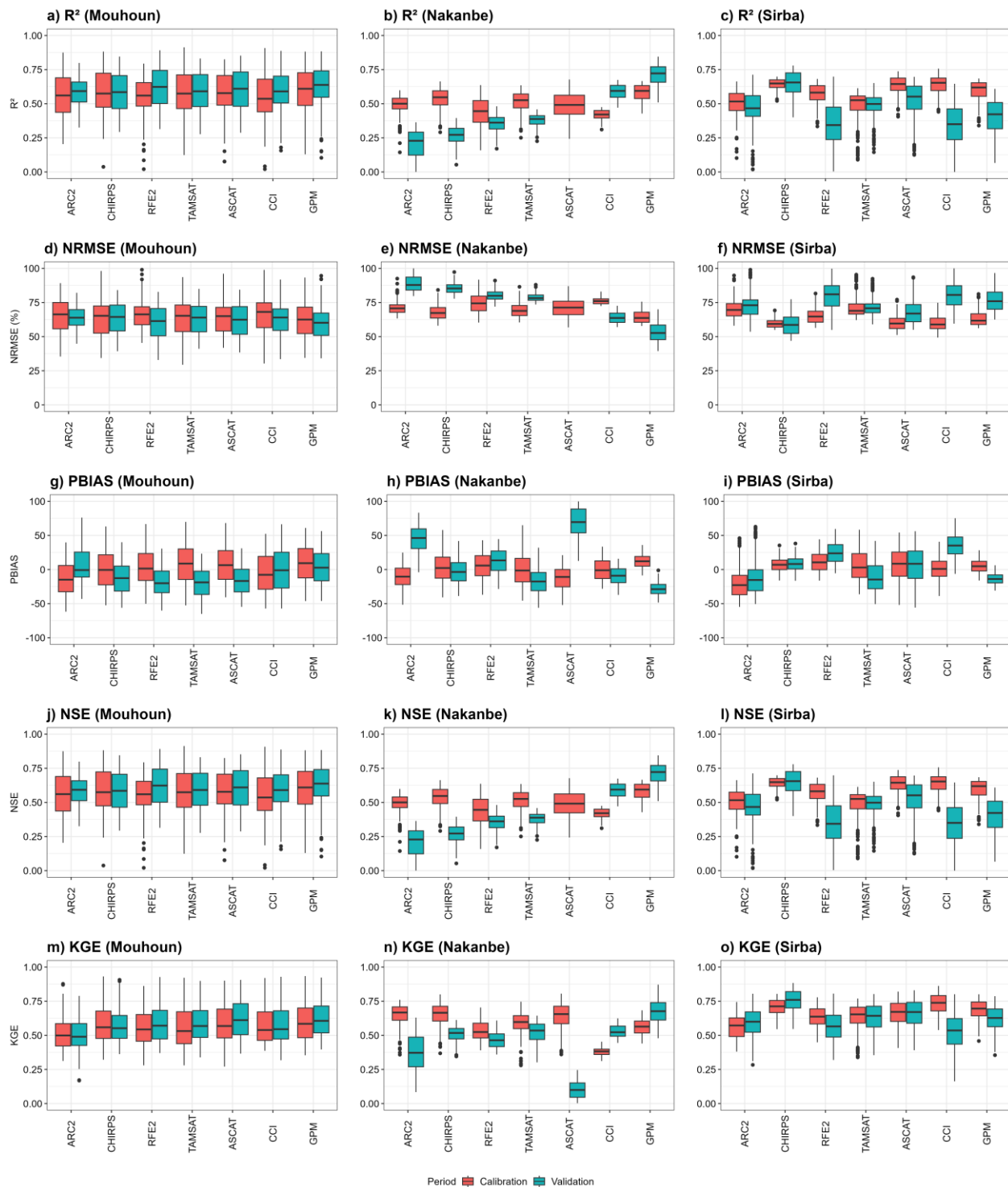


Figure 8 : Performances des simulations satisfaisantes sur toutes les périodes d'étude de chaque BV par produits. Les boxplots présentent la dispersion des métriques des simulations jugées satisfaisantes lors de la simulation d'ensemble avec les paramètres calibrés.

Sur le Mouhoun l'ensemble de métriques présentent des performances et une stabilité C/V des plus optimales. Les métriques d'ajustement tels que le KGE, le NSE et R^2 ont des valeurs médianes de plus de 0.50, avec des optimums atteignant facilement les 0.80 et 0.90 et cela sans d'importantes distinctions entre les produits top-down et les produits bottom-up. On notera également une tendance globale médiane de légère sous-estimation et surestimations des débits (médiane globale des PBIAS proche de 0).

Le Nakanbé révèle la particularité des produits RFE2 et TAMSAT, qui malgré des métriques peu optimales, représente une robustesse certaines entre C/V, pour l'ensemble des métriques. Le produit ASCAT montre d'importante faiblesse, avec une variation importante entre les plages de performance de C/V, notamment avec $NSE < 0$ en validation, bien que sa médiane en calibration montre des performances que l'on qualifie de satisfaisante pour ce critère (NSE médian en calibration ≈ 0.50) ce qui corrobore le biais de sous-estimation en validation, le plus importants de toutes les métriques sur le Nakanbé. Le produit GPM et CCI, contrairement à ASCAT surpasse assez largement les meilleurs produits top-down en termes de variabilité sur les processus de C/V.

Les produits sur la Sirba, présentent des faibles variabilités entre C/V pour l'ensemble des produits. Le produits CHIRPS se démarque assez nettement en termes de stabilité entre C/V, suivie des produits ASCAT et TAMSAT qui malgré de faibles optimums peuvent révéler une fiabilité. Les produits les moins fiables sur la Sirba étant le GPM et CCI avec des corrélations qui, bien de satisfaisantes montre une variabilité C/V plus importante que les autres produits.

Afin d'observer le comportement des en profondeur des différents produits sur chaque, l'on s'intéressa alors à une partie plus affiner des résultats de nos meilleurs simulations, soit une portion de 10%. Ce qui permet de dégager une réelle appréciation des optimums de chaque produit.

