



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

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR 2iE AVEC GRADE DE
MASTER

**SPECIALITE : GENIE DE L'EAU, DE L'ASSAINISSEMENT ET DES
AMENAGEMENTS HYDRO-AGRICOLES**

Présenté et soutenu publiquement le 21/07/2025 par

Seydou TRAORE (N°20200307)

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

Maître de stage : M. Moulaye Mohamed TRAORE, Directeur de Production, SEMAF
M. Jacob Y SANGARÉ, Chef de Service Hydrologie et Planification, SEMAF

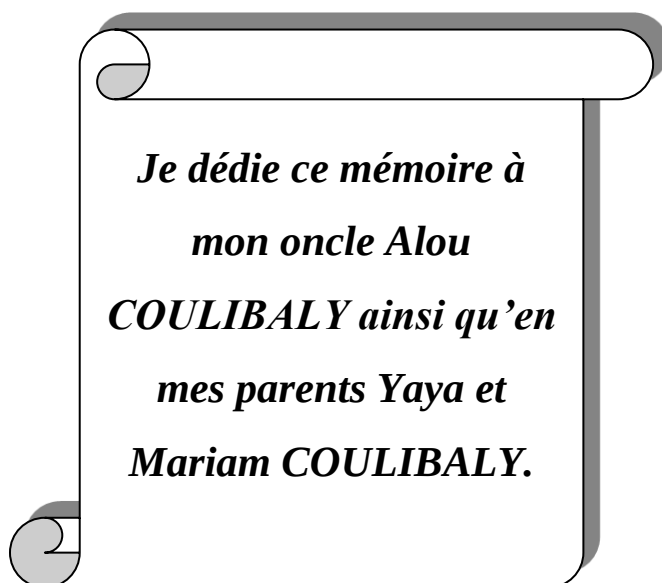
Jury d'évaluation du stage :

Président : Dr Angelbert Chabi BIAOU (2iE)

Membres et correcteurs : Dr Moussa Bruno KAFANDO (Université Joseph Ki ZERBO)
M. Soumahila SAKANDE (2iE)

Promotion [2024/2025]

DEDICACES



REMERCIEMENTS

Je remercie ALLAH qui m'a accordé la santé, le courage et la facilité de produire ce modeste travail.

Je remercie mes parents, mes frères et sœurs et tout le reste de la famille TRAORE ET COULIBALY.

L'occasion me semble aussi appropriée pour remercier et témoigner ma profonde reconnaissance à toutes les personnes physiques ou morales qui nous ont assisté de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire. Il s'agit de :

- l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) pour la qualité de l'enseignement et de l'encadrement dont j'ai bénéficié ;
- Dr. FOWE TAZEN, qui, en tant qu'encadreur, n'a ménagé aucun effort pour m'apporter son assistance dans le cadre de ce travail ;
- Monsieur Abdoulaye DIA Directeur Général de la Société d'Exploitation de Manantali et Félou (SEMAF SA) pour l'opportunité de stage qu'il nous a accordé
- Nous adressons nos sincères remerciements à Monsieur Moulaye Mouhamed TRAORE, Directeur de la production de la SEMAF, pour son assistance et son soutien indéfectible dans la réalisation de ce travail. Grâce à lui, nous avons bénéficié des meilleures conditions durant notre séjour à Manantali. À travers lui, nous exprimons également notre gratitude à toute l'équipe de la SEMAF, et en particulier au Directeur des Ressources Humaines, Monsieur Aboubacar Sidiki KANTE, au Chef de Service Hydrologie et Planification, Monsieur Jacob Yacouba SANGARÉ, ainsi qu'au Chef d'unité Planification, Monsieur Alassane THIAM, pour leur accompagnement et leur précieuse collaboration tout au long de notre séjour ;
- Une grande part de ma gratitude va également à l'endroit de Monsieur le Directeur des Études et des Affaires Académiques de l'Institut 2iE Professeur Mahamadou KOÏTA pour sa grande contribution à notre formation, sa disponibilité et son soutien ;
- Je remercie chaleureusement l'ensemble du corps professoral de 2iE pour tous leurs efforts et leur engagement à nous transmettre leur savoir;
- À mon oncle Alou COULIBALY, pour avoir pris en charge l'intégralité de mes études de master, ainsi qu'à toute sa famille, en particulier à mes deux tantes, Djènèba DEMBELE et Oumou DEMBELE ;
- À toutes et à tous, qui m'ont aidé, encouragé, soutenu, je vous adresse un sincère merci !

RESUME

Dans le but d'améliorer la compréhension et la gestion des ressources en eau du barrage de Manantali, cette étude évalue les impacts potentiels du changement climatique sur le bassin du Bafing Makanan à l'horizon 2050. L'analyse s'appuie sur des données hydro-climatiques observées (1990–2014) et des projections futures (2036–2065), issues de trois modèles climatiques (IPSL-CM6A-LR, FGOALS-g3 et EC-Earth3), selon les scénarios d'émissions SSP2-4.5 et SSP5-8.5. Ces données, corrigées des biais, ont été intégrées au modèle hydrologique HEC-HMS, calibré sur la période 1990–2006 et validé sur la période 2007–2022, afin de simuler les écoulements futurs du bassin.

Les résultats révèlent une baisse des précipitations annuelles, particulièrement marquée sous le scénario SSP5-8.5, ainsi qu'une augmentation de l'évapotranspiration potentielle (ETP) pour tous les mois de l'année, avec des pics notables entre mars et juin. Ces évolutions climatiques conduisent à une réduction significative des écoulements dans le bassin du Bafing, indiquant une diminution potentielle des apports en eau vers le réservoir de Manantali. Le modèle HEC-HMS s'est montré performant pour simuler ces tendances (Nash-Sutcliffe de 0,68 en calage et 0,67 en validation), ce qui souligne la fiabilité des résultats obtenus et met en évidence la nécessité de stratégies d'adaptation pour assurer une gestion durable des ressources en eau à l'horizon 2050.

Mots Clés :

Bassin versant ; Bafing Makanan ; HEC-HMS ; Modélisation hydrologique ; Projection climatique

ABSTRACT

With the aim of improving the understanding and management of water resources at the Manantali dam, this study assesses the potential impacts of climate change on the Bafing Mamanan basin up to 2050. The analysis is based on observed hydro-climatic data (1990-2014) and future projections (2036-2065), derived from three climate models (IPSL-CM6A-LR, FGOALS-g3 and EC-Earth3), according to emission scenarios SSP2-4.5 and SSP5-8.5. These bias-corrected data were integrated into the HEC-HMS hydrological model, calibrated over the period 1990-2006 and validated over the period 2007-2022, in order to simulate future basin flows.

The results reveal a decrease in annual precipitation, particularly marked under the SSP5-8.5 scenario, as well as an increase in potential evapotranspiration (PET) for all months of the year, with notable peaks between March and June. These climatic changes lead to a significant reduction in runoff in the Bafing basin, indicating a potential decrease in water inflows to the Manantali reservoir. The HEC-HMS model has proven effective in simulating these trends (Nash-Sutcliffe of 0.68 in calibration and 0.67 in validation), which underscores the reliability of the results obtained and highlights the need for adaptation strategies to ensure sustainable water resource management by 2050.

Key words:

Bafing Mamanan; Climate projection; HEC-HMS; Hydrological modeling; Watershed

LISTE DES ABREVIATIONS

Arc-hydro-tools	: Hydrology Tools in Arcgis
BNDT	: Base Nationale de Données Topographiques
CMIP	: Coupled Model Intercomparison Projet
CN	: Curve Number
ETP	: Évapotranspiration Potentielle
EMM	: Moyenne ensemble multi-modèle
ISP	: Indice Standardisé des Précipitations
FAO	: Food and Agriculture Organization of the United Nations
GES	: Gaz à Effet de Serre
GIEC	: Groupe d'expert Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
HEC-GeoHMS	: Hydrologic Engineering Center - Geospatial Hydrologic Modeling System
HEC-HMS	: Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System
MCG	: Modèle Climatique Global
MCR	: Modèle Climatique Régional
MNT	: Modèle Numérique de Terrain
NEX-GDDP	: NASA Earth Exchange - Global Daily Downscaