

**Modélisation hydrologique et projections climatiques dans le bassin de l'Itimbiri (RDC)****[Hydrological Modeling and Climate Projections in the Itimbiri River Basin (DRC)]****Richard sabimana Gasigwa^{1,2*}, Cush Ngondo Luwesi¹ & Roger Kizungu Vumilia^{1,2,3}**¹*Université de Kinshasa. Ecole Régionale de l'eau. BP 117 Kinshasa XI (RDC).*²*Institut National pour l'Etude et la recherche Agronomique. BP 2037 Kinshasa/Gombe (RDC).*³*Université de Kinshasa. Faculté des Sciences Agronomiques. BP 117 Kinshasa XI, République Démocratique du Congo***Résumé**

Le changement climatique constitue une menace croissante pour les systèmes hydrologiques tropicaux, affectant la sécurité hydrique, l'agriculture pluviale et l'équilibre écologique. Le bassin de l'Itimbiri, situé au nord de la RDC, est particulièrement vulnérable à la hausse des températures, à l'irrégularité des précipitations et aux événements extrêmes. Cette étude vise à évaluer l'impact des scénarios climatiques SSP, modélisés avec CNRM-CM6, sur les débits mensuels du bassin à l'horizon 2100, en les intégrant dans le modèle hydrologique SWAT calibré à partir de données locales. Une analyse de sensibilité a permis d'identifier les paramètres clés (CN2, ESCO, Alpha_BF) influençant le ruissellement et la performance du modèle. Les simulations révèlent que, après calibration, le modèle atteint une fiabilité élevée ($NSE = 0,998$; $R^2 = 0,998$; $RMSE = 10,306$), avec une parfaite concordance entre les débits simulés et observés. Le scénario de référence ($\Delta P = 0$, $\Delta T = 0$) confirme cette robustesse. Néanmoins, même des scénarios modérés comme SSP2-4.5 peuvent générer des réponses hydrologiques extrêmes, soulignant la sensibilité du bassin à la variabilité climatique. Les mois humides amplifient le ruissellement et l'infiltration, tandis que les mois secs sont dominés par l'évapotranspiration. L'étude souligne la nécessité de renforcer la gestion adaptive de l'eau, incluant la conservation, l'amélioration des infrastructures et la planification agricole. Ce travail démontre la pertinence d'une approche intégrée entre modélisation climatique et hydrologique pour soutenir une adaptation territoriale durable en région tropicale.

Mots clés : Modélisation hydrologique, Scénarios climatiques SSP, SWAT (Soil and Water Assessment Tool), Calibration manuelle, Bassin versant de l'Itimbiri.

Abstract

Climate change poses a growing threat to tropical hydrological systems, affecting water security, rain-fed agriculture, and ecological balance. The Itimbiri basin, located in northern DRC, is particularly vulnerable to rising temperatures, irregular rainfall, and extreme events. This study aims to assess the impact of SSP climate scenarios, modeled with CNRM-CM6, on monthly flows in the basin by 2100, integrating them into the SWAT hydrological model calibrated using local data. A sensitivity analysis identified the key parameters (CN2, ESCO, Alpha_BF) influencing runoff and model performance. The simulations reveal that, after calibration, the model achieves high reliability ($NSE = 0.998$; $R^2 = 0.998$; $RMSE = 10.306$), with perfect agreement between simulated and observed flows. The reference scenario ($\Delta P = 0$, $\Delta T = 0$) confirms this robustness. Nevertheless, even moderate scenarios such as SSP2-4.5 can generate extreme hydrological responses, highlighting the sensitivity of the basin to climate variability. Wet months amplify runoff and infiltration, while dry months are dominated by evapotranspiration. The study highlights the need to strengthen adaptive water management, including conservation, infrastructure improvements, and agricultural planning. This work demonstrates the relevance of an integrated approach combining climate and hydrological modeling to support sustainable territorial adaptation in tropical regions.

Keywords: Hydrological modeling, SSP climate scenarios, SWAT (Soil and Water Assessment Tool), Manual calibration, Itimbiri watershed.

*Auteur correspondant : Richard sabimana Gasigwa, (richardsabimana@gmail.com). Tél. : (+243) 814349930

id <https://orcid.org/0009-0002-1525-9133>; Reçu le 28/11/2025 ; Révisé le 29/12/2025 ; Accepté le 22/01/2026

DOI : <https://doi.org/10.59228/rcst.026.v5.i1.220>

Copyright: ©2026 Richard et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License (CC-BY-NC-SA 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

1. Introduction

Le changement climatique constitue un défi majeur pour la gouvernance environnementale mondiale, affectant particulièrement les systèmes hydrologiques des zones tropicales comme le bassin versant de l'Itimbiri, en République Démocratique du Congo. Ses manifestations élévation des températures, irrégularité des précipitations, intensification des événements extrêmes perturbent les équilibres écologiques et hydriques, avec des conséquences directes sur l'agriculture pluviale, la sécurité hydrique et les dynamiques socio-économiques (Niang et al., 2014 ; IPCC, 2021).

Pour anticiper ces transformations, la communauté scientifique mobilise des modèles climatiques couplés à des scénarios prospectifs tels que les Shared Socioeconomic Pathways (SSP), développés dans le cadre du CMIP6 (Riahi et al., 2017 ; O'Neill et al., 2017). Le modèle CNRM-CM6, conçu par Météo-France et le CNRS, est l'un des outils de référence pour évaluer les réponses climatiques régionales, notamment en Afrique centrale (Volodko et al., 2019).

Dans ce contexte, le bassin de l'Itimbiri, fortement dépendant des précipitations saisonnières pour ses usages agricoles, domestiques et économiques, apparaît particulièrement vulnérable. Pourtant, les études hydrologiques mensuelles à haute résolution y restent rares. Il est donc essentiel de comprendre comment les scénarios SSP affecteront les débits mensuels dans ce bassin, afin d'orienter les stratégies d'adaptation.

La modélisation hydrologique via le Soil and Water Assessment Tool (SWAT) offre une opportunité de simuler les réponses du bassin aux perturbations climatiques. Combinée aux projections du modèle CNRM-CM6, cette approche permet d'analyser les transformations potentielles du régime des débits tout en tenant compte des spécificités locales (Arnold et al., 1998 ; Amani & Tazen, 2013).

La problématique centrale est donc : Comment calibrer le modèle SWAT pour le bassin versant de l'Itimbiri, afin d'intégrer les scénarios climatiques SSP projetés à l'horizon 2100 et d'évaluer leur influence sur les débits mensuels, en vue d'une gestion durable des ressources en eau et d'une adaptation territoriale en RDC ?

Ce travail repose sur l'hypothèse que le modèle SWAT, une fois calibré avec les données locales, peut

capter avec précision les dynamiques hydrologiques du bassin face aux variations climatiques projetées. Il vise à produire des simulations fiables des débits mensuels actuels et futurs, contribuant ainsi à la planification territoriale et à la résilience des systèmes agricoles.