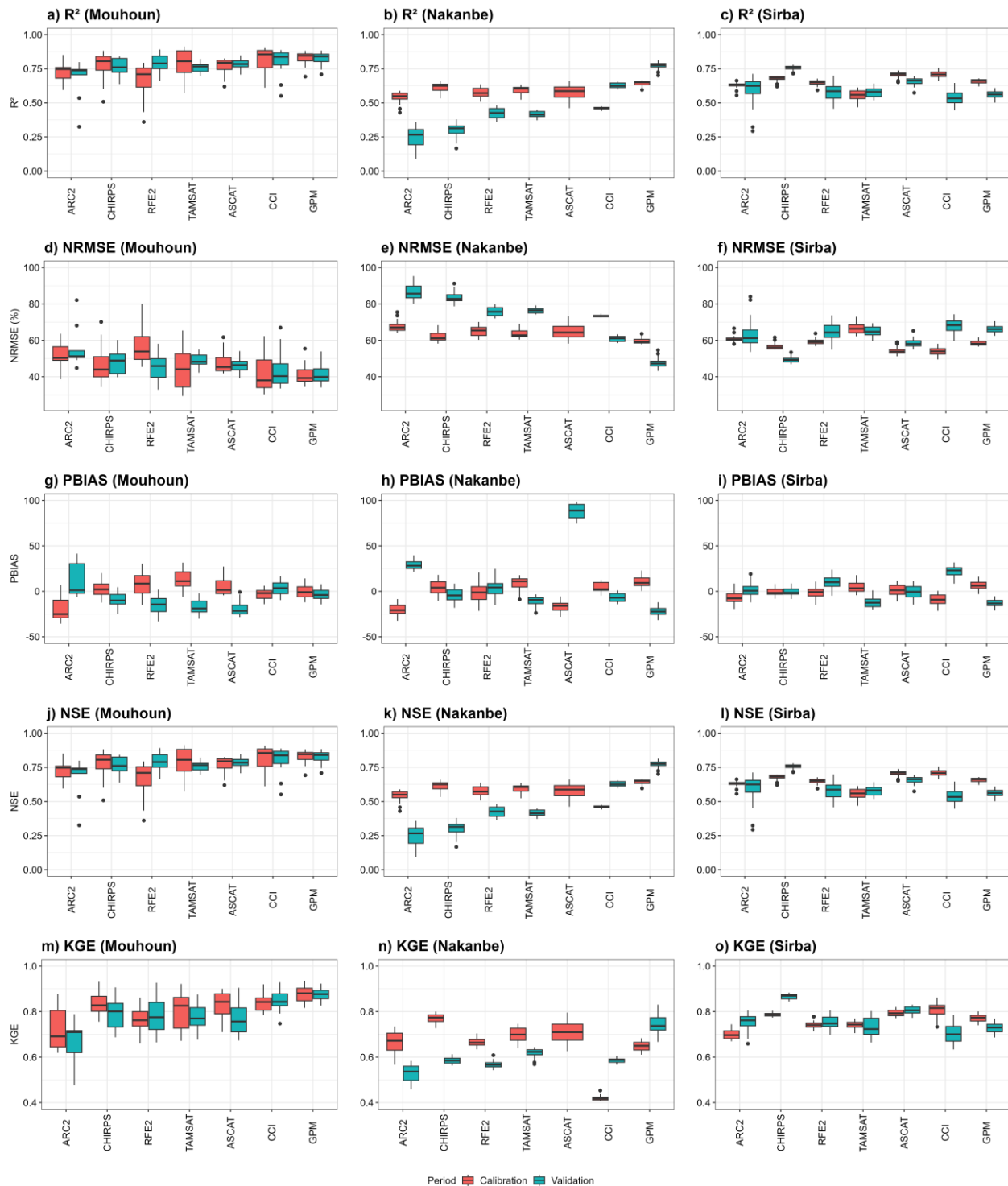


Figure 9 : Métriques du Top-10% des meilleures simulations

Pour une meilleure appréciation des performances des simulations satisfaisantes, l'on s'intéresse au comportement de 10% des meilleurs simulations.

Les performances du Top-10% des meilleurs simulations sur le Mouhoun démarques les produits CCI et GPM des autres en termes de performances de d'ajustements et de biais. Et rend compte de la moindre performance de ARC2 sur le Mouhoun par rapport aux autres produits.

Sur le Nakanbé cette dernière analyse fait davantage ressortir le biais de sous-estimation du produits ASCAT et ces performances moindres. Montre également une réelle variabilité de l'ensemble produits top-down, comme bottom-up, mais avec GPM pouvant partiellement être considéré comme le meilleur produit sur le Nakanbé en performance de corrélation, d'erreur et de biais entre les processus de C/V.

Sur la Sirba, CHIRPS reste le produit avec les métriques les plus souhaitables (ajustement, robustesse entre C/V, erreur et biais)

V.4. Signatures hydrologiques

Quelques signatures hydrologiques. La figures 10 présente la courbe de débit moyen mensuel des différents bassins versants d'après les données observées aux différentes stations et l'ajustement des courbes issus des débits simulés à l'aide des différents produits satellitaires. La figure 11 quant à elle, présente la FDC issus des débits observés aux différentes stations et l'ajustement de celles issues des débits simulés à l'aide des différents produits satellitaires.

