Modélisation pluie-débit du bassin versant du Grand Balé à Pâ dans un contexte de changement climatique au Burkina Faso

MÉMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME D'INGÉNIEUR 2iE AVEC GRADE DE **MASTER**

SPÉCIALITÉ : GÉNIE DE L'EAU, DE L'ASSAINISSEMENT ET DES AMÉNAGEMENTS HYDRO-AGRICOLES

Présenté et soutenu publiquement le 21/01/2026 par

David ZONGO (N°20220766)

Directeur de mémoire : Pr. Harouna KARAMBIRI, Professeur Titulaire (CAMES), Enseignant-Chercheur à 2iE

Encadrant 2iE : Dr FOWE TAZEN, Maître-Assistant (CAMES), Enseignant-Chercheur à 2iE

Maître de stage : M. W. Amédée BAGA, hydrologue, DGRE

Jury d'évaluation du stage :

Président : Pr Mahamadou KOITA, Professeur Titulaire (CAMES), (2iE)

Membres et correcteurs : Dr Ousmane Roland YONABA, Maitre de Conférences (CAMES), (2iE)

Dr Axel BELEMTOUGRI, Attaché de recherche, (INERA)

Promotion [2025/2026]

Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
Rue de la Science - 01 BP 594 - Ouagadougou 01 - BURKINA FASO
Tél. : (+226) 25. 49. 28. 00 - Fax : (+226) 25. 49. 28. 01 - Mail : 2ie@2ie-edu.org - **www.2ie-edu.org**

DEDICACES

A ma famille,

pour leur patience, leur encouragement et leur confiance.

REMERCIEMENTS

Ce document est l'œuvre de plusieurs personnes qui, malgré leur programme très chargé, ont contribué à la correction. Nous tenons à exprimer toute notre reconnaissance envers ces personnes qui ont contribué à l'établissement de ce document.

Ainsi, nous adressons nos remerciements sincères :

- Au corps professoral et administratif de l'institut 2iE, pour les efforts fournis afin de nous donner une formation de qualité ;
- À mon Directeur de mémoire, Pr. Harouna KARAMBIRI, qui a suivi avec intérêt les travaux de mon mémoire de fin d'étude ;
- À mon Encadreur interne, Dr FOWE TAZEN pour sa disponibilité, son engagement et ses précieux conseils tout au long de la rédaction de ce document ;
- À la Directrice générale des Ressources en Eau pour avoir donné une suite favorable à notre demande de stage et à l'ensemble du personnel de la direction pour l'accueil chaleureux au sein de la direction ;
- À notre maître de stage, Monsieur BAGA W. Amédée qui, en plus de sa disponibilité, nous a prodigué des conseils très enrichissants pour la rédaction du présent document ;

Toute personne ayant contribué à la rédaction de ce présent mémoire, nous adressons nos sincères remerciements.

RÉSUMÉ

La modification du régime des eaux de surface, causée par le changement climatique, compromet le développement socio-économique et l'équilibre environnemental. Cette étude vise à contribuer à une meilleure gestion des ressources en eau du bassin versant du Grand Balé à Pâ dans un contexte de changement climatique à l'horizon 2050 (2036-2065). Une analyse préalable des séries chronologiques de pluies et de débits sur la période 1990-2024 a permis de caractériser la variabilité hydro-climatique dans le bassin versant de 3 676 km^2. Pour la modélisation des écoulements d'eau, le modèle pluie-débit HEC HMS a été calibré (1990-2008) et validé (2009-2016) afin de simuler les débits à l'exutoire du bassin versant. Le climat futur a été constitué par la moyenne Multi-modèle de cinq modèles climatiques du projet NEX-GDDP-CMIP6 sous les profils SSP2-4.5 et SSP5-8.5. L'analyse de la période d'étude révèle une rupture significative vers des conditions plus humides à partir de la fin des années 2005 (test de Pettitt). La tendance des débits moyens annuels est à la hausse de 0,283 $m^3/s/an$ plus marquée que celle des précipitations qui est de 5,6 mm/an. Les résultats des projections climatiques à l'horizon 2050 indiquent une augmentation modérée des précipitations annuelles de l'ordre de 9 %. Une hausse de l'évapotranspiration potentielle annuelle de l'ordre de 3 % est projetée dans la zone du bassin versant. La simulation débits montre une modification significative du régime des écoulements futurs. Les anomalies négatives sont comprises entre -5 % et -70 %. À l'inverse, une augmentation nette est projetée pour la saison des pluies. Les variations de l'ordre de 85 % sont observées en septembre. Les débits journaliers maximums resteront supérieurs à ceux historiques. Ces résultats, qui s'inscrivent dans la tendance régionale, soulignent la vulnérabilité accrue du bassin du Grand Balé et plaident pour l'intégration des projections dans les stratégies de gestion durable des ressources en eau au Burkina Faso.

Mots clés :

Changement climatique,

HEC-HMS,

CMIP6,

Grand Balé,

Burkina Faso.

ABSTRACT

Changes in surface water regimes caused by climate change are compromising socio-economic development and environmental balance. This study aims to contribute to better management of water resources in the Grand Balé à Pâ watershed in the context of climate change by 2050 (2036-2065). A preliminary analysis of rainfall and runoff time series for the period 1990-2024 was used to characterize hydro-climatic variability in the 3,676 km² watershed. For water flow modeling, the HEC HMS rainfall-runoff model was calibrated (1990-2008) and validated (2009-2016) to simulate runoff at the watershed outlet. The future climate was constructed using the multi-model average of five climate models from the NEX-GDDP-CMIP6 project under the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 profiles. Analysis of the study period reveals a significant shift towards wetter conditions from the end of 2005 onwards (Pettitt test). The trend in average annual flows is increasing by 0.283 m3/s/year, which is more pronounced than the trend in precipitation, which is 5.6 mm/year. The results of climate projections for 2050 indicate a moderate increase in annual precipitation of around 9%. An increase in potential annual evapotranspiration of around 3% is projected in the watershed area. The flow simulation shows a significant change in the flow regime. The results of climate projections for 2050 indicate a moderate increase in annual precipitation of around 9%. An increase in potential annual evapotranspiration of around 3% is projected in the watershed area. The flow simulation shows a significant change in future flow patterns. Negative anomalies range from -5% to -70%. Conversely, a net increase is projected for the rainy season. Variations of around 85% are observed in September. Maximum daily flows will remain higher than historical levels. These results, which are in line with regional trends, highlight the increased vulnerability of the Grand Balé basin and call for the integration of projections into sustainable water resource management strategies in Burkina Faso.

Keywords :

Climate Change,

CMIP6,

HEC-HMS,

Grand Balé,

Burkina Faso.

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

BNDT	:	Base Nationale de Données Topographiques
BV	:	Bassin Versant
CHIRPS		Données de précipitations par infrarouge du groupe Climate Hazards
CMIP	:	Projet d'Intercomparaison des Modèles Couplés
CN	:	Numéro de courbe
DGRE	:	Direction générale des Ressources en Eau
ETP	:	Évapotranspiration Potentielle
FAO	:	Organisation des Nations Unies pour alimentation et agriculture
GES	:	Gaz à Effet de Serre
GR4J / GR6J	:	Génie Rural à 4 ou 6 paramètres Journaliers
GBP	:	Grand Balé à Pâ
GIEC	:	Groupe d'expert Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
HEC-HMS	:	Système de Modélisation Hydrologique du Centre d'Ingénierie Hydrologique
ISD	:	Indice Standardisé de Débit
ISP	:	Indice Standardisé des Précipitations
MAE	:	Erreur Absolue Moyenne
MBE	:	Erreur de Biais Moyen
MEEA	:	Ministère de l'Environnement, de l'Eau et de l'Assainissement
MCG	:	Modèle Climatique Global
MNT	:	Modèle Numérique de Terrain
EMM	:	Moyenne Ensemble Multi-Modèle
NEX-GDDP	:	Projet NASA d'échange de données terrestres Projections désagrégées quotidiennes globales
NRCS	:	Service de Conservation des Ressources Naturelles
OMM	:	Organisation Météorologique Mondiale
SSP	:	Profil Socio-économique Partagé
SDAGE		Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion de l'Eau
SMA	:	Méthode de bilan hydrique des sols
USACE	:	Corps des Ingénieurs de l'Armée des États-Unis

SOMMAIRE

DEDICACES ..... **ii**

REMERCIEMENTS ..... **iii**

RÉSUMÉ ..... **iv**

ABSTRACT ..... **v**

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS ..... **vi**

SOMMAIRE ..... **vii**

LISTE DES TABLEAUX ..... **ix**

LISTE DES FIGURES ..... **x**

I. INTRODUCTION **1**

II. PRÉSENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL **4**

III. REVUE DE LA LITTÉRATURE **6**

III. 1. Variabilité et changement climatique au Burkina Faso 6

III. 2. Modélisation hydrologique 7

III. 3. Synthèse de quelques études menées sur le bassin versant du Grand Balé 10

III. 4. Projections climatiques 10

IV. MATERIEL ET METHODES **12**

IV. 1. Présentation de la zone d'étude 12

IV. 2. Matériel 17

IV. 3. Méthodologie de l'étude 22

V. RÉSULTATS ET DISCUSSION **37**

V.1 . Caractérisation hydro-géomorphologique du bassin versant 37

V.2 Analyse de la variabilité hydro-climatique 41

V.3 . Modélisation du bassin versant du Grand Balé à Pâ 47

V.4 . Simulation des débits à l'horizon 2050 52

V.5 Discussion 61

V.6 Limites de l'étude 63

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS 64

BIBLIOGRAPHIE 65

ANNEXES 72

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Modèles climatiques du Projet NEX-GDDP -CMIP6 utilisés 19

Tableau 2 : Classification de la période en fonction de l'indice 25

Tableau 3 : Données d'entrée de HEC HMS 27

Tableau 4 : Valeurs initiales et plage de variation des paramètres de calibration du modèle HEC HMS 31

Tableau 5 : Caractéristiques morphométriques du grand Balé à Pâ 38

Tableau 6 : Résultats des tests de ruptures sur les séries des variables hydro-climatiques annuelles 44

Tableau 7: Résultat du test de corrélation de Spearman entre pluie et débits annuels du Grand Balé à Pa 44

Tableau 8 : Synthèse des résultats du test de Mann–Kendall et de la pente de Theil-Sen 46

Tableau 9 : Caractéristiques des sous-bassins versants du GBP 48

Tableau 10 : Paramètres géométriques des cours d'eau du GBP 48

Tableau 11 : Les paramètres avant et après calage du modèle hydrologique 49

Tableau 12 : Résultats du calage du modèle sur la période 1990-2008 50

Tableau 13 : Résultats de la validation du modèle sur la période 2009-2016 51

Tableau 14 : Métriques de sensibilité des précipitations en fonction des modèles 53

Tableau 15 : Quantiles des débits journaliers maximums annuels en m^3/s 60

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Organigramme de la Direction Générale des Ressources en Eau 5

Figure 2 : Localisation du bassin Grand Balé à Pâ 12

Figure 3 : Diagramme ombrothermique du bassin versant du Grand Balé à Pâ 13

Figure 4 : Réseau hydrographique du bassin grand Balé à Pâ 14

Figure 5 : Sols du bassin grand Balé à Pâ 15

Figure 6 : Carte de localisation des stations hydrométriques et pluviométriques ainsi que les zones d'influence des postes pluviométriques (Polygones de Thiessen) 18

Figure 7 : Diagramme de la démarche de simulation des débits futurs 36

Figure 8 : Courbe hypsométrique du bassin versant du Grand Balé à Pâ 39

Figure 9 : carte des pentes du Grand Balé à Pâ 40

Figure 10 : Évolution de l'Indice Standardisé des Précipitations sur la période 1990-2024 .. 41

Figure 11 : Évolution des indices de sécheresse hydrologiques 42

Figure 12 : Date de rupture de la série de pluies (Pettitt) 43

Figure 13 : Date de rupture de la série de débits (Pettitt) 43

Figure 14 : Tendance linéaire de la série de pluies 45

Figure 15 : Tendance linéaire de la série de débits 46

Figure 16 : Modèle conceptuel HEC-HMS du bassin versant du GBP 47

Figure 17 : Hydrogrammes simulé et observé pour la période de calage du modèle 50

Figure 18 : Hydrogrammes simulé et observé pour la validation du modèle HEC-HMS 51

Figure 19 : Pluie moyenne-mensuelles des modèles par rapport à la moyenne de référence 52

Figure 20 : Distribution des pluies annuelles des modèles et de la référence sur 1990-2014. 53

Figure 21 : Températures moyennes mensuelles sur le bv du GBP des modèles sur la période de référence 54

Figure 22 : Distribution des précipitations annuelles à l'horizon 2050 55

Figure 23 : Profil saisonnier des précipitations à l'horizon 2050 55

Figure 24 : Distribution de l'ETP annuelle à l'horizon 2050..... 56

Figure 25 : Profil saisonnier de l'ETP à l'horizon 2050 57

Figure 26 : Profils des débits moyens mensuels à l'horizon 2050..... 58

Figure 27 : Distribution des débits journaliers maximums annuels à l'horizon 2050 59

Figure 28 : Courbes des débits classés..... 60

I. INTRODUCTION

La gestion durable des ressources en eau est devenue un enjeu planétaire majeur dans un contexte marqué par les effets du changement climatique et la croissance démographique soutenue. Le réchauffement climatique modifie le cycle hydrologique en influençant les précipitations, l'évapotranspiration et les régimes d'écoulement, avec des conséquences directes sur la disponibilité et la variabilité des ressources en eau (GIEC, 2013, 2023). Ces modifications affectent à la fois les quantités mobilisables, leur répartition temporelle et la qualité des ressources pour les usages humains et environnementaux. En Afrique de l'Ouest, la gestion des ressources en eau est rendue plus complexe par la forte dépendance des activités socio-économiques aux précipitations et aux eaux de surface (Descroix et al., 2016; Nicholson, 2013; OMM, 2022). L'agriculture pluviale, l'élevage, la pèche continentale et l'approvisionnement en eau potable reposent largement sur la disponibilité des ressources hydriques. Le changement climatique agit comme un facteur aggravant des déséquilibres hydrologiques existants. Il se manifeste notamment par une intensification des évènements hydro-climatiques extrêmes tels que les sécheresses et les inondations., le stress hydrique accumulé et les incertitudes croissantes pour la gestion de la ressource eau (Lombe et al., 2024). Ces évolutions se sont accentuées au cours des deux dernières décennies. Elles renforcent la pression sur les ressources en eau, déjà fragilisées par la croissance démographique et les usages concurrents. Ces constats ont été confirmés par des travaux scientifiques (Fowe et al., 2012; Idrissou et al., 2022; Konaté, 2023; Ouedraogo et al., 2024; Abeysingha et Ray, 2025). Environ 60 % des bassins versants mondiaux ont connu des anomalies de débit fluvial avec des cours d'eau affichant les débits anormalement élevés ou faibles par rapport à la moyenne historique (1991-2020), rapporte l'OMM (2025). Ces changements concernent non seulement les événements extrêmes, mais également les débits moyens, les périodes d'étiage et la saisonnalité des écoulements (Diop et al., 2025).. À ces contraintes s'ajoutent des pressions anthropiques, comme la déforestation, l'extension agricole, l'urbanisation et l'exploitation minière artisanale (Ouattara et al., 2024). Ces pressions compromettent à la fois la quantité et la qualité de l'eau, rendant urgente la mise en place d'outils d'aide à la décision pour orienter la gestion intégrée et durable des ressources en eau.

Au Burkina Faso, pays sahélien à pluviométrie irrégulière et fortement saisonnière, la gestion des ressources représente un enjeu du développement durable. Les ressources en eau de surface y jouent un rôle essentiel pour l'agriculture, l'alimentation en eau potable, la production

halieutique et le maintien des écosystèmes. Plusieurs travaux ont mis en évidence la sensibilité des bassins versants aux variations climatiques et aux changements d'occupation des sols, avec des impacts notables sur le régimes d'écoulement et la disponibilité de la ressource eau(Fowe et al., 2012; Fowé et al., 2025; Guelbeogo et al., 2023; Konaté, 2023; Philippe et al., 2023; Tirogo et al., 2016; Yonaba, 2020; Zouré et al., 2023a). Le bassin versant du Grand Balé à Pâ (GBP), sous-bassin du bassin du fleuve Mouhoun, constitue un cadre d'étude particulièrement pertinent pour analyser ces problématiques. Ce bassin se distingue par les agricoles, pastorales et halieutiques essentielles pour la population locale. Il est également soumis à u des dynamiques de transformation de l'occupation des sols, liées à l'extension des surfaces agricoles et à la pression démographique, susceptibles d'influencer les processus hydrologiques. Par ailleurs, le bassin du GBP présente une configuration hydrologique représentative à l'échelle locale des bassins sahéliens pour analyse des impacts du changement climatique sur la disponibilité des ressources en eau (Kafando, 1991; Tamboura et al., 2025). Ces dernières années, plusieurs manifestations hydrologiques ont mis en évidence la sensibilité du bassin versant aux épisodes pluviométriques intenses et les limites actuelles de la régulation des écoulements. La submersion récurrente de la Route Nationale n°1, axe stratégique reliant Ouagadougou à Bobo Dioulasso, au niveau du pont de Hérédougou (DGRE, 2025, 2024; Kambou, 2022) illustre une réponse hydrologique rapide du bassin face aux fortes pluies. Au-delà de leurs impacts ponctuels sur les infrastructures, les activités agricoles et la mobilité, ces événements traduisent une évolution du fonctionnement hydrologique du bassin dans un contexte de transformation du régime pluviométrique régional (Fowe et al., 2015; Konaté, 2023; Souley Tangam et al., 2024; Tirogo et al., 2016; Yonaba, 2020).

Ces constats soulignent la nécessité de disposer d'outils d'analyse capables de représenter de manière fiable la relation pluie-débit et d'évaluer la disponibilité et la variabilité des ressources en eau à l'échelle du bassin versant. La modélisation hydrologique constitue à cet égard un outil essentiel pour simuler les écoulements, analyser les impacts du changement climatique et appuyer la prise de décision en matière de gestion de l'eau (Bodian et al., 2012; Guelbeogo et al., 2023; Konaté, 2023; Souley Tangam et al., 2024; Villeneuve et al., 2005). Des modèles tels que **HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modelling System)**, largement utilisés en contexte sahélien, permettent d'intégrer les caractéristiques physiques du bassin et les données hydro-climatiques afin d'améliorer la compréhension du fonctionnement hydrologique et de contribuer à une gestion plus efficace et anticipative des

ressources en eau à l'échelle du bassin versant du GBP. Cette approche fournirait des éléments essentiels pour orienter les décisions de gestion intégrée et durable de l'eau dans le bassin, à l'horizon 2050.

L'objectif général de ce travail est de contribuer à une meilleure gestion des ressources en eau du bassin versant du Grand Balé à Pâ dans un contexte de changement climatique à l'horizon 2050. Plus spécifiquement, il s'agit de :

- Caractériser physiquement et hydrologiquement le bassin versant du Grand Balé à Pâ ;
- Mettre en place un cadre de modélisation hydrologique avec HEC-HMS pour la simulation des écoulements du bassin versant du grand Balé à Pâ ;
- Évaluer les impacts du changement climatique sur les écoulements dans le bassin versant du Gand Balé à Pâ à l'horizon 2050.

Ce mémoire s'articule en cinq parties principales comme suit :

La première partie présente le cadre de l'étude, énonce la problématique de la recherche et définit les objectifs poursuivis.

La deuxième partie est dédiée à la revue de la littérature scientifique concernant la variabilité et les changements climatiques au Burkina Faso, les modèles hydrologiques et les études sur le bassin versant du GBP.

La troisième partie présente le bassin versant, décrit la méthodologie de travail mise en œuvre pour atteindre les objectifs fixés.

La quatrième partie expose les principaux résultats obtenus, suivis d'une discussion qui les analyse et les confronte aux connaissances actuelles.

Enfin, **la cinquième partie** est consacré à la conclusion et formule des recommandations issues des travaux de recherche.

II. PRÉSENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL

La Direction Générale des Ressources en Eau (DGRE) du Burkina Faso est une institution publique placée sous la tutelle du Ministère de l'Environnement, de l'Eau et de l'Assainissement (MEEA). Elle a connu une évolution marquante dans le contexte des besoins croissants en gestion durable des ressources hydriques.

Dans les années 1990, elle a élargi ces missions avec l'adoption du concept de la Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE) au Burkina Faso. La loi sur l'eau de 2001 vient par la suite instaurer un cadre décentralisé et participatif.

Sur le plan organisationnel, l'arrêté *n°2025-2110/MEEA/CAB* du 4 décembre 2025 portant organisation, attributions et fonctionnement de la DGRE vient renforcer la structure. Elle est dirigée par une directrice nommée par décret en Conseil des ministres. La structure comprend trois principales Directions de service : La Direction des Études et de l'Information sur l'eau (DEIE), la Direction de la Qualité des Eaux (DQEaux), et la Direction du Suivi de la Réglementation et des Organismes de Bassins (DEROB). Elle dispose également de Services d'appui. La DEIE, au sein de laquelle s'est déroulé notre stage, constitue un pilier technique majeur de la DGRE. Elle est composée de trois services : le Service Hydrologie (SH), le Service Hydrogéologie (SHgéo), et le service Information, Promotion des Études et Recherches sur l'Eau (SIPEau). Le service Hydrologie, où nous avons été affectés, est spécifiquement chargé de la mise en place des mécanismes de collecte des données sur les eaux de surface, de la centralisation et du traitement de ces données, de la modélisation et de la prévision des crues, de la gestion des banques de données, ainsi que de l'appui-conseil aux acteurs du domaine. Ce service joue ainsi un rôle essentiel dans la connaissance, la surveillance et la gestion durable des ressources en eau de surface du Burkina Faso. La Figure 1 illustre l'organigramme de la DGRE.

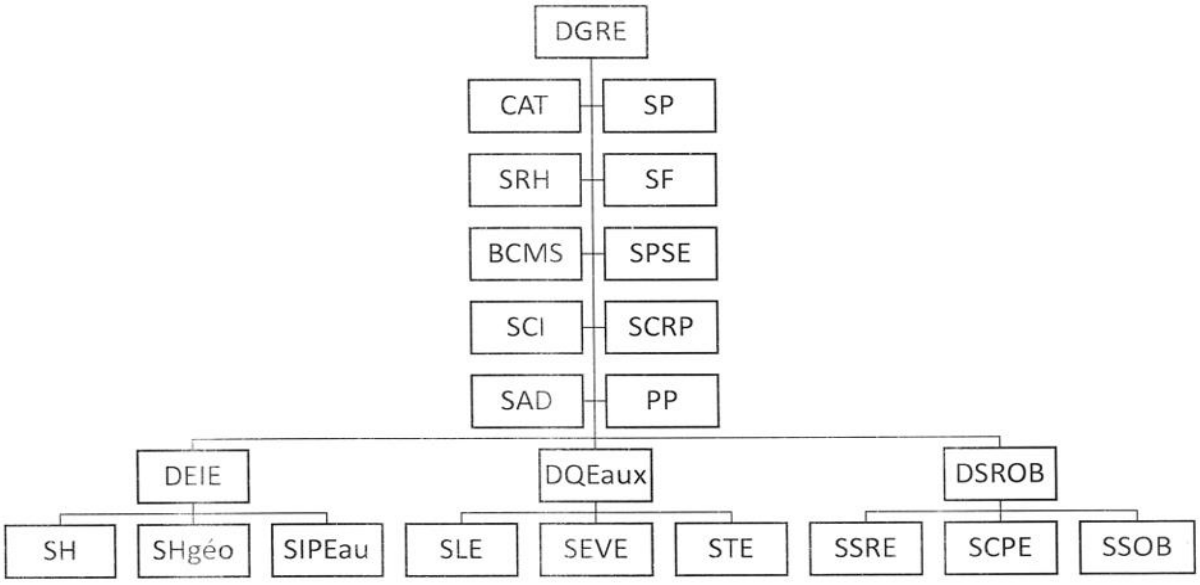


Figure 1 : Organigramme de la Direction Générale des Ressources en Eau

Légende

BCMS : Bureau de la Communication et du Marketing Social
CAT : Cellule d'Appui Technique
DEIE : Direction des Études et de l'Information sur l'Eau
DGRE : Direction Générale des Ressources en Eau
DQEEaux : Direction de la Qualité des Eaux
DSROB : Direction du Suivi de la Règlementation et des Organismes de Bassins
PP : Projets et Programmes
SAD : Service des Archives et de la Documentation
SCI : Service de Contrôle Interne
SCPE : Service Coordination de la Police de l'Eau
SCRP : Service de Communication et des Relations Publiques
SEVE : Service Évaluation, Valorisation des Données de la Qualité de l'Eau
SF : Service Financier
SH : Service Hydrologie
SHgéo : Service Hydrogéologie
SiPEau : Service Information, Promotion des Études et Recherches sur l'Eau
SLE : Service du Laboratoire d'Analyse de la Qualité des Eaux
SP : Secrétariat Particulier
SPSE : Service de Planification, de Suivi et d'Évaluation
SRH : Service des Ressources Humaines
SSOB : Service Suivi des Organismes de Bassins
SSRE : Service Suivi de la Règlementation sur l'Eau
STE : Service Promotion du Traitement des Eaux

III. REVUE DE LA LITTÉRATURE

III. 1. Variabilité et changement climatique au Burkina Faso

III.1.1. Concept clé et phénomènes observés

Le changement climatique peut être défini comme une variation persistante de l'état du climat identifiable par des modifications statistiques de la moyenne, et/ou de la variabilité de ses paramètres sur plusieurs décennies ou plus (GIEC, 2013). Au Burkina Faso, cette variabilité se manifeste par un enchaînement d'événements climatiques extrêmes d'une ampleur au cours des dernières décennies (Bikie et al., 2025; Fowé et al., 2025; Konaté, 2023).

La variabilité climatique récente au Burkina Faso s'est caractérisée autour de deux phases principales. La période 1970-1990 caractérisée par une sécheresse sévère et durable à l'échelle du sahel, marquée par un déficit pluviométrique important et une augmentation généralisée des écoulements (Descroix et al., 2016; Fowé et al., 2025). À partir des années 1990, une reprise pluviométrique relative est enregistrée. Celle-ci ne traduit toutefois pas un retour aux conditions antérieures, mais plutôt une transformation du régime des précipitations. Plusieurs études (Ahokpossi, 2018; Ibrahim et al., 2014; Panthou et al., 2014), soulignent une augmentation significative de la fréquence et de l'intensité dans les événements pluvieux extrêmes (pluies journalières supérieures à 50 mm). Cette évolution favorise un ruissellement rapide et accroît le risque d'inondation, alors même que les cumuls annuels restent inférieurs aux moyennes de référence de la période pré-sécheresse (Sanogo et al., 2015). Parallèlement, une tendance au réchauffement thermique s'est clairement installée. L'augmentation des températures, plus prononcée pour les minimales, est cohérente avec les tendances liées à l'échelle régionale et mondiale (GIEC, 2023). Cette élévation des températures intensifie la demande évaporative de l'atmosphère et accentue le stress hydrique, en particulier pendant la saison sèche. Les analyses historiques mettent une alternance marquée de périodes sèches et humides, dominée par une sécheresse prolongée au cours de la période 1970-2000. Cette phase a occasionné une baisse significative du régime pluviométrique, estimée entre 14 % et 31 % (Fowé et al., 2025; Kouakou et al., 2023). Ces perturbations ont eu des conséquences immédiates sur la disponibilité des ressources en eau, accentuant le stress hydrique dans de nombreuses régions (Water Aid, 2021).

III.1.2. Projections et impacts anticipés sur les ressources en eau

Les projections climatiques à moyen et long terme dessinent un avenir incertain et préoccupant pour les ressources en eau au Burkina Faso. Pour les précipitations, les projections montrent une forte incertitude et une grande variabilité selon les modèles climatiques. A la station de Wayen, les simulations avec les projections climatiques des RCMs projettent une augmentation des débits de l'ordre de 22 % tandis qu'une baisse d'environ 3% des précipitations entraîne une diminution de 9% des débits (Fowe et al., 2012). Cette diminution serait particulièrement marquée dans plusieurs grands bassins hydrographiques, avec des réductions estimées à 68,9 % pour la Comoé, 73 % pour le Mouhoun, 29,9 % pour le Nakambé et 41,4 % pour le bassin du Niger (Water Aid, 2021).