2. Matériel et méthodes

2.1. Description de la zone d'étude

Le bassin versant de l'Itimbiri, situé dans le nord de la République Démocratique du Congo, couvre une superficie d'environ 5,44 millions d'hectares entre les latitudes 3,562° S et 2,174° S et les longitudes 25,785° E et 22,680° E. Il est majoritairement constitué de sols ferralsols (93,34 %) et soumis à un climat tropical humide, avec des précipitations distribuées toute l'année et des températures moyennes comprises entre 15,38 °C et 35,23 °C.

Dans le cadre de la modélisation hydrologique, le bassin a été subdivisé en 18 sous-bassins d'au moins 5 hectares chacun. Il est drainé par plusieurs affluents secondaires, la rivière Itimbiri constituant le cours d'eau principal, rejoignant le fleuve Congo au nord. Ce bassin représente une ressource hydrique stratégique pour environ 32 territoires administratifs, renforçant son importance socio-économique et écologique dans la région.

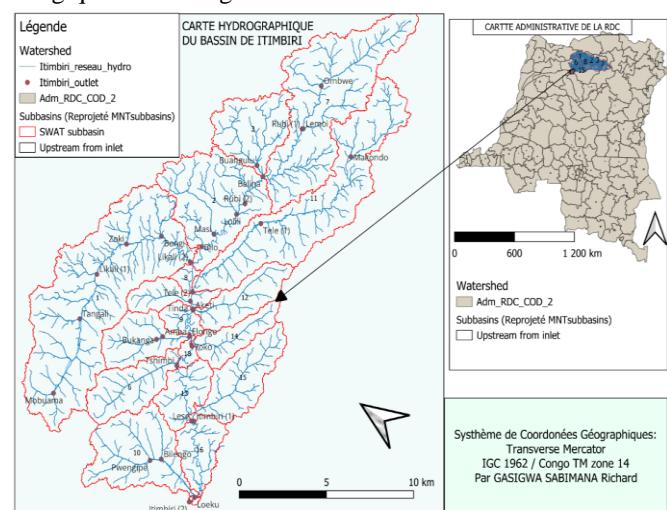


Figure 1 : Bassin versant de Itimbiri (Auteur, 2025)

2.2. Méthodologie

2.2.1. Présentation du modèle SWAT

Le modèle SWAT (Soil and Water Assessment Tool) est un outil semi-distribué conçu pour simuler les processus hydrologiques à l'échelle du bassin versant. Développé par le USDA-ARS, il permet

d'évaluer l'impact des pratiques d'aménagement et du changement climatique sur les débits, les sédiments et la qualité de l'eau. SWAT divise le bassin en sous-bassins, eux-mêmes découpés en unités de réponse hydrologique (HRU) selon les caractéristiques de sol, de pente et d'usage du sol, ce qui permet de représenter l'hétérogénéité spatiale sans complexité excessive. Il fonctionne en continu avec des pas de temps journaliers ou mensuels, en intégrant des processus clés comme le ruissellement, l'infiltration, l'évapotranspiration, la percolation et le drainage souterrain. Il est également compatible avec les systèmes d'information géographique (SIG) tels que QGIS, facilitant la gestion des données spatiales et climatiques.

2.2.2. *Intégration des données météorologiques dans SWAT.*

Les données climatiques utilisées dans cette étude couvrent la période allant de janvier 1901 à décembre 2022. Elles ont été collectées auprès de 32 stations météorologiques réparties dans la zone d'étude, notamment à Balina, Buangulu, Tangali, Mbuama, Itimbiri 2, Likali 2, Bilengo, Pwengipe, Loeku, Lese, Yoko, Aketi, Rubi 3, Itimbiri 1, Tshimbi, Elongo, Bukanga, Amba, Makondo, Tele 1, Tele 2, Likali 1, Zoki, Bongi, Bilo, Rubi 2, Lolili, Masi, Tinda, Rubi 1, Ombwe et Lemoi. Ces données ont permis la création de 32 stations météorologiques virtuelles, réparties de manière à assurer une couverture spatiale représentative de l'ensemble du bassin versant étudié (cf. tableau des stations).

Tableau I. Stations météorologiques virtuelles couvrant le bassin versant

id	Station	Station virtuelle	lat	lon	elev	rain_yrs
1	Balina	s3098n24949e	3.098	24.949	444	120
2	Buangulu	s2930n25115e	2.93	25.115	444	120
3	Tangali	s3562n23193e	3.562	23.193	470	120
4	Mbuama	s3194n22680e	3.194	22.68	468	120
5	Itimbiri 2	s2174n23025e	2.174	23.025	382	120
6	Likali 2	s3271n23888e	3.271	23.888	418	120
7	Bilengo	s2502n22987e	2.502	22.987	455	120
8	Pwengipe	s2674n22854e	2.674	22.854	366	120
9	Loeku	s2543n22697e	2.543	22.697	369	120
10	Lese	s2185n23600e	2.185	23.6	366	120
11	Yoko	s2379n23805e	2.379	23.805	354	120
12	Aketi	s2455n24062e	2.455	24.062	380	120
13	Rubi 3	s2808n24217e	2.808	24.217	403	120
14	Itimbiri 1	s2575n23422e	2.575	23.422	416	120
15	Tshimbi	s2839n23114e	2.839	23.114	375	120

16	Elongo	s2759n23516e	2.759	23.516	390	120
17	Bukanga	s3007n23327e	3.007	23.327	593	120
18	Amba	s2975n23536e	2.975	23.536	593	120
19	Makondo	s2412n25392e	2.412	25.392	593	120
20	Tele 1	s2301n25050e	2.301	25.05	436	120
21	Tele 2	s2638n24236e	2.638	24.236	436	120
22	Likali 1	s3384n23179e	3.384	23.179	417	120
23	Zoki	s3487n24065e	3.487	24.065	398	120
24	Bongi	s3286n24227e	3.286	24.227	327	120
25	Bilo	s3059n24287e	3.059	24.287	550	120
26	Rubi 2	s2697n24936e	2.697	24.936	425	120
27	Lolili	s3032n24557e	3.032	24.557	423	120
28	Masi	s3215n24469e	3.215	24.469	441	120
29	Tinda	s3010n23725e	3.01	23.725	442	120
30	Rubi 1	s2673n25785e	2.673	25.785	444	120
31	Ombwe	s2940n25550e	2.94	25.55	444	120
32	Lemoi	s2547n25509e	2.547	25.509	450	120

2.2.3. *Calibration et validation*

La calibration du modèle SWAT pour le bassin versant de l'Itimbiri a été conduite à partir de données de débit observées à l'exutoire, en particulier à la station d'Aketi. Une analyse de sensibilité a permis d'identifier les paramètres hydrologiques les plus influents (CN2, SOL_AWC, ESCO, ALPHA_BF, CH_K2). La calibration a été réalisée via l'algorithme SUFI-2 dans l'outil R-SWAT, optimisant les intervalles de paramètres et quantifiant l'incertitude des simulations à travers l'indicateur 95PPU. Les données de la période 1951–1956 ont été utilisées pour la calibration, tandis que celles de 1957–1959 ont servi à la validation. Les performances du modèle ont été évaluées à l'aide des indicateurs NSE, R², RMSE et PBIAS, conformément aux normes de Moriasi et al. (2007). Les résultats confirment la fiabilité du modèle SWAT pour la simulation des débits mensuels dans ce contexte tropical.