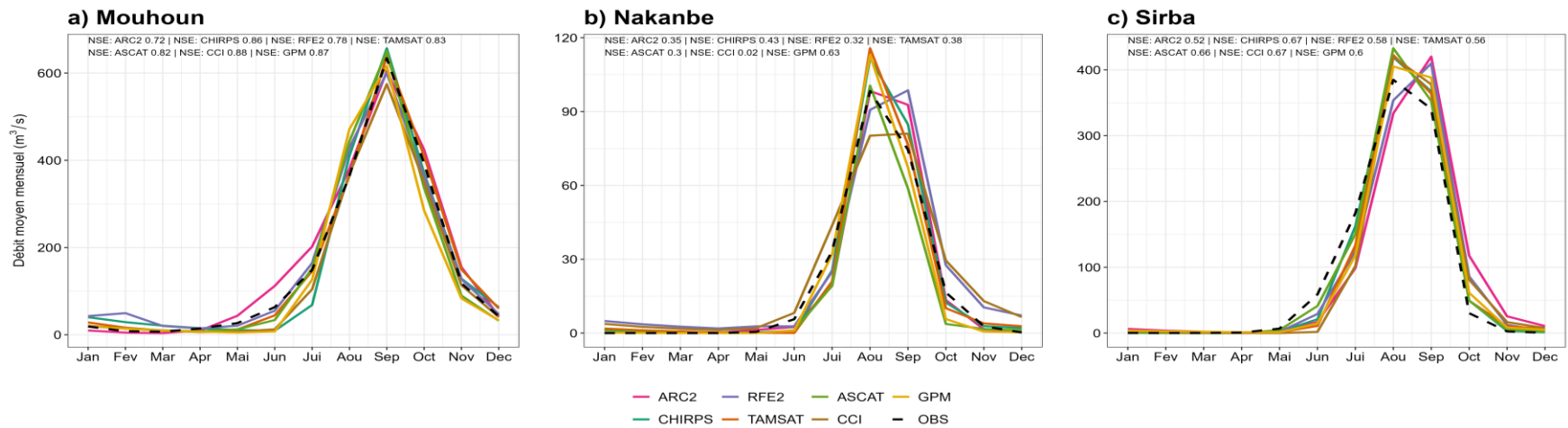


Figure 10 : Ajustement des courbes de débits moyen mensuel des produits par rapport à celle des observés

La courbe de débit moyen journalier est une signature hydrologique qui permet de saisir plus particulièrement les informations sur l'équilibre hydrique global et le comportement à long terme du bassin versant. Une analyse de celle-ci permet d'apprécier les produits s'ajustant le mieux sur le long terme par rapport à des propriétés intrinsèques du bassin (comme le temps de base).

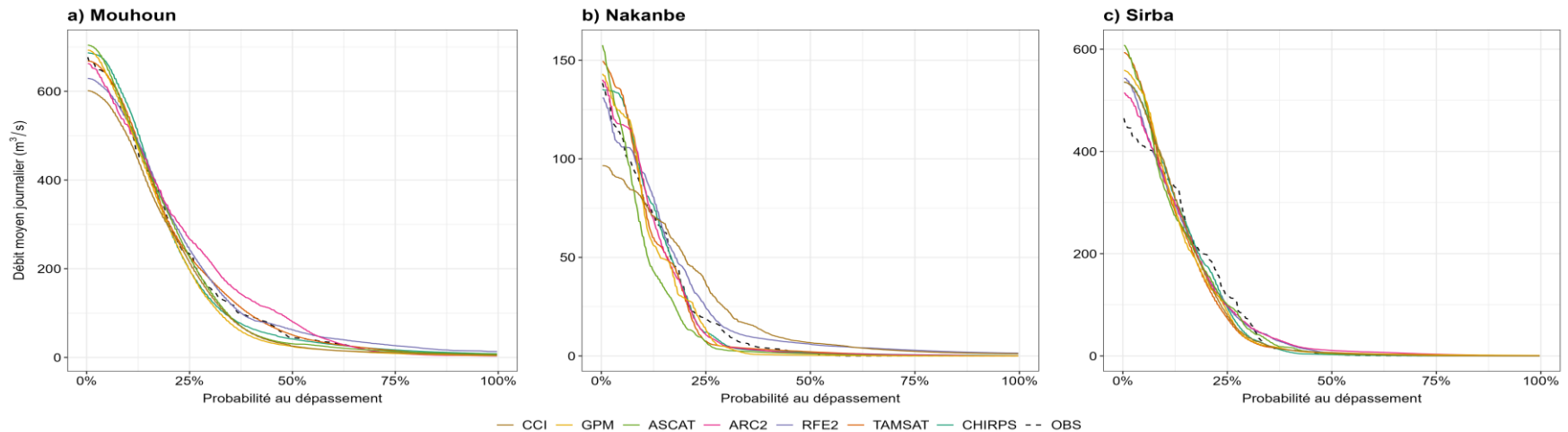


Figure 11 : Les Courbe de débits classés pour chaque produit et par bassin versant.

Elle présente l'ajustement des courbes de débits classés (CDC ou FDC en anglais) des produits par rapport à celle des observés. Les FDC informe sur la probabilité de dépassement des débits possible sur notre cours d'eau (de l'étiage à la crue). Un bon ajustement des produits par rapport à celle-ci traduirait une bonne maîtrise de la variabilité des débits au sein du bassin versant.

V.5. Bilan hydrologique

Au sortir des différents processus d'étalonnage sur nos différents bassins nous avons pu extraire les principales composantes du bilan hydrologiques et estimer leur part vis-à-vis des précipitations qui sont le principal moteur du cycle hydrologique.

Tableau 7 : Bilan hydrologique sur le Mouhoun

Bilan hydrologique sur le Mouhoun								
COMPOSANTES	Obs	ARC2	CHIRPS	RFE2	TAMSAT	ASCAT	CCI	GPM
<i>Précipitations (P) [mm]</i>	964.7	1003.8	856.9	951.7	785.4	625.4	906.3	620.0
<i>ET0 [mm]</i>	1949.9	1949.9	1949.9	1949.9	1949.9	1947.5	1950.0	1954.4
<i>ET [mm]</i>	804.0*	435.2	639.9	624.3	485.8	336.5	505.1	366.2
<i>Ruissellement de surface (Qsurf) [mm]</i>	41.5	52.4	47.8	50.8	49.5	47.8	41.6	43.3
<i>Recharge de l'aquifère profond (R) [mm]</i>	41.0*	298.6	48.9	44.2	26.3	34.5	59.8	36.0
RATIO								
<i>ET/Précipitation</i>	83.3%*	43.4%	74.7%	65.6%	61.9%	53.8%	55.7%	59.1%
<i>Qsurf/Précipitation</i>	4.3%	5.2%	5.6%	5.3%	6.3%	7.6%	4.6%	7.0%
<i>R/P</i>	4.3%*	29.7%	5.7%	4.6%	3.3%	5.5%	6.6%	5.8%

(*) valeurs approximatives issues d'études à grande échelle continentale ou globale, alors pouvant s'avérer peu spécifique et fidèle à une réalité dont pourrai rendre compte des études spécifiques futures.