Ainsi, le Burkina Faso se trouve confronté à une double contrainte climatique : une variabilité hydro climatique déjà accentuée par le passé et des perspectives futures défavorables pour la disponibilité en eau. Dans ce contexte, les études de modélisation prospective, comme celle menée sur le bassin versant du GBP, apparaissent essentielles pour mieux anticiper les évolutions à venir et appuyer les stratégies de planification et l'adaptation.

III. 2. Modélisation hydrologique

III.2.1. Définitions des concepts

La modélisation hydrologique consiste à mobiliser des outils mathématiques et numériques afin de produire des informations hydrologiques non disponibles à partir de données hydrométéorologiques existantes (Sahu et al, 2020). Elle vise à estimer des débits, des volumes de ruissellement ou encore des scénarios hydrologiques correspondant à différents contextes climatiques (actuel ou futur). Le modèle pluie-débit constitue l'un des outils centraux de cette approche. Il vise à établir une relation quantitative avec les données d'entrée de pluies, des caractéristiques du bassin versant et le débit à la sortie du bassin versant. Il permet soit de prévoir les débits futurs à partir de prévisions météorologiques, soit de reproduire les scénarios hydrologiques dans des contextes donnés (Ramos, 2018).

III.2.2. Intérêts de la modélisation hydrologique

La modélisation hydrologique répond à plusieurs objectifs essentiels. Elle permet avant tout d'anticiper les crues et de contribuer à la gestion des risques d'inondation (Kouamé, 2024). Elle constitue également un outil clé pour la planification et la gestion durable des ressources en eau, notamment pour l'agriculture irriguée et l'alimentation en eau des populations (Sahu et al, 2020). Dans les bassins non jaugés, ou les données hydrométriques sont souvent insuffisantes, elle apporte une aide précieuse à la décision en fournissant des estimations indirectes des débits (Randrianasolo, 2012). Enfin, elle permet d'évaluer les impacts des changements climatiques en reliant les scénarios de précipitation et de température aux dynamiques hydrologiques des bassins (Ibrahim, 2012).

III.2.3. Classification des modèles hydrologiques

La modélisation hydrologique occupe une place centrale dans l'étude et la gestion des ressources en eau. Elle s'appuie sur une large diversité de modèles développés au fil du temps, chacun répondant à des objectifs spécifiques. Chaque modèle présente des avantages et des limites propres. Le choix de l'outil dépend étroitement des objectifs de l'étude et de la disponibilité des données. Afin de structurer cette diversité, les modèles hydrologiques sont généralement classés selon trois critères principaux : la description des processus, la représentation spatiale et la discrétisation temporelle (Okiria et al., 2022; Paul et al., 2019; Villeneuve et al., 2005; Yonaba, 2020). Selon la description des processus, on distingue les modèles empirique fondés sur des relations statistiques et les modèles dérivés des processus incluant les approches physiques et conceptuelles. Du point de vue spatial, les modèles peuvent être globaux, distribués ou semi-distribués, ces derniers offrant un compromis entre simplicité et réalisme. Enfin sur le plan temporel, les modèles événements se concentrent sur des épisodes pluvieux isolés, tandis que les modèles continuent simulent le fonctionnement hydrologique sur de longues périodes en incluant les phases sèches et humides. Compte tenu des objectifs poursuivis, le choix s'est porté sur un modèle conceptuel, semi-distribué et continu.

III.2.4. Justification du choix du modèle HEC-HMS

Dans le contexte sahélien et plus largement ouest-africain, plusieurs modèles ont déjà été implémentés. Les modèles globaux et conceptuels de la famille génie rural (GR), tels que GR2M (Paturel et al., 1995; Bodian et al., 2012; Fowe et al., 2012; Marie-Rosine et al., 2020) et GR4J (Batienon, 2021; Kouamé, 2024; Koubodana et al., 2021; Tramblay et al., 2021) ont l'avantage d'être simples, peu exigeants en données et adaptées aux bassins faiblement jaugés. Cependant, leur caractère global limite leur capacité à représenter explicitement la variabilité spatiale, ce qui peut être insuffisant lorsque l'objectif est d'analyser l'influence des états de surface ou des changements d'occupation du sol.

À l'opposé, des modèles semi-distribués ou distribués comme SWAT (Abbaspour et al., 2015; Chaibou Begou et al., 2016; Yonaba, 2020; Zouré et al., 2023) offrent une description fine de l'hydrodynamique et de l'hétérogénéité spatiale du bassin (sols, topographie, occupation des terres). Ils sont particulièrement adaptés pour étudier les impacts du changement climatique et de l'utilisation des sols. Toutefois, SWAT nécessite un volume important de données d'entrée (climat, pédologie, cartographie détaillée), une calibration lourde et fait face à des problèmes de sur-paramétrisation (Abbaspour et al., 2015), ce qui rend son application délicate dans les contextes sahéliens où l'information de terrain est rare.

Le modèle HEC-HMS permet de simuler en événementielles (crues) et en continues (écoulements saisonniers). Cela permet de répondre à la nécessité d'intégrer l'effet des conditions d'humidité initiale et des processus inter-événementiels, souvent déterminants dans le contexte sahélien (Niang, 2006). Un autre atout de HEC-HMS est son accessibilité : il s'agit d'un logiciel gratuit et mis à jour fréquemment, disposant d'une interface conviviale facilitant le traitement des données d'entrées (Lamachère and PUECH, 1995).

Dans le cadre de cette recherche, HEC-HMS apparaît comme le modèle le plus adapté : il combine la flexibilité des approches semi-distribuées, une modularité méthodologique qui s'adapte aux données disponibles, et une reconnaissance internationale validée par de nombreuses applications (Sahu et al, 2020). Contrairement aux modèles GR, il va au-delà des relations globales pluie-débit, et à la différence de SWAT, il demeure moins lourd en données et en calibration. Ainsi, HEC-HMS représente un compromis robuste et réaliste pour l'étude des processus hydrologiques dans le contexte ouest-africain en particulier le bassin versant du GBP.

III. 3. Synthèse de quelques études menées sur le bassin versant du Grand Balé

Des travaux hydrologiques et environnementaux ont été réalisés dans le bassin du Grand Balé. Kafando (1991), dans la monographie du bassin versant du GBP, a souligné l'importance stratégique de ce bassin pour les activités agricoles et pastorales, mais également sa vulnérabilité aux pressions climatiques et anthropiques. L'étude met en avant la forte variabilité interannuelle des précipitations et la tendance à l'augmentation des phénomènes extrêmes, notamment les sécheresses et les inondations, ce qui affecte la disponibilité et la gestion de l'eau.

Dans la même perspective d'analyse spatiale, Tamboura et al. (2025) ont reconstitué la dynamique spatio-temporelle de l'occupation des terres dans le bassin versant du Grand Balé entre 1976 et 2022 à partir d'images Landsat et d'analyses Système d'Information Géographique. L'étude révèle que des dynamiques progressives et régressives ont été observées dans le bassin versant. La superficie cultivée a considérablement augmenté de 371,36 % en 47 ans. Cette dynamique s'est faite au détriment de la savane boisée, qui a perdu 1 511,89 km², tombant de 2 197,96 km² (42,8 %) en 1976 à 686 km² (13,36 %) en 2022. Des pertes significatives de superficie ont également été observées dans la forêt galerie, qui a perdu 24,1 km² par rapport à sa superficie de référence de 50,24 km². Cette transformation du paysage a entraîné une perturbation de l'équilibre hydrologique du bassin versant. Cette étude contribuera à la compréhension des dynamiques hydrologiques du bassin versant du GBP.

III. 4. Projections climatiques

La projection climatique constitue un outil central pour l'analyse des impacts futurs du changement climatique sur les systèmes environnementaux et hydrologiques. Elle se repose sur des modèles climatiques numériques qui simulent l'évolution du climat en fonction de différents scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (GIEC, 2023). Ces scénarios sont initialement formulés sous la forme des Representative Concentration Pathways (RCP), puis plus récemmentsous la forme des Shared Socioeconomic Pathways (SSP). Ils décrivent des trajectoires contrastées de développement socio-économique et de forçage radiatif, servant de base aux simulations climatiques futures (IPCC, 2021). La sixième phase du Projet Intercomparaison des Modèles Couplés s'appuie sur une centaine de modèles climatiques globaux (MCGs) développés dans le cadre des projets d'intercomparaison CMIP5 et CMIP6.

À l'échelle de l'Afrique de l'Ouest et du Sahel, la littérature scientifique converge vers une augmentation des températures moyennes au cours du XXIe siècle, indépendamment du scénario considéré (Ibrahim et al., 2014; Monerie et al., 2025; Sawadogo et al., 2024). Cette hausse thermique, souvent supérieure à la moyenne mondiale, est susceptible d'intensifier l'évapotranspiration potentielle (Hargreaves and Samani, 1985) et de modifier significativement les bilans hydriques des bassins versants sahéliens, avec des conséquences directes sur les écoulements de surface et la recharge des nappes (Diop et al., 2025; Tirogo et al., 2016). En revanche, les projections relatives aux précipitations demeurent marquées par de fortes incertitudes. Les études basées sur des ensembles multi-modèles montrent des résultats contrastés quant à l'évolution des cumuls pluviométriques annuels, certains modèles projetant une augmentation des précipitations, tandis que d'autres suggèrent une diminution ou une redistribution spatio-temporelle des pluies (Biasutti, 2019; Monerie et al., 2025). Toutefois, plusieurs travaux s'accordent sur une augmentation de la fréquence et de l'intensité des évènements pluviométriques extrêmes, accompagnée d'une variabilité intra-saisonnière accrue et de séquences sèches plus longues (Descroix et al., 2016; Panthou et al., 2014). Ces incertitudes sont largement attribuées à la complexité des mécanismes contrôlant la mousson ouest-africaine, aux interactions océans-atmosphère, ainsi qu'aux différences de paramétrisation et de résolution spatiale entre modèles climatiques (Nicholson, 2013; Sanogo et al., 2015). Elles justifient le recours à des ensembles multi-modèles, à la régionalisation dynamique ou statistique, ainsi qu'aux techniques de correction de biais avant toute application hydrologique (Thrasher et al., 2024). Dans les études hydrologiques, les projections climatiques constituent une entrée essentielle pour l'évaluation des impacts futurs sur les débits, les crues, les sécheresses et la disponibilité des ressources en eau. De nombreux travaux en Afrique de l'Ouest ont montré l'intérêt de coupler les projections climatiques avec des modèles hydrologiques conceptuels ou distribués tels que SWAT, HEC-HMS, GR4J ou IHACRES, afin de quantifier les réponses hydrologiques futures des bassins versants (Bikie et al., 2025; Diallo, 2022; Idrissou et al., 2022; Konaté, 2023). Au regard de ces constats, il apparait nécessaire d'analyser, à l'échelle locale, l'impact des projections climatiques sur le régime hydro-climatique du bassin versant du GBP à l'aide des scénarios climatiques récents SSP.

IV. MATERIEL ET METHODES

IV. 1. Présentation de la zone d'étude

IV.1.1. Situation géographique du bassin Grand Balé à Pâ

La zone d'étude est le bassin versant du Grand Balé à Pâ, qui est un affluent du cours d'eau Mouhoun. Il est situé à l'Ouest du Burkina Faso, entre les latitudes 11°26′ et 12°04′ Nord, et les longitudes 03°10′ et 03°56′ Ouest (Figure 2). Le bassin draine une superficie totale d'environ 3 676 km² à la station hydrométrique de Pâ. Près de 55 % de la superficie totale du bassin se trouve dans la région de Bankui, tandis que 45 % se trouvent sur la région du Guiriko.

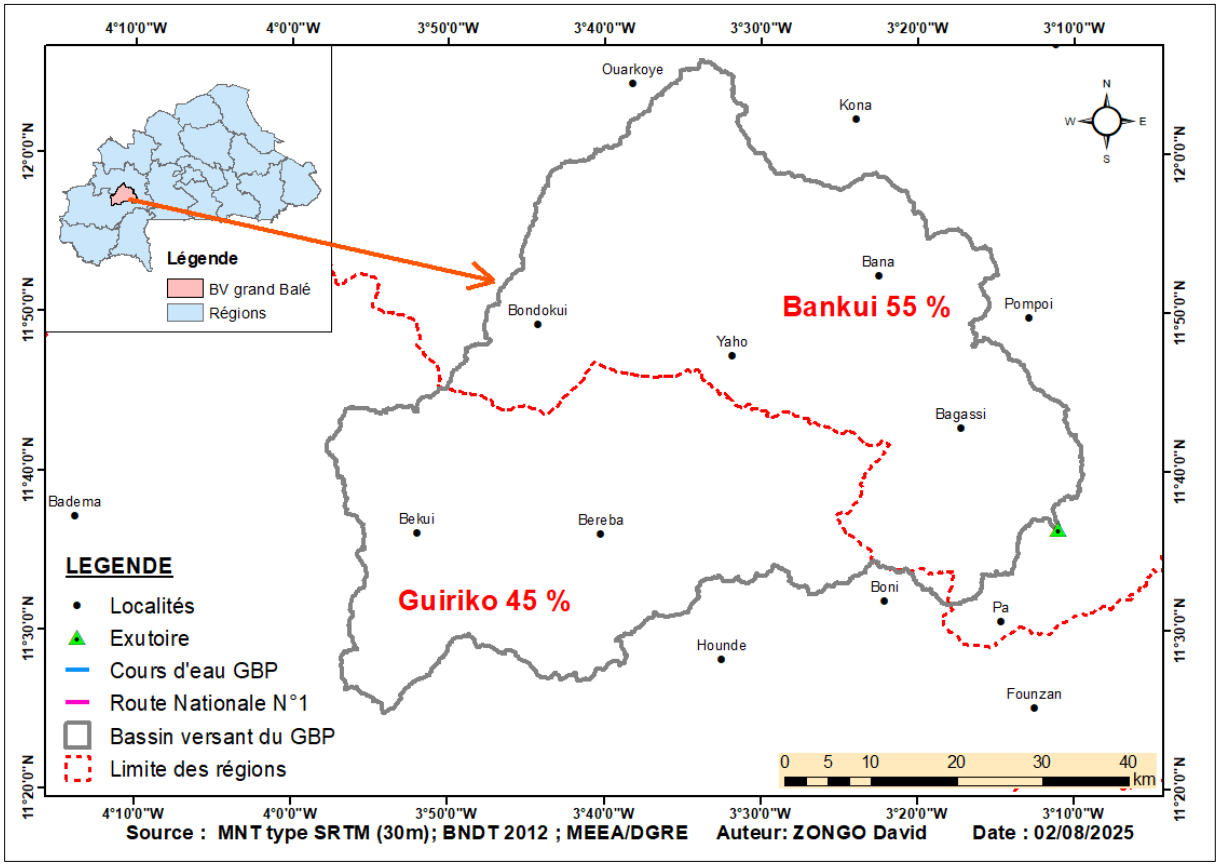


Figure 2 : Localisation du bassin Grand Balé à Pâ

IV.1.2. Caractéristiques climatiques du bassin Grand Balé à Pâ

La Figure 3 présente la moyenne mensuelle de la température et celle des précipitations du bassin versant du GBP sur la période 1990-2024 (données CHIRPS). La saison sèche s'étend de novembre à avril avec des précipitations quasi nulles (0 à 10 mm), tandis que la saison des pluies s'étale de mai à octobre, avec un cumul en août de 262 mm Ce régime pluviométrique est typique d'un climat soudano-sahélien, à une seule saison humide bien marquée. Du point de vue thermique, les températures restent élevées toute l'année, oscillant entre 24°C en août et 32°C en avril, qui est le mois le plus chaud.

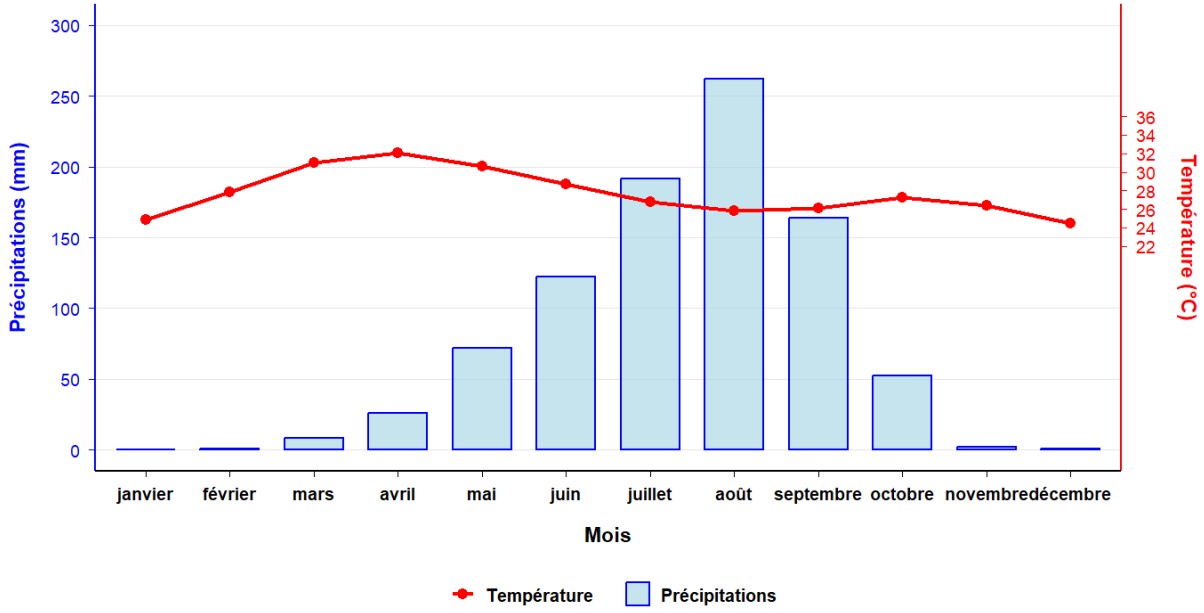


Figure 3 : Diagramme ombrothermique du bassin versant du Grand Balé à Pâ

IV.1.3. Réseau hydrographique du bassin versant du Grand Balé à Pâ

La Figure 4 illustre l'ensemble des rivières qui drainent le bassin versant du GBP. Le cours d'eau principal porte le nom de Grand Balé. Il est un affluent du cours d'eau Mouhoun. Il se jette un peu plus après la station hydrométrique de Pâ. Les écoulements d'eaux vont principalement d'Ouest en Est.

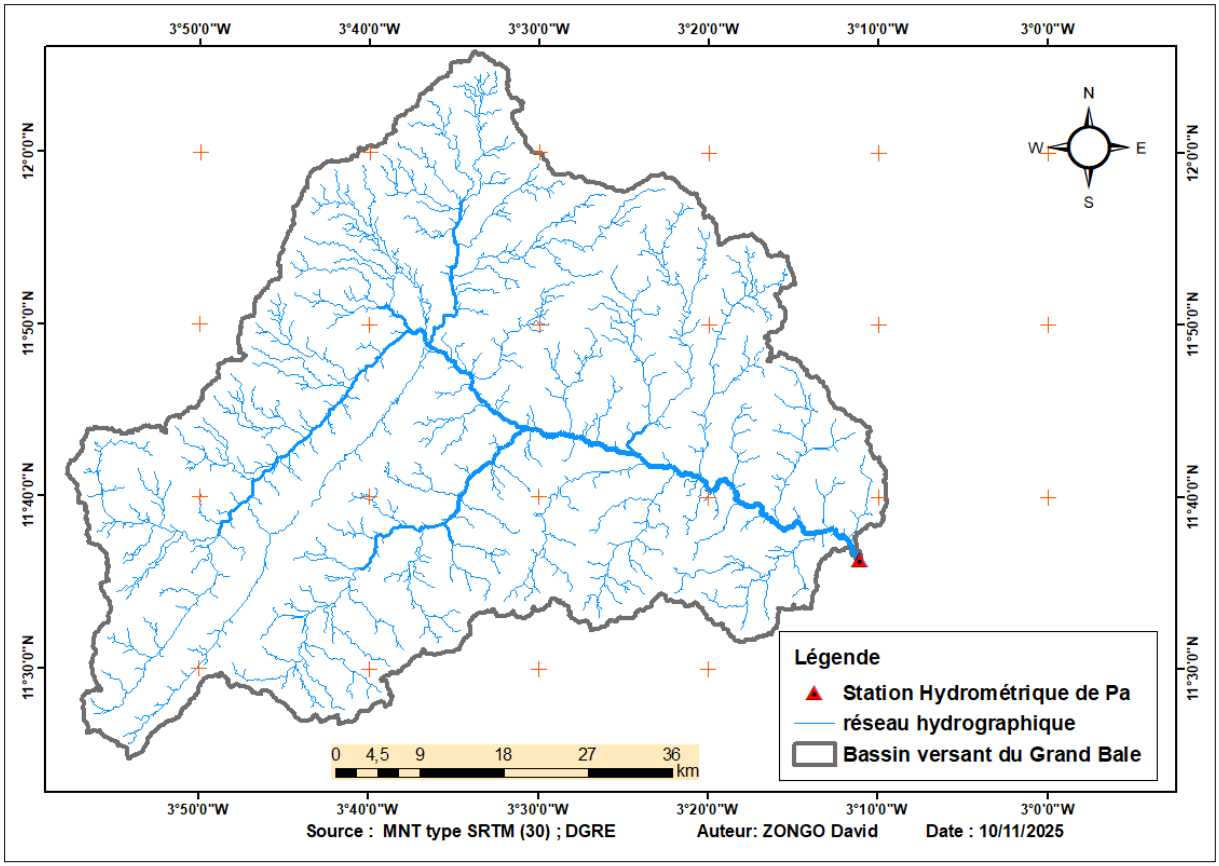


Figure 4 : Réseau hydrographique du bassin grand Balé à Pâ

IV.1.4. Pédologie

La carte pédologique (Figure 5) révèle une diversité de types de sols sur le bassin. Les sols à Sesquioxydes, majoritaires, occupent l'essentiel de la superficie. Ils ont une capacité de rétention en eau limitée, ce qui favorise le ruissellement de surface. On note également la présence de sols à mull dans certaines zones, associés à des affleurements rocheux, qui accentuent l'écoulement direct vers les cours d'eau. Les sols peu évolués et d'origine non climatique apparaissent en taches localisées, traduisant des conditions particulières de pédogenèse. Les sols hydromorphes peuvent être retrouvés sur les lits des cours d'eau. Ce type de sols favorise les écoulements rapides (Kamagaté, 2006).

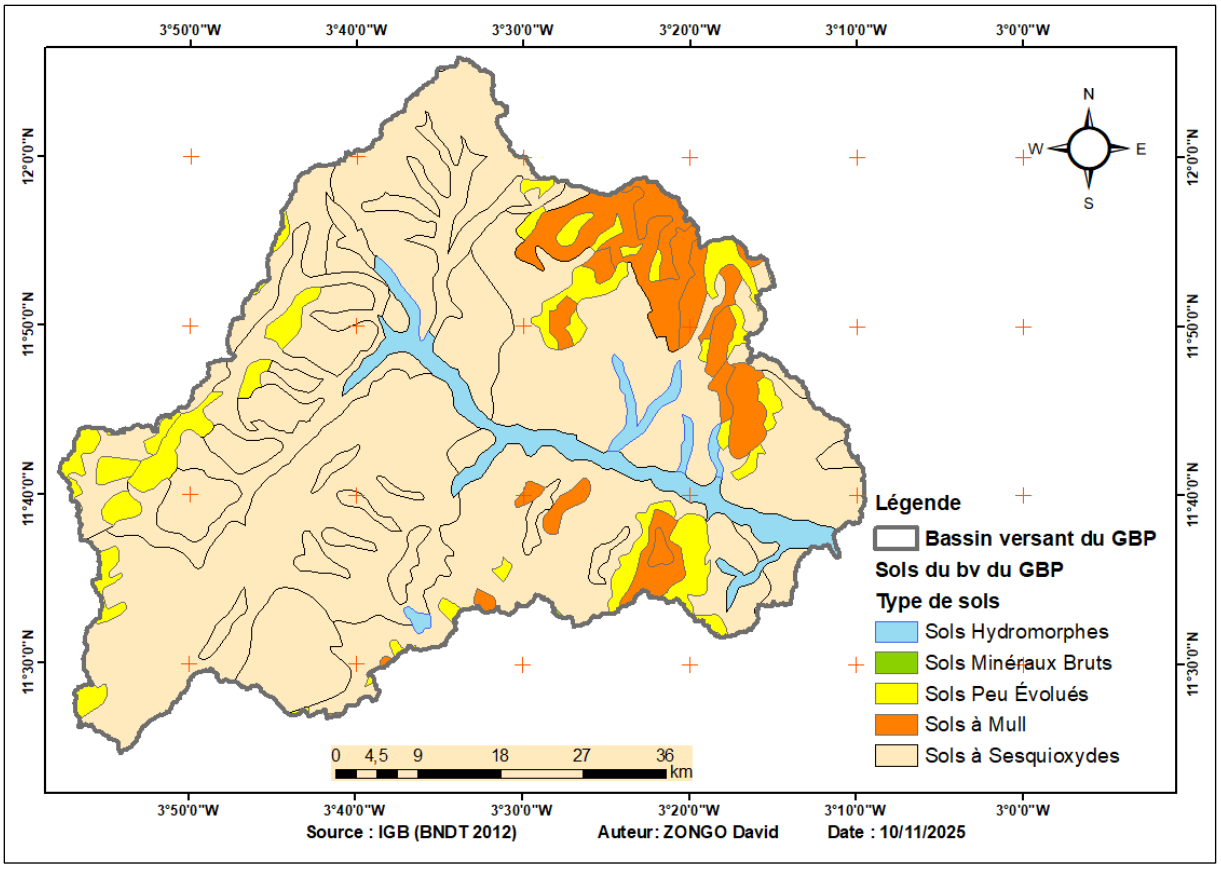


Figure 5 : Sols du bassin grand Balé à Pâ

IV.1.5. Géologie et hydrogéologie

Le bassin du GBP présente une géologie dominée par trois grands ensembles : les formations du bouclier, les formations du sillon birrimien et les formations sédimentaires, issues de l'érosion et du dépôt des matériaux détritiques. Les roches cristallines du socle (migmatites, granites, gneiss) affleurent par endroits, donnant naissance à des inselbergs et à des collines isolées. Le sillon birrimien est représenté par des métabasaltes et des schistes, témoignant d'un ancien contexte volcanique et sédimentaire (Diagne et al., 2023). Ces structures géologiques influencent directement la morphologie du bassin, l'infiltration des eaux et la disponibilité des nappes phréatiques. Sur le plan hydrogéologique, le bassin versant repose essentiellement sur des aquifères discontinus liés aux fractures et zones altérées du socle. Ces aquifères présentent des débits modestes, mais jouent un rôle crucial pour l'alimentation en eau potable et l'irrigation locale (Diagne et al., 2023). Leur productivité varie selon la profondeur de l'altération, la fracturation et la nature des matériaux (FAO, 1996). Ainsi, la géologie conditionne fortement les écoulements de surface et les ressources souterraines du Grand-Balé.

IV.1.6. Population

La population du bassin versant est composée majoritairement d'autochtones Bwaba, auxquels s'ajoutent des groupes allochtones tels que les Bobo, Mossi, Gourounsi, Peulh et quelques minorités, comme les Dagari-Dioula (INSD, 2023). La densité de population varie entre 7 et 45 habitants/km², ce qui traduit une occupation contrastée de l'espace.

IV.1.7. Activités économiques sur le bassin versant

IV.1.7.1. Agriculture et élevage

L'agriculture constitue l'activité économique dominante, mobilisant plus de 90 % de la population active. Elle repose sur la culture du coton, principale spéculation commerciale, suivie du riz dans les zones inondables, et d'une large gamme de cultures vivrières (mil, maïs, sorgho, arachide, sésame, igname, manioc, soja) destinées prioritairement à l'autoconsommation (Ouedraogo, 2012). L'élevage occupe une place importante avec les bovins, petits ruminants et volailles, souvent associé aux populations peulh. Toutefois, l'intégration agriculture-élevage reste limitée, entraînant des pressions sur les terroirs villageois et sur les ressources pastorales.

IV.1.7.2. Pèche et foresterie

La pêche est une activité artisanale pratiquée essentiellement par les femmes et les enfants dans les mares résiduelles de la rivière Grand-Balé entre septembre et mars. Bien que non lucrative, elle joue un rôle alimentaire important. Du côté de la foresterie, le bassin dispose de forêts classées et de formations savanicoles exploitées pour le bois de chauffe, les produits forestiers non ligneux (karité, néré, tamarinier), et le pâturage.