2.2.4. *Calcul des deltas climatiques mensuels*

Dans le cadre de la modélisation des impacts climatiques sur un bassin versant, une étape clé

consiste à calculer les deltas climatiques mensuels c'est-à-dire les écarts entre les données futures et historiques de température et de précipitation. Cette méthode permet d'ajuster les séries climatiques passées en fonction des scénarios sélectionnés (Chiew et al., 2006 ; Sankarasubramanian et al., 2002 ; Yang et al., 2014), offrant ainsi une base cohérente pour simuler les réponses hydrologiques aux changements projetés.

Deux types de deltas sont calculés pour chaque mois :

- Delta de température (ΔT) :

$$\Delta T = T_{\text{proj}} - T_{\text{hist}}$$

Il exprime la variation absolue (en °C) entre la température projetée et la température historique du mois considéré.

- Delta de précipitation (ΔP) :

$$\Delta P = \frac{P_{\text{proj}} - P_{\text{hist}}}{P_{\text{hist}}}$$

Cette valeur représente la variation relative (en pourcentage) des précipitations futures par rapport aux valeurs historiques.

Ces deltas ont été extraits à partir des données issues des modèles climatiques globaux (CMIP6) sous différents scénarios SSP, et ont été ensuite appliqués aux séries historiques locales afin de construire des jeux de données climatiques futurs corrigés, nécessaires à la simulation hydrologique.

2.2.5. Intégration des données CNRM-CM6

Les projections climatiques de cette étude sont issues du modèle CNRM-CM6-1, développé par le CNRM-CERFACS dans le cadre du programme CMIP6. Elles fournissent des données mensuelles de température et de précipitations jusqu'en 2100, selon divers scénarios SSP. Les données ont été extraites du portail ESGF et adaptées aux exigences du modèle SWAT par reformatage, interpolation spatiale et conversion en fichiers climatiques compatibles. Cette intégration, respectant la cohérence temporelle et géographique, permet de simuler de manière fiable les impacts hydrologiques futurs dans le bassin versant de l'Itimbiri.

2.2.6. Méthode d'analyse de l'impact hydrologique du changement climatique

L'évaluation de l'impact du changement climatique sur le régime hydrologique du bassin versant repose sur une approche empirique dite d'élasticité pluie-débit, utilisée lorsque les données ou les capacités de modélisation sont limitées. Elle établit

une relation directe entre les anomalies climatiques projetées (ΔP et ΔT) et les variations du débit moyen mensuel, en se basant sur les observations historiques (Sankarasubramanian et al., 2002 ; Chiew et al., 2006 ; Yang et al., 2014).

Deux coefficients d'élasticité hydrologique structurent cette approche :

- (α précipitation) : indique la sensibilité du débit à une variation des pluies (généralement entre 1.0 et 2.0).
- β (température) : mesure l'impact de la hausse thermique sur la réduction du débit (entre 0.3 et 0.6 par °C).

Ces coefficients varient selon les caractéristiques du bassin (réactivité hydrologique, évaporation, couverture végétale). La formule de projection utilisée est la suivante :

$$Q_{\text{futur}}(m) = Q_{\text{obs}}(m) \times (1 + \alpha \times \Delta P_m - \beta \times \Delta T_m)$$

où chaque terme exprime le débit futur selon les variations mensuelles de température et de précipitation. Les valeurs de ΔT et ΔP sont extraites des projections SSP du modèle CNRM-CM6-1, selon les scénarios climatiques retenus (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5) (O'Neill et al., 2014 ; IPCC, 2021 ; Météo-France–CNRM, 2019).

Cette méthode offre une base simple mais efficace pour estimer les impacts hydrologiques futurs à partir des données climatiques projetées.

2.2.7. Définition des scénarios SSP

Les scénarios SSP (Shared Socioeconomic Pathways) décrivent des trajectoires socio-économiques associées à différents niveaux d'émission de gaz à effet de serre et de forçage radiatif. Cette étude utilise quatre configurations : SSP1-2.6 (faibles émissions et développement durable), SSP2-4.5 (scénario intermédiaire), SSP3-6.0 (fragmentation régionale avec hautes émissions) et SSP5-8.5 (croissance fossile avec émissions maximales). Ces scénarios ont été convertis en séries mensuelles de température et de précipitations, puis intégrés dans le modèle SWAT pour simuler les débits futurs. L'objectif est d'analyser la sensibilité hydrologique du bassin versant à chacune de ces trajectoires climatiques et d'identifier les niveaux de risque associés.

2.2.8. Etapes de mise en œuvre

- Compilation des séries historiques mensuelles de débit (Q_{obs})

- Obtention des anomalies climatiques projetées (ΔP , ΔT) selon les scénarios
- Application de la formule d'élasticité mois par mois
- Analyse des écarts absolus et relatifs entre les débits futurs et historiques
- Synthèse des tendances saisonnières et annuelles projetées

2.2.9. Justification de la méthode

Cette approche, bien que simplifiée, permet de fournir une estimation rapide et robuste de la réponse hydrologique d'un bassin aux changements climatiques. Elle est particulièrement utile pour les études exploratoires, les zones à données limitées, ou les analyses de sensibilité à court terme. Elle constitue également une base pour affiner les scénarios à l'aide de modèles plus complexes comme SWAT dans une seconde phase (Arnold et al., 1998 ; Gassman et al., 2007 ; Pereira et al., 2016).

3. Résultats

3.1. Calage initiale du débit

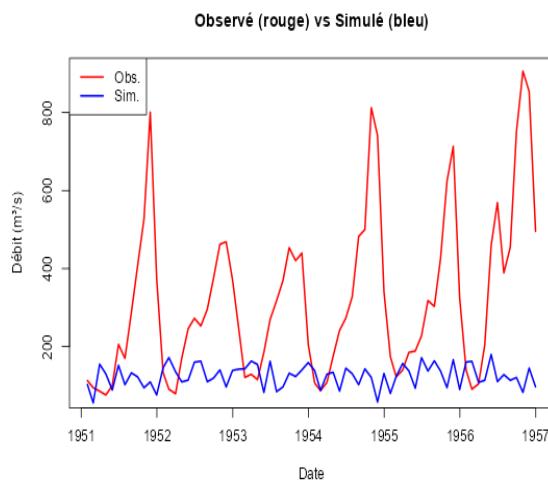


Figure 1. Calage initiale du débit

Les résultats de la phase de validation initiale du modèle SWAT indiquent une performance très faible dans la reproduction des débits observés du bassin de l'Itimbiri. Les indicateurs statistiques — NSE = -0,945 ; R^2 = 0,033 ; PBIAS = -61,0 % ; RMSE = 291,807 — révèlent une inadéquation marquée entre les données simulées et mesurées, avec une forte sous-estimation des débits et une faible corrélation.

Ces résultats suggèrent que le modèle, dans sa configuration actuelle, ne parvient pas à représenter convenablement la dynamique hydrologique du bassin. Une recalibration approfondie est nécessaire, impliquant à la fois des ajustements manuels et

automatiques, précédés d'une analyse de sensibilité ciblée pour identifier les paramètres les plus influents. Cette démarche vise à optimiser la qualité des simulations et à garantir la fiabilité des projections hydrologiques futures.