Tableau 8 : Bilan hydrologique sur le Nakanbé

Bilan hydrologique sur le Nakanbé								
COMPOSANTES	Obs	ARC2	CHIRPS	RFE2	TAMSAT	ASCAT	CCI	GPM
<i>Précipitations (P) [mm]</i>	837.6	858.4	690.0	815.7	623.8	443.7	754.5	447.5
<i>ET0 [mm]</i>	1954.3	1954.3	1954.3	1954.3	1954.3	1952.1	1950.7	1950.6
<i>ET [mm]</i>	700.0*	676.0	525.3	557.1	445.4	308.9	354.7	246.9
<i>Ruissellement de surface (Qsurf) [mm]</i>	18.2	29.4	30.9	35.2	29.7	23.7	34.7	28.0
<i>Recharge de l'aquifère profond ® [mm]</i>	15.0*	7.8	14.8	64.5	24.4	11.8	31.3	3.8

RATIO								
<i>ET/Précipitation</i>	83.6%*	78.8%	76.1%	68.3%	71.4%	69.6%	47.0%	55.2%
<i>Qsurf/Précipitation</i>	2.2%	3.4%	4.5%	4.3%	4.8%	5.3%	4.6%	6.2%
<i>R/P</i>	1.8%*	0.9%	2.1%	7.9%	3.9%	2.7%	4.1%	0.8%

(*) valeurs approximatives issues d'études à grande échelle continentale ou globale, alors pouvant s'avérer peu spécifique et fidèle à une réalité dont pourrai rendre compte des études spécifiques futures.

Tableau 9 : Bilan hydrologique sur la Sirba

Bilan hydrologique sur la Sirba								
COMPOSANTES	Obs	ARC2	CHIRPS	RFE2	TAMSAT	ASCAT	CCI	GPM
<i>Précipitations (P) [mm]</i>	692.1	697.3	620.3	701.4	577.8	398.5	670.1	401.1
<i>ET0 [mm]</i>	1955.5	1955.5	1955.5	1955.5	1955.5	1955.5	1952.4	1955.5
<i>ET [mm]</i>	500.0*	404.7	413.7	418.4	441.9	162.1	418.7	220.6
<i>Ruissellement de surface (Qsurf) [mm]</i>	74.2	70.8	70.1	69.7	68.7	70.9	63.7	69.0
<i>Recharge de l'aquifère profond (R) [mm]</i>	15.0*	7.8	14.8	64.5	24.4	11.8	31.3	3.8
RATIO								
<i>ET/Précipitation</i>	72.2%*	58.0%	66.7%	59.7%	76.5%	40.7%	62.5%	55.0%
<i>Qsurf/Précipitation</i>	10.7%	10.1%	11.3%	9.9%	11.9%	17.8%	9.5%	17.2%
<i>R/P</i>	2.2%*	1.1%	2.4%	9.2%	4.2%	3.0%	4.7%	0.9%

(*) valeurs approximatives issues d'études à grande échelle continentale ou globale, alors pouvant s'avérer peu spécifique et fidèle à une réalité dont pourrai rendre compte des études spécifiques futures.

L'analyse des bilans hydrologiques simulés sur les bassins du Mouhoun, du Nakanbé et de la Sirba révèle plusieurs points essentiels sur la qualité des estimations et la dynamique hydrologique régionale. D'abord, les précipitations reconstituées à partir des différents produits satellitaires montrent une variabilité importante. Les données issues des produits top-down (ARC2, RFE2, CHIRPS) apparaissent les plus proches des observations de terrain, avec des écarts souvent limités à ± 15 %. Sur le Mouhoun, par exemple, ARC2 surestime légèrement la pluie annuelle (+4 %) tandis que CHIRPS la sous-estime modérément. À l'inverse, les produits bottom-up tels qu'ASCAT et GPM affichent des déficits plus marqués, atteignant par endroits 30

à 40 % de sous-estimation. Ces différences sont en partie imputables à la nature indirecte de l'estimation à partir de l'humidité du sol et aux périodes de disponibilité plus courtes, notamment pour CCI et ASCAT.

En ce qui concerne les écoulements de surface, les valeurs simulées sont généralement proches des mesures. Les parts de ruissellement représentent en moyenne 4 à 7 % des précipitations annuelles sur le Mouhoun et 9 à 17 % sur la Sirba, ce qui reflète de façon assez satisfaisante les réalités hydrologiques observées. Sur le Nakanbé, les ruissellements modélisés sont légèrement supérieurs aux valeurs mesurées, mais l'écart reste modéré. Ces résultats traduisent la capacité du modèle SWAT à bien reproduire les volumes d'écoulement lorsque la calibration est réalisée sur les débits.

Notons que très peu d'étude référencies les valeurs de recharge et d'évapotranspiration pour les bassins versants étudiés ici. Nous avons qu'une approximation plus ou moins larges de ces deux paramètres sur des études à l'échelle mondiale ou Africaine (Ferreira et al. 2024; Moeck et al. 2020; West et al. 2023). C'est sur la base de ces estimations que nous posons l'analyse suivantes. La répartition entre l'évapotranspiration réelle et la recharge profonde met en évidence des contrastes plus marqués. Selon les produits, la part de l'évapotranspiration varie de 43 à 75 % des précipitations sur le Mouhoun, de 47 à 78 % sur le Nakanbé et de 40 à 76 % sur la Sirba. Ces valeurs sont parfois plus basses que ce qu'on attend généralement dans les zones soudano-sahéliennes, où l'évapotranspiration annuelle atteint fréquemment 60 à 80 %. Parallèlement, les recharges simulées peuvent atteindre des proportions élevées, jusqu'à près de 30 % des précipitations avec ARC2 sur le Mouhoun ce qui est supérieur aux valeurs régionales couramment admises (environ 5 à 15 %). Ces écarts suggèrent qu'une part de la recharge estimée compense la sous-estimation de l'évapotranspiration, un effet typique des calibrations axées exclusivement sur les débits.

VI. DISCUSSIONS

L'étude s'intéresse aux performances des produits satellitaires *top-down* comparativement aux produits *bottom-up* dans le contexte de la modélisation hydrologique avec SWAT et dans différents contextes climatiques. Sur le Mouhoun à Dapola, situé dans une zone climatique essentiellement soudano-sahélienne et soudanienne dans la partie sud du bassin versant montre de façon générale une bonne estimation de l'ensemble des produits avec des performances quasi similaires, mais une analyse plus profonde de nos résultats, révèle une nette performance des produits *bottom-up*, en particulier GPM et CCI par rapport aux produits *top-down*, bien que présentant des bandes d'incertitude des plus importantes. De façon, singulière le produit RFE2 présente les performances très satisfaisantes avec l'incertitude la moins importante de l'ensemble des produits, robuste entre les processus de C/V tandis qu'un autre produit *top-down*, ARC2 se démarque comme le moins performant dans l'ensemble. Cette conclusion d'analyse de métrique, est davantage constater lorsque nous avons porté un œil sur quelques signatures hydrologiques (pouvant être considéré comme des empreinte des processus hydrologique des cours d'eau), tel que les courbes de débits moyen mensuels et la courbe de débits classées sur le Mouhoun à Dapola. L'ajustement sur le Mouhoun montre une convergence nette de l'ensemble des produits vers des performances similaires avec des excentrement net du produits ARC2 qui tend à surestimer des débits moyens (entre Q15% et Q60%) durant la phase ascendante des écoulements entre Avril et Août.

Sur le bassin versant du Nakanbé à Wayen, dans un contexte principalement soudano-sahélien les produits *top-down* pourrait être considéré comme supérieur aux produits *bottom-up* si l'on ne s'intéressait qu'aux performance moyenne entre les meilleures simulations de chaque produit de chaque approche, soit en moyenne $KGE > 0.69$ pour les meilleures simulations des produits *top-down* et une moyenne $KGE \approx 0.67$ pour les meilleures simulations des produits *bottom-up*. Bien que ces valeurs soit intéressante, elle ne rend pas à elle seule compte des performances de produits en termes de robustesse ou de variabilité. Compte tenu de cela les produits *top-down* présente peu de robustesse entre les processus de C/V et des indices d'erreur plus importante par rapport aux produits *bottom-up*, à l'exception d'ASCAT qui est le bien moins robuste de l'ensemble des produits. En rajoutant à ces résultats, des indicateurs intrinsèques des processus d'écoulement sur le Nakanbé, l'on notera clairement qu'aucun produit, sur le long terme ne

semble pouvoir traduire avec fiabilité les écoulements de débit du bassin versant, avec le jeu de paramètres étalonné.

Le processus hydrologique dans le bassin versant de la Sirba à Garbey-Kourou, baignant principalement dans le contexte sahélien, est mieux saisi par les produits CHIRPS les produits bottom-up bien que présentant des sur estimation des crues, mais avec une faible variabilité entre les étapes de C/V, c'est également le cas, de façon générale pour la plupart des produits, montrant la stabilité du jeu de paramètre étalonné. Toutefois, bien que les autres produits top-down soit plus fiable en termes de probabilité de dépassement, ils sont peu performants sur le long terme si l'on se réfère à la courbe de débit moyen mensuel en particulier pour ARC2 et RFE2. Les produits bottom-up étant donc comparativement aux produits top-down, meilleurs sur la Sirba.

En termes de bilan hydrologique, les résultats s'inscrivent dans un ensemble d'observations déjà documentées dans la littérature scientifique sur le SOA et les modèles hydrologiques semi-distribués. De nombreux travaux, notamment ceux du BRGM au Burkina Faso et les études de Leduc et Favreau sur la recharge sahélienne, montrent que l'évapotranspiration représente la plus grande part du bilan hydrologique annuel, tandis que la recharge reste relativement limitée, rarement supérieure à 15 %. Les estimations produites par ARC2, qui dépassent parfois 25 ou 30 % de recharge, apparaissent donc probablement surestimées. De même, les faibles valeurs d'évapotranspiration issues de certains scénarios (notamment ASCAT et GPM) ne sont pas compatibles avec les observations issues de la télédétection (produits MODIS ou GLEAM) et les mesures ponctuelles réalisées en zone soudano-sahélienne.

Cette situation illustre une limite bien connue des approches de calibration mono-objectif. Lorsqu'un modèle comme SWAT est ajusté uniquement sur les débits observés en rivière, il tend à équilibrer le bilan hydrologique en augmentant artificiellement la recharge profonde si l'évapotranspiration est sous-estimée. Cela peut conduire à une bonne reproduction des hydrogrammes et des volumes d'écoulement, mais sans que la répartition réelle des flux verticaux (ET et infiltration) soit correctement représentée. Plusieurs études récentes recommandent donc d'intégrer des contraintes supplémentaires lors de la calibration, par exemple via des données d'humidité du sol, des relevés piézométriques et des estimations indépendantes d'évapotranspiration.

Malgré ces limites, l'étude démontre l'intérêt d'utiliser plusieurs sources de données satellitaires et de comparer leurs effets sur les bilans hydrologiques. La cohérence globale des écoulements simulés constitue un point fort, et les différences de partition entre recharge et évapotranspiration invitent à la prudence dans l'interprétation des résultats. Pour des applications opérationnelles, il sera important de croiser ces simulations avec d'autres indicateurs et de poursuivre la validation multi-variable afin de mieux représenter les processus hydrologiques et réduire les incertitudes.

VII. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cette étude a évalué la performance hydrologique des produits de précipitations satellitaires « *top-down* » et « *bottom-up* » dans le Sahel Ouest-Africain (SOA), une région confrontée à d'importantes lacunes de données hydrométéorologiques. L'objectif principal était de comparer ces produits via la modélisation avec le modèle SWAT sur trois bassins versants du Burkina Faso (Mouhoun, Nakanbé, Sirba). Nos recherches ont permis de tirer plusieurs conclusions clés :
Précision des précipitations : Le produit RFE2 (*top-down*) a montré le meilleur ajustement moyen aux observations au sol. De manière notable, le produit CCI (*bottom-up*) s'est distinguée par un très bon ajustement comparable à RFE2 et une capacité à capter les extrêmes des précipitations.
Performances de simulation hydrologique (débits) :

Sur le Mouhoun, les simulations ont montré des performances optimales et une bonne stabilité C/V, avec des KGE médians supérieurs à 0.50 et des optimums atteignant 0.80-0.90. RFE2 a présenté les performances les plus satisfaisantes avec la plus faible incertitude ($r\text{-factor} < 1.5$).

Sur le Nakanbé, l'optimisation fut plus délicate en raison des lacunes de données importantes. Aucun produit n'a pu traduire de manière fiable les écoulements de débit à long terme sur ce bassin.

Sur la Sirba, le produit ASCAT (*bottom-up*) a montré les meilleurs résultats globaux, et les produits "*bottom-up*" ont été comparativement meilleurs sur ce bassin.

Analyse du bilan hydrologique : L'évapotranspiration représente la majeure partie du bilan annuel, cohérent avec la littérature du SOA. Cependant, ARC2 a produit des estimations de recharge profonde ($> 25\text{-}30\%$) qui sont probablement surestimées, suggérant une compensation d'une sous-estimation de l'évapotranspiration.

En somme, cette étude démontre le potentiel des produits satellitaires maillés pour la modélisation hydrologique dans les régions à données rares d'Afrique de l'Ouest. La précision et la robustesse varient significativement selon le produit, le bassin versant et la variable ; conclusions permettant d'asseoir l'hypothèse 1, sur la différenciation des performances, constaté en fonction des différents contextes climatiques, de même que l'hypothèse 2 avec une reproduction de l'ensemble des produits rendant compte plus ou moins des principales dynamiques.

Il serait, cependant intéressant afin de mieux asseoir ces résultats par des études futures de (1) faire une étude sur les produits satellitaires après correction des biais, ce qui pourrait permettre d'en améliorer les performances et (2) explorer une approche de calibration multi-objectif pour améliorer la reproduction des différentes composantes du bilan hydrologique.

VIII. BIBLIOGRAPHIE

- Abbas, Ather, Yuan Yang, Ming Pan, et al. 2025. « Comprehensive Global Assessment of 23 Gridded Precipitation Datasets Across 16,295 Catchments Using Hydrological Modeling ». Prépublication, janvier 20. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-4194>.
- Abbaspour, E. Rouholahnejad, S. Vaghefi, R. Srinivasan, H. Yang, et B. Kløve. 2015. « A Continental-Scale Hydrology and Water Quality Model for Europe: Calibration and Uncertainty of a High-Resolution Large-Scale SWAT Model ». *Journal of Hydrology* 524 (mai): 733-52. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.027>.
- Abbaspour, Saeid Vaghefi, Raghvan Srinivasan, et Srinivasan Raghvan. 2017. « A Guideline for Successful Calibration and Uncertainty Analysis for Soil and Water Assessment: A Review of Papers from the 2016 International SWAT Conference ». *Water* 10 (1): 6. <https://doi.org/10.3390/w10010006>.
- Arnold, J.R. Kiniry, R. Srinivasan, et J.G. Arnold, J.R. Kiniry, R. Srinivasan, J.R. Williams, E.B. Haney, S.L. Neitsch. 2012. « SWAT-IO-Documentation-2012 ».
- Awange, J.L., V.G. Ferreira, E. Forootan, et al. 2016. « Uncertainties in Remotely Sensed Precipitation Data over Africa: UNCERTAINTIES IN REMOTELY SENSED PRECIPITATION DATA OVER AFRICA ». *International Journal of Climatology* 36 (1): 303-23. <https://doi.org/10.1002/joc.4346>.
- Bakary, Faty, Ali Abdou, Dacosta Honoré, et al. 2018. « Assessment of Satellite Rainfall Products for Stream Flow Simulation in Gambia Watershed ». *African Journal of Environmental Science and Technology* 12 (12): 501-13. <https://doi.org/10.5897/AJEST2018.2551>.
- Beck, Hylke E., Eric F. Wood, Ming Pan, et al. 2019. « MSWEP V2 Global 3-Hourly 0.1° Precipitation: Methodology and Quantitative Assessment ». *Bulletin of the American Meteorological Society* 100 (3): 473-500. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0138.1>.
- Bennour, Ali, Li Jia, Massimo Menenti, et al. 2022. « Calibration and Validation of SWAT Model by Using Hydrological Remote Sensing Observables in the Lake Chad Basin ». *Remote Sensing* 14 (6): 1511. <https://doi.org/10.3390/rs14061511>.
- Beven, Keith, Andrew Binley, BINLEY, et Beven. 1992. « The Future of Distributed Models: Model Calibration and Uncertainty Prediction ». *Hydrological Processes* 6 (3): 279-98. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360060305>.
- Bodian, Ansoumana, Alain Dezetter, Abdoulaye Deme, et Lamine Diop. 2016. « Hydrological Evaluation of TRMM Rainfall over the Upper Senegal River Basin ». *Hydrology* 3 (2): 15. <https://doi.org/10.3390/hydrology3020015>.
- Brocca, Luca Ciabatta, Christian Massari, et al. 2014. « Soil as a Natural Rain Gauge: Estimating Global Rainfall from Satellite Soil Moisture Data ». *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 119 (9): 5128-41. <https://doi.org/10.1002/2014JD021489>.
- Brocca, Paolo Filippucci, Sebastian Hahn, et al. 2019. « SM2RAIN-ASCAT (2007–2018): Global Daily Satellite Rainfall Data from ASCAT Soil Moisture Observations ». *Earth System Science Data* 11 (4): 1583-601. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1583-2019>.
- Brocca, Luca, Christian Massari, Thierry Pellarin, et al. 2020. « River Flow Prediction in Data Scarce Regions: Soil Moisture Integrated Satellite Rainfall Products Outperform Rain Gauge Observations in West Africa ». *Scientific Reports* 10 (1): 12517. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69343-x>.

- Brocca, T. Moramarco, F. Melone, et W. Wagner. 2013. « A New Method for Rainfall Estimation through Soil Moisture Observations ». *Geophysical Research Letters* 40 (5): 853-58. <https://doi.org/10.1002/grl.50173>.
- Chaibou Begou, Seifeddine Jomaa, Sihem Benabdallah, Pibgnina Bazie, Abel Afouda, et Michael Rode. 2016. « Multi-Site Validation of the SWAT Model on the Bani Catchment: Model Performance and Predictive Uncertainty ». *Water* 8 (5): 178. <https://doi.org/10.3390/w8050178>.
- Ciabatta, Luca, Christian Massari, Luca Brocca, et al. 2018. « SM2RAIN-CCI (1 Jan 1998 – 31 December 2015) global daily rainfall dataset ». Version 2. Zenodo, juillet 5. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1305021>.
- Dembélé, Moctar, Bettina Schaepli, Nick Van De Giesen, et Grégoire Mariéthoz. 2020. « Suitability of 17 Gridded Rainfall and Temperature Datasets for Large-Scale Hydrological Modelling in West Africa ». *Hydrology and Earth System Sciences* 24 (11): 5379-406. <https://doi.org/10.5194/hess-24-5379-2020>.
- Dos Santos, R.A. Jucá Oliveira, P. Datok, et al. 2022. « Evaluating the Performance of Multiple Satellite-Based Precipitation Products in the Congo River Basin Using the SWAT Model ». *Journal of Hydrology: Regional Studies* 42 (août): 101168. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101168>.
- Ensor, Scott M. Robeson, Scott M., et Scott M. 2008. « Statistical Characteristics of Daily Precipitation: Comparisons of Gridded and Point Datasets ». *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 47 (9): 2468-76. <https://doi.org/10.1175/2008JAMC1757.1>.
- Faty, Geert Sterk, Abdou Ali, et al. 2023. « Satellite-Based Rainfall Estimates to Simulate Daily Streamflow Using a Hydrological Model over Gambia Watershed ». *Water Science* 37 (1): 151-68. <https://doi.org/10.1080/23570008.2023.2225898>.
- Ferreira, Vagner G., Hao Yang, Christopher Ndehedehe, et al. 2024. « Estimating Groundwater Recharge across Africa during 2003–2023 Using GRACE-Derived Groundwater Storage Changes ». *Journal of Hydrology: Regional Studies* 56 (décembre): 102046. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.102046>.
- Funk, Pete Peterson, Martin Landsfeld, et al. 2015. « The Climate Hazards Infrared Precipitation with Stations—a New Environmental Record for Monitoring Extremes ». *Scientific Data* 2 (1): 150066. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>.
- Ganiyu, Faridah Othman, Wan Zurina Wan Jaafar, et Cia Yik Ng. 2025. « Comprehensive Evaluation of Satellite Precipitation Products over Sparsely Gauged River Basin in Nigeria ». *Theoretical and Applied Climatology* 156 (3): 169. <https://doi.org/10.1007/s00704-025-05388-0>.
- Gosset, Julien Viarre, Guillaume Quantin, et Matias Alcoba. 2013. « Evaluation of Several Rainfall Products Used for Hydrological Applications over West Africa Using Two High-resolution Gauge Networks ». *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 139 (673): 923-40. <https://doi.org/10.1002/qj.2130>.
- Goudiaby, Ansoumana Bodian, Alain Dezetter, Ibrahima Diouf, et Andrew Ogilvie. 2024. « Evaluation of Gridded Rainfall Products in Three West African Basins ». *Hydrology* 11 (6): 75. <https://doi.org/10.3390/hydrology11060075>.
- Houngué, Kingsley Nnaemeka Ogbu, Adrian Delos Santos Almoradie, et Mariele Evers. 2021. « Evaluation of the Performance of Remotely Sensed Rainfall Datasets for Flood Simulation in the Transboundary Mono River Catchment, Togo and Benin ». *Journal of Hydrology: Regional Studies* 36 (août): 100875. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100875>.

- Hughes, E. Kapangaziwiri, T. Sawunyama, et Kapangaziwiri. 2010. « Hydrological Model Uncertainty Assessment in Southern Africa ». *Journal of Hydrology* 387 (3-4): 221-32. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.04.010>.
- Knoben, Wouter J. M., Jim E. Freer, Ross A. Woods, et Wouter J. M. 2019. « Technical Note: Inherent Benchmark or Not? Comparing Nash–Sutcliffe and Kling–Gupta Efficiency Scores ». *Hydrology and Earth System Sciences* 23 (10): 4323-31. <https://doi.org/10.5194/hess-23-4323-2019>.
- Kouakou, Jean-Emmanuel Paturel, Frédéric Satgé, Yves Tramblay, Dimitri Defrance, et Nathalie Rouché. 2023. « Comparison of Gridded Precipitation Estimates for Regional Hydrological Modeling in West and Central Africa ». *Journal of Hydrology: Regional Studies* 47 (juin): 101409. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101409>.
- Kucera, Elizabeth E. Ebert, F. Joseph Turk, et al. 2013. « Precipitation from Space: Advancing Earth System Science ». *Bulletin of the American Meteorological Society* 94 (3): 365-75. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00171.1>.
- Love, Vadlamani Kumar, PingPing Xie, et Wassila Thiaw. 2004. *A 20-YEAR DAILY AFRICA PRECIPITATION CLIMATOLOGY USING SATELLITE AND GAUGE DATA*.
- Maidment, David Grimes, Emily Black, et al. 2017. « A New, Long-Term Daily Satellite-Based Rainfall Dataset for Operational Monitoring in Africa ». *Scientific Data* 4 (1): 170063. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.63>.
- Mankin, Sushant Mehan, Timothy R Green, et David M Barnard. 2025. « Review of Gridded Climate Products and Their Use in Hydrological Analyses Reveals Overlaps, Gaps, and the Need for a More Objective Approach to Selecting Model Forcing Datasets ». *Hydrol. Earth Syst. Sci.*
- Massari, Luca Brocca, Thierry Pellarin, et al. 2020. « A Daily 25 Km Short-Latency Rainfall Product for Data-Scarce Regions Based on the Integration of the Global Precipitation Measurement Mission Rainfall and Multiple-Satellite Soil Moisture Products ». *Hydrology and Earth System Sciences* 24 (5): 2687-710. <https://doi.org/10.5194/hess-24-2687-2020>.
- Massazza, Vieri Tarchiani, Jafet C. M. Andersson, et al. 2020. « Downscaling Regional Hydrological Forecast for Operational Use in Local Early Warning: HYPE Models in the Sirba River ». *Water* 12 (12): 3504. <https://doi.org/10.3390/w12123504>.
- McMillan, Ida Westerberg, Flora Branger, et H. Mcmillan, I. Westerberg, F. Branger. 2017. « Five Guidelines for Selecting Hydrological Signatures ». *Hydrological Processes* 31 (26): 4757-61. <https://doi.org/10.1002/hyp.11300>.
- Moeck, Christian, Nicolas Grech-Cumbo, Joel Podgorski, et al. 2020. « A Global-Scale Dataset of Direct Natural Groundwater Recharge Rates: A Review of Variables, Processes and Relationships ». *Science of The Total Environment* 717 (mai): 137042. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137042>.
- Moriasi, J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel, et T. L. Veith. 2007. « Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations ». *Transactions of the ASABE* 50 (3): 885-900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>.
- Moriasi, R. W. Zeckoski, J. G. Arnold, et C. B. Baffaut,. 2015. « Hydrologic and Water Quality Models: Key Calibration and Validation Topics ». *Transactions of the ASABE* 58 (6): 1609-18. <https://doi.org/10.13031/trans.58.11075>.

- Ndehedehe, Christopher E., Christopher E., et Christopher E. 2019. « The Water Resources of Tropical West Africa: Problems, Progress, and Prospects ». *Acta Geophysica* 67 (2): 621-49. <https://doi.org/10.1007/s11600-019-00260-y>.
- Novella, Wassila M. Thiaw, Nicholas S., et Wassila M. 2013. « African Rainfall Climatology Version 2 for Famine Early Warning Systems ». *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 52 (3): 588-606. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-0238.1>.
- Pandi, Saravanan Kothandaraman, Mohan Kuppusamy, et Dinagarapandi Pandi, Saravanan Kothandaraman * and Mohan Kuppusamy. 2023. « Simulation of Water Balance Components Using SWAT Model at Sub Catchment Level ». *Sustainability* 15 (2): 1438. <https://doi.org/10.3390/su15021438>.
- Qqunta, Pedro Rau, Luc Bourrel, Frédéric Frappart, et Waldo Lavado-Casimiro. 2023. « Assessment of Bottom-Up Satellite Precipitation Products on River Streamflow Estimations in the Peruvian Pacific Drainage ». *Remote Sensing* 16 (1): 11. <https://doi.org/10.3390/rs16010011>.
- Satgé, Dimitri Defrance, Benjamin Sultan, et al. 2020. « Evaluation of 23 Gridded Precipitation Datasets across West Africa ». *Journal of Hydrology* 581 (février): 124412. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124412>.
- Satgé, Denis Ruelland, Marie-Paule Bonnet, Jorge Molina, et Ramiro Pillco. 2019. « Consistency of Satellite-Based Precipitation Products in Space and over Time Compared with Gauge Observations and Snow- Hydrological Modelling in the Lake Titicaca Region ». *Hydrology and Earth System Sciences* 23 (1): 595-619. <https://doi.org/10.5194/hess-23-595-2019>.
- Singh, Francisco Muñoz-Arriola, Muñoz-Arriola, et Francisco. 2021. « Improvements in Sub-Catchment Fractional Snowpack and Snowmelt Parameterizations and Hydrologic Modeling for Climate Change Assessments in the Western Himalayas ». *Hydrology* 8 (4): 179. <https://doi.org/10.3390/hydrology8040179>.
- Souley Tangam, Roland Yonaba, Dial Niang, Mahaman Moustapha Adamou, Amadou Keïta, et Harouna Karambiri. 2024. « Daily Simulation of the Rainfall–Runoff Relationship in the Sirba River Basin in West Africa: Insights from the HEC-HMS Model ». *Hydrology* 11 (3): 34. <https://doi.org/10.3390/hydrology11030034>.
- Stisen, Inge Sandholt, Simon, et Sandholt. 2009. « Evaluation of Remote?Sensing?Based Rainfall Products through Predictive Capability in Hydrological Runoff Modelling ». *Hydrol. Process.*
- West, Charles, Robert Reinecke, Rafael Rosolem, Alan M. MacDonald, Mark O. Cuthbert, et Thorsten Wagener. 2023. « Ground Truthing Global-Scale Model Estimates of Groundwater Recharge across Africa ». *Science of The Total Environment* 858 (février): 159765. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159765>.
- Yang, Su, Phil D. Jones, Hui Jiang, et Zijiang Zhou. 2020. « Development of a Near-real-time Global in Situ Daily Precipitation Dataset for 0000–0000 UTC ». *International Journal of Climatology* 40 (5): 2795-810. <https://doi.org/10.1002/joc.6367>.
- Yates, Sandrine Anquetin, Véronique Ducrocq, Jean-Dominique Creutin, Didier Ricard, et Katia Chancibault. 2006. « Point and Areal Validation of Forecast Precipitation Fields ». *Meteorological Applications* 13 (1): 1-20. <https://doi.org/10.1017/S1350482705001921>.
- YONABA. 2020. « Dynamique spatio-temporelle des états de surface et influence sur le ruissellement sur un bassin de type sahélien : cas du bassin de Tougou (nord Burkina Faso) ». INSTITUT INTERNATIONAL D'INGENIERIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT (Institut 2iE).

- Yonaba, Axel Belemtougri, Tazen Fowé, et al. 2024. « Rainfall Estimation in the West African Sahel: Comparison and Cross-Validation of Top-down vs. Bottom-up Precipitation Products in Burkina Faso ». *Geocarto International* 39 (1): 2391956. <https://doi.org/10.1080/10106049.2024.2391956>.
- Zouré, Cheick Oumar, Arsène Kiema, Roland Yonaba, et Bernard Minoungou. 2023. « Unravelling the Impacts of Climate Variability on Surface Runoff in the Mouhoun River Catchment (West Africa) ». *Land* 12 (11): 2017. <https://doi.org/10.3390/land12112017>.