IV. 2. Matériel

IV.2.1. Données de l'étude

La construction de la base de données de cette étude a impliqué plusieurs sources de données. Il s'agit des données hydrométriques, climatiques observées, climatiques simulées, de la base nationale de données topographiques (BNDT), d'un modèle numérique de terrain (MNT), l'occupation des sols et des types de sol.

IV.2.1.1. Données hydro-climatiques observées

Les données climatiques utilisées dans cette étude proviennent des produits du *Climate Hazards Center* de l'Université de Californie à Santa Barbara. Les précipitations journalières sont issues du jeu de données **CHIRPS** (*Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations*), qui fournit des estimations quotidiennes des pluies à une résolution spatiale d'environ 5 km, disponibles depuis 1981. Ce produit, couvrant la période 1981-2024, est particulièrement adapté aux régions tropicales et semi-arides, telles que l'Afrique de l'Ouest (Dembélé and Zwart, 2016; Funk et al., 2015; Kouakou et al., 2023; Yonaba et al., 2024). Les températures journalières maximales et minimales proviennent quant à elles du jeu de données **CHIRTS-daily** (*Climate Hazards Center InfraRed Temperature with Stations*), qui offre une résolution spatiale similaire et couvre la période d'étude (1981–2016). L'ensemble de ces données a été téléchargé sur le site du *Climate Hazards Center* (https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps et https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRTSdaily/, consultés respectivement le 1er août et le 25 octobre 2025). Les données ont été extraites sur 8 stations pluviométriques (SIEREM - Téléchargement Stations - BURKINA FASO, **Annexe 1**) représentant la pluviométrie sur le bassin versant du GBP. Ces stations dont les zones d'influences ont été déterminées à l'aide des polygones de Thiessen (Fiedler, 2003) sont illustrées sur la Figure 6.

Quant aux données hydrométriques, elles sont fournies par la Direction Générale des Ressources en Eau. Il s'agit des données de débits journaliers à la station hydrométrique de Pa (Figure 6) sur 35 ans (1990 à 2024). La série des débits comporte des données manquantes qui seront comblées avant utilisation.

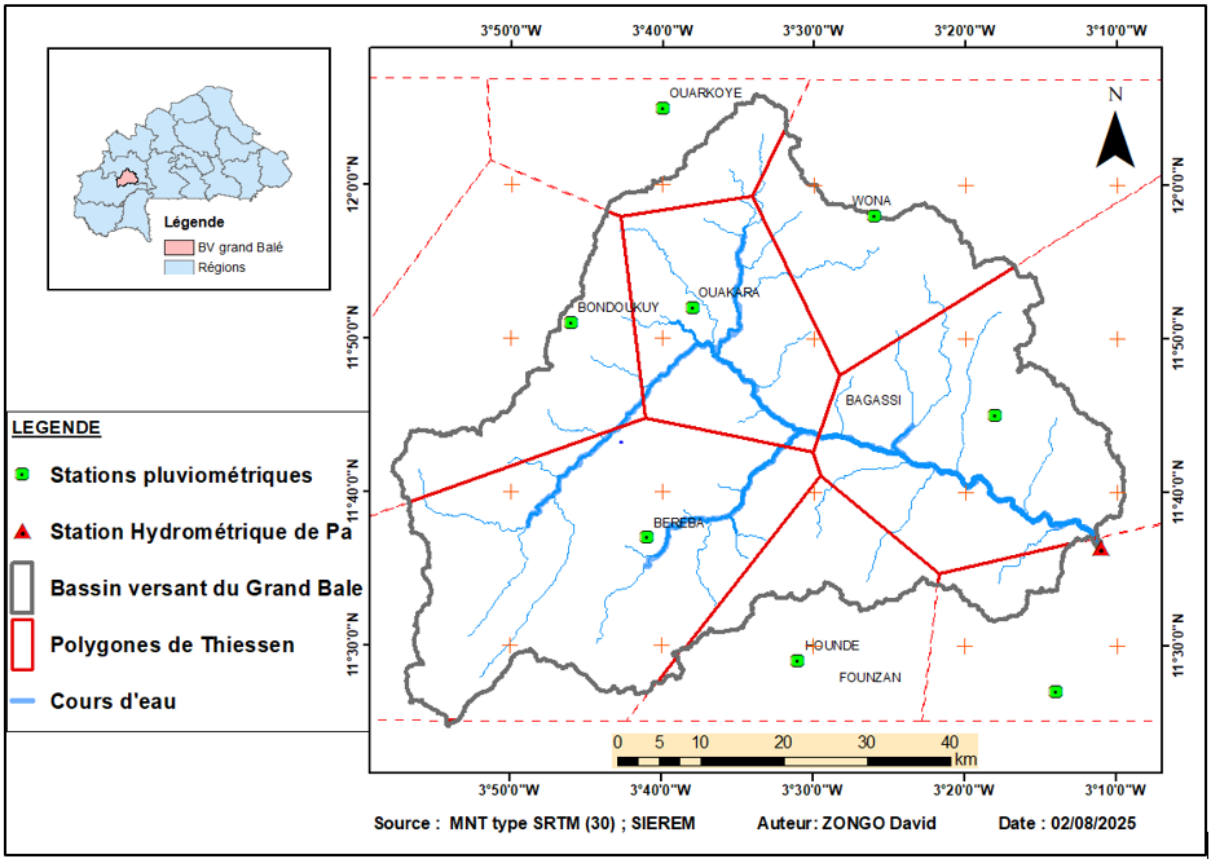


Figure 6 : Carte de localisation des stations hydrométriques et pluviométriques ainsi que les zones d'influence des postes pluviométriques (Polygones de Thiessen)

IV.2.1.2. Données climatiques futures

Cette étude utilise des projections climatiques haute résolution provenant du projet NEX-GDDP-CMIP6. L'analyse s'est basée sur trois variables climatiques quotidiennes (précipitations, températures maximale et minimale) issues de cinq (05) Modèles Climatiques Globaux (MCGs) (Tableau 1). Les deux phases, la période historique (1981-2014) et l'horizon 2050 (2036-2065), ont été considérées selon deux scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (GES) : le scénario intermédiaire SSP2-4.5 et le scénario pessimiste SSP5-8.5. La période de référence 1981-2014 a servi d'étalon pour évaluer la performance des modèles climatiques futurs. L'ensemble des données climatiques futures utilisées est accessible publiquement sur le portail de la NASA : (https://ds.nccs.nasa.gov/thredds/ncss/AMES/NEX/GDDP-CMIP6/, consulté le 2 septembre 2025). Le script de téléchargement sur google earth engine est présenté à l'**Annexe 2**.

Tableau 1 : Modèles climatiques du Projet NEX-GDDP -CMIP6 utilisés

MCG	Institutions/Pays	Résolution spatiale (°)
ACCESS-CM2	Simulateur Australien du Climat et du Système Terrestre Modèle Climatique 2, Australie	1×1
MRI-ESM2-0	Institut de Recherches Météorologiques, Japon	
MPI-ESM1-2-HR	Institut Max Planck pour la Météorologie, Allemagne	
MIROC6	Centre de Recherche sur le Système Climatique de l'Université de Tokyo, Japon	
MIROC-ES2L		

IV.2.1.3. Données géospatiales

Les données géographiques ont été fournies par l'Institut géographique du Burkina (IGB). Ce sont essentiellement des données vectorielles (en format "shapefile") issues de la BNDT de 2012 de l'Institut Géographique du Burkina Faso.

Le modèle numérique de terrain (MNT) utilisé est du type SRTM Worldwide Elevation Data (avec une résolution de 30 m, version SRTM V3). Il a été téléchargé au format GEOTIFF via le site gouvernemental du United States of Geological Survey (USGS) (https://earthexplorer.usgs.gov, consulté le 10 août 2025).

IV.2.1.4. Curve Number grid

Le numéro de courbe (CN grid) a été élaboré à partir d'une superposition, dans une SIG, des données d'occupation des sols issues de *Copernicus Global Land Cover* (https://livingatlas.arcgis.com/landcover/) de résolution spatiale de 100 m et des types de sols provenant de la *FAO Digital Soil Map of the Word* (https://www.fao.org/land-water/land/land-governance/land-resources-planning-toolbox/category/details/en/c/1026564/), consultés le 7 octobre 2025. La carte numérique est la version digitalisée de la carte mondiale des sols FAO-UNESCO, produite au format papier à l'échelle 1 : 5 000 000. Les types de sols ont été classés en groupes hydrologiques (A, B, C et D) selon leur perméabilité. Cette reclassification repose sur les propriétés de texture et de pente fournies par la DSMW, en suivant les guides standards

(comme le National Engineering Handbook de l'USDA). Les groupes vont des sols les plus perméables (Groupe A) aux moins perméables (Groupe D). Les valeurs de CN ont été attribuées à chaque pixel de l'image composite (représentant une combinaison unique « Occupation du sol / Groupe hydrologique de sol ») sur la base des tables du rapport du Service de Conservations des Ressources Naturelles (NRCS) du Département de l'Agriculture des Etats-Unis (USDA) (https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmstrm/cn-tables) consulté le 8 octobre 2025.

IV.2.2. Analyse critique et prétraitement des données

IV.2.2.1. Analyse critique des données climatiques

De nombreuses études ont validé la fiabilité de CHIRPS dans le contexte ouest-africain, en particulier pour la modélisation hydrologique et l'analyse des extrêmes climatiques (Dembélé et al., 2020; Dembélé and Zwart, 2016; Kouakou et al., 2023; Yonaba et al., 2024). Parmi les modèles de précipitations spatiales, CHIRPS présente une cohérence spatiale optimale au Burkina Faso et reproduit fidèlement le gradient nord-sud des précipitations, déjà mentionné dans des études antérieures (Dembélé et Zwart, 2016; Dembélé et al., 2020). L'étude menée par Kouakou et al. (2023), comparant 15 produits de précipitations dans divers bassins en Afrique de l'Ouest et centrale, a révélé que CHIRPS présente les meilleures performances pour la simulation des débits dans des modèles hydrologiques régionaux, grâce à un bon équilibre entre précision, continuité des séries et résolution spatiale. Par ailleurs, CHIRPS s'avère également efficace pour le suivi des sécheresses. Yonaba et al. (2024) ont démontré que ce produit était particulièrement performant pour la détection des sécheresses météorologiques, à la fois pour les épisodes courts (3 mois) et longs (12 mois), confirmant ainsi sa pertinence pour le suivi hydro-climatique dans la région soudano-sahélienne.

Dans ce mémoire, l'utilisation des données climatiques permet donc de pallier les limites liées aux lacunes de données météorologiques au sol, tout en garantissant une cohérence temporelle et spatiale essentielle pour la calibration et la simulation du fonctionnement hydrologique de la zone d'étude. Une analyse des données climatiques a prouvé leur qualité, les différents tests effectués ont permis de déterminer les périodes de ruptures. En appliquant l'indice standardisé des précipitations, les périodes sèches, humide et d'alternance ont été détectés.

IV.2.2.2. Analyse critique des données hydrométriques

La série journalière de débits à la station de Pâ présente environ un taux global de 31,08 % de lacunes. La présence de ces lacunes peut affecter la représentativité statistique de la série et introduire des biais dans les analyses si elles ne sont pas traitées de manière rigoureuse. Par ailleurs, les données de débit se caractérisent par une forte saisonnalité et par des relations non linéaires avec le temps, rendant les méthodes classiques d'interpolation ou d'imputation linéaire peu adaptées (Wilks, 2006). Ces contraintes justifient le recours à une méthode d'imputation capable de préserver la structure temporelle, la variabilité naturelle et les interactions complexes propres aux séries hydrologiques.

Afin de reconstituer les valeurs manquantes, une méthode d'imputation par forêts aléatoires a été mise en œuvre. Les forêts aléatoires constituent une approche d'apprentissage non paramétrique reposant sur la combinaison d'un grand nombre d'arbres de décision construits à partir de sous-échantillons aléatoires des données observées (Breiman, 2001). Dans cette étude, le modèle est composé de 500 arbres, chaque division ne considérant qu'un nombre restreint de variables explicatives, ce qui permet de réduire la corrélation entre les arbres et d'améliorer la robustesse des prédictions. Les variables temporelles (jour julien, mois et année) sont utilisées comme prédicteurs afin de capturer la saisonnalité et l'évolution temporelle du débit. Le modèle est ajusté uniquement sur les observations disponibles, puis utilisé pour estimer les valeurs manquantes. La qualité des prédictions est évaluée à l'aide de l'erreur *out-of-bag*, qui fournit une estimation non biaisée de l'erreur de prédiction. Cette méthode est reconnue pour sa capacité à modéliser des relations non linéaires complexes, sa robustesse face aux valeurs extrêmes et sa capacité à préserver la structure interne des données (Stekhoven et Bühlmann, 2012). Toutefois, comme toute méthode fondée sur l'apprentissage, elle reste limitée à l'interpolation et ne permet pas d'extrapoler des comportements absents des données d'apprentissage. Les résultats issus de l'imputation doivent donc être interprétés avec prudence, en tenant compte des incertitudes associées aux valeurs reconstruites.

IV.2.3. Outils utilisés

Cette étude a mobilisé des outils spécialisés pour mener à bien l'étude. Il s'agit de : *ArcGIS 10.5* avec ses extensions *Arc-Hydro Tools* pour délimiter le bassin versant et déterminer ses paramètres morphométriques ; *HEC-HMS* 4.12 pour simuler les processus hydrologiques ; Pack *Microsoft Office* pour les différents calculs et la rédaction du rapport ; *Logiciel R 4.5.1* pour extraire et analyser des données pour l'étude et *Zotero* pour organiser la littérature scientifique.

IV. 3. Méthodologie de l'étude

IV.3.1. Caractérisation hydro-géomorphologique du bassin versant du Grand Balé à Pâ

IV.3.1.1. Délimitation du bassin versant du Grand Balé à Pâ

Dans cette étude, la délimitation du bassin du GBP s'est déroulée en quatre (4) étapes : la réparation du MNT et correction des dépressions artificielles (filling sinks) ; le calcul de la direction et de l'accumulation des flux (flow direction, flow accumulation) ; l'extraction du réseau hydrographique avec un seuil d'accumulation supérieur à 1000 ; et la délimitation du bassin versant en choisissant l'exutoire au niveau de la station hydrométrique de Pâ. Ce processus a permis d'obtenir la limite hydrologique du bassin du GBP, ainsi qu'une cartographie du réseau de drainage.

IV.3.1.2. Caractéristiques physiques du bassin versant du Grand Balé à Pâ

Les caractéristiques morphométriques du bassin versant traduisent ses dimensions, sa forme et l'organisation de son réseau hydrographique, et influencent directement son fonctionnement hydrologique. Dans le cas du bassin du GBP, la superficie et le périmètre ont été obtenus à partir des limites déduites du MNT sous ArcGIS. La superficie conditionne la quantité d'eau que le bassin peut collecter, tandis que le périmètre, combiné à la surface, permet de calculer différents indices de forme.

L'ensemble de ces paramètres, calculés à partir des données topographiques et géospatiales, constitue une base essentielle pour comprendre le fonctionnement hydrologique du bassin et alimenter la modélisation pluie-débit avec HEC-HMS (Karambiri, 2003).

IV.3.1.3. Indice de compacité et Rectangle équivalent

Le coefficient de forme ou coefficient de Gravelius (K_G) est calculé à l'aide de l'Équation 1.

Équation 1

$$\mathbf{K_G = 0,282 * \frac{P}{\sqrt{S}}}$$

Avec **P** : le périmètre du bassin versant [km]
S : la surface du bassin versant [km^2]

Le rectangle équivalent est le rectangle qui a la même superficie, le même indice de compacité et la même distribution hypsométrique que le bassin versant. Sa longueur est déterminée respectivement par l'Équation 2.

Équation 2

$$\mathbf{L = \frac{P+\sqrt{P^2-16\times S}}{4}}$$

Avec :
P : le périmètre du bassin versant [km] ;
S : la surface du bassin versant [km^2] ;
l : la largeur du rectangle équivalent [km]
L : la longueur du rectangle équivalent [km]

IV.3.1.4. Courbe hypsométrique

La courbe hypsométrique représente la distribution spatiale des altitudes au sein d'un bassin versant, en fonction des surfaces cumulées en pourcentage de la superficie totale. Cet outil morphométrique fondamental permet de caractériser la structure du relief et son stade d'évolution géomorphologique. Elle révèle l'équilibre entre les processus d'érosion et la résistance des roches, offrant ainsi un indicateur précieux de la dynamique géomorphologique du bassin (Lague, 2001).

IV.3.1.5. Indice global de pente

L'indice global de pente (Ig) calculé à l'aide de l'Équation 3, est un paramètre morphométrique qui exprime la pente moyenne d'un bassin versant. Il influence directement la vitesse du ruissellement et l'intensité de l'érosion. Plus l'indice est élevé, plus le ruissellement est rapide, ce qui réduit l'infiltration et accroît les risques de crues et d'érosion (Faye et al., 2021).

Équation 3

$$\mathbf{I_g = \frac{H_{5\%}-H_{95\%}}{L}}$$

Avec
I_g : l'indice global des pentes [m/km]
$H_{5\%}$: altitude à 5% de la surface du bassin [m]
$H_{95\%}$: altitude à 95% de la surface du bassin [m]
L : La longueur du rectangle équivalent [km]

IV.3.1.6. Dénivelée spécifique et densité de drainage

La dénivelée spécifique se calcule en multipliant l'indice global de pente par la racine carrée de la superficie du bassin versant (Équation 4). Elle sert de critère quantitatif pour une classification morphologique des bassins versants, où chaque intervalle de valeurs de Ds correspond à un type de relief distinct (faible, modéré, accidenté).

Équation 4

$$D_s = I_g * \sqrt{S}$$

Avec

D_s : dénivelée spécifique [m]

S : la surface du bassin versant [km^2]

I_g : Indice global de pente [m/km]

La densité de drainage est le rapport entre la longueur totale des cours d'eau dans le bassin versant et la superficie de celui-ci. Elle est définie par l'Équation 5.

Équation 5

$$D_d = \frac{\sum L_i}{S}$$

Avec

D_d : densité de drainage [km/km^2]

L_i : longueur du cours d'eau élémentaire [km]

S : la surface du bassin versant [km^2].

IV.3.1.7. Sinuosité du cours principal

La sinuosité est le rapport entre la longueur réelle du cours d'eau et la longueur de la vallée (Équation 6). La longueur de la vallée est estimée en calculant la distance en ligne droite entre le point le plus en amont et le point le plus en aval du tronçon.

Équation 6

$$Sinuosité = \frac{L_{cours\ d'eau}}{L_{ligne\ droite\ amont_aval}}$$

C'est une mesure descriptive qui quantifie le **degré de méandrage** du chenal. La sinuosité du cours d'eau sera apprécier en utilisant le classification hydromorphologique de (Rosgen, 1994).

IV.3.2. Analyse de la variabilité hydro-climatique

IV.3.2.1. Indices de Pluie et des débits

L'étude pluviométrique a été réalisée à partir des données de précipitations annuelles extraites des séries de données de réanalyses (CHIRPS). L'analyse des données pluviométriques a permis de caractériser les années humides ou sèches dans la zone étudiée à travers les Indice Standardisé des Précipitations (ISP).

Pour évaluer les années hydrologiques dans un contexte de changement climatique, l'Indice Standardisé des Débits (ISD) (Nalbantis et Tsakiris, 2009) a été calculé. Il exprime la situation hydrologique d'un cours d'eau (débit observé) par rapport à sa moyenne historique sur une période donnée. Nous avons supposé que l'année hydrologique commence en janvier et se termine en décembre. Les indices ISP et ISD sont calculés à l'aide de l'Équation 7 avec i la variable indice. Le Tableau 2 donne la classification en fonction de la classe de l'ISP ou de l'ISD.

Équation 7

$$i = \frac{X_{\text{an}} - \bar{X}_{an}}{\sigma}$$

Avec

i : Indice des pluies (ISP) ou des débits (ISD)

$\boldsymbol{X_{an}}$: variable annuelle Pluie [mm] ou Débit [m^3/s]

$\boldsymbol{\bar{X}_{an}}$: Moyenne des pluies annuelles [mm] ou des débits annuels [m^3/s] de la période considérée

$\boldsymbol{\sigma}$: Ecart-type [mm] ou [m^3/s] de la série considérée

Tableau 2 : Classification de la période en fonction de l'indice

Classe de l'indice	Période
$i > 0$	Humide
$i = 0$	Normale
$i < 0$	Sèche

IV.3.2.2. Test de ruptures sur les séries hydro-climatiques

Les données hydro-climatiques ont été soumises au test de (Pettitt, 1979). Ce test permet de détecter un changement dans la valeur de chacun de deux segments de données. Il est basé sur les hypothèses nulle (H_0 : « il n'y a pas de rupture) et alternatives (H_1 : il y a donc rupture). Le test Pettitt sera réalisé sur les séries de données de pluies et de débits à l'aide de la fonction pettitt du package ***trend*** à un niveau de significativité de 5 %.

IV.3.2.3. Test de corrélation entre les précipitations et les débits

La corrélation entre les séries annuelles de précipitations et de débits a été vérifiée à l'aide de tests statistiques non paramétriques, en particulier le test de corrélation par rang de Spearman (**Annexe 3**) disponible dans le package ***trend*** du logiciel R. Ce test, qui ne repose pas sur l'hypothèse d'une distribution spécifique des données, permet de mesurer la force de la relation monotone entre deux variables. Le coefficient de Spearman noté τ, est compris entre -1 et 1. Une valeur proche de 1 indique une forte corrélation croissante, tandis qu'une valeur proche de -1 signale une forte corrélation décroissante. Plus la valeur se rapproche de 0, plus la relation est faible ou inexistante.

IV.3.2.4. Détection des tendances sur les séries de pluies et de débits

Pour détecter et quantifier les tendances dans les séries temporelles de précipitations et de débits du bassin versant du GBP, le test de Mann-Kendall modifié a été utilisé, en raison de la présence probable d'autocorrélation dans ces données hydrologiques. L'autocorrélation peut en effet biaiser les résultats des tests de tendance classiques en surestimant la significativité statistique (Hamed et al., 1998). Le test fournit, pour chaque série, le coefficient Tau de Kendall, la valeur Z corrigée, ainsi que la taille effective de l'échantillon. Cette approche est particulièrement adaptée aux séries hydrologiques et pluviométriques (Hamed et al., 1998) du bassin du GBP, où les observations quotidiennes ou mensuelles peuvent présenter des dépendances temporelles.

IV.3.3. Mise en place du modèle HEC-HMS du bassin versant GBP

IV.3.3.1. Présentation du modèle HEC-HMS

Le système de modélisation hydrologique HEC-HMS est un outil complet développé en 1998 par les ingénieurs de l'armée américaine (USACE). Il simule les processus hydrologiques au sein des bassins versants dendritiques. Il est largement utilisé pour la conception et la gestion de projets hydrauliques, la régulation des activités en zones inondables ainsi que pour la cartographie et l'évaluation des risques d'inondation (Hawker et al., 2022). En outre, le logiciel propose des fonctionnalités avancées pour la simulation du ruissellement sur grille, l'optimisation des paramètres de modélisation, la prévision des débits ainsi que l'évaluation de l'incertitude, de l'érosion, du transport sédimentaire et de la qualité de l'eau (Hawker et al., 2022). Le modèle prend en entrée un certain nombre de variable. Dans le cadre de cette étude, les données d'entrée du modèle HEC-HMS se présentées dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Données d'entrée de HEC HMS

Variable	Source
Précipitations	De 8 stations pluviométriques (pluie) de CHIRPS
ETP	Tmin et Tmax de CHIRTS
Débits observés	Station hydrométrique de Pâ (DGRE)
Relief et pente	Modèle numérique de terrain de type SRTM résolution 30 m (https://earthexplorer.usgs.gov)
Sols	FAO Soil Map (Carte numérique des sols du Monde) (www.fao.org)
Occupation des sols	Global Land cover (https://livingatlas.arcgis.com/landcover/)

IV.3.3.2. Organisation du modèle HEC-HMS

L'organisation du modèle repose sur trois grandes composantes. La première est la représentation physique du bassin, qui consiste à le découper en sous-bassins élémentaires à l'aide d'outils de cartographie basés sur les systèmes d'information géographique. La deuxième concerne la description météorologique, en intégrant par exemple les données de précipitations et d'évapotranspiration nécessaires aux calculs hydrologiques. La troisième, enfin, regroupe les spécifications de simulation, avec la définition des fonctions de production, qui évaluent les pertes d'eau, des fonctions de transfert, qui convertissent le ruissellement en débit, ainsi que des fonctions d'évaluation et d'optimisation, destinées à comparer les résultats du modèle avec les données observées et à ajuster les paramètres pour améliorer la précision des simulations.

IV.3.3.3. Spécifications de contrôle

Dans cette composante, l'accent est mis sur trois fonctions principales, à savoir la fonction de production, la fonction de transfert, et la fonction objectif. Chacune de ces fonctions dispose de méthodologies propres, dont la sélection peut s'avérer délicate selon les objectifs et les spécificités du modèle.

a. Fonction de production

Elle permet de modéliser les pertes d'eau (infiltration, interception, évaporation, etc.) pendant un événement de pluie, c'est-à-dire la transformation de la pluie brute en pluie nette. Il existe six formalismes pour représenter cette fonction. Le choix de l'un de ces formalismes dépend du type de modélisation envisagé (Traoré, 2025). Nous avons retenu le formalisme de **Perte initiale et constante** particulièrement adapté à la modélisation continue, associé à la méthode « **canopée** » pour estimer l'évapotranspiration.

b. Fonction de transfert

La fonction de transfert permet de transformer le ruissellement de surface produit dans un sous-bassin en débit à l'exutoire, à travers un hydrogramme. Elle inclut plusieurs méthodes pour représenter la transformation du ruissellement à l'exutoire du bassin, parmi les différents formalismes disponibles, **l'hydrogramme unitaire** de la SCS a été retenu, car il est recommandé en complément du formalisme de la fonction de production « Perte initiale et constante» (Batienon, 2021; Scharffenberg et Fleming, 2006). Ce formalisme se caractérise par un seul paramètre, le temps de retard (*Lag Time*) entre le pic de crue et le pic de précipitation, calculé à partir des valeurs CN, spécifiques à chaque sous-bassin. Le temps de retard T_{lag} (min) est estimé à 60 % du temps de concentration (T_c). Pour le calcul de T_c, nous avons utilisé l'Équation 8 définie comme suit (Rocha, 2014) :

Équation 8

$$T_c = \frac{L^{0,8} * [(1000/CN) - 10]^{0,7}}{1900 \times p^{0,5}}$$

Où

L : Plus long chemin hydraulique du bassin (m),

CN : numéro de courbe du bassin versant,

p : pente du sous bassin (%),

T_c : Temps de concentration (h)

c. La fonction d'acheminement

Le processus de routage hydrologique consiste à simuler comment un hydrogramme se modifie en se propageant le long d'une rivière. Pour cette étude, la **méthode de Muskingum** a été retenue parmi les différentes approches disponibles, telles que l'onde cinématique, Muskingum-Cunge, Puls modifié, le décalage simple, le routage par décalage (Lag), le routage décalage-K (Lag et K), le routage Straddle Stagger, et le routage à profondeur normale. Ce choix est motivé par son adéquation aux rivières naturelles, son équilibre entre simplicité et efficacité, et son usage répandu en hydrologie opérationnelle (Song et al., 2011). La méthode repose sur l'équation de continuité et une relation de stockage linéaire exprimée par l'Équation 9.

Équation 9

$$\boldsymbol{S = k[xI + (1 - x)Q]}$$

Où

$\boldsymbol{S}$: le volume stocké $[m^3]$

$\boldsymbol{I}$: débit entrant $[m^3/h]$

$\boldsymbol{Q}$: débit sortant $[m^3/h]$

$\boldsymbol{k}$: temps de propagation de l'onde [h]

$\boldsymbol{x}$: facteur d'atténuation

Les paramètres k et x ont été initialement estimés à partir des caractéristiques physiques des rivières en utilisant l'Équation 10.

Équation 10

$$\boldsymbol{k = \frac{L}{V_w}}$$

Avec

$\boldsymbol{L}$: la longueur du cours d'eau en [km]

$\boldsymbol{V_w}$: la célérité de l'onde de crue $[km.h^{-1}]$ qui vaut en moyenne 3,72 $km.h^{-1}$ pour le bassin versant du GBP

d. Fonction objectif

La fonction objectif est utilisée pour évaluer la performance du modèle en comparant les résultats simulés aux observations. Chaque formalisme de la fonction objectif permet de mesurer l'écart entre les simulations et les observations selon des critères spécifiques. Nous avons retenu la fonction objectif Nash-Sutcliffe NSE définit par l'Équation 11.