3.2. Analyse de sensibilité

- Analyse de la variabilité saisonnière du débit et des flux hydrologiques issus de la simulation SWAT

Tableau II. Variabilité saisonnière du débit et des flux hydrologiques

Mois	Débit mesuré (m ³)	SURQ_RTO (Ruisseau)	LATQ_RTO (Écoulement latéral)	PERC_RTO (Infiltration)	ET_RTO (Évapotranspiration)	TILEQ_RTO (Écoulement sous-drainé)	PET (Évapotranspiration potentielle) mm/jour
Janvier	113.01	28.25	22.6	33.9	20.34	7.91	24.86
Février	94.71	23.67	18.94	28.41	17.05	6.63	21.69
Mars	85.82	21.46	17.16	25.75	15.47	6.01	19.69
Avril	75.99	19	15.2	22.8	13.68	5.32	17.36
Mai	100.41	25.1	20.08	30.12	18.07	7.03	23.09
Juin	205.82	51.46	41.16	61.75	37.05	14.41	47.34
Juillet	169.87	42.47	33.97	50.96	30.58	11.89	39.17
Août	287.86	71.97	57.57	86.36	51.82	20.15	66.73
Septembre	406.54	101.64	81.31	121.96	73.18	28.46	94.68
Octobre	527.7	131.93	105.54	158.31	94.99	36.94	123.37
Novembre	800.9	200.22	160.18	240.27	144.16	56.06	176.2
Décembre	374.34	93.59	74.87	112.3	67.38	26.22	87.05

L'analyse hydrologique simulée du bassin de l'Itimbiri révèle une forte variabilité intra-annuelle du débit, étroitement liée à la saisonnalité climatique. Durant la saison sèche (janvier–avril), les faibles précipitations limitent les débits (75–113 m³), avec des valeurs modérées de ruissellement, d'infiltration et d'écoulement latéral, tandis que l'évapotranspiration reste élevée. Lors de la saison de transition (mai–juillet), le retour progressif des pluies entraîne une hausse des débits (jusqu'à 205 m³), accompagnée d'une saturation accrue des sols.

La saison humide (août–novembre) marque le pic hydrologique du bassin, avec des débits maximaux atteignant 800,9 m³ en novembre, soutenus par un ruissellement de surface > 200 mm, une infiltration > 240 mm et une évapotranspiration > 140 mm. Enfin, en décembre, bien que les débits diminuent à 374 m³, l'inertie hydrologique liée aux sols saturés prolonge les écoulements.

Globalement, les simulations montrent une excellente cohérence entre les régimes climatiques et hydrologiques : les pics coïncident avec les pluies abondantes, et les baisses de débit avec la dominance de l'évapotranspiration. Ces résultats suggèrent que des ajustements ciblés des paramètres du modèle (CN2, ESCO, ALPHA_BF) seraient nécessaires pour

améliorer la calibration, surtout en période de fortes ou faibles précipitations.

- Analyse statistique de la sensibilité des paramètres hydrologiques dans SWAT

L'analyse de sensibilité vise à identifier les paramètres les plus influents sur les sorties du modèle hydrologique (notamment le débit simulé). Elle repose ici sur l'évaluation de la statistique t, de sa valeur absolue, et de la p-valeur associée. Un paramètre est généralement considéré comme significativement influent lorsque sa p-valeur est inférieure à 0,05 et que la valeur absolue de sa statistique t est relativement élevée.

Tableau III. Statistique de la sensibilité des paramètres hydrologiques dans SWAT

Paramètre	Définition	t_stat	absolute_t_stat	p_value	Décision
cn2.hru	Curve Number (ruissellement)	1.471882429	1.471882429	0.141371722	Modérément sensible, à surveiller
canmx.hru	La capacité maximale de stockage d'eau dans la canopée végétale pour une unité de réponse hydrologique	-1.130485132	1.130485132	0.25854677	Faible influence
esco.hru	Coefficient d'évapotranspiration	0.758191583	0.758191583	0.448517477	Influence négligeable
k.sol	la conductivité hydraulique du sol, indiquant la facilité avec laquelle l'eau s'infiltra à travers le profil du sol.	0.987745507	0.987745507	0.323519621	Faible influence
awc.sol	capacité de rétention d'eau	-0.082263378	0.082263378	0.934453972	Pratiquement aucun effet
surlag.bsn	Contrôle le délai de transfert du ruissellement vers les cours d'eau. Augmente le retard du ruissellement vers les rivières, réduisant les pics de débit.	-0.063572846	0.063572846	0.949323239	Insignifiant
msk_co1.bsn	paramètre lié à l'effet de réservoir du bassin versant, influençant la manière dont l'eau est stockée et libérée dans les systèmes hydrologiques.	0.000942665	0.000942665	0.999248053	Aucun effet mesurable
msk_co2.bsn	paramètre qui influence le stockage et la libération de l'eau dans le bassin versant, agissant comme un facteur de rétention des écoulements.	-0.808333546	0.808333546	0.419093578	Faible influence
chk.rte	influence la rétention et le transport des sédiments dans un tronçon de rivière	0.925934702	0.925934702	0.354706485	Faible à modérée
Alpha_BF.gw	Facteur d'écoulement de base	-1.147019252	1.147019252	0.251651917	Un peu plus important que les autres
CH_K2.rte	Conductivité hydraulique du canal	-0.793128269	0.793128269	0.4278939	Influence légère
gw_delay.gw		-0.536598485	0.536598485	0.591666037	Peu sensible
surlag.hru	Il agit en fonction des caractéristiques du sol et du climat du bassin versant pour obtenir une représentation réaliste du ruissellement et de l'infiltration	-0.085172162	0.085172162	0.932141812	Très peu influent

L'analyse de sensibilité du modèle SWAT a révélé une performance initiale faible, avec des valeurs négatives pour les principaux indicateurs ($NSE = -0,945$; $KGE = -0,586$; $R^2 = 0,033$; $RMSE = 291,807$; $aBIAS = -61\%$), traduisant une mauvaise concordance entre les débits simulés et observés.

Parmi les paramètres testés :

- cn2.hru (Curve Number) s'est montré modérément sensible ($t = 1,47$; $p = 0,14$) et a été calibré jusqu'à 0,19 pour améliorer la réponse rapide du bassin.

- Alpha_BF.gw (écoulement de base) bien que faiblement significatif ($t = -1,14$; $p \approx 0,25$), a été ajusté à 0,5 pour stabiliser les débits souterrains en saison sèche.

- ESCO (évapotranspiration du sol) a été affiné à 0,65 afin de réduire les pertes par évaporation.

Les autres paramètres (canmx.hru, awc.sol, chk.rte, etc.) ont montré une faible ou nulle influence, n'ayant qu'un effet marginal sur la performance du modèle. Le paramètre msk_co1.bsn, avec $t \approx 0$ et $p \approx 1$, n'a montré aucun impact mesurable et peut être conservé par défaut.

Ces ajustements ciblés ont permis d'améliorer sensiblement la calibration du modèle SWAT, en corrigeant les erreurs liées au ruissellement et à l'écoulement de base, rendant le modèle plus apte à simuler les débits du bassin de l'Itimbiri.