Équation 11

$$\mathbf{NSE} = 1 - \frac{\sum_i (\boldsymbol{Q_{o,i}} - \boldsymbol{Q_{s,i}})^2}{\sum_i (\boldsymbol{Q_{o,i}} - \boldsymbol{\overline{Q}_o})^2}$$

$\boldsymbol{Q_{o,i}}$: Débits observés [m^3/s] au jour i

$\boldsymbol{Q_{s,i}}$: Débits simulés [m^3/s] au jour i

$\boldsymbol{\overline{Q}_o}$: Moyenne des débits observés [m^3/s]

IV.3.3.4. Méthode d'optimisation automatique des paramètres du modèle

La méthode d'optimisation automatique permet de calibrer les paramètres du modèle en minimisant les écarts entre les débits observés et simulés. HEC-HMS propose notamment trois méthodes : la méthode du gradient univarié, la méthode de l'évolution différentielle et la méthode de Nelder-Mead, également appelée « méthode du simplex ».

Dans notre étude, nous avons choisi la méthode de l'évolution différentielle, qui se comporte de manière similaire à la méthode du Simplex. Les itérations de la recherche varient les paramètres de manière aléatoire. Cette méthode s'adapte bien aux problèmes non linéaires. Étant donné que la modélisation pluie-débit du bassin versant repose sur des processus hydrologiques complexes et non linéaires, cette méthode s'avère plus appropriée.

IV.3.3.5. Calage et validation du modèle

a) Calibration du modèle

Pour calibrer le modèle, un ajustement des paramètres sensibles du Tableau 4 sera opéré afin d'approcher au mieux les hydrogrammes des débits enregistrés à la station de Pâ. Dans le cadre de cette étude, les objectifs de la procédure de calage du modèle seront principalement de reconstituer 'correctement' la forme générale de l'hydrogramme observé, d'arriver à un 'bon' accord entre les débits de pointe calculés et observés et d'obtenir un bilan 'convenable' sur les volumes sur la période de 19 ans (**01/01/1990 au 31/12/2008**) soit 70% de la période de l'étude comme recommandé par (Yonaba, 2020).

Tableau 4 : Valeurs initiales et plage de variation des paramètres de calibration du modèle HEC HMS

Modules	Formalismes utilisés	Paramètres (unité)	Etat de sensibilité	Valeurs initiales	Plages (Min -Max)
Estimation évapo-transpiration	Méthode de la canopée	Etat initial de la canopée (mm)	Non sensible	100	(0,001-1500)
		Stockage maximum de la canopée (mm)	Sensible	17-1500	(0,001-1500)
		Coefficient de culture	Sensible	1	(0,01-1,5)
Fonction de production	Perte initiale et constante	Déficit initial (mm)	Non sensible	2	(0,001-1000)
		Taux d'infiltration constant (mm/h)	Non sensible	1	(0,001-300)
		Surface imperméable (%)	Sensible	8-11	(0-100)
Fonction de transfert	Hydrogramme unitaire de la SCS	Temps de réponse du bassin (min)	Sensible	575-1788	(0,1-30000)
Fonction d'acheminement	Méthode de Muskingum	k (h)	Non sensible	4-9	(0,1-150)
		x (-)	Non sensible	0,1	(0-0,5)

b) Validation du modèle

La performance du modèle sera testée en utilisant le jeu de paramètres obtenus par la calibration pour une simulation sur la période de 8 ans (**01/01/2009 au 31/12/2016**) soit 30% de la période de l'étude.

IV.3.3.6. Critères de performances du modèle HEC-HMS

L'examen visuel des résultats d'une simulation ne suffit pas pour juger de la qualité d'un modèle hydrologique, car il ne constitue pas une évaluation objective. Il est donc indispensable de recourir à des critères quantitatifs permettant de comparer de manière rigoureuse les débits simulés avec les débits observés. Dans le cadre de cette étude, quatre indicateurs de performance ont été retenus. Le premier est le critère de Nash et Sutcliffe (1970), largement utilisé en hydrologie pour apprécier la qualité de l'ajustement entre valeurs simulées et observées.

a) Pourcentage de biais

Le **pourcentage de biais** (PBIAS) exprime en pourcentage l'écart entre les débits simulés par le modèle et les débits observés. Une valeur idéale est égale à zéro, traduisant une parfaite correspondance entre simulation et observation. Des valeurs proches de zéro indiquent une bonne performance du modèle, tandis que des écarts plus importants révèlent une surestimation ou une sous-estimation systématique des débits. Ce critère, largement utilisé dans l'évaluation des modèles hydrologiques, est décrit notamment par Legates et McCabe (2013). La formule de calcul est donnée par l'Équation 12, et les seuils d'interprétation correspondants sont ceux utilisés par Yonaba (2020).

Équation 12

$$\mathbf{PBIAIS} = \frac{\sum_i (Q_{o,i} - Q_{s,i}) \times 100}{\sum_i Q_{o,i}}$$

Avec

$Q_{o,i}$: Débits observés [m^3/s] au jour i

$Q_{s,i}$: Débits simulés [m^3/s] au jour i

b) Coefficient de corrélation

Le **coefficient de corrélation** est exprimé à travers l'Équation 13.

Équation 13

$$R^2 = \frac{[\sum_i (Q_{o,i} - \overline{Q}_o) \times (Q_{s,i} - \overline{Q}_s)]^2}{\sum_i (Q_{o,i} - \overline{Q}_o)^2 \times \sum_i (Q_{s,i} - \overline{Q}_s)^2}$$

Avec

$Q_{o,i}$: Débits observés [m^3/s] au jour i

$Q_{s,i}$: Débits simulés [m^3/s] au jour i

Ce critère évalue la manière dont les séries simulées et observées fluctuent ensemble. Si ce coefficient est égal à un (1) on a une corrélation parfaite entre les variables étudiées des séries simulées et observées (Sami et al., 2023).

c) Erreur quadratique moyenne (RMSE)

L'erreur quadratique (RMSE) donne une idée de l'écart-type des erreurs de prédiction (Willmott et Matsuura, 2005). Sa valeur optimale est 0 et elle est décrit par l'Équation 14.

Équation 14

$$\mathbf{RSR} = \frac{\sqrt{\sum_i (Q_{o,i} - Q_{s,i})^2}}{\sqrt{\sum_i (Q_{o,i} - \overline{Q}_o)^2}}$$

Avec

$Q_{o,i}$: Débits observés [m^3/s] au jour i

$Q_{s,i}$: Débits simulés [m^3/s] au jour i

$\overline{Q}_o$: Moyenne des débits observés [m^3/s]

IV.3.4. Projection climatique à l'horizon 2050

IV.3.4.1. Modèles climatiques globaux utilisés

Les cinq modèles ont été retenus en raison de leur cohérence technique, de leur diversité structurelle et de leur représentativité climatique. Leur disponibilité dans le jeu de données NEX-GDDP-CMIP6 assure une homogénéité dans les résolutions, les variables et les méthodes de réduction d'échelle appliquées (Thrasher et al., 2024). Cette cohérence est essentielle pour garantir la comparabilité des résultats hydrologiques. La combinaison de ces cinq MCGs avec les deux scénarios d'émissions contrastés (SSP2-4.5 et SSP5-8.5) permet d'explorer simultanément l'incertitude liée aux trajectoires socio-économiques et celle liée aux différences de sensibilité climatique des modèles (Riahi et al., 2017; Hausfather et Peters, 2020; Sawadogo et al., 2024). Cette approche multi-modèle et multi-scénario est conforme aux recommandations du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2023) pour les études d'impacts hydrologiques.

Dans le contexte du Burkina Faso, Sawadogo et al. (2024) ont conduit à l'identification de dix-sept (17) modèles CMIP6 capables de simuler avec précision les caractéristiques climatiques. Ces modèles présentent de bonnes performances (Sawadogo et al., 2024) dans la reproduction des régimes pluviométriques observés au Burkina Faso, caractérisés par un fort gradient méridien, une distribution saisonnière marquée et une variabilité interannuelle significative. Les cinq MCG retenus pour cette étude obtiennent les corrélations de 0,82 à 0,96 pour les précipitations et les températures, tout en affichant des biais modérés et des erreurs quadratiques moyennes (RMSE) faibles (Sawadogo et al., 2024). Les cinq modèles retenus font parmi des huit modèles que Bikie et al. (2025) ont utilisé pour les projections hydro-climatiques du bassin du Mouhoun dont le GBP est un sous bassin du dit bassin versant. Cela confirme que ces cinq modèles font partie des MCGs les plus cohérents et les plus performants pour reproduire le climat passé du Burkina Faso, aussi bien en termes de précipitations saisonnières, de variabilité interannuelle, que de tendance à long terme.

IV.3.4.2. Validation des données climatiques simulées

Afin de garantir la fiabilité des projections climatiques, une validation des MCG a été réalisée en comparant leurs performances sur la période historique de **1981 à 2014**. Les indicateurs statistiques, tels que **l'erreur de biais moyenne (MBE)**, **l'erreur moyenne absolue (MAE) et l'erreur quadratique moyenne (RMSE)** (Yonaba, 2020) ont été utilisés sur les séries de précipitations, températures minimale et maximale. Les Équation 15, Équation 16 et Équation 17 ont été utilisées pour calculer respectivement l'erreur MBE, l'erreur MAE et l'erreur RMSE.

Équation 15

$$\mathbf{MBE}_h = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(p_{i,h}^{sim} - p_{i,h}^{obs})$$

Équation 16

$$\mathbf{MAE}_h = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|p_{i,h}^{sim} - p_{i,h}^{obs}|$$

Équation 17

$$\mathbf{RMSE}_h = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(p_{i,h}^{sim} - p_{i,h}^{obs})^2}$$

Où $p_{i,h}^{sim}$ et $p_{i,h}^{obs}$ désignent respectivement le cumul de pluies simulée et observée pour le mois, $i \in \{1, \dots 12\}$, $n = 12$. L'indice h correspond à un modèle climatique (MC) considéré dans l'ensemble des cinq MCGs (Yonaba, 2020). La valeur optimale pour ces trois indices est nulle.

IV.3.4.3. Estimation de l'Évapotranspiration potentielle (ETP)

L'Évapotranspiration potentielle (ETP) journalière a été estimée à l'aide de l'Équation 18 de la méthode empirique de **Hargreaves** et **Samani** (1985), qui repose uniquement sur les températures minimales et maximales quotidiennes. Cette méthode, simple d'application, fournit des résultats proches de ceux obtenus avec la méthode plus complexe de Penman-Monteith, tout en nécessitant moins de données climatiques (Fowe et al., 2015; Yonaba, 2020). Elle a déjà montré de bonnes performances à estimer l'ETP au Burkina Faso (Zouré, 2019).

Équation 18

$$\boldsymbol{ETP = 0,0023 \times R_a (T_{max} - T_{min})^{0,5} \times (T + 17,8)}$$

ETP en [mm/jour] ;

$\mathbf{R_a}$ radiation extraterrestre [MJ.m^{-2}.jr^{-1}] définie en fonction de la latitude de la station ;

$\boldsymbol{T_{max}}$ $\boldsymbol{et}$ $\boldsymbol{T_{min}}$ représentent respectivement les températures maximales et minimales journalières [°C] ;

$\mathbf{T} = \frac{(T_{max}+T_{min})}{2}$: la température moyenne journalière [°C].

IV.3.4.4. Simulation des débits futurs

La détermination des débits journaliers futurs repose sur une chaîne méthodologique combinant les projections climatiques des cinq modèles climatiques globaux choisis et la modélisation hydrologique. Dans un premier temps, les séries journalières historiques de précipitations et de températures issues des modèles sont soumises à une comparaison avec les données CHIRPS sur la période de référence de 1981 à 2014 afin d'assurer leur cohérence temporelle. Après cette phase de vérification, les températures minimales et maximales des projections climatiques ont servi à calculer la demande évaporative ETP journalière. Enfin, les précipitations journalières et l'ETP sur la période 2036-2065 ont été utilisées pour forcer le modèle HEC-HMS calibré et validé, afin de simuler les débits journaliers futurs du bassin versant du GBP. Les séries de débits obtenus servent de base à l'analyse des évolutions hydrologiques futures et à l'évaluation des impacts du changement climatique sur la ressource eau à l'horizon 2050. La Figure 7 illustre la démarche méthodologique adaptée de (Yonaba, 2020) pour déterminer les débits futurs sur le bassin versant du GBP.

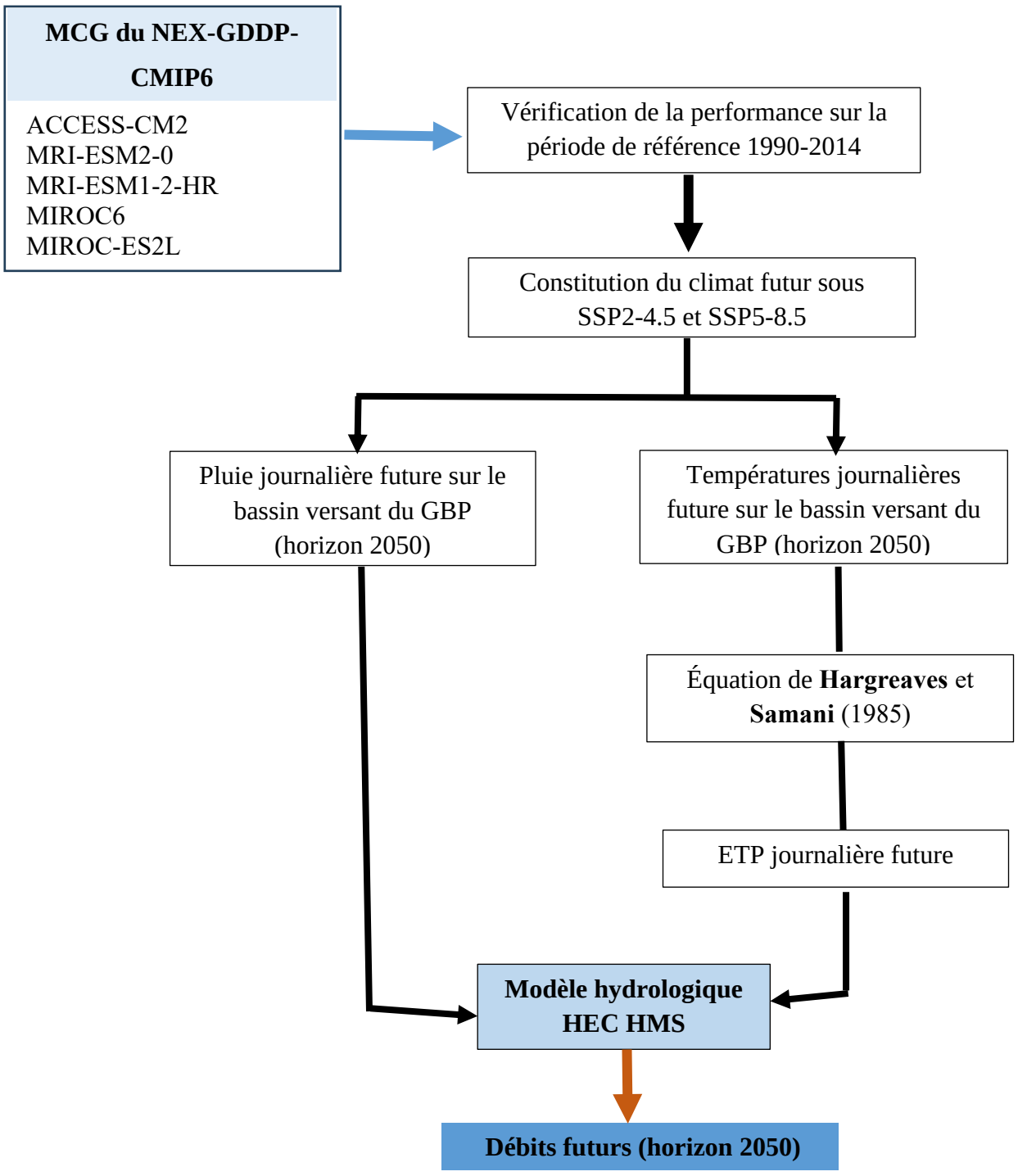


Figure 7 : Diagramme de la démarche de simulation des débits futurs

V. RÉSULTATS ET DISCUSSION

V.1. Caractérisation hydro-géomorphologique du bassin versant

V.1.1. Caractéristiques morphométriques

Les caractéristiques morphométriques du bassin versant du Grand Balé à Pâ sont présentées dans le Tableau 5. Il ressort que le bassin étudié est un grand bassin versant avec une superficie de 3 676 km² et une longueur principale du cours d'eau de 110 km. C'est un bassin versant de forme allongée (KG> 1).

Sur le plan topographique, les altitudes varient entre 253 m (H_{min}) et 576 m (H_{max}). La pente moyenne et l'indice global de pente sont respectivement 2,94 m/km et 0,55 m/km. Selon le manuel de la FAO, la dénivelée spécifique D_s = 33,25 m < 50 m caractérise un relief faible.

Le réseau hydrographique bien développé avec une valeur de densité de drainage qui vaut D_d = 1,14 km/km^2. L'indice de sinuosité obtenu est de 1,22, ce qui traduit un cours d'eau faiblement sinueux. Cette valeur de sinuosité caractérise des chenaux légèrement sinueux, en transition entre les formes rectilignes et méandriformes (Held, 2011). C'est à dire le cours d'eau commence à développer des méandres peu marqués.

Tableau 5 : Caractéristiques morphométriques du grand Balé à Pâ

Caractéristiques morphométriques	Unités	Valeurs	Commentaire
Superficie (S)	km²	3676	Bassin versant de taille relativement grande
Périmètre (P)	km	373	
Coefficient de Gravelius (K_G)	-	1,76	Bassin est relativement allongé et moins compact
Longueur du rectangle équivalent (L)	km	164,1	
Largeur du rectangle équivalent (l)	km	22,4	
Altitude maximum (H_{max})	m	576	
Altitude minimum (H_{min})	m	253	
Altitude 5% de superficie cumulée ($H_{5\%}$)	m	360	
Altitude 95% de superficie cumulée ($H_{95\%}$)	m	270	
Longueur du cours d'eau (L_{long})	km	110	
Indice global de pente (I_g)	m/km	0,55	Relief faible
Pente moyenne (I)	m/km	2,94	
Dénivelée spécifique (D_s)	m	33,25	
Densité de drainage D_d	km/km²	1,14	Densité de drainage relativement élevée
Sinuosité du cours d'eau principal	-	1,22	Cours d'eau faiblement sinueux

V.1.2. Courbe hypsométrique du bassin versant du grand Balé

La Figure 8 montre que le bassin du GBP présente des altitudes comprises entre 253 m et 576 m. La distribution des surfaces (en orange) en fonction des tranches d'altitudes indique que la majorité du bassin se situe à des altitudes moyennes autour de 310 à 350 mètres. Les altitudes basses, autour de 270 mètres, occupent une surface plus réduite. La courbe hypsométrique (en bleu), de forme concave, traduit un stade de maturité géomorphologique, marqué par une topographie modérée. Sur le plan hydrologique, cette configuration favorise un ruissellement relativement homogène, avec une concentration des écoulements vers l'aval.

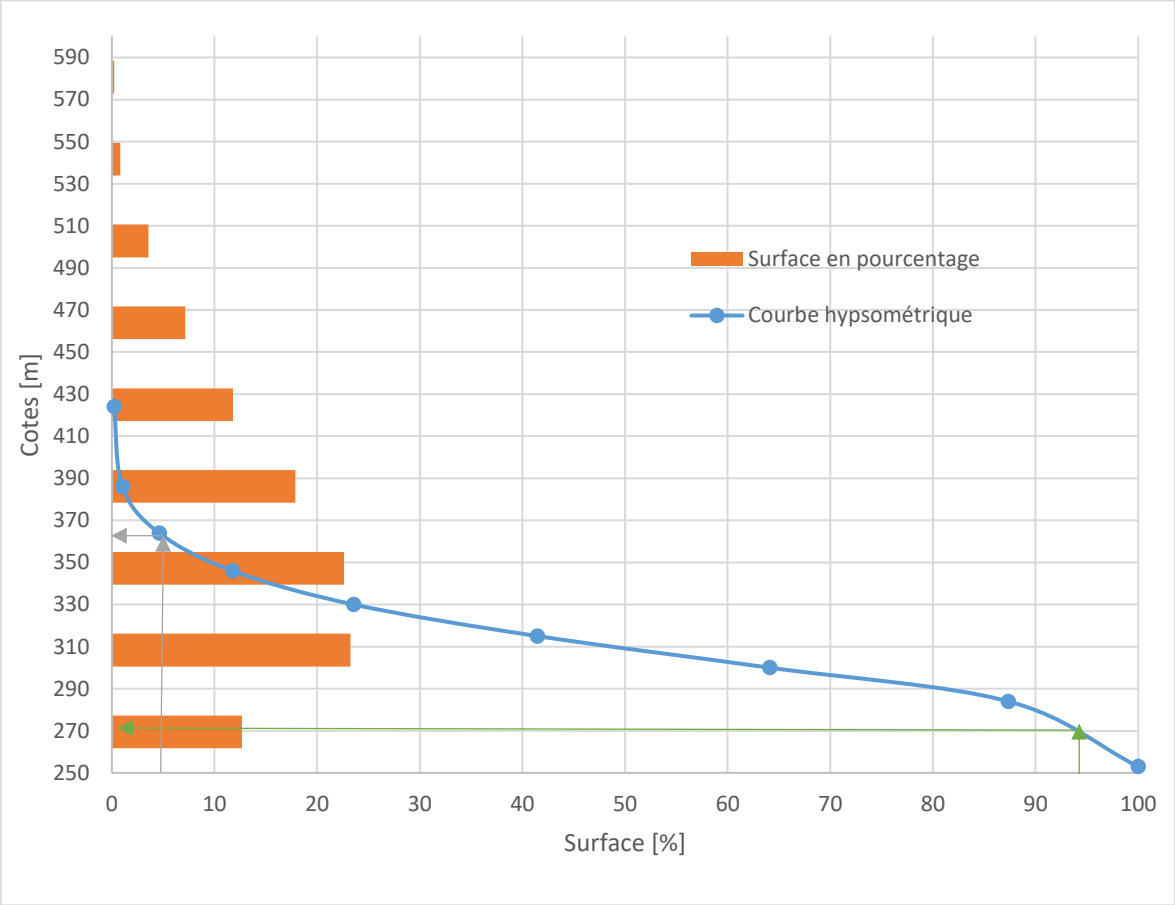


Figure 8 : Courbe hypsométrique du bassin versant du Grand Balé à Pâ

V.1.3. Carte des pentes du grand Balé à Pâ

La Figure 9 montre une prédominance de pentes faibles à modérées (< 10 %) sur le bassin du GBP. Le relief est globalement peu accidenté. Les fortes pentes, localisées surtout au nord-est et au centre-est, restent limitées en superficie. Cette configuration favorise globalement l'infiltration et l'agriculture, mais les zones escarpées présentent un risque accru d'érosion et de ruissellement rapide. La topographie du bassin versant du GBP ayant servi à déterminer les pentes est illustrée à l'**Annexe 4**.

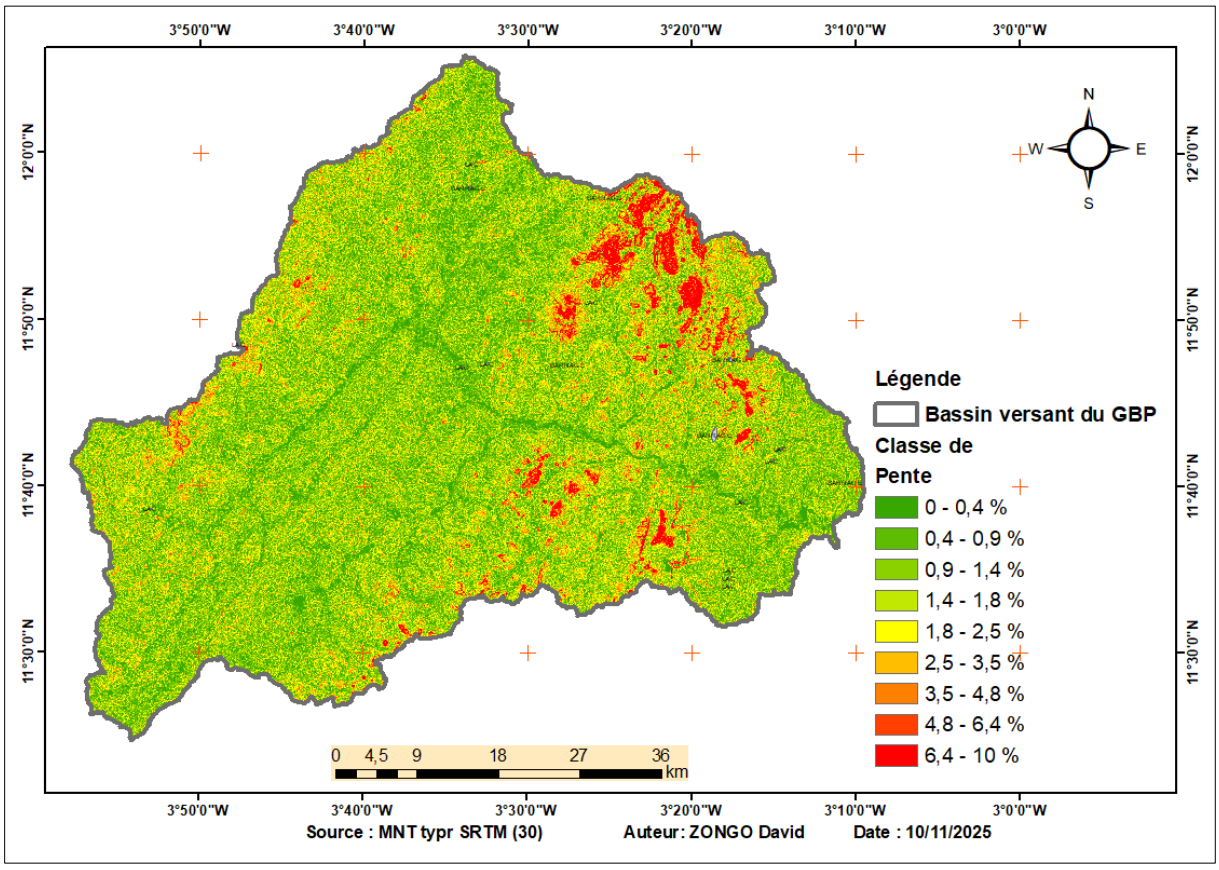


Figure 9 : carte des pentes du Grand Balé à Pâ

V.2 Analyse de la variabilité hydro-climatique

V.2.1. Analyse de la variabilité des pluies annuelles

L'indice standardisé de précipitation (ISP) permet d'évaluer les fluctuations des conditions hydriques et de caractériser les périodes sèches et humides observées au cours de la série temporelle. L'analyse de la Figure 10 montre une forte variabilité interannuelle de l'ISP, traduisant une alternance marquée entre les années déficitaires et excédentaires en précipitations. Entre 1990 et 2008, on observe une prédominance des années sèches, avec plusieurs valeurs de l'ISP inférieures à zéro, atteignant parfois des seuils proches de -1,5 à -2,0. Ces épisodes correspondent à des sécheresses modérées à fortes, indiquant des déficits pluviométriques significatifs sur le bassin. À partir de 2009, la tendance s'inverse, marquée par une succession d'années à valeurs positives de l'ISP. Ces années sont caractérisées par des conditions humides modérées à fortes. Un regain de précipitations et une amélioration relative du bilan hydrique du bassin est alors observé ces dernières années.

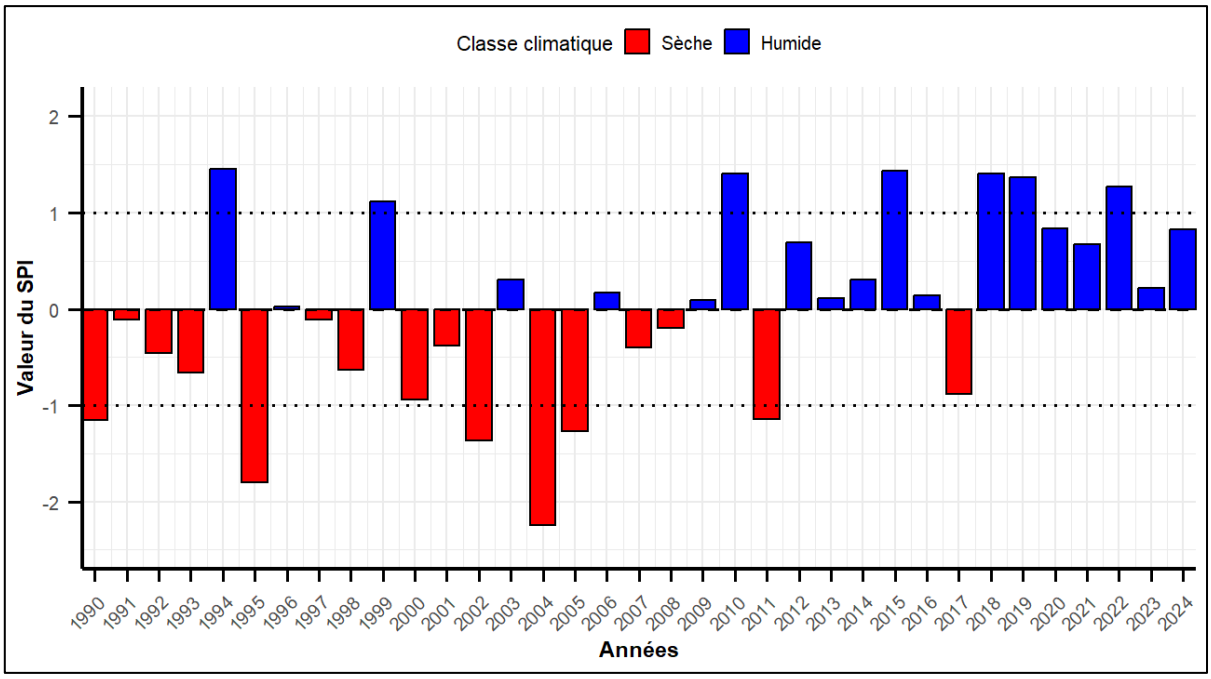


Figure 10 : Évolution de l'Indice Standardisé des Précipitations sur la période 1990-2024

V.2.2. Analyse de l'Indice de Sécheresse Hydrologique

La Figure 11 montre qu'entre 1990 et 1998, la majorité des valeurs de l'ISD sont négatives. Ce qui correspond à une période prolongée de sécheresse hydrologique légère à modérée. Les débits moyens annuels restent inférieurs à la moyenne sur la période. L'année 1999 fut exceptionnellement humide avec un débit journalier maximum de 80 m^3/s. Après cette année les conditions défavorables recommencent jusqu' en 2006. De 2007 à 2014, on constate une alternance d'année humide et d'année sèche, marquée par un retour progressif à la normale. En revanche, la période postérieure à 2014 se distingue nettement par une prédominance d'indices positifs, indiquant une amélioration significative et durable des conditions hydrologiques. Plusieurs années récentes, notamment 2018, 2019, 2022 et 2024, présentent des valeurs de l'ISD supérieure au seuil de +1, traduisant des conditions hydrologiques excédentaires marquées, associée à des débits annuels largement supérieure à la moyenne. Cette phase humide récente suggère une intensification des apports hydriques, possiblement liée à une augmentation des précipitations et/ou à une meilleure recharge des cours d'eau. L'évolution de l'ISD met en évidence une succession de régimes hydrologiques contrastés, avec une période sèche dominante dans les années 1998. Les dernières années les débits à l'exutoire du GBP sont excédentaires.

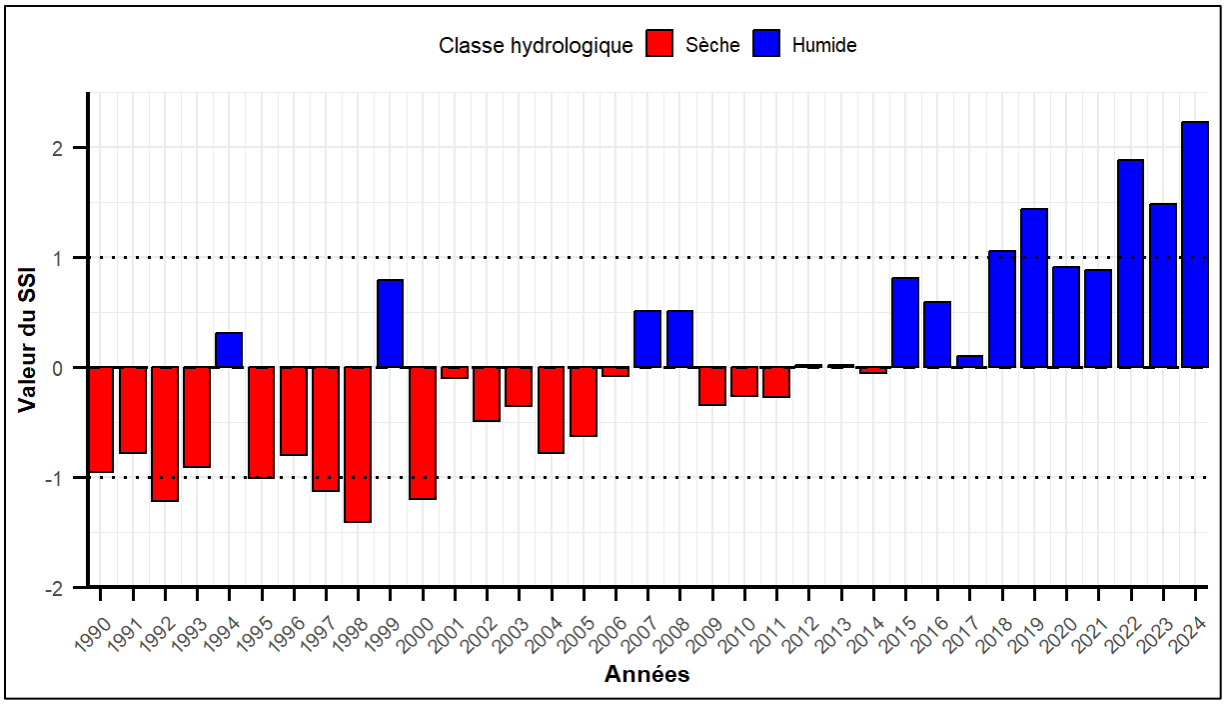


Figure 11 : Évolution des indices de sécheresse hydrologiques

V.2.3. Détection des points de changement sur les données hydro-climatiques

La Figure 12 illustre le résultat du test de Pettitt sur la série de pluies. Il détecte une rupture en 2008 avec un niveau qui est statistiquement significatif (p-value = 0,014< 0,05). La pluie moyenne passe de 838,2 mm à 960,2 mm soit une variation de +14,56 % de la pluviométrie.

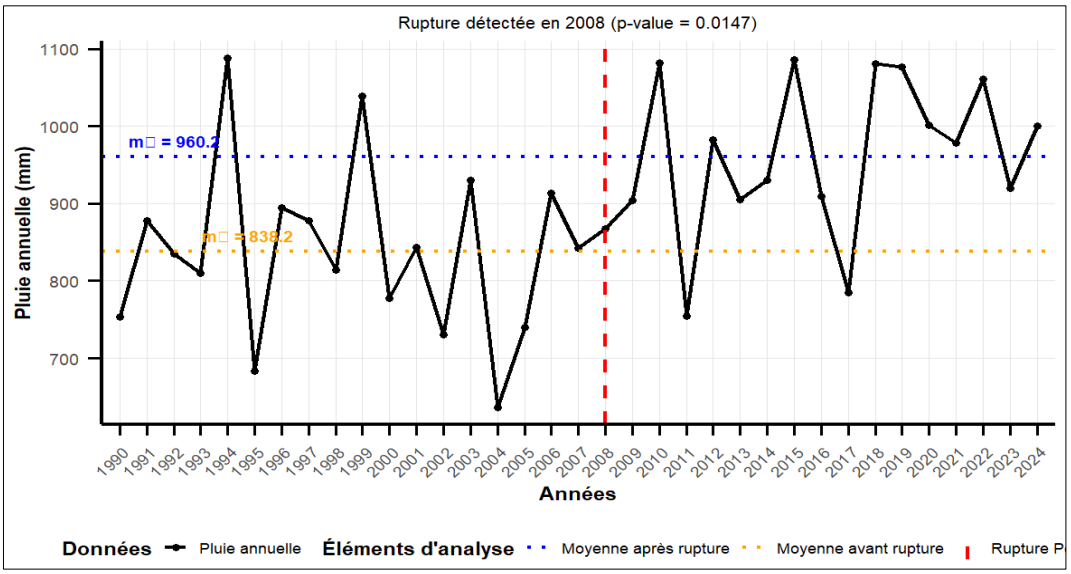


Figure 12 : Date de rupture de la série de pluies (Pettitt)

La Figure 13 illustre le résultat du test de Pettitt sur la série de débits. Le test révèle une rupture hautement significative en 2005 **(**p-value = 0,0002**)**, traduisant une modification majeure du régime hydrologique. Le débit moyen annuel passe de 4,84 m³/s avant la rupture à 9,72 m³/s après, soit une augmentation de 100,9 %, indiquant un renforcement important des écoulements.

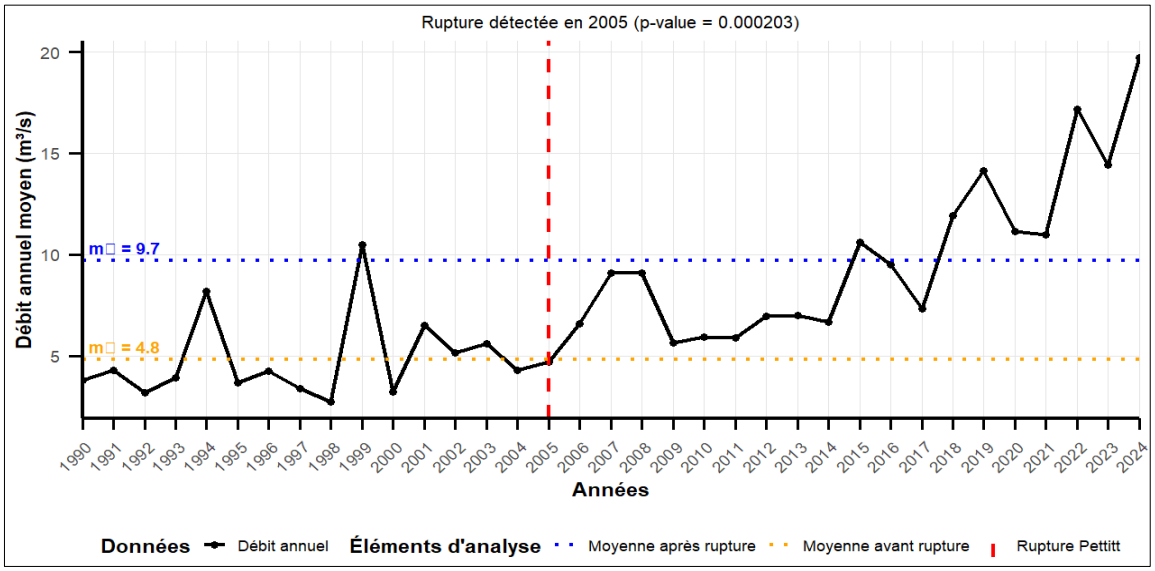


Figure 13 : Date de rupture de la série de débits (Pettitt)

Le Tableau 6 présente les résultats du test de rupture appliqués à la série de débits annuels à la station hydrométrique de Pâ et celui des pluies. Dans l'ensemble, ces résultats traduisent un passage vers des conditions plus humides, caractérisées par une augmentation des précipitations et, de manière encore plus marquée, des débits. Cette évolution suggère un ruissellement plus intense et une réponse hydrologique amplifiée du bassin versant.

Tableau 6 : Résultats des tests de ruptures sur les séries des variables hydro-climatiques annuelles

Variables	Test de rupture	Année détectée	p-value	Moyenne avant rupture	Moyenne après rupture	Variation (%)
Pluie annuelle **(mm)**	Pettitt	2008	0,014	838,2	960,2	14,56
Débit moyen annuel **(m³/s)**	Pettitt	2005	0,0002	4 ;84	9,72	100,9

V.2.4. Test de corrélation et détection des tendances sur les séries de pluies et de débits

V.2.4.1. Test de corrélation par rang de Spearman

Le test de Spearman appliqué entre les séries annuelles de précipitation et de débits a donné les résultats consignés dans le Tableau 7. Le test de Spearman donne **τ = 0,70** avec **p < 0, 05.** La relation entre précipitations et débit moyen est fortement positive, c'est-à-dire que des précipitations plus importantes entraînent un débit moyen plus élevé, la relation tend à être parfaite (**Annexe 5**). La valeur p très faible indique que cette corrélation est statistiquement très significative, donc il est très probable que cette association soit due au hasard. En effet, sur le graphe de la corrélation entre précipitations et débits moyens annuels, on observe une tendance générale à la hausse du débit moyen avec l'augmentation des précipitations, ce qui indique cette corrélation positive modérée.

Tableau 7: : Résultat du test de corrélation de Spearman entre pluie et débits annuels du Grand Balé à Pa

Paramètres	Valeur
Niveau de risque (α)	0,05
Nombre d'observations N (1990 à 2024)	35
p-value	< 0,05
Coefficient de corrélation de Spearman entre pluie et débits annuels (τ)	0,70

V.2.4.2. Analyse des tendances dans les séries hydro-climatiques

Le test sur les précipitations annuelles (Figure 14) a révélé une tendance à la hausse modérée (tau = 0,34) avec une signification marginale (p = 0,45 %). La pente de Theil–Sen confirme cette dynamique par une augmentation moyenne de +5,7 mm/an.

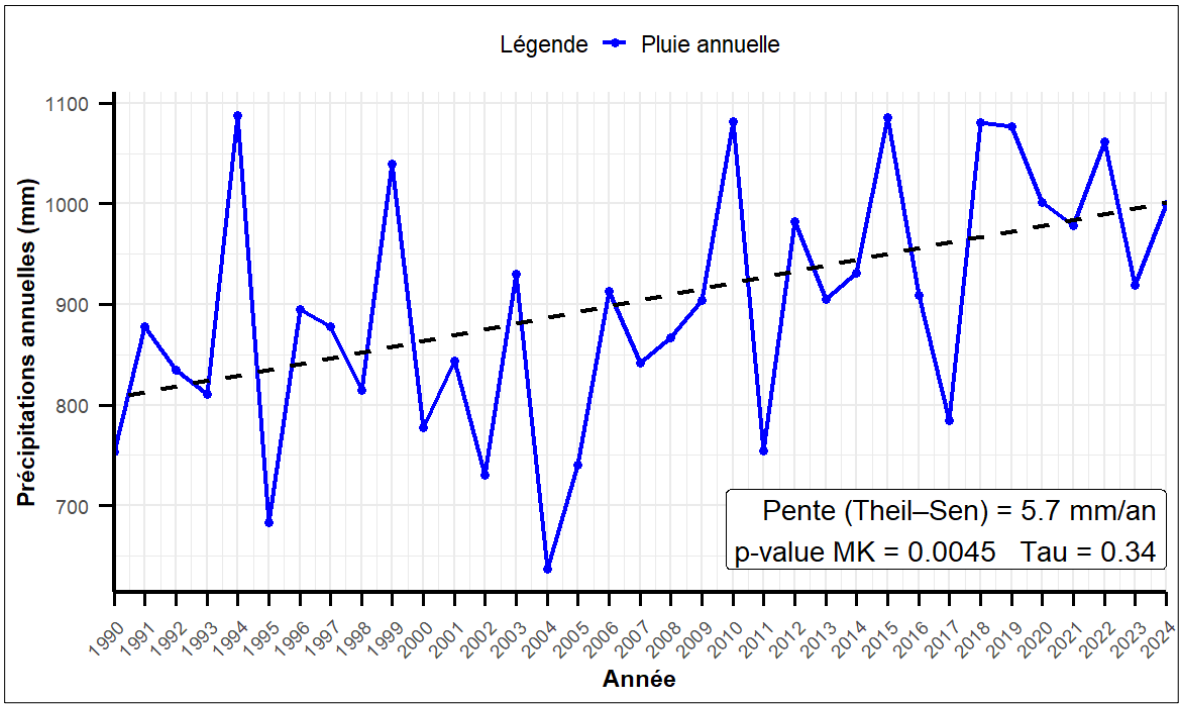


Figure 14 : Tendance linéaire de la série de pluies

Les débits moyens annuels (Figure 15) présentent une situation nettement plus claire et statistiquement robuste. Contrairement à la pluie, le test de Mann–Kendall modifié avec la p-value presque nulle confirment une tendance à la hausse et hautement significative. Cela signifie que l'augmentation des écoulements n'est pas due au hasard ni à des dépendances internes de la série : elle est réelle, stable et statistiquement solide. La pente de Theil–Sen estimée à +0,283 m³/s/an met en évidence une accélération de la réponse hydrologique. Cette hausse est beaucoup plus importante que celle observée dans les précipitations.

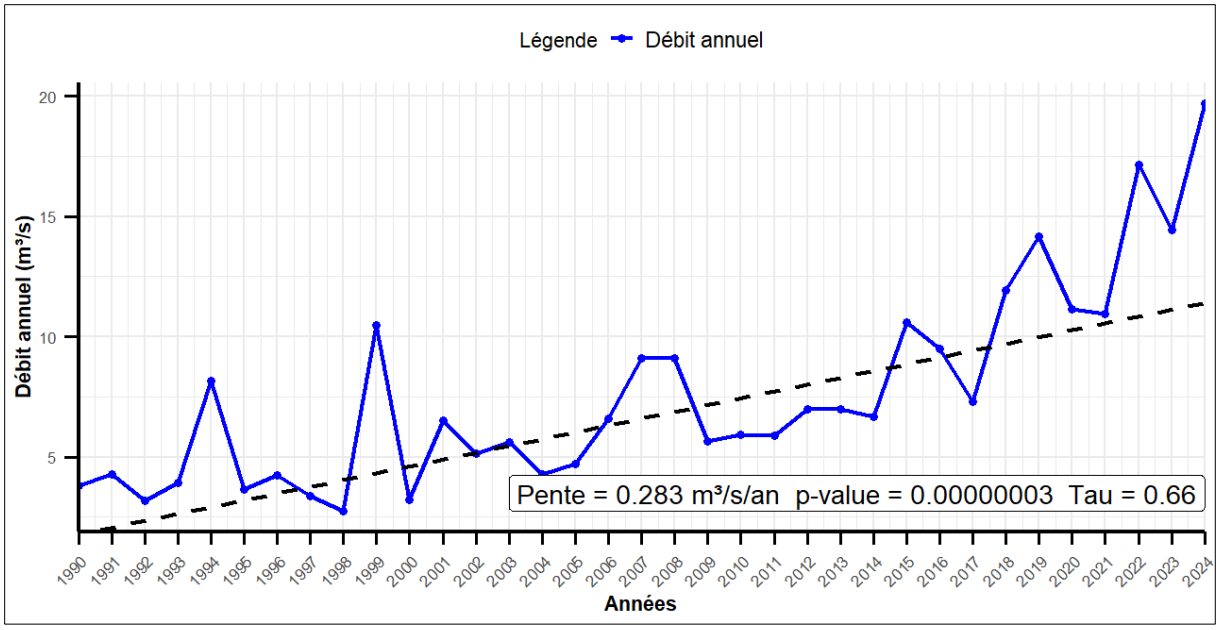


Figure 15 : Tendance linéaire de la série de débits

Le Tableau 8 présente les résultats du test de Mann-Kendall modifié et celui de la pente de Theil-Sen (Hamed et al., 1998) sur les deux séries de pluies et de débits.

Tableau 8 : Synthèse des résultats du test de Mann–Kendall et de la pente de Theil-Sen

Série	Tau de Kendall	p-value	Tendance	Pente de Theil-Sen	Significativité
Pluie annuelle	0,34	0,0045	Hausse modérée	+5,7 mm/an	Oui (p > 0,05)
Débit moyen annuel	0,66	P < 0,05	Hausse	+0,283 m³/s/an	Oui (p < 0,05)

V.3. Modélisation du bassin versant du Grand Balé à Pâ

V.3.1. Schéma conceptuel du bassin versant du Grand Balé à Pa

La Figure 16 illustre la configuration hydrologique du modèle élaboré dans **HEC-HMS** à partir du MNE SRTM traité avec GIS associer au logiciel HEC-HMS 4.12. Le bassin versant du GBP a été subdivisé en 10 sous-bassin versants homogène (Sbv1 à Sbv10) afin de mieux capturer la variabilité spatiale des conditions de surface (Barbosa et al., 2019), notamment les caractéristiques topographiques et hydrologiques essentielles au calcul du ruissellement.

À ces dix sous-bassins, ont été associés à leurs éléments hydrologiques déterminés, notamment les jonctions (Junc), les connecteurs, les tronçons de rivière (riv) ainsi que l'exutoire principal (Sink). Cette structuration essaie de refléter fidèlement l'organisation spatiale du réseau hydrographique et permet de représenter les transferts hydrologiques internes entre les différents compartiments du bassin. L'organisation des sous-bassins facilite l'intégration ultérieure des paramètres physiques, tels que la longueur du chemin d'écoulement, la pente moyenne, la densité de drainage ou encore les paramètres du modèle de pertes (comme le SCS-CN), indispensables à la simulation hydrologique.

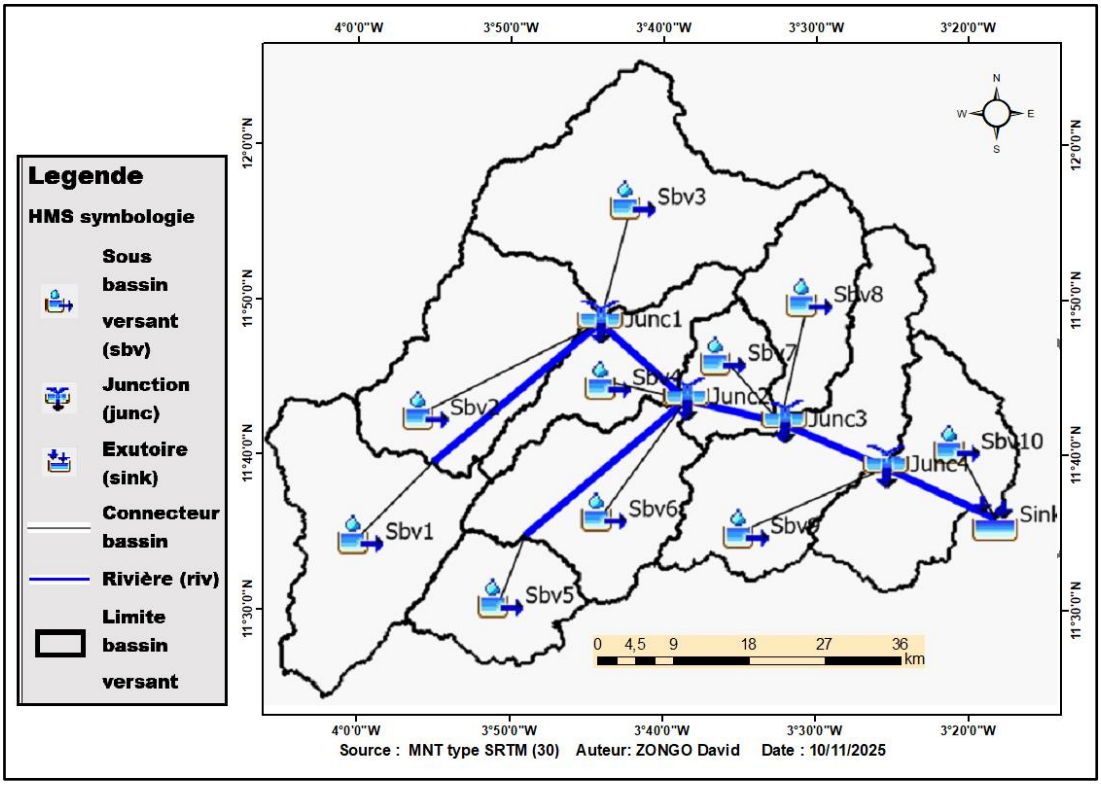


Figure 16 : Modèle conceptuel HEC-HMS du bassin versant du GBP

Le Tableau 9 présente les caractéristiques des dix sous-bassins versants du GBP. Les superficies relativement contrastées oscillent entre 150 km² (sbv7) et 610,92 km² (sbv3). Les valeurs du numéro de courbe (CN), indicateur majeur des capacités d'infiltration et de ruissellement, varient de 65,61 (sbv1) à 89,6 (sbv10), traduisant des conditions de surface plus ou moins favorables au ruissellement selon les unités. La dynamique des écoulements est influencée par la longueur du plus long chemin hydraulique, qui s'étend de 26,26 km (sbv7) à 47,07 km (sbv9). Enfin, les pentes moyennes, comprises entre 0,027 et 0,059 m/m, témoignent de variations topographiques qui modulent davantage les vitesses d'écoulement.

Tableau 9 : Caractéristiques des sous-bassins versants du GBP

Sous bassins versants	Superficie (km^2)	Plus long chemin hydraulique (km)	Numéro de Courbe (CN)	Pente (m/m)
sbv1	498,62	41,31	65,61	0,028
sbv2	439,40	44,71	66,93	0,03
sbv3	610,92	46,64	68,25	0,031
sbv4	256,53	44,20	69,57	0,027
sbv5	219,67	26,40	70,89	0,029
sbv6	387,39	41,27	72,21	0,029
sbv7	150,00	26,26	82,6	0,032
sbv8	251,99	42,43	67,1	0,059
sbv9	501,20	47,07	76,5	0,041
sbv10	361,82	38,99	89,6	0,030

Le Tableau 10 présente les caractéristiques géométriques des cours d'eau du bassin versant du GBP. Les longueurs des rivières varient entre 14,18 km (riv4) et 32,22 km (riv3), traduisant des tracés plus ou moins étendus à l'intérieur du réseau hydrographique. Les pentes longitudinales, comprises entre 0,14 ‰ et 0,59 ‰, indiquent des déclivités globalement faibles, typiques des systèmes fluviaux de plaine où les écoulements évoluent avec modération. La sinuosité, qui mesure le degré de courbure du tracé, oscille quant à elle entre 1,19 (riv4) et 1,41 (riv6).

Tableau 10 : Paramètres géométriques des cours d'eau du GBP

Rivières	Longueur (km)	Pente (‰)	Sinuosité
riv1	32,17	0,44	1,26
riv2	17,64	0,51	1,28
riv3	32,22	0,59	1,30
riv4	14,18	0,14	1,19
riv5	16,75	0,30	1,32
riv6	20,04	0,40	1,41

V.3.2. Calage et validation du modèle

V.3.2.1. Calage du modèle HEC-HMS

Le Tableau 11 présente les valeurs de paramètres initiaux calculées pour les dix sous-bassins du GBP (avant) et les valeurs finales ajustées (après) pour le calage du modèle hydrologique.

Tableau 11 : Les paramètres avant et après calage du modèle hydrologique

Sous bassins versants	**Sbv1**		**Sbv2**		**Sbv3**		**Sbv4**		**Sbv5**	
Calage	Av	Ap	Av	Ap	Av	Ap	Avt	Ap	Avt	Ap
Stock. Max. de la canopée (mm)	100	130,89	100	349,49	100	57,64	100	194,92	100	39,56
Coéf de culture	1	1	1	1,1	1	1,1	1	1	0.8	1
Surf. Imper. (%)	3	11	8	10	9	11	15	11	15	11
Tlag(min)	1787,8	997,06	1763 ;5	956,73	1723 ;6	403,21	1693,0	605,25	1023,2	592 ;84
Sous bassins versants	**Sbv6**		**Sbv7**		**Sbv8**		**Sbv9**		**Sbv10**	
Calage	Av	Ap	Av	Ap	Av	Ap	Av	Ap	Av	Ap
Stock. Max. de la canopée (mm)	100	58,38	100	16,57	100	212,65	100	1500	100	1500
Coéf de culture	1	1,1	1	1,1	1	1	1	1	1,1	1
Surf. Imper. (%)	0	10	0	8	0	10	0	11	8	0
Tlag(min)	1415,6	477,62	613,7	552,12	1191,4	307,16	1119 ,8	906,88	575,0	512,76

La Figure 17 montre les hydrogrammes observé et simulé sur la période de calibration. Le modèle est reproduit le comportement hydrologique observé. Il ne reproduit pas bien les pics de débits. Il parvient à représenter les phases de montée des eaux et celle des décrues. Les étiages sont parfaitement reproduits.

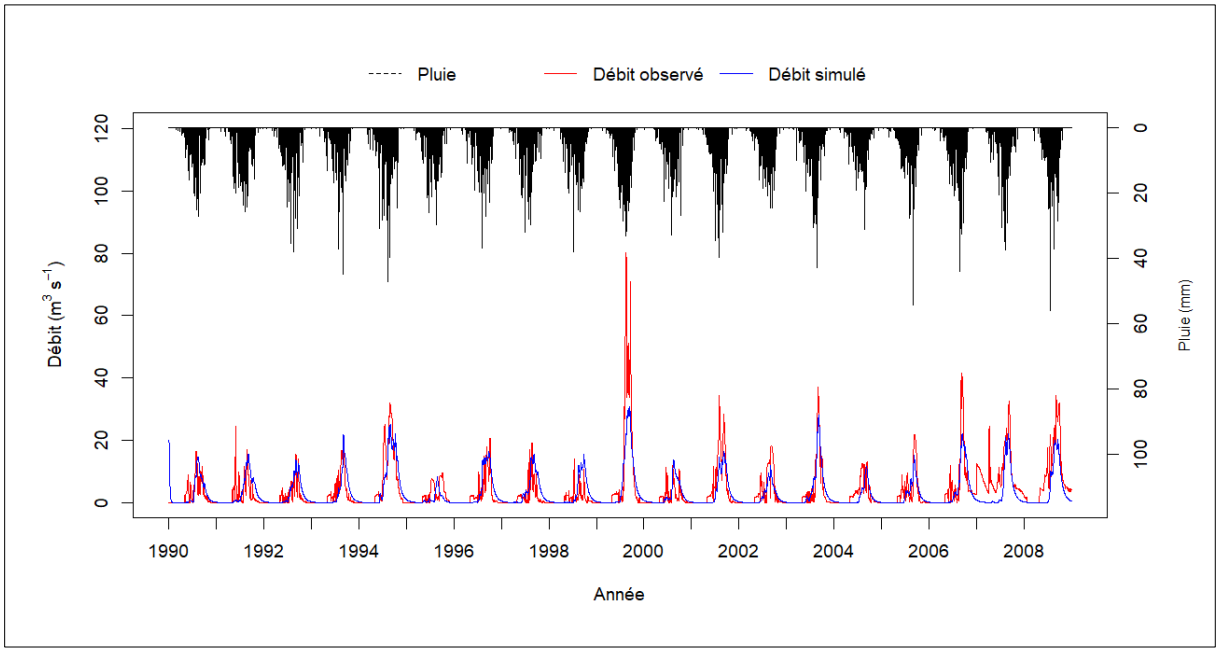


Figure 17 : Hydrogrammes simulé et observé pour la période de calage du modèle

La valeur de NSE lors du calage est de 0,604 (Tableau 12). Cette valeur est acceptable selon la classification de Nash et Sutcliffe, (1970). De plus, 69 % de la variance des débits observés sont expliqués par le modèle. Cependant il y a des biais qui sont de l'ordre de -19 % et une erreur moyenne qui peut varier autour de ± 0,6 m^3/s au des valeurs observées.

Tableau 12 : Résultats du calage du modèle sur la période 1990-2008

Critères d'efficacité	R^2	Nash	Pbiais	RMSE
Valeur	0,69	0,604	-18,86 %	0,6

V.3.2.2. Validation du modèle HEC-HMS

L'hydrogramme des débits simulés (Figure 18) tend à se superposer à celui des débits observés. Mais on constate qu'au lors de la montée des crues s'y a un léger décalage mais lors des décrues les courbes s'épousent. Les pics sont des débits observés sont presque atteint par ceux simulés.

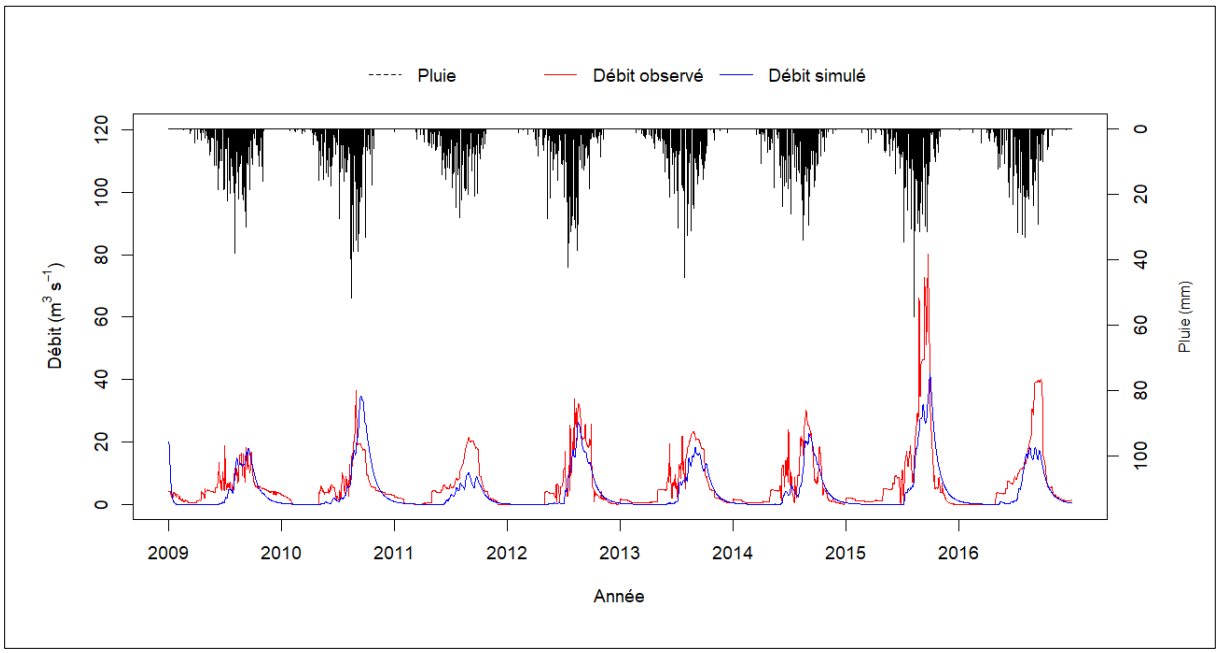


Figure 18 : Hydrogrammes simulé et observé pour la validation du modèle HEC-HMS

Les résultats de la validation présentés dans le Tableau 13 montrent que le modèle parvient globalement à reproduire de manière satisfaisante le comportement hydrologique du bassin. Le débit de pointe simulé, estimé à 41,8 m³/s le 30 septembre 2015, reste toutefois inférieur au débit maximal observé de 80,2 m³/s enregistré le 22 septembre 2015. La valeur de NSE à régresser mais reste acceptable. De même le coefficient de corrélation a diminué mais reste à 64 % ce qui est acceptable. Quant aux biais, il va -27,5 % et l'erreur moyenne passe à ± 0,7 m^3/s.

Tableau 13 : Résultats de la validation du modèle sur la période 2009-2016

Critères d'efficacité	R^2	Nash	Pbiais	RMSE
Valeur	**0,64**	**0,523**	**-27,5**	**0,7**

V.4. Simulation des débits à l'horizon 2050

V.4.1. Validation des modèles climatiques

V.4.1.1. Analyse saisonnière des précipitations de la période historique

Les précipitations moyennes mensuelles issues des cinq modèles climatiques du projet NEX-GDDP-CMIP6 ont été comparées avec les données satellitaires CHIRPS pour la période 1981-2014. La Figure 19 illustre les profils saisonniers des MCGs comparativement aux données observées. Tous les cinq profils ont atteint leur pic au mois d'aout. Certains modèles comme MPI-ESM1-2-HR a un profil qui débute en Mars avec des précipitations d'au moins 25 mm. Les autres modèles à la même période les précipitations sont presque égales. Au niveau du pic, tous les modèles amplifiaient la quantité de la plui sauf MIROC6. En fin de saison tous les modèles reflètent la pluviométrie observée.

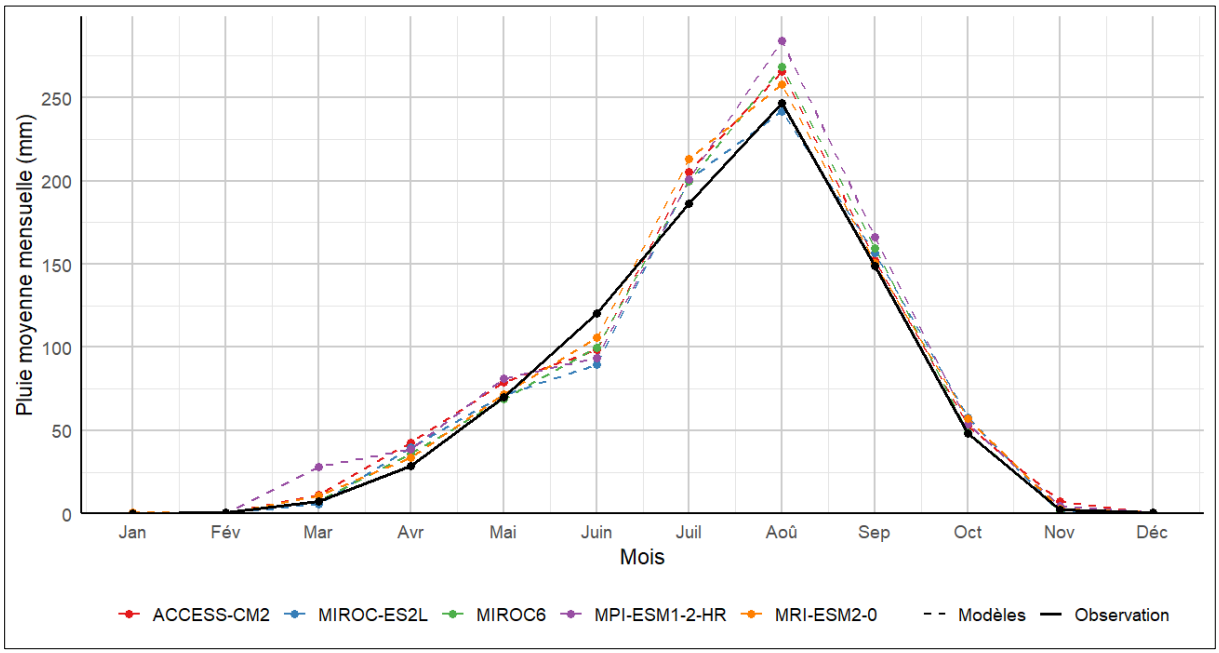


Figure 19 : Pluie moyenne-mensuelles des modèles par rapport à la moyenne de référence

Toutefois, une vérification des critères de performance tels que l'erreur absolue moyenne (MAE) et l'écart quadratique Moyen (RMSE) et l'erreur de biais moyen (MBE) a été réalisée afin de vérifier si les modèles choisis sont performants. Ces indicateurs ont été calculés sur chaque station d'observation pluviométrique afin de déterminer la moyenne de chaque indicateur pour chaque modèle (Aïzansi et al., 2024). Le Tableau 14 donne les valeurs de métriques calculées. Les biais sont de l'ordre de 8 mm/mois/an. L'erreur absolue

respectivement l'erreur quadratique sont de l'ordre de 32 mm/mois/an respectivement 54,1 mm/mos/an.

Tableau 14 : Métriques de sensibilité des précipitations en fonction des modèles

Modèles	MBE *(mm/mois/an)*	MAE *(mm/mois/an)*	RMSE *(mm/mois/an)*
MIROC-ES2L	0,3	23,0	37,7
ACCESS-CM2	4,7	25,9	39,9
MIROC6	2,6	26,2	42,2
MRI-ESM2-0	3,7	25,9	43,5
MPI-ESM1-2-HR	7,6	32,0	54,1

La Figure 20 illustre la distribution des cumuls annuels de pluies simulés par les différents modèles en comparaison avec la référence observée sur la période 1990-2014. Les modèles présentent des dispersions interannuelles dont les médianes sont proches sauf MPI-ESM1-2-HR et ACCESS-CM2 qui s'écartent avec une distribution interquartile plus importante.

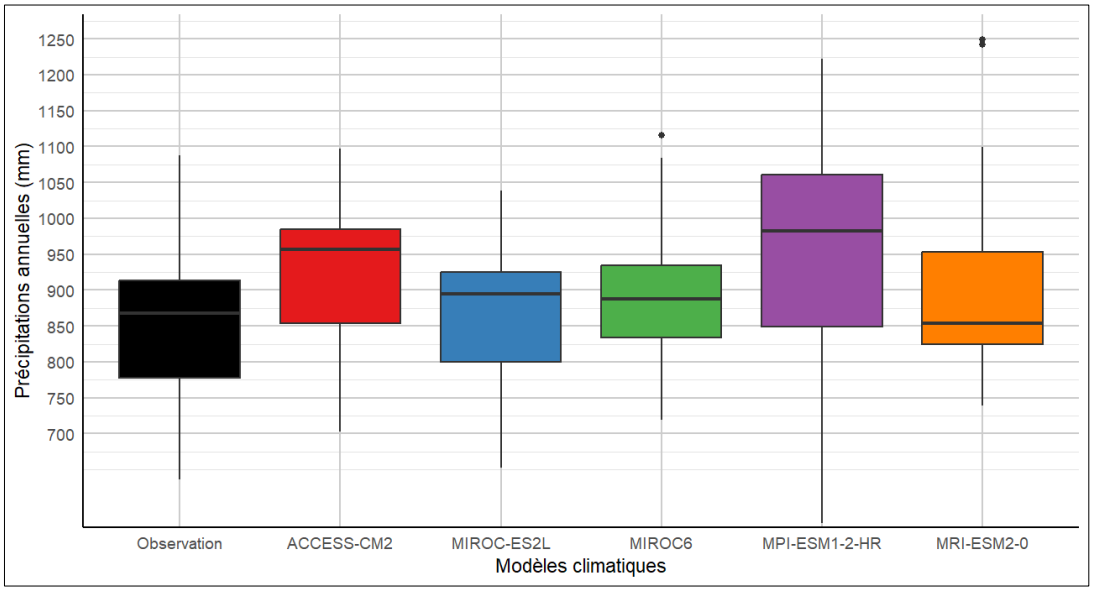


Figure 20 : Distribution des pluies annuelles des modèles et de la référence sur 1990-2014

V.4.1.2. Températures

Le cycle saisonnier de la température moyenne mensuelle sur le bassin versant du GBP, simulé par les modèles climatiques globaux sur la période 1990-2014 est présenté à la Figure 21. Les cycles saisonniers des températures maximales (Tmax) des MCGs choisis tendent à coïncider avec celui des températures observées et minimales observées. Des écarts existent entre janvier-avril et septembre-novembre. Les profils pour les températures minimales se superposent légèrement avec celui des données de référence avec des écarts en début d'année (janvier) et en fin d'année (octobre-décembre).

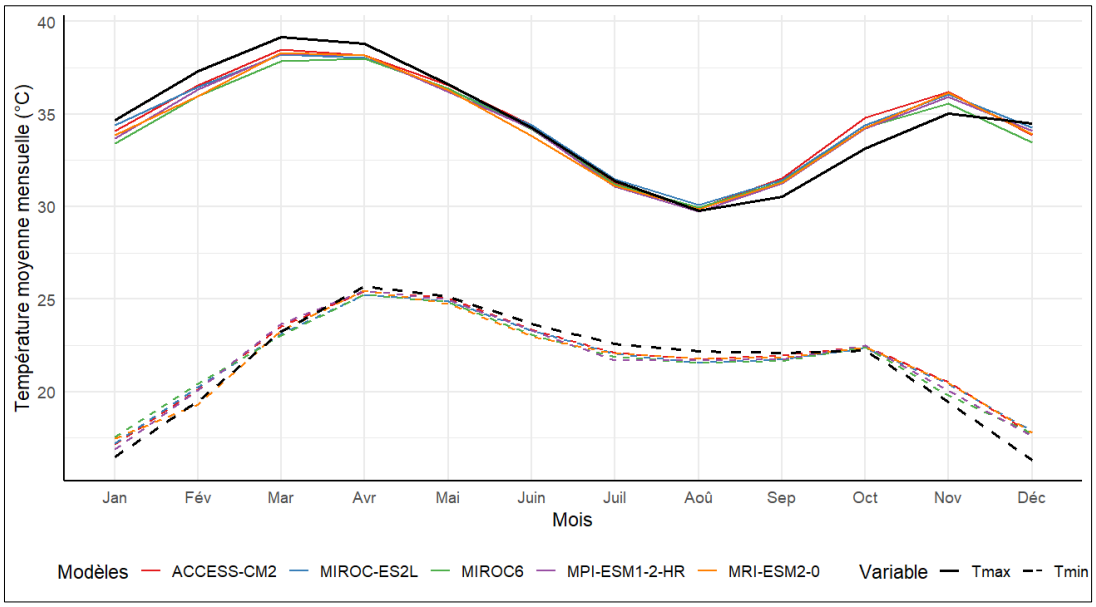


Figure 21 : Températures moyennes mensuelles sur le bv du GBP des modèles sur la période de référence

V.4.2. Analyse des données climatiques futures

V.4.2.1. Analyse des précipitations sur la période 2036-2065

La Figure 22 illustre la distribution des précipitations annuelles sur le bassin versant pour la période de référence et les projections futures. La boîte noire, correspondante aux données CHIRPS, présente une médiane 897,4 mm. Sous le scénario SSP2-4.5, les précipitations des modèles présentent une légère hausse par rapport à l'historique. Les dispersions entre les modèles sont similaires exceptées ACCESSM2. Ce dernier projette des précipitations plus importantes. L'EMM sous ce scénario a une médiane supérieure à celle historique. Sous le scénario SSP5-8.5 les modèles ont les mèmes tendances que le scénario modéré tant

individuellement que l'EMM. Sous ce scénario l'augmentation de la médiane de la moyenne des cinq modèles devient plus marquée, atteignant environ 9 %. Cette évolution reflète l'influence accumulée des modèles projetant des hausses significatives des précipitations dans un contexte de forçage radiatif plus élevé.

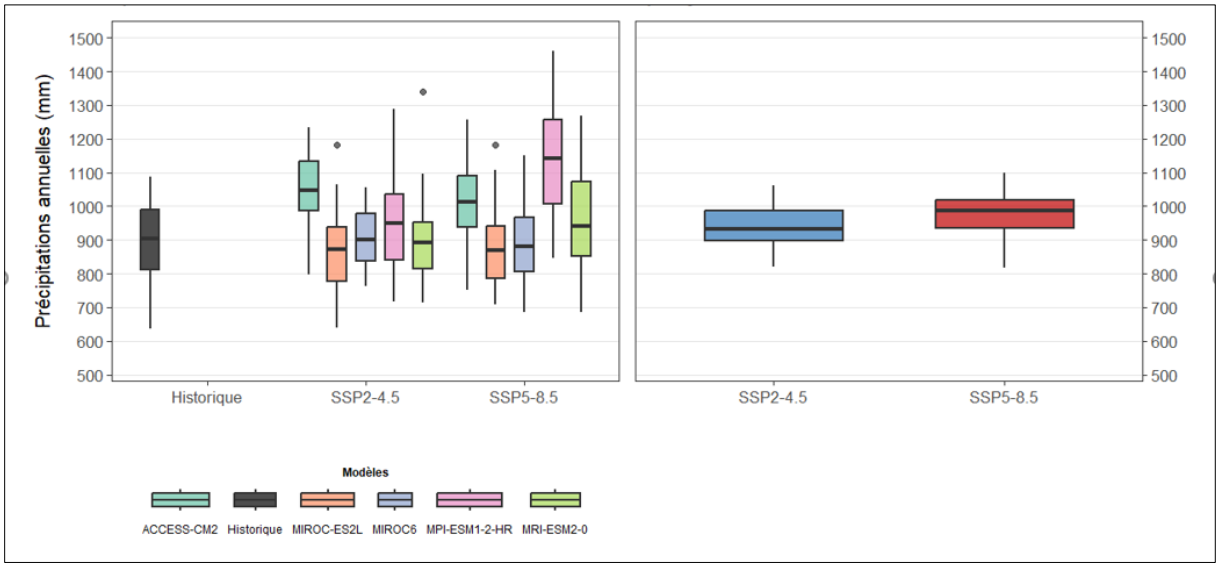


Figure 22 : Distribution des précipitations annuelles à l'horizon 2050

Le profil saisonnier futur sous les deux scénarios varie peu (Figure 23). La variation est de l'ordre de 11 % sous SSP2-4.5 contre 13 % dans le mois de juillet.

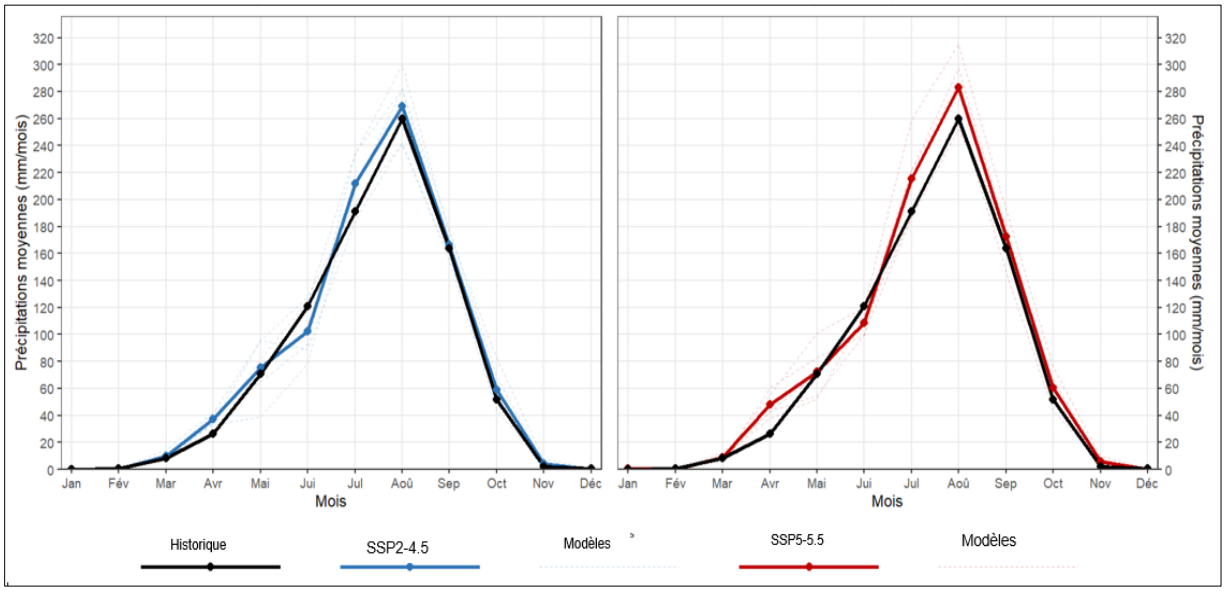


Figure 23 : Profil saisonnier des précipitations à l'horizon 2050

V.4.2.2. Analyse de l'ETP sur la période 2036-2065

La Figure 24 illustre la distribution interannuelle de l'évapotranspiration potentielle (ETP) des modèles climatiques et du climat historique. Sous le scénario SSP2-4.5, les modèles projettent une augmentation de l'ETP annuelle, avec des variations relatives de la médiane s'échelonnant entre 0,2 % et 3,7 %. Sous le scénario SSP5-8.5, caractérisé par un forçage radiatif plus intense, les augmentations projetées sont plus importantes et plus homogènes, avec des hausses de la médiane de l'ordre de 4 % pour la majorité des modèles. La moyenne d'ensemble confirme la hausse modérée, mais systématique de l'ETP annuelle. Sous SSP2-4.5, l'ETP devrait augmenter relative d'environ 2 %. Sous SSP5-8.5, la hausse est plus prononcée, avec une augmentation de la médiane de 2,7 %.

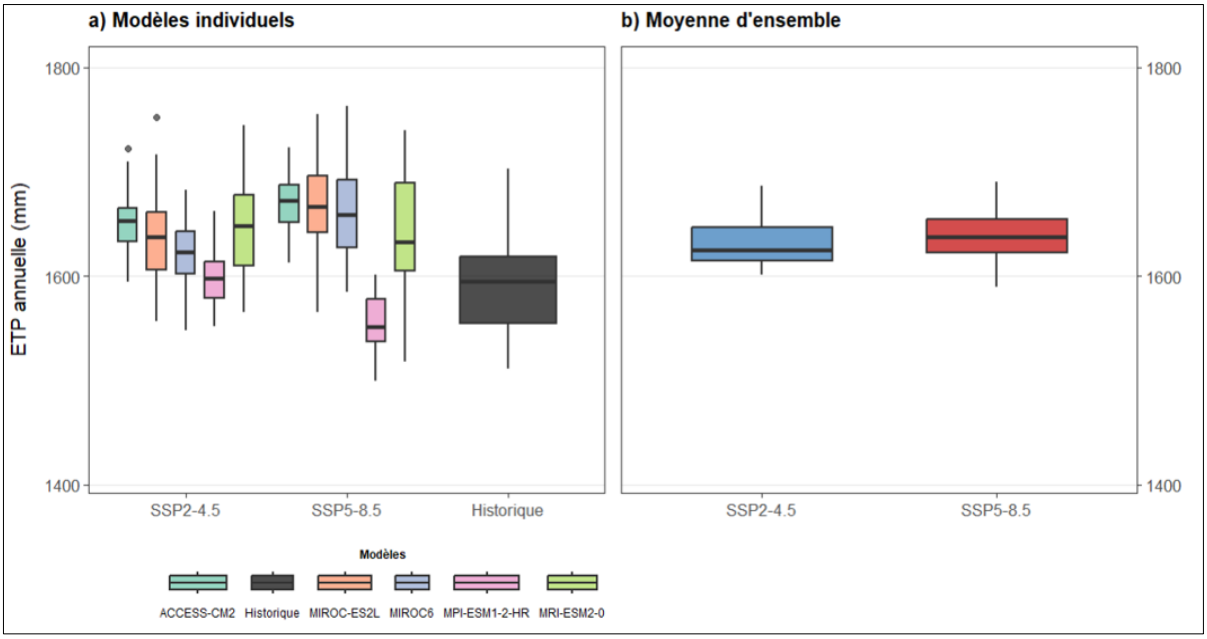


Figure 24 : Distribution de l'ETP annuelle à l'horizon 2050

À l'échelle mensuelle (Figure 25), les variations moyennes de l'ETP sont globalement positives, avec des augmentations moyennes respectives de 3,3 % sous SSP2-4.5 et 3,8 % sous SSP5-8.5. Cette évolution suggère que l'augmentation de l'ETP concerne l'ensemble du cycle annuel, sans se limiter à une période spécifique. L'analyse de la saisonnalité montre que la structure du cycle annuel de l'ETP est maintenue dans les projections futures. Les projections indiquent toutefois une amplification du cycle saisonnier, caractérisée par des valeurs mensuelles légèrement plus élevées, sans modification notable du calendrier saisonnier.

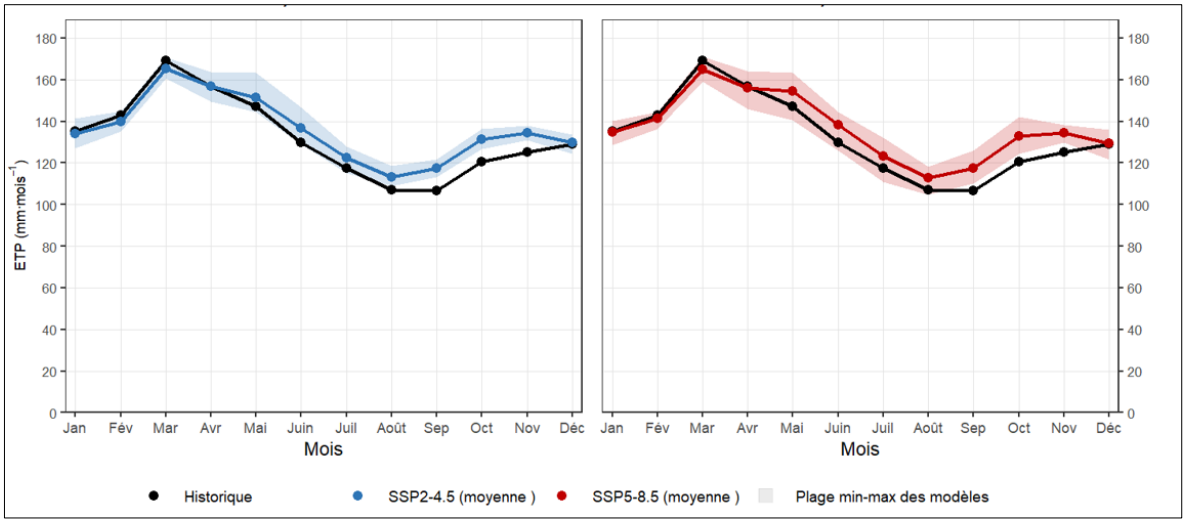


Figure 25 : Profil saisonnier de l'ETP à l'horizon 2050

V.4.3. Évaluation des débits futurs sur le bassin versant du GBP

V.4.3.1. Simulations des débits futurs

La Figure 26 présente l'évolution des écoulements moyens mensuels simulés à l'horizon 2050 sous les scénarios climatiques SSP2-4.5 (en bleu) et SSP5-8.5 (en rouge), comparée à la référence observée. Dans les deux scénarios, le cycle saisonnier des débits est globalement conservé, avec des écoulements très faibles en saison sèche (janvier à avril), une montée progressive à partir de mai–juin et un maximum atteint en septembre. Toutefois, les projections futures se distinguent nettement de la période de référence par une augmentation de l'ordre de 85 % des débits moyens mensuels. Sous le scénario SSP2-4.5, le profil moyen d'ensemble indique une hausse modérée d'environ 71 % des débits du pic de septembre par rapport à la période de référence. Les débits simulés des modèles varient entre -20 % et 82 % par rapport à la référence. Sous le scénario SSP5-8.5, l'augmentation des débits moyens mensuels est plus prononcée. Le moyenne d'ensemble atteint également son pic en septembre, avec des valeurs nettement supérieures à celles du SSP2-4.5. (Environ 85 % des débits de la référence). La gamme de variation inter-modèles est plus large (-26 % à 117 %), traduisant une incertitude accrue, mais aussi un signal climatique plus fort, en particulier pendant la saison des pluies.

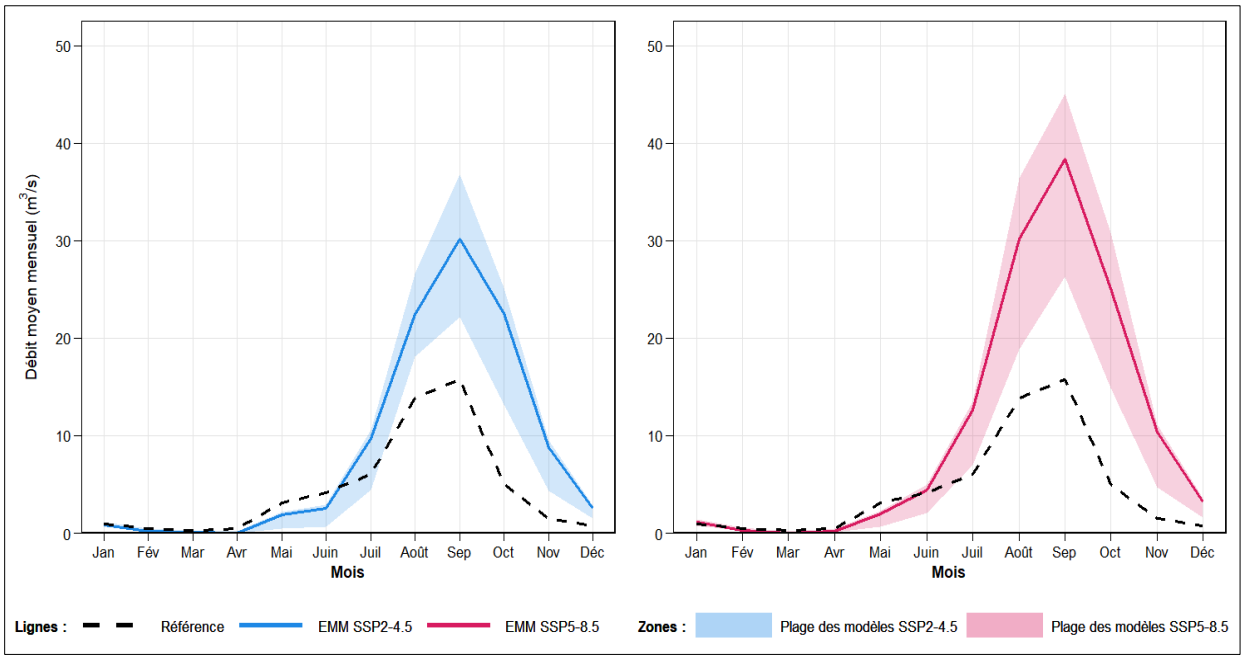


Figure 26 : Profils des débits moyens mensuels à l'horizon 2050

V.4.3.2. Débits journaliers maximums annuels à l'horizon 2050

La Figure 27 présente la distribution des débits journaliers maximums annuels simulés à l'horizon 2050 sous les scénarios SSP2-4.5 et SSP5-8.5 Elle met en évidence une augmentation nette des débits maximums annuels futurs par rapport à la moyenne référence historique. Cette hausse est observable sur l'ensemble de la distribution de l'ordre de 230 %. Les débits journaliers maximums sont identiques la plupart dans le mois de septembre.

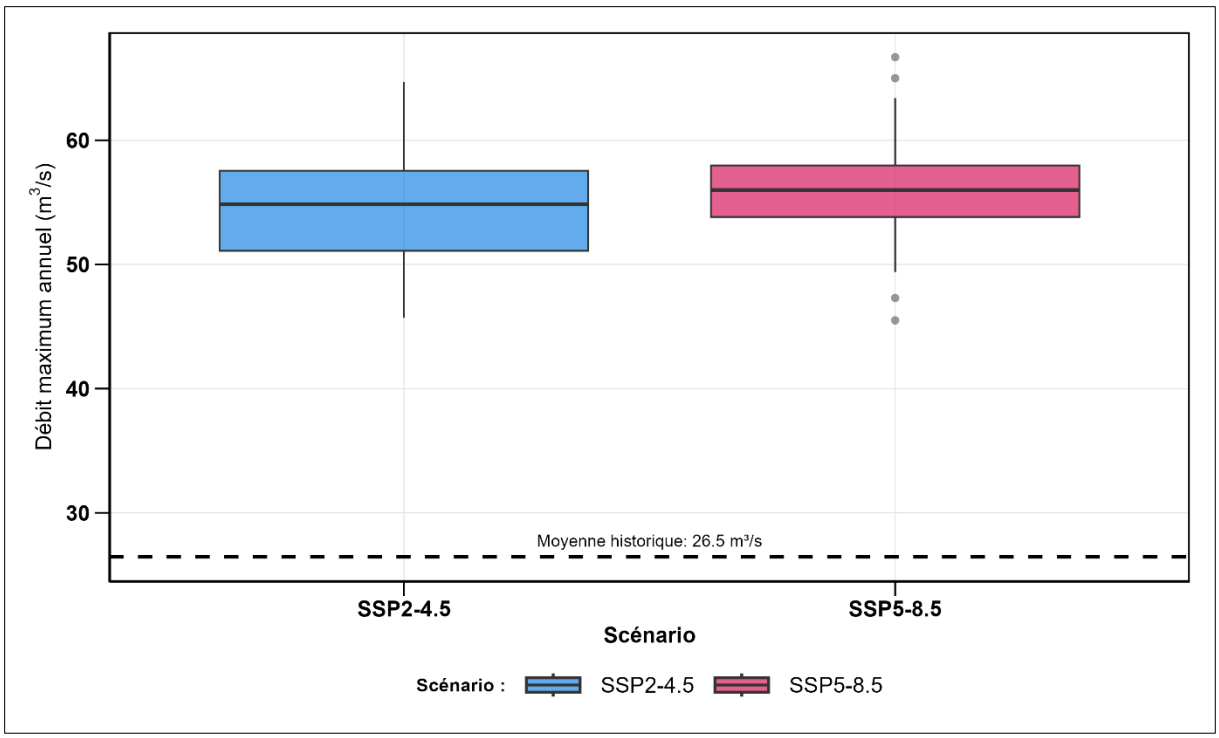


Figure 27 : Distribution des débits journaliers maximums annuels à l'horizon 2050

Le Tableau 15 confirme cette tendance marquée vers l'augmentation et la régularisation des débits sous l'effet du changement climatique. Les projections futures montrent une transforme du régime hydrologique. Le débit médian annuel (Q_{50}) passe de 22,2 m^3/s en historique à environ 56 m^3/s dans les projections futures, soit une augmentation de 150 %. Cette hausse concerne du régime moyen aux faibles contre une légère baisse des crues extrêmes de l'ordre de 19 %. La valeur moyenne des débits maximums annuels en hausse sous les deux scénarios. Le coefficient de variation chute de 85 % traduisant une intensification des crues quel que soit le scénario d'émissions.

Tableau 15 : Quantiles des débits journaliers maximums annuels en m^3/s

Scénario	Q_{05}	Q_{50}	Q_{95}	C_v
SSP2-4.5	-7,3	149,3	351,5	-84,8
SSP5-8.5	-4,1	154,5	350,1	-83,9

Les courbes des débits classés issues des projectons sous les scénarios SSP2-4.5 et SSP5-8.5 (Figure 28) illustre une augmentation générale des débits, quel que soit le niveau de probabilité de dépassement de plus de 5 %. L'évolution vers une réduction de la pente des courbes avec un décalage vers le haut pourrait traduire un changement de régime vers des conditions homogènes tout au long de l'année hydrologique. L'écart est faible pour les débits faibles, traduisant une évolution limitée des étiages. Le scénario SSP5-8.5 (en rouge) présente les débits les plus élevés, notamment pour la partie supérieure des courbes. Le scénario SSP2-4.5 (en bleu) montre une évolution similaire, mais d'amplitude légèrement moindre.

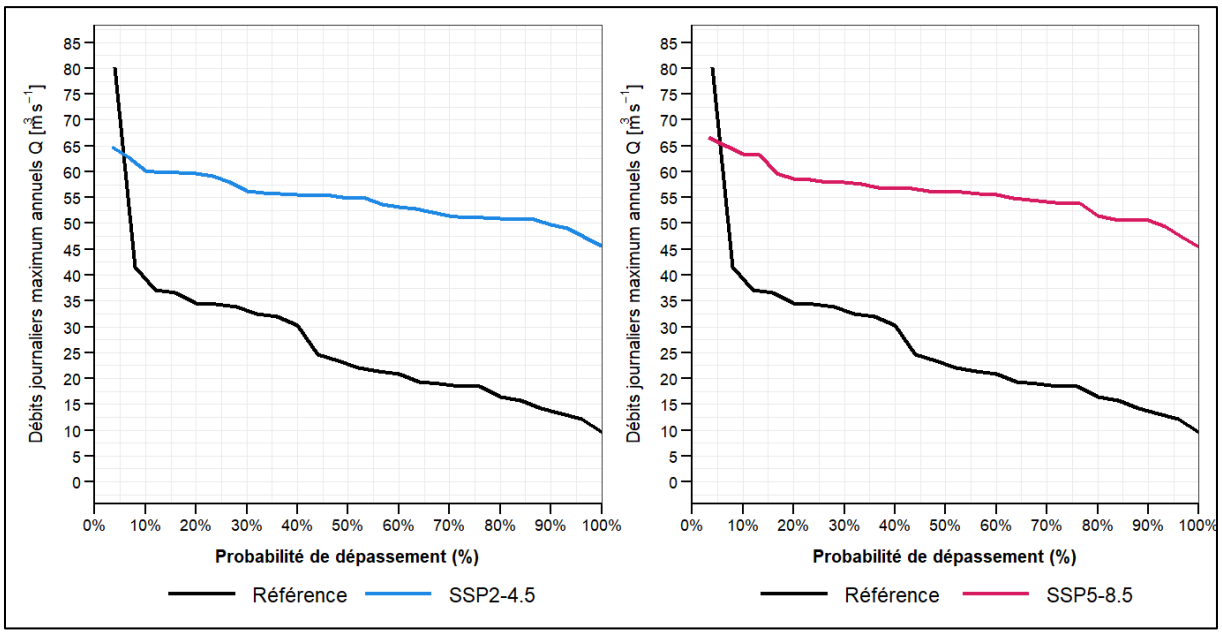


Figure 28 : Courbes des débits classés

V.5. Discussion

Ces dernières décennies, sur le bassin versant du GBP, affluent du cours d'eau Mouhoun on assiste des crues exceptionnelles qui inondent la RN1. Cette modification du régime fluvial du cours d'eau survient dans un contexte déjà marqué par une forte pression anthropique liée à l'agriculture, aux prélèvements en eau et à la dégradation progressive du couvert végétal, comme observé dans l'ensemble du bassin du Mouhoun (Ouedraogo et al., 2024).

Dans cette étude, les paramètres hydro-climatiques entre 1990 et 2024 ont été analysés. L'analyse a porté sur les variabilités spatio-temporelles, la détection des ruptures dans les chroniques, et l'analyse des tendances annuelles dans les séries de données hydro-climatiques entre 1990 et 2024. Il en est ressorti que la série de précipitations annuelles du bassin versant ont connu une rupture[2] en 2008 (Pettitt). L'analyse des indices de précipitations au niveau du bassin versant montre une alternance de périodes sèches (1990-2008) et humides (2009-2024). Ce comportement coïncide avec les résultats d'études menées dans le Sahel, indiquant une reprise pluviométrique depuis le début des années 2000 (Balme et al., 2006; Nicholson, 2013; Sanogo et al., 2015; Yonaba, 2020). Une rupture a été détectée par le tests statique en 2005 (Pettitt) avec une hausse de 100 % dans la série des écoulements (débits) moyens annuels du bassin versant du GBP. Ces résultats corroborent ceux de Fowé et al. (2025) qui détectent une hausse de 68 % des débits moyens annuels sur le bv du Mouhoun à Boromo à partir de 2007. Les tests de tendance donnent une hausse de 5,7 mm/an des précipitations et de 0,283 $m^3/s/an$ des débits. Ces résultats traduisent une légère amélioration des précipitations, ce qui concorde avec les études régionales indiquant une reprise partielle des pluies depuis les années 2000 en zone sahélienne (Panthou et al., 2014; Descroix et al., 2016) et ceux de Fowé et al. (2025).

Dans cette étude, les projections climatiques issues de cinq modèles globaux CMIP6 ont été utilisées comme données d'entrée du modèle hydrologique HEC-HMS. Le modèle hydrologique HEC-HMS, calé sur la période 1990-2008 et validé sur 2009-2016, a montré une capacité satisfaisante à reproduire la dynamique des débits journaliers observés (NSE = 0,6), malgré certaines limites liées à la densité relativement faible du réseau de stations hydro-climatiques. Ces résultats sont cohérents avec ceux rapportés dans d'autres sous-bassins du Mouhoun, où les performances des modèles pluie-débit restent acceptables malgré des lacunes dans les séries de données (Philippe et al., 2023). Dans les bassins sahéliens, ce type d'écart est courant et est souvent attribué à la forte réactivité hydrologique, au ruissellement de surface

très intense, ainsi qu'à l'incertitude des précipitations en entrée du modèle (Zouré et al., 2023; Odey and Cho, 2025). Cette performance s'inscrit dans la gamme rapportée dans la littérature sur les sous-bassins du Mouhoun et de la Volta. Par exemple, (Zouré et al., 2023) ont montré que même après calibration poussée, les modèles hydrologiques sous climat soudano-sahélien peinent souvent à reproduire fidèlement les crêtes de crue, alors que les volumes et les tendances annuelles sont mieux simulés.

L'analyse des débits moyens mensuels futurs révèle des anomalies hydrologiques sous les scénarios SSP245 et SSP585. De janvier à avril, les débits simulés chutent fortement par rapport à la période historique. Des anomalies de l'ordre -70%. Cette régression indique une aggravation des conditions d'étiage. Cette baisse des débits pourrait être due à l'augmentation de l'évapotranspiration potentielle (ETP) projetée, combinée à une faiblesse des précipitations. Des résultats similaires ont été observés dans le sous-bassin du Massili et dans le bassin du Nakambé, où les débits de saison sèche montrent une tendance à la diminution sous l'effet de l'augmentation des températures (Philippe et al., 2023).

À l'inverse, en saison des pluies, les résultats indiquent une intensification très marquée des écoulements. Les anomalies positives atteignent +22 % à +43 % en juillet, dépassent +70 % (SSP585) en août et culminent en septembre avec +60 % sous SSP2-4.5 et +85 % sous SSP5-8.5. Les valeurs maximales journalières projettées dépassent 68 m^3/s sous les scénarios futurs, contre des valeurs plus faibles sur la période de référence. La valeur moyenne des débits maximums annuels est en forte hausse de 191 % sous les deux scénarios avec des valeurs légèrement plus élevées pour les quantiles extrêmes. Cette augmentation des extrêmes hydrologiques indique une amplification de la variabilité intra-annuelle des débits, caractérisée par des épisodes de crues plus intenses alternant avec des périodes d'étiage plus sévères. Ce comportement est typique des bassins ouest-africains soumis au changement climatique et correspond au phénomène souvent qualifié de « paradoxe sahélien » (Descroix et al., 2013).

Les résultats obtenus sur le bassin du Grand Balé sont cohérents avec ceux rapportés dans d'autres sous-bassins du Mouhoun et en Afrique de l'Ouest. Dans le sous-bassin de la Kou, il a été montré que plus de 74 % du bassin est exposé à un risque élevé d'inondation sous les scénarios climatiques futurs (Guelbeogo et al., 2023). Dans le sous-bassin de Dano, les projections hydrologiques indiquent des variations des débits comprises entre -44 % et +95 % selon les modèles climatiques régionaux utilisés par Idrissou et al. (2022), soulignant aussi la

tendance générale à une intensification des extrêmes. Sur le bassin du Mouhoun, Konaté, (2023) et Bikie et al. (2025) montrent une augmentation des débits de pointe et des débits mensuels de +36,2% et +107 % à moyen terme (2055-2085) respectivement sous les scénarios climatiques futurs SSP2-4.5 et SSP5-8.5. Le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion de l'Eau (SDAGE) du bassin du Mouhoun indique également une possible diminution des débits en saison sèche (janvier-juillet), compensée par une augmentation en saison des pluies (août–octobre). Les résultats de la présente étude confirment cette tendance, tout en montrant que l'intensité des crues pourrait être plus élevée que celle envisagée dans les scénarios de planification actuels.

V.6. Limites de l'étude

La présente étude comporte certaines limites qu'il convient de prendre en compte lors de l'interprétation des résultats relatifs à l'impact du changement climatique sur les écoulements du bassin du GBP. Tout d'abord les données hydrométriques comportent souvent des lacunes qui pourraient entrainer des erreurs sur le traitement. En suite les données de précipitations sont des données satellitaires CHIRPS et CHIRTS en lieu et place des données observées méritent de tenir compte dans les interprétations. En ce qui concerne la modélisation hydrologique, le modèle HEC-HMS, bien qu'adapté à l'analyse des débits à l'échelle du bassin versant, présente certaines limites. Il repose sur une représentation simplifiée des processus hydrologiques et suppose une invariance des paramètres dans le temps. Enfin utiliser plus de modèles que les cinq pourraient aider à avoir plus de vu sur l'évolution future.

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

L'étude a permis d'évaluer l'impact du changement climatique sur les débits futurs et de mesurer les anomalies par rapport aux valeurs historiques. L'analyse des résultats obtenus à partir des scénarios climatiques SSP2-4.5 et SSP5-8.5 montre une accentuation notable du contraste saisonnier : la saison des pluies devrait connaître des débits moyens mensuels fortement amplifiés, avec des anomalies +85 % en août et septembre. En revanche, la saison sèche demeure caractérisée par des écoulements très faibles, proches de ceux observés historiquement, mais un assèchement du lit du cours d'eau.

Cette distribution contrastée des débits est symptomatique des effets combinés de la variabilité des prélèvements et de l'augmentation de l'évapotranspiration potentielle (ETP), particulièrement sous SSP5-8.5. Ainsi, le bassin versant du Grand Balé Pâ pourrait être confronté à des risques hydrologiques doubles : des inondations plus intenses pendant la saison humide. Ces changements auront des impacts directs sur l'agriculture, l'irrigation, l'approvisionnement en eau potable et la production hydroélectrique. La gestion intégrée et anticipée des ressources en eau devient dès lors une priorité pour le Burkina Faso, afin de garantir la sécurité hydrique et énergétique dans le contexte du changement climatique.

À la lumière de ces résultats, les recommandations suivantes sont formulées à l'endroit du Direction générale des Ressources en Eau du Burkina Faso et les parties concernées :

1. Protéger davantage les zones riveraines sensibles par des aménagements adaptés ;
2. Sensibiliser davantage les acteurs locaux aux risques climatiques.

Ces recommandations visent à minimiser les impacts négatifs du changement climatique, tout en assurant une gestion optimale et durable des ressources en eau et des systèmes hydrauliques.

BIBLIOGRAPHIE

Abbaspour, K.C., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S., Srinivasan, R., Yang, H., Kløve, B., 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, 733–752.

Abeysingha, N.S., Ray, R.L., 2025. Rivers at risk, soil erosion in a changing climate: a comprehensive review. Discov. Soil 2, 16. https://doi.org/10.1007/s44378-025-00040-9

Ahokpossi, Y., 2018. Analysis of the rainfall variability and change in the Republic of Benin (West Africa). Hydrological Sciences Journal 63, 2097–2123. https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1554286

Aïzansi, A.N., Ogunjobi, K.O., Ogou, F.K., 2024. Monthly rainfall prediction using artificial neural network (case study: Republic of Benin). Environmental Data Science 3, e11. https://doi.org/10.1017/eds.2024.10

Balme, M., Vischel, T., Lebel, T., Peugeot, C., Galle, S., 2006. Assessing the water balance in the Sahel: Impact of small scale rainfall variability on runoff: Part 1: Rainfall variability analysis. Journal of Hydrology, Water Resources in Regional Development: The Okavango River 331, 336–348. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.05.020

Barbosa, Fernandes, Lima, 2019. The influence of spatial discretization on HEC-HMS modelling: a case study. International Journal of Hydrology 442–449.

Batienon, S.I., 2021. Contribution à la Caractérisation hydrologique du bassin versant du MASSILI à GONSE au Burkina Faso à travers une approche multimodèle pluie débit (HEC-HMS, GR4J).

Biasutti, M., 2019. Rainfall trends in the African Sahel: Characteristics, processes, and causes. Wiley Interdiscip Rev Clim Change 10, e591. https://doi.org/10.1002/wcc.591

Bikie, G.A.D., Ye, S.G., Kam, S., 2025. Hydroclimatic Projections for the Mouhoun Basin in Burkina Faso by the Year 2100. J. Water Resour. Ocean Sci. 14, 163–174. https://doi.org/10.11648/j.wros.20251406.11

Bodian, A., Dezetter, A., Dacosta, H., 2012. Apport de la modélisation pluie-débit pour la connaissance de la ressource en eau : application au haut Bassin du Fleuve Sénégal. Climatologie 9, 109–125. https://doi.org/10.4267/climatologie.223

Breiman, L., 2001. Random Forests. Machine Learning 45, 5–32. https://doi.org/10.1023/A:1010933404324

Chaibou Begou, J., Jomaa, S., Benabdallah, S., Bazie, P., Afouda, A., Rode, M., 2016. Multi-site validation of the SWAT model on the Bani catchment: Model performance and predictive uncertainty. Water 8, 178.

Dembélé, M., Schaefli, B., van de Giesen, N., Mariéthoz, G., 2020. Suitability of 17 gridded rainfall and temperature datasets for large-scale hydrological modelling in West Africa. Hydrology and Earth System Sciences 24, 5379–5406. https://doi.org/10.5194/hess-24-5379-2020

Dembélé, M., Zwart, S.J., 2016. Evaluation and comparison of satellite-based rainfall products in Burkina Faso, West Africa. International Journal of Remote Sensing 37, 3995–4014. https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1207258

Descroix, L., Moussa, I.B., Genthon, P., Sighomnou, D., Mahé, G., Mamadou, I., Vandervaere, J.-P., Gautier, E., Maiga, O.F., Rajot, J.-L., Abdou, M.M., Dessay, N., Ingatan, A., Noma, I., Yéro, K.S.,

Karambiri, H., Fensholt, R., Albergel, J., Olivry, J.-C., Descroix, L., Moussa, I.B., Genthon, P., Sighomnou, D., Mahé, G., Mamadou, I., Vandervaere, J.-P., Gautier, E., Maiga, O.F., Rajot, J.-L., Abdou, M.M., Dessay, N., Ingatan, A., Noma, I., Yéro, K.S., Karambiri, H., Fensholt, R., Albergel, J., Olivry, J.-C., 2013. Impact of Drought and Land – Use Changes on Surface – Water Quality and Quantity: The Sahelian Paradox. Current Perspectives in Contaminant Hydrology and Water Resources Sustainability. https://doi.org/10.5772/54536

Descroix, L., Niang, A., Panthou, G., Bodian, A., Sane, Y., Dacosta, H., Malam Abdou, M., Vandervaere, J., Quantin, G., 2016. Évolution récente de la pluviométrie en Afrique de l'ouest à travers deux régions : la Sénégambie et le Bassin du Niger Moyen. Climatologie 12, 25–43. https://doi.org/10.4267/climatologie.1105

DGRE, 2025. Burkina/Pont de Hèrèdougou : Risque de submersion, vigilance accrue recommandée. Ouest Info. URL https://www.ouestinfo.bf/burkina-pont-de-heredougou-risque-de-submersion-vigilance-accrue-recommandee/ (accessed 12.1.25).

DGRE, W., 2024. Inondation à Pâ : la hauteur de l'eau a augmenté de plus d'un (01) mètre. Quotidien Sidwaya. URL https://www.sidwaya.info/inondation-a-pa-la-hauteur-de-leau-a-augmente-de-plus-dun-01-metre/ (accessed 12.1.25).

Diagne, F.M., Chabi, B.A., Marie, D.P.A., Mahamadou, K., Hamma, Y., 2023. Contribution of remote sensing and geophysical prospecting (1D) to the knowledge of groundwater resources Burkina Faso. American Journal of Water Resources 11, 49–64.

Diallo, 2022. Modélisation pluie-débit du bassin versant de la Comoé à Folonzo (Burkina Faso) à l'horizon 2031-2050 par le modèle HEC-HMS.

Diop, S.B., Ekolu, J., Tramblay, Y., Dieppois, B., Grimaldi, S., Bodian, A., Blanchet, J., Rameshwaran, P., Salamon, P., Sultan, B., 2025. Climate change impacts on floods in West Africa: new insight from two large-scale hydrological models. Natural Hazards and Earth System Sciences 25, 3161–3184. https://doi.org/10.5194/nhess-25-3161-2025

FAO, 1996. Crues et apports : Manuel pour l'estimation des crues décennales et des apports annuels pour les petits bassins versants non jaugés de l'A'frique sahélienne et tropicale sèche.

Faye, C., Dièye, S., Faye, G., 2021. Analyse morphométrique et hydrologique du sous bassin versant du Niaoulé (Bassin de la Gambie) à l'aide de technique SIG.

Fiedler, F.R., 2003. Simple, Practical Method for Determining Station Weights Using Thiessen Polygons and Isohyetal Maps. Journal of Hydrologic Engineering 8, 219–221. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2003)8:4(219)

Fowe et al., 2015. Impacts des changements globaux sur les ressources en eau dans la zone sahélienne en Afrique de l'Ouest.

Fowe, T., Karambiri, H., Hamma, Y., Barbier, B., Paturel, J.-E., Ibrahim, B., 2012. Impacts des scenarii climatiques et de l'occupation des sols sur les ressources en eau du bassin versant du Nakanbé (Burkina Faso). Climat et Développement 14, 123–137.

Fowé, T., Yonaba, R., Konaté, M.T., Mounirou, L.A., Nkiaka, E., Karambiri, H., 2025. A 60-year analysis of past hydroclimatic variability and trends in the Mouhoun river catchment in West Africa. Sci Rep 15, 21358. https://doi.org/10.1038/s41598-025-06549-x

Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., 2015. The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. Scientific data 2, 1–21.

GIEC, 2023. Synthèse du sixième rapport de synthèse du GIEC ,Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat.

GIEC, 2013. Changement climatique : Les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

Guelbeogo, S., ouédraogo, L., Ilboudo, S., 2023. Prévision ses crues du bassin versant du Kou, Burkina Faso. Scribd.