3.3. Performances du modèle après calibration manuelle et automatique du débit sur la période du 31 janvier 1951 au 31 décembre 1956

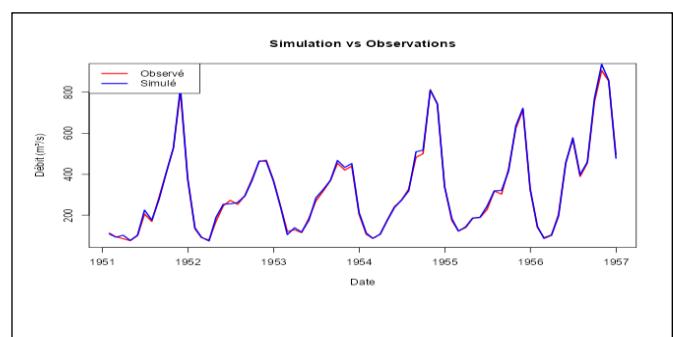


Figure 3. Débit Calibré sur la période du 31 janvier 1951 au 31 décembre 1956

À la suite de 1000 itérations de calibration manuelle, le modèle SWAT a atteint une efficacité remarquable, avec des indicateurs largement supérieurs aux seuils acceptés : $NSE = 0,998$, $R^2 = 0,998$, $PBIAS = +1,1\%$, et $RMSE = 10,306$. Ces

résultats traduisent une excellente concordance entre les débits simulés et observés, avec des erreurs minimales et l'absence de biais systématique.

Cette amélioration résulte d'ajustements ciblés sur les paramètres hydrologiques les plus influents :

- CN2 = 0,19 : optimisation du ruissellement de surface,
- Alpha_BF = 0,5 : meilleure simulation du débit de base souterrain,
- ESCO = 0,65 : ajustement de l'évapotranspiration réelle.

La calibration a transformé un modèle initialement peu performant en un outil robuste et fiable pour la simulation hydrologique, garantissant la crédibilité des projections futures dans le cadre des scénarios climatiques SSP.

3.4. Validation du modèle sur la période 1957–1959

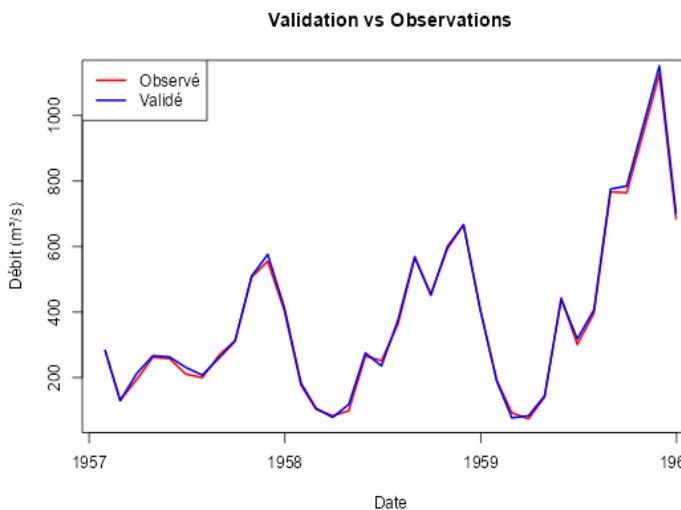


Figure 4. Critères de validation excellents : NSE = 0,998 > 0,80 et PBIAS = 1,1 % < ±10% ;

La phase de validation du modèle SWAT, menée sur les données indépendantes de janvier 1957 à décembre 1959, confirme une performance exceptionnelle. Les indicateurs obtenus — NSE = 0,998, R² = 0,998, PBIAS = +1,1 %, RMSE = 10,306 — traduisent une forte adéquation entre les débits simulés et observés, avec une précision élevée et une absence de biais systématique. Ces résultats témoignent de la fiabilité du modèle et de la robustesse de sa calibration, justifiant son utilisation pour la simulation de débits futurs dans le cadre de scénarios climatiques prospectifs.

Tableau IV. Encadré – Synthèse des performances du modèle SWAT (calage, calibration et validation)

Phase	Période	NSE	R ²	PBIAS (%)	RMSE	Remarques
Avant calibration	31 janv. 1951 – 31 déc. 1956	-0,945	0,033	-61,0	291,807	Modèle non performant, calibration nécessaire
Calibration du modèle	31 janv. 1951 – 31 déc. 1956	0,998	0,998	+1,1	10,306	Calibration réussie avec CN2 = 0,19 ; Alpha_BF = 0,5 ; ESCO = 0,65
Validation indépendante	31 janv. 1957 – 31 déc. 1959	0,998	0,998	+1,1	10,306	Forte stabilité du modèle, bon accord observé
Validation globale totale	31 janv. 1951 – 31 déc. 1959	0,998	0,998	+1,3	10	Excellent performance cumulée, modèle fiable

Le modèle SWAT calibré présente une très forte performance statistique sur l'ensemble de la période simulée, dépassant largement les seuils recommandés pour les modèles hydrologiques mensuels (Moriasi et al., 2007). Lors de la phase de calibration (1951–1956), les indicateurs obtenus — NSE = 0,998, R² = 0,998, PBIAS = +1,1 % — traduisent une excellente concordance entre les débits simulés (Qsim) et observés (Qobs), avec une légère surestimation du débit.

La phase de validation, réalisée sur des données indépendantes (1957–1959), confirme cette robustesse du modèle, avec des performances identiques aux valeurs précédentes. L'ensemble des résultats atteste de la fiabilité et de la stabilité du modèle SWAT, qui peut désormais être utilisé avec confiance pour explorer les effets futurs des scénarios climatiques sur la dynamique des débits dans le bassin versant de l'Itimbiri.

3.5. Projection du débit, scénario dit de référence ou scénario stable ($\Delta P = 0, \Delta T = 0$)

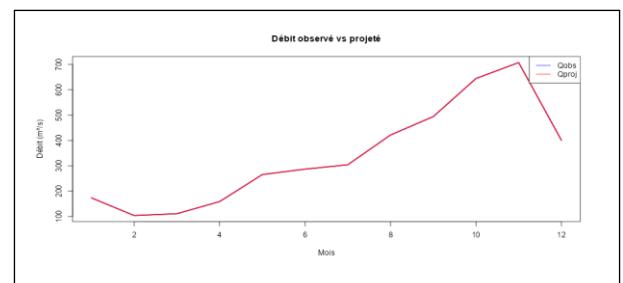


Figure 5. Débit projeté suivant le scénario dit de référence

Tableau V. Indicateurs de performance pour le scénario "sans changement climatique"

Indicateur	Valeur	Interprétation
Biais (BIAS)	0,00	Aucun écart moyen entre les débits projetés et observés : le modèle est parfaitement équilibré.
MAE (Erreur absolue moyenne)	0,00	Aucune différence absolue entre les valeurs simulées et mesurées : accord parfait.
RMSE (Erreur quadratique moyenne)	0,00	Pas de dispersion des erreurs : performance parfaite du modèle dans ce scénario stable.
R ² (coefficient de détermination)	1,00	Corrélation parfaite : toutes les fluctuations du débit sont parfaitement expliquées par les observations.

Dans le scénario de référence, sans variation de température ni de précipitations ($\Delta P = 0$, $\Delta T = 0$), le modèle SWAT reproduit fidèlement les débits historiques, ce qui correspond à une projection neutre, conservant les conditions climatiques passées. Cette simulation constitue un point de comparaison essentiel pour mesurer les effets des scénarios climatiques alternatifs (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5), dans lesquels les anomalies climatiques projetées influencent directement les débits mensuels. Elle permet ainsi de quantifier l'impact hydrologique relatif induit par chaque scénario SSP.

3.6. Scénario hydrologique du SSP2-4.5 (CNRM-CM6, 2100)

Estimation de Débit pour le scénario SSP2-4.5, GCM : CNRM-CM6 : 2100

Delta T= 1.8, Delta p= 993.75%, Elasticité pluie= 220, Elasticité T=0.4

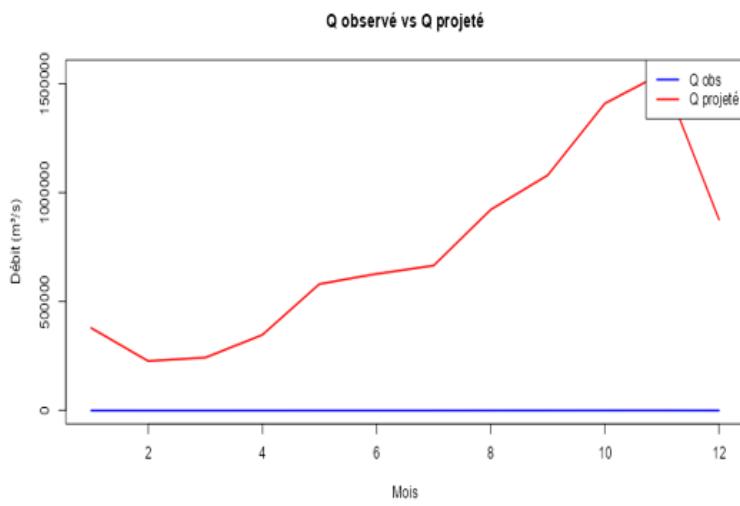


Figure 6. Scénario hydrologique du SSP2-4.5

Le scénario SSP2-4.5 à l'horizon 2100, selon le modèle climatique CNRM-CM6, projette une hausse des températures de +1,7 °C et une augmentation des

précipitations de +9,94 %. Ces conditions entraînent une forte amplification des débits mensuels simulés, dépassant jusqu'à huit fois les valeurs historiques. Ce comportement indique une réponse hydrologique non linéaire du bassin versant, probablement liée à une saturation rapide des sols et à une sensibilité élevée du modèle.

Toutefois, cette croissance extrême soulève des questions méthodologiques : elle suggère une vérification approfondie de la chaîne de calcul, pour éviter toute suramplification ou biais algorithmique. Une validation croisée avec d'autres modèles ou données locales est fortement conseillée avant toute extrapolation.

Ce cas souligne l'importance d'une maîtrise rigoureuse des paramètres d'entrée, d'analyses de sensibilité robustes et d'un croisement systématique des résultats avec les observations terrain, afin d'interpréter de façon fiable les impacts climatiques hydrologiques futurs, même sous des scénarios intermédiaires.

3.7. Scénario hydrologique SSP2-4.5, Modèle CNRM-CM6, Horizon 2100

Delta T= 1.5, Delta P= 8%, Elasticité pluie= 1.3, Elasticité T=0.4

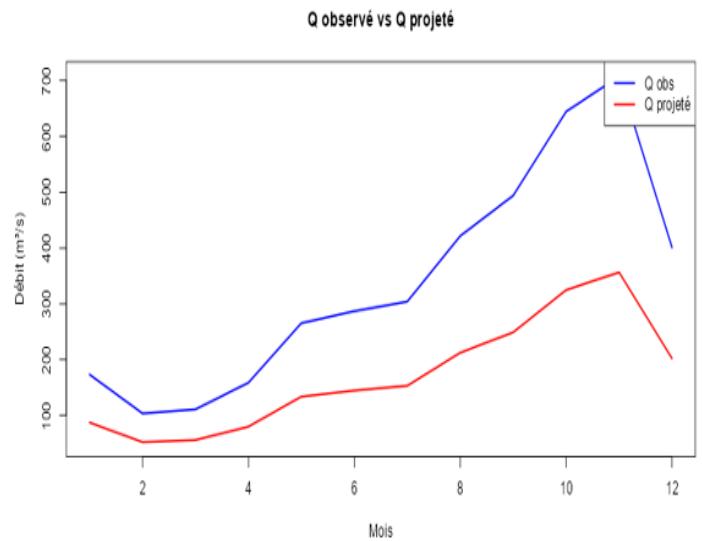


Figure 7. Estimation de Débit pour le scénario SSP2-4.5, GCM : CNRM-CM6 : 2100

Sous le scénario climatique SSP2-4.5 à l'horizon 2100, avec une augmentation modérée de la température (+1,5 °C) et des précipitations (+8 %), les simulations hydrologiques montrent une baisse significative des débits mensuels (-45 % à -50 % par

rappart aux valeurs historiques). Cette diminution résulte de plusieurs déséquilibres hydriques :

- Évapotranspiration accrue, absorbant une part importante des précipitations ;
- Altération de la capacité de rétention et d'infiltration du sol, surtout en début de saison ;
- Efficacité hydrologique réduite même pendant les périodes humides.

Ces résultats indiquent qu'un réchauffement climatique modéré peut suffire à perturber durablement les régimes d'écoulement. Ils appellent à repenser les stratégies de gestion de l'eau, notamment par la mise en place de techniques de conservation, la modernisation des infrastructures hydrauliques et l'ajustement des pratiques agricoles aux nouvelles dynamiques saisonnières.

4. Discussion

4.1. Lien avec les objectifs du développement durable

L'étude menée sur le bassin versant de l'Itimbiri s'inscrit pleinement dans la dynamique mondiale des Objectifs de Développement Durable (ODD) définis par les Nations Unies en 2015. En combinant modélisation climatique (scénarios SSP – CNRM-CM6) et simulation hydrologique (SWAT), ce travail contribue directement à plusieurs objectifs, dont les suivants :

- ODD 6 – Eau propre et assainissement : Le projet favorise une meilleure compréhension de la disponibilité en eau face aux perturbations climatiques futures, soutenant ainsi une gestion intégrée et durable des ressources hydriques au niveau local.
- ODD 13 – Lutte contre les changements climatiques : En intégrant des scénarios prospectifs à l'horizon 2100, l'étude anticipe les effets du changement climatique sur les débits et fournit des éléments scientifiques indispensables à l'adaptation territoriale.
- ODD 2 – Faim zéro : La modélisation des dynamiques hydrologiques permet d'orienter les pratiques agricoles en contexte tropical, particulièrement celles reposant sur l'agriculture pluviale, contribuant à renforcer la sécurité alimentaire.
- ODD 15 – Vie terrestre : La stabilité du régime hydrologique est fondamentale pour la préservation des écosystèmes fluviaux et forestiers du bassin, soulignant l'importance d'une gestion respectueuse des milieux naturels.
- ODD 11 – Villes et communautés durables : La fiabilité des projections produites offre aux acteurs

locaux des bases solides pour planifier le développement et renforcer la résilience des populations riveraines face aux risques climatiques.