H. Hargreaves, G., A. Samani, Z., 1985. Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. Applied Engineering in Agriculture 1, 96–99. https://doi.org/10.13031/2013.26773

Hamed, K.H., Ramachandra Rao, A., Khaled, H., 1998. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. Journal of Hydrology 204, 182–196. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00125-X

Hausfather, Z., Peters, G.P., 2020. Emissions – the 'business as usual' story is misleading. Nature 577, 618–620. https://doi.org/10.1038/d41586-020-00177-3

Hawker, L., Uhe, P., Paulo, L., Sosa, J., Savage, J., Sampson, C., Neal, J., 2022. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed. Environ. Res. Lett. 17, 024016. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4d4f

Held, A.-E., 2011. Apport de la paléohydrologie dans la quantification des rôles respectifs du climat et de la tectonique des systèmes fluviatiles méandriformes fossiles : application à des systèmes oligo-miocènes d'Europe occidentale (Theses). École Nationale Supérieure des Mines de Paris.

Ibrahim, B., 2012. Caractérisation des saisons de pluies au Burkina Faso dans un contexte de changement climatique et évaluation des impacts hydrologiques sur le bassin du Nakanbé. Université Pierre et Marie Curie-Paris VI.

Ibrahim, B., Karambiri, H., Polcher, J., Yacouba, H., Ribstein, P., 2014. Changes in rainfall regime over Burkina Faso under the climate change conditions simulated by 5 regional climate models. Clim Dyn 42, 1363–1381. https://doi.org/10.1007/s00382-013-1837-2

Idrissou, M., Diekkrüger, B., Tischbein, B., Hipt, F.O. de, Näschen, K., Poméon, T., Yira, Y., Ibrahim, B., Idrissou, M., Diekkrüger, B., Tischbein, B., Hipt, F.O. de, Näschen, K., Poméon, T., Yira, Y., Ibrahim, B., 2022. Modeling the Impact of Climate and Land Use/Land Cover Change on Water Availability in an Inland Valley Catchment in Burkina Faso. Hydrology 9. https://doi.org/10.3390/hydrology9010012

INSD, 2023. INSTITUT NATIONAL DE LA STATISTIQUE ET DE LA DEMOGRAPHIE.

IPCC, 2021. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [WWW Document]. https://www.cambridge.org/bf/universitypress. URL https://www.google.com/search?q=IPCC.+(2021).+Climate+Change+2021%3A+The+Physical+Science+Basis.+Contribution+of+Working+Group+I+to+the+Sixth+Assessment+Report+of+the+Intergovernmental+Panel+on+Climate+Change.+Cambridge+University+Press.+https%3A%2F%2Fdoi.org%2F10.1017%2F9781009157896&oq=IPCC.+(2021).+Climate+Change+2021%3A+The+Physical+Science+Basis.+Contribution+of+Working+Group+I+to+the+Sixth+Assessment+Report+of+the+Intergovernmental+Panel+on+Climate+Change.+Cambridge+University+Press.+https%3A%2F%2Fdoi.org%2F10.1017%2F9781009157896&gs_lcrp=EgZjaHJvbWUyBggAEEUYOdIBCTM4MzFqMGoxNagCCLACAfEFUvfNzXFRu2w&sourceid=chrome&ie=UTF-8 (accessed 8.12.25).

Kafando, 1991. Monographie du Grand Balé à Pa : Crue de Septembre 1988 (Mémoire de maitrise (option geographie physique)). Université de Ouagadougou/FLASHS.

Kamagaté, B., 2006. Fonctionnement hydrologique et origine des écoulements sur un bassin versant de milieu tropical de socle au Bénin: bassin versant de la Donga (haute vallée de l'Ouémé).

Kambou, S.F., 2022. Analyse de la situation des inondations du tronçon de la RN1 à Pâ. Burkina24.com - Actualité du Burkina Faso 24h/24. URL https://burkina24.com/2022/08/24/analyse-de-la-situation-des-inondations-du-troncon-de-la-rn1-a-pa/ (accessed 12.1.25).

Karambiri, H., 2003. Crue et érosion hydrique au Sahel: étude et modélisation des flux d'eau et de matières sur un petit bassin versant pastoral au nord du Burkina Faso (Theses).

Konaté, M.T., 2023. Evaluation des impacts des changements climatiques sur les ressources en eau de surface du bassin versant du Mouhoun à Boromo, burkina faso (MÉMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME D'INGÉNIEUR 2IE AVEC GRADE DE MASTER). 2ie, Bibliothèque.

Kouakou, Tramblay, Dimitri Defrance, Nathalie Rouch, 2023. (PDF) Comparison of gridded precipitation estimates for regional hydrological modeling in West and Central Africa 2–4.

Kouamé, K.F.C., 2024. un Approche de la prévision des crues fluviales à partir d'une modélisation hydrologique: cas du modèle GR4J appliqué au bassin versant aménagé du fleuve Sassandra à l'exutoire de Soubré (Sud-ouest de la Côte d'Ivoire). Espace Géographique et Société Marocaine 1.

Koubodana, H.D., Atchonouglo, K., Adounkpe, J.G., Amoussou, E., Kodja, D.J., Koungbanane, D., Afoudji, K.Y., Lombo, Y., Kpemoua, K.E., 2021. Surface runoff prediction and comparison using IHACRES and GR4J lumped models in the Mono catchment, West Africa, in: Proceedings of IAHS. Presented at the Hydrology of Large River Basins of Africa - 4th International Conference on the "'Hydrology of the Great Rivers of Africa,'" Copernicus GmbH, pp. 63–68. https://doi.org/10.5194/piahs-384-63-2021

Lague, D., 2001. Dynamique de l'érosion continentale aux grandes échelles de temps et d'espace: modélisation expérimentale, numérique et théorique. Université Rennes 1.

Lamachère, J.-M., PUECH, C., 1995. Télédétection et cartographie des états de surface. Télédétection et Gestion des Ressources en Eau.

Legates, D.R., McCabe, G.J., 2013. A refined index of model performance: a rejoinder. International Journal of Climatology 33, 1053–1056.

Lombe, P., Carvalho, E., Rosa-Santos, P., 2024. Drought Dynamics in Sub-Saharan Africa: Impacts and Adaptation Strategies. Sustainability 16. https://doi.org/10.3390/su16229902

Marie-Rosine, F.N., Drissa, S.T., Gbombélé, S., Rodrigue, O.K., Lanciné, G.D., 2020. Modélisation de la Relation Pluie-Débit dans un Contexte de Gestion en Eau : Cas du Sous Bassin Versant du N'zi en Côte d'Ivoire. European Scientific Journal, ESJ 16, 62–62. https://doi.org/10.19044/esj.2020.v16n21p62

Monerie, P.-A., Mohino, E., Moine, M.-P., Biasutti, M., Pohl, B., Mignot, J., 2025. Exploring uncertainty in dynamical future changes in Sahel precipitation: the extratropical influence. Clim Dyn 63, 353. https://doi.org/10.1007/s00382-025-07835-0

Nalbantis, I., Tsakiris, G., 2009. Assessment of Hydrological Drought Revisited.

Nash, J.E., Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. Journal of Hydrology 10, 282–290. https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6

Niang, D., 2006. Fonctionnement hydrique de différents types de placages sableux dans le sahel Burkinabè. Verlag nicht ermittelbar.

Nicholson, S.E., 2013. The West African Sahel: A Review of Recent Studies on the Rainfall Regime and Its Interannual Variability. ISRN Meteorology 2013, 1–32. https://doi.org/10.1155/2013/453521

Odey, G., Cho, Y., 2025. Event-Based vs. Continuous Hydrological Modeling with HEC-HMS: A Review of Use Cases, Methodologies, and Performance Metrics. Hydrology 12, 39. https://doi.org/10.3390/hydrology12020039

Okiria, E., Okazawa, H., Noda, K., Kobayashi, Y., Suzuki, S., Yamazaki, Y., 2022. A Comparative Evaluation of Lumped and Semi-Distributed Conceptual Hydrological Models: Does Model Complexity Enhance Hydrograph Prediction? Hydrology 9. https://doi.org/10.3390/hydrology9050089

OMM, 2025. State of Global Water Resources 2024. World Meteorological Organization. https://doi.org/10.59327/WMO/WATER/2024

OMM, 2022. Le rapport sur l'état du climat en Afrique met l'accent sur le stress hydrique et les risques liés à l'eau [WWW Document]. Organisation Météorologique Mondiale. URL https://public.wmo.int/fr/media/le-rapport-sur-letat-du-climat-en-afrique-met-laccent-sur-le-stress-hydrique-et-les-risques-lies (accessed 12.2.25).

Ouattara, Tanoh, M.K., Dimitri, E., Maboridjon, D., François, D.M., Florence, B.N., Essetchi, P.K., 2024. Evaluation of the spatio-temporal variation of the physico-chemical parameter and the level of ecological pollution in the waters of the Como River and its tributary Iringou. J. Ecol. Nat. Environ. 16, 1–9. https://doi.org/10.5897/JENE2023.0963

Ouedraogo, H., Zoungrana, B.J.-B., Rouamba, J., Zongo, G., 2024. Influence de la dynamique de l'utilisation des terres sur le fleuve Mouhoun au Burkina Faso. Revue Internationale du Chercheur 5.

Ouedraogo, M., 2012. Impact des changements climatiques sur les revenus agricoles au Burkina Faso. Journal of Agriculture and Environment for International Development (JAEID) 106, 3–21.

Panthou, G., Vischel, T., Lebel, T., 2014. Recent trends in the regime of extreme rainfall in the Central Sahel. International Journal of Climatology 34, 3998–4006. https://doi.org/10.1002/joc.3984

Paturel, J.E., Servat, E., Vassiliadis, A., 1995. Sensitivity of conceptual rainfall-runoff algorithms to errors in input data — case of the GR2M model. Journal of Hydrology 168, 111–125. https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)02654-T

Paul, P.K., Zhang, Y., Mishra, A., Panigrahy, N., Singh, R., 2019. Comparative Study of Two State-of-the-Art Semi-Distributed Hydrological Models. Water 11. https://doi.org/10.3390/w11050871

Pettitt, A.N., 1979. A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem. Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics) 28, 126–135. https://doi.org/10.2307/2346729

Philippe, B.M., Roland, Y., Abdoulaye, S.B., Corenthin, S.Y.S., 2023. Influence des changements d'utilisation des terres sur les débits du bassin versant du Massili à Gonsé (Burkina Faso). VertigO. La revue internationale en sciences de l'environnement. https://doi.org/10.4000/vertigo.39765

Ramos, M.-H., 2018. Qualité et valeur des prévisions hydrologiques d'ensemble. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches (dossier scientifique), Irstea (Antony), Sorbonne Université, Paris, 102p., Disponible sur https://webgr. irstea. fr/wp-content/uploads/2018/05/HDR-RAMOS_2018_VPublic. pdf.

Randrianasolo, A., 2012. Généralisation de l'approche d'ensemble à la prévision hydrologique dans les bassins versants non jaugés. AgroParisTech.

Riahi, K., van Vuuren, D.P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B.C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Cuaresma, J.C., Kc, S., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., Ebi, K., Hasegawa, T., Havlik, P., Humpenöder, F., Da Silva, L.A., Smith, S., Stehfest, E., Bosetti, V., Eom, J., Gernaat, D., Masui, T., Rogelj, J., Strefler, J., Drouet, L., Krey, V., Luderer, G., Harmsen, M., Takahashi, K., Baumstark, L., Doelman, J.C., Kainuma, M., Klimont, Z., Marangoni, G., Lotze-Campen, H., Obersteiner, M., Tabeau, A., Tavoni, M., 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

Rocha, N.R., 2014. Débits de crue et analyse hydrologique de petits bassins versants. Université Laval.

Rosgen, D.L., 1994. A classification of natural rivers. CATENA 22, 169–199. https://doi.org/10.1016/0341-8162(94)90001-9

Sahu et al, 2020. A REVIEW ON THE HEC-HMS RAINFALL-RUNOFF SIMULATION MODEL 9.

Sami, M.K., Abderrazek, M.M., Sabri, M.B., Amer, M.Z., 2023. BENKOUITEN Messaoud KAHIA Oussama TEGHRI Lokmane.

Sanogo, S., Fink, A.H., Omotosho, J.A., Ba, A., Redl, R., Ermert, V., 2015. Spatio-temporal characteristics of the recent rainfall recovery in West Africa. Intl Journal of Climatology 35, 4589–4605. https://doi.org/10.1002/joc.4309

Sawadogo, W., Neya, T., Semde, I., Korahiré, J.A., Combasséré, A., Traoré, D.E., Ouedraogo, P., Diasso, U.J., Abiodun, B.J., Bliefernicht, J., Kunstmann, H., 2024. Potential impacts of climate change on the sudan-sahel region in West Africa – Insights from Burkina Faso. Environmental Challenges 15, 100860. https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.100860

Scharffenberg, W.A., Fleming, M.J., 2006. Hydrologic modeling system HEC-HMS: user's manual. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.

Song, X., Kong, F.-Z., Zhu, Z.-X., 2011. Application of Muskingum routing method with variable parameters in ungauged basin. Water Science and Engineering 20. https://doi.org/10.3882/j.issn.1674-2370.2011.01.001

Souley Tangam, I., Yonaba, R., Niang, D., Adamou, M.M., Keïta, A., Karambiri, H., 2024. Daily Simulation of the Rainfall–Runoff Relationship in the Sirba River Basin in West Africa: Insights from the HEC-HMS Model. Hydrology 11, 34. https://doi.org/10.3390/hydrology11030034

Stekhoven, D.J., Bühlmann, P., 2012. MissForest—non-parametric missing value imputation for mixed-type data. Bioinformatics 28, 112–118. https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btr597

Tamboura, S., Bagre, M.P., Kagambega, Z.P., 2025. Spatial reconstruction of landscape dynamics in the Grand-Balé catchment area between 1976-2022 (Burkina Faso). International Journal of Progressive Sciences and Technologies 52, 274–288. https://doi.org/10.52155/ijpsat.v52.2.7256

Thrasher, B., Wang, W., Michaelis, A., Brosnan, I., Khajehei, S., 2024. NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections (NEX-GDDP-CMIP6). Presented at the European Geosciences Union General Assembly 2024 (EGU24), p. 19303. https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-19303

Tirogo, J., Jost, A., Biaou, A., Valdes-Lao, D., Koussoubé, Y., Ribstein, P., 2016. Climate Variability and Groundwater Response: A Case Study in Burkina Faso (West Africa). Water 8, 171. https://doi.org/10.3390/w8050171

Tramblay, Y., Rouché, N., Paturel, J.-E., Mahé, G., Boyer, J.-F., Amoussou, E., Bodian, A., Dacosta, H., Dakhlaoui, H., Dezetter, A., 2021. ADHI: The African database of hydrometric indices (1950–2018). Earth System Science Data 13, 1547–1560.

Traoré, S., 2025. Modélisation pluie-débit du bassin versant Bafing pour la gestion de l'eau du lac de Manantali, dans la région de Kita au Mali à l'horizon 2050. 2ie.

Villeneuve, J.P., Hubert, P., Mailhot, A., Rousseau, A.N., 2005. La modélisation hydrologique et la gestion de l'eau. rseau 11, 19–39. https://doi.org/10.7202/705327ar

Water Aid, 2021. Changement climatique et sécurité de l'eau, cas du Burkina Faso et du Niger, Water Aid, juillet 2021. WATHI. URL https://www.wathi.org/changement-climatique-et-securite-de-leau-cas-du-burkina-faso-et-du-niger-water-aid-juillet-2021/ (accessed 1.2.26).

Wilks, D.S., 2006. Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. Academic Press.

Willmott, C., Matsuura, K., 2005. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. Clim. Res. 30, 79–82. https://doi.org/10.3354/cr030079

Yonaba, R., Belemtougri, A., Fowé, T., Mounirou, L.A., Nkiaka, E., Dembélé, M., Komlavi, A., Coly, S.M., Koïta, M., Karambiri, H., 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, 2391956. https://doi.org/10.1080/10106049.2024.2391956

Yonaba, R.O., 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) (Theses). Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement.

Zouré, C.O., 2019. Thèse en Sciences et Technologies de l'Eau, de l'Energie et de l' Environnement. Étude des performances hydrologiques des techniques culturales dans un contexte de changement climatique en zone sahélienne du Burkina.

Zouré, C.O., Kiema, A., Yonaba, R., Minoungou, B., 2023a. Unravelling the Impacts of Climate Variability on Surface Runoff in the Mouhoun River Catchment (West Africa). Land 12, 2017. https://doi.org/10.3390/land12112017

Zouré, C.O., Kiema, A., Yonaba, R., Minoungou, B., 2023b. Unravelling the Impacts of Climate Variability on Surface Runoff in the Mouhoun River Catchment (West Africa). Land 12, 2017. https://doi.org/10.3390/land12112017

ANNEXES

Annexe 1 : Script R d'extraction des données de pluies i

Annexe 2 : Script de téléchargement des données de modèles climatiques ii

Annexe 3 : Script R pour le test de corrélation sur le rang de Spearman iv

Annexe 4 : Topographie du bassin versant du Grand Balé à Pa..... v

Annexe 5 : Corrélation entre précipitations et débit annuels..... vi

Annexe 1 : Script R d'extraction des données de pluies

```
# === 1. Charger les bibliothèques ===
library(terra)    # pour manipuler les NetCDF
library(dplyr)    # pour les jointures et transformations
library(tidyr)    # pour réorganiser les tables
# === 2. Définir le dossier contenant les fichiers NetCDF ===
setwd("C:/Users/USER/Documents/2IE/M2GEAAH/S10/Traitement_de_donnee/donnees_de_precip_reanalise_chirps_nc_1981_2024")
# Lister les fichiers NetCDF (.nc)
files <- list.files(pattern = "\\.nc$", full.names = TRUE)
# === 3. Charger le fichier CSV contenant les points ===
points_csv <- read.csv("C:/Users/CANTINET/Documents/2IE/M2GEAAH/S10/Traitement_de_donnee/Station_Pluvio.csv",
  sep = ";" , stringsAsFactors = FALSE)
# === 4. Créer un objet spatial à partir du CSV ===
points_vect <- vect(points_csv, geom = c("Longitude", "Latitude"), crs = "EPSG:4326")
# === 4. Liste pour stocker les données de chaque fichier ===
all_data <- list()
# === 5. Boucle d'extraction ===
for (f in files) { cat("Traitement du fichier :", f, "\n")
 precip <- rast(f) points_proj <- project(points_vect, crs(precip))
  # Extraction des valeurs
  extrait <- terra::extract(precip, points_proj)
  extrait <- extrait[,-1]  # Retirer colonne ID ajoutée par terra
  # Créer data.frame avec les noms des stations
  df <- as.data.frame(t(extrait))
  names(df) <- points_csv$Nom
  df$Date <- time(precip)
  all_data[[f]] <- df }
# === 6. Fusionner toutes les années ===
df_final <- bind_rows(all_data)
# === 7. Réorganisation des colonnes ===
df_final <- df_final %>%  relocate(Date, .before = 1) %>%  arrange(Date)
# === 8. Sauvegarde en CSV ===
write.csv(df_final,
"C:/Users/CANTINET/Documents/2IE/M2GEAAH/S10/Traitement_de_donnee/pluie_points_CHIRPS_large_1990_2024.csv", row.names = FALSE)
cat("✅ Extraction terminée : fichier joint au format large créé !\n")
```

Annexe 2 : Script de téléchargement des données de modèles climatiques

```
// SCÉNARIO FUTUR SSP585

// Définition des stations

var stations = ee.FeatureCollection([ ee.Feature(ee.Geometry.Point([-3.3,11.75]),{Code:'1200000700',Nom:'BAGASSI',Bassin:'Volta'}),
ee.Feature(ee.Geometry.Point([-3.6833,11.6167]),{Code:'1200003400',Nom:'BEREBA',Bassin:'Volta'}),
ee.Feature(ee.Geometry.Point([-3.7667,11.85]),{Code:'1200004900',Nom:'BONDOUKUY',Bassin:'Volta'}),
 ee.Feature(ee.Geometry.Point([-3.2333,11.45]),{Code:'1200010700',Nom:'FOUNZAN',Bassin:'Volta'}),
 ee.Feature(ee.Geometry.Point([-3.5167,11.4833]),{Code:'1200013000',Nom:'HOUNDE',Bassin:'Volta'}),
 ee.Feature(ee.Geometry.Point([-3.6667,12.0833]),{Code:'1200024700',Nom:'OUARKOYE',Bassin:'Volta'}),
 ee.Feature(ee.Geometry.Point([-3.4333,11.9667]),{Code:'1200034900',Nom:'WONA',Bassin:'Volta'}),
 ee.Feature(ee.Geometry.Point([-3.6333,11.8667]),{Code:'1200024200',Nom:'OUAKARA',Bassin:'Volta'})
]);

Map.centerObject(stations,8);

Map.addLayer(stations,{color:'red'},'Stations');

// Paramètres CMIP6

var scenario = 'ssp245'; // minuscule

var models = ['MRI-ESM2-0','MPI-ESM1-2-HR','MIROC6','MIROC-ES2L','ACCESS-CM2'];

var variables = ['pr'];

// Plage de dates sûre

var startDate='2036-01-01';

var endDate='2065-12-31';
```

```
var cmip6 = ee.ImageCollection('NASA/GDDP-CMIP6')
  .filter(ee.Filter.inList('model',models))
  .filter(ee.Filter.eq('scenario',scenario))
  .filterDate(startDate,endDate)
  .select(variables);
print('Taille collection CMIP6 (futur SSP245) :', cmip6.size());
// Fonction extraction série journalière pour une station
function timeSeriesForStation(station){ var geom = ee.Feature(station).geometry(); var code = ee.Feature(station).get('Code'); var nom = ee.Feature(station).get('Nom'); return cmip6.map(function(img){var values = img.reduceRegion({ reducer: ee.Reducer.mean(), geometry: geom, scale: 25000, crs: 'EPSG:4326'}); return ee.Feature(geom, values .set('date', img.date().format('YYYY-MM-dd')).set('time_start', img.get('system:time_start')) .set('model', img.get('model')) .set('scenario', scenario) .set('station_code', code) .set('station_nom', nom) .set('lat', geom.coordinates().get(1)) .set('lon', geom.coordinates().get(0))); }); }
// Application à toutes les stations
var stationList = stations.toList(stations.size());
var allSeriesList = ee.List.sequence(0,stations.size().subtract(1))
  .map(function(i){ return timeSeriesForStation(ee.Feature(stationList.get(i))); });
var allSeries = ee.FeatureCollection(allSeriesList).flatten();
// Affichage d'un point exemple pour contrôle
allSeries.size().evaluate(function(sz){ if(sz>0){ Map.addLayer(allSeries.first().geometry(),{color:'blue'},'Exemple point'); } else { print('Collection vide ! Vérifie modèles ou dates.'); }
}); // Export CSV vers Google Drive
Export.table.toDrive({ collection: allSeries, description:'CMIP6_SSP245_cinq_model_Stations_pr_2036_2065', fileFormat:'CSV'
});
```

Annexe 3 : Script R pour le test de corrélation sur le rang de Spearman

```
# Charger librairies
library(dplyr); library(lubridate); library(ggplot2)

# Lecture des données
data <- read.csv("chemin/vers/pluie_bassin_CHIRPS_1990_2024.csv", sep = ";", header = TRUE)
data$Date <- as.Date(data$Dates, format = "%d/%m/%Y")

# Extraction temporelle
data <- data %>% mutate(Annee = year(Date), Mois = month(Date))

# Calculs mensuels et annuels (à adapter selon variables disponibles)
# Note: le code original utilise 'donnees_jour' et 'debit_kalman' non définis ici
debit_mensuel <- data %>% group_by(Annee, Mois) %>% summarise(debit_mensuel = sum(debit_kalman, na.rm = TRUE))
debit_annuel <- data %>% group_by(Annee) %>% summarise(debit_annuel = sum(debit_kalman, na.rm = TRUE))

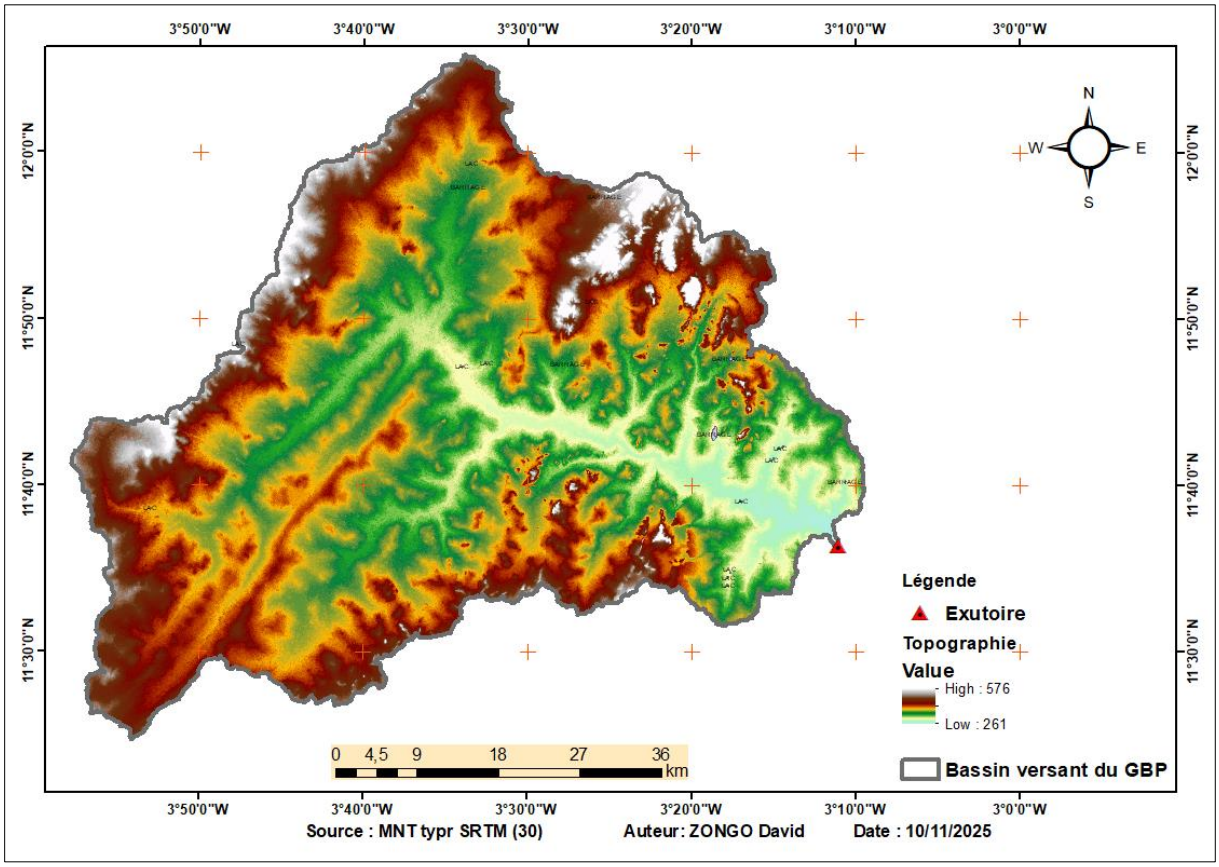
# Export
write.csv(debit_mensuel, "chemin/vers/debit_mensuel.csv", row.names = FALSE)
write.csv(debit_annuel, "chemin/vers/debit_annuel.csv", row.names = FALSE)

# Fusion avec données pluie (si pluie_annuelle existe)
df <- merge(pluie_annuelle, debit_annuel, by = "Annee")

# Test de corrélation Spearman
test_spearman <- cor.test(df$Pluie_annuelle, df$debit_annuel, method = "spearman", exact = FALSE)

# Graphique
ggplot(df, aes(x = Pluie_annuelle, y = debit_annuel)) +
  geom_point(color = "blue", size = 2) +
  geom_smooth(method = "lm", se = TRUE, color = "red", linetype = "dashed") +
  labs(title = "Corrélation entre précipitations et débit annuel",
       subtitle = paste0("Spearman: rho = ", round(test_spearman$estimate, 3),
                         ", p = ", signif(test_spearman$p.value, 3)),
       x = "Précipitations annuelles (mm)",
       y = "Débit annuel (m³/s)")
```

Annexe 4 : Topographie du bassin versant du Grand Balé à Pa



Annexe 5 : Corrélation entre précipitations et débit annuels