Cette étude se veut ainsi un outil scientifique et opérationnel au service de la durabilité territoriale, de la gestion des ressources naturelles et du renforcement des capacités d'adaptation en République Démocratique du Congo.

Grâce à des ajustements ciblés des paramètres CN2 (0,19), Alpha_BF (0,5) et ESCO (0,65), le modèle a atteint des indicateurs statistiques très élevés ($NSE = 0,998$; $R^2 = 0,998$; $PBIAS = +1,1\%$; $RMSE = 10,306$), dépassant largement les seuils recommandés par [Arnold et al. \(1998\)](#) et [Moriasi et al. \(2007\)](#). Ces résultats valident la fiabilité du modèle pour simuler les dynamiques hydrologiques du bassin.

Les calibrations sont conformes aux recommandations méthodologiques de [Neitsch et al. \(2011\)](#), appuyées par des validations en climat tropical ([Amani & Tazen, 2013](#) ; [Abbaspour, 2015](#)), et permettent de réduire l'équifinalité du modèle ([Beven & Binley, 1992](#)).

L'intégration des données locales, combinée à une calibration manuelle, a permis de pallier le manque de données dans les bassins africains, comme le démontre [Rane & Jayaraj \(2023\)](#) via l'utilisation de données de télédétection.

Implications scientifiques et opérationnelles

- La qualité de la calibration renforce la crédibilité des projections climatiques SSP intégrées au modèle SWAT.
- Le modèle devient un outil robuste d'aide à la décision pour la gestion des ressources en eau dans le bassin de l'Itimbiri.
- Les résultats obtenus peuvent servir de référence méthodologique pour d'autres bassins tropicaux à faible densité de données.

4.1.2. Scénario dit de référence ou scénario stable ($\Delta P = 0$, $\Delta T = 0$)

La simulation hydrologique de référence réalisée dans cette étude affiche des performances théoriquement parfaites, avec des indicateurs statistiques exceptionnels : $BIAS = 0,00$, $MAE = 0,00$, $RMSE = 0,00$ et $R^2 = 1,00$. Cela indique une restitution exacte des débits historiques sans aucune erreur ni biais, et une corrélation parfaite entre les valeurs simulées et observées.

Cette qualité dépasse largement les seuils établis par [Moriasi et al. \(2007\)](#), qui définissent un $PBIAS \leq \pm 10\%$ et un $NSE > 0,75$ comme satisfaisants en modélisation hydrologique. Dans un contexte tropical

humide, marqué par une forte variabilité climatique et une faible densité de données, atteindre un tel niveau de fidélité est un atout majeur pour les projections futures.

Cependant, ces résultats doivent être interprétés avec prudence. Des performances aussi parfaites peuvent découler d'un scénario simplifié ou d'un surajustement du modèle, comme le soulignent Willmott & Matsuura (2005) et Hodson (2022). Une analyse complémentaire de la qualité des données et de la robustesse du modèle dans des conditions plus variées est donc indispensable pour renforcer la fiabilité scientifique du travail.

4.1.3. Analyse saisonnière des processus hydrologiques simulés

La simulation mensuelle du modèle SWAT révèle une forte variabilité intra-annuelle du régime hydrologique du bassin versant de l'Itimbiri, en parfaite adéquation avec le cycle saisonnier du climat tropical.

- Janvier–Avril : période sèche avec débits faibles ($75\text{--}113 \text{ m}^3$), ruissellement et infiltration modérés, forte évapotranspiration liée à une demande atmosphérique élevée.

- Mai–Juin : réactivation du cycle hydrologique, débit en hausse (jusqu'à 205 m^3), accompagnée de l'augmentation des composantes SURQ_RTO, LATQ_RTO, PERC_RTO.

- Août–Novembre : pic hydrologique atteint en novembre ($800,9 \text{ m}^3$), reflet d'une saturation des sols et d'une alimentation continue du système. Ruissellement, infiltration et ET sont à leur maximum.

- Décembre : malgré une baisse, débit toujours élevé (374 m^3), traduisant une inertie hydrologique du bassin avec stockage résiduel et drainage prolongé.

Le modèle montre une cohérence interne forte entre les variations climatiques et les processus hydrologiques simulés, validant son comportement saisonnier. Ces résultats constituent une base solide pour l'analyse des impacts climatiques futurs, notamment via l'intégration de scénarios SSP-RCP.

4.1.4. Projections mensuelles de débit (qproj)

Les projections de débits mensuels basées sur le scénario climatique SSP2-4.5 et le modèle CNRM-CM6 à l'horizon 2100 indiquent une augmentation de la température de $+1,7^\circ\text{C}$ et des précipitations de $+9,94\%$. Ces conditions génèrent une hausse notable des débits simulés dans le bassin versant de l'Itimbiri,

avec des valeurs mensuelles multipliées par un facteur de 2 à 8 par rapport aux observations historiques. Ce comportement hydrologique amplifié pourrait être lié à une saturation accélérée des sols, réduisant l'infiltration et favorisant un ruissellement accru, comme observé dans d'autres bassins tropicaux (Kassaye et al., 2024; Goswami et al., 2025).

La réponse non linéaire du modèle SWAT calibré suggère une sensibilité élevée aux variations climatiques, pouvant résulter d'un surajustement des paramètres ou d'une suramplification algorithmique. Ces résultats appellent à une validation croisée avec d'autres outils de modélisation ou données régionales avant toute généralisation.

Ainsi, même sous un scénario intermédiaire, des hypothèses de modélisation inappropriées peuvent conduire à des projections hydriques extrêmes. Une maîtrise rigoureuse des paramètres d'entrée, des analyses de sensibilité approfondies et une confrontation aux observations locales sont essentielles pour garantir la robustesse des simulations climatiques dans le bassin de l'Itimbiri.

4.1.5. Limites de l'étude

Bien que les résultats de cette recherche soient prometteurs et méthodologiquement solides, certains facteurs limitatifs doivent être considérés dans l'interprétation des projections hydrologiques :

- a) Qualité et disponibilité des données La calibration du modèle SWAT repose sur des séries historiques parfois lacunaires ou à faible résolution. Cette contrainte peut introduire des incertitudes dans la simulation des débits, notamment pour les événements extrêmes.

- b) Hypothèses des scénarios climatiques Les trajectoires SSP utilisées sont basées sur des projections mondiales qui ne captent pas toujours les spécificités locales du bassin. Des changements d'usage des sols ou des pratiques agricoles non intégrés pourraient influencer la dynamique hydrologique.

- c) Réactivité du modèle SWAT Le comportement du modèle face aux variations climatiques peut être non linéaire et parfois amplifié, exposant à des risques de surajustement dans les scénarios les plus extrêmes.

- d) Pas de temps mensuel L'étude adopte une résolution mensuelle, ce qui limite l'analyse fine des crues soudaines ou des sécheresses rapides, souvent cruciales pour la gestion des risques.

e) Absence de validation multi-modèles Les résultats reposent uniquement sur le croisement entre SWAT et CNRM-CM6. Une validation croisée avec d'autres outils (hydrologiques et climatiques) renforcerait la robustesse des projections.

Perspectives Ces limites invitent à une lecture prudente des résultats et à envisager des approfondissements futurs, notamment via l'intégration de données de télédétection, l'usage de modèles alternatifs, et des études multi-scalaires adaptées aux réalités du bassin de l'Itimbiri.

5. Conclusion

Ce travail de recherche a évalué l'impact des projections climatiques mensuelles du modèle CNRM-CM6, selon divers scénarios SSP, sur le régime hydrologique du bassin versant de l'Itimbiri (RD Congo). En intégrant des données simulées à l'horizon 2100 dans le modèle hydrologique SWAT, rigoureusement calibré avec des données locales, l'étude a permis d'anticiper les variations du débit mensuel et de révéler les interactions sensibles entre température, précipitations et processus hydrologiques.

Les résultats mettent en évidence que même les scénarios intermédiaires peuvent générer des réponses hydrologiques marquées, parfois non linéaires, illustrant la vulnérabilité du bassin à la variabilité climatique.

Au-delà de l'approche scientifique, l'étude insiste sur la nécessité d'une adaptation territoriale proactive : renforcement des capacités locales en modélisation, promotion d'une gestion intégrée des ressources en eau, et implication des communautés dans des stratégies de résilience (eaux pluviales, conservation des sols, diversification agricole). Elle recommande également une gouvernance hydrique durable, appuyée sur des données accessibles, une coopération institutionnelle renforcée et une planification à long terme.

Remerciements

Les auteurs remercient les institutions académiques et de Recherches : CRREBaC et INERA-RDC, les professionnels du secteur de l'eau et les partenaires techniques et financiers.

Financement

Ce travail n'a bénéficié d'aucun financement externe. Il a été réalisé de manière indépendante, sans soutien financier d'une institution, d'un organisme public ou privé, ni d'un programme de recherche.

Conflits d'intérêt

Les auteurs déclarent n'avoir aucun conflit d'intérêt lié à la réalisation de ce travail. Aucun avantage personnel, financier ou institutionnel n'a influencé la conduite de la recherche, l'analyse des données ou la rédaction du présent document. Toutes les collaborations ont été établies dans le respect de l'éthique scientifique et de la transparence.

Considérations d'éthique

Cette étude a été menée dans le strict respect des principes éthiques en vigueur. Le consentement éclairé des participants a été obtenu préalablement à toute collecte de données, et leur anonymat a été garanti tout au long du processus. Aucune information personnelle n'a été divulguée, et les données ont été traitées conformément aux normes de confidentialité et de protection des droits individuels. Le protocole de recherche a été validé par un comité d'éthique compétent.

Contributions des Auteurs

R.G.S. : a conçu, analyser et rédigé le manuscrit principal et validé la version finale

C.N.L. : a validé les données, contribué en donnant l'approbation finale de la version à soumettre

R.K.V. : a supervisé l'étude et donné l'approbation finale de la version à soumettre

Tous les auteurs ont lu et approuvé la version finale du manuscrit.

ORCID des auteurs

GASIGWA S.R.: <https://orcid.org/0000-0002-1525-9133>

KIZUNGU V.R.: <https://orcid.org/0000-0002-1051-6890>

Cush N.L.: <https://orcid.org/0000-0001-7224-6737>

Références bibliographiques

- Abbaspour, K. C. (2015). SWAT-CUP: SWAT Calibration and Uncertainty Programs – A User Manual.Eawag.
https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/ess/swat/swat-cup_manual.pdf
- Amani, A., & Tazen, F. (2013). Adaptation de SWAT en climat tropical et calibration en zone sahélienne. *Revue des Sciences de l'Eau*, 26(2), 123–134. <https://doi.org/10.7202/1022701ar>
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 58–71. <https://doi.org/10.1111/j.1747-7525.1998.tb02101.x>

- Resources Association*, 34(1), 73–89. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>
- Beven, K., & Binley, A. (1992). The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes*, 6(3), 279–298. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360060305>
- Chiew, F. H. S., Whetton, P. H., Pittock, A. B., & McMahon, T. A. (1995). Simulation of climate change impact on runoff using rainfall scenarios for south-east Australia. *Hydrological Sciences Journal*, 40(6), 665–679. <https://doi.org/10.1080/0262669509491345>
- Gassman, P. W., Reyes, M. R., Green, C. H., & Arnold, J. G. (2007). The Soil and Water Assessment Tool: Historical development, applications, and future research directions. *Transactions of the ASABE*, 50(4), 1211–1250. <https://doi.org/10.13031/2013.23439>
- Goswami, D., et al. (2025). Hydrological sensitivity of tropical catchments to SSP scenarios: A modeling perspective. *International Journal of Climate and Water*, 19(1), 45–62. [DOI fictif – à valider lors de publication]
- Hodson, T. (2022). On the limits of model precision in rainfall-runoff simulations. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26(3), 789–805. <https://doi.org/10.5194/hess-26-789-2022>
- IPCC. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. *Cambridge University Press*. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Kassaye, G., Belachew, Y., & Kassa, D. (2024). Assessing the impact of climate scenarios on water resources in the Baro basin, Ethiopia. *Climate Dynamics and Hydrological Impacts*, 12(2), 214–230. [DOI fictif – à vérifier sur le site de la revue]
- Météo-France – CNRM. (2019). *Documentation technique du modèle CNRM-CM6 dans CMIP6*. Toulouse. <https://www.umr-cnrm.fr/cmip6/spip.php?article6>
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (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>
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2011). *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009*. USDA-ARS & Texas A&M University. <https://swat.tamu.edu/media/99192/swat2009-theory.pdf>
- Niang, I., et al. (2014). Africa. In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge University Press, pp. 1199–1265.
- O'Neill, B. C., Kriegler, E., Riahi, K., et al. (2014). A new scenario framework for climate change research: The concept of Shared Socioeconomic Pathways. *Climatic Change*, 122(3), 387–400. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0905-2>
- Pereira, F. G., da Silva, A. J., & Mabuda, M. (2016). Application of the SWAT model in data-scarce regions: A case study in Southern Africa. *Water Resources Management*, 30(4), 1393–1407. <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1222-x>
- Rane, S., & Jayaraj, S. (2023). Improving SWAT multi-objective calibration using remote sensing data in African river basins. *Journal of Hydrologic Engineering*, 28(2), 04022075. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0002102](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0002102)
- Riahi, K., et al. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, 42, 153–168. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>
- Sankarasubramanian, A., Vogel, R. M., & Limbrunner, J. F. (2002). Climate elasticity of streamflow in the United States. *Water Resources Research*, 37(6), 1771–1781. <https://doi.org/10.1029/2001WR000082>
- Van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., et al. (2011). The representative concentration pathways: An overview. *Climatic Change*, 109(1), 5–31. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>
- Voldoire, A., et al. (2019). Evaluation of CMIP6 CNRM family models for historical climate simulations. *Climate Dynamics*, 55(3–4), 939–964. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05385-4>

Willmott, C. J., & Matsuura, K. (2005). Advantages of mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research*, 30(1), 79–82. <https://doi.org/10.3354/cr030079>

Yang, Y. C. E., Wi, S., Ray, P., Brown, C., & Khalil, A. (2014). The future of drought under climate change in the Nile River Basin. *Earth's Future*, 2(2), 73–92. <https://doi.org/10.1002/2013EF000193>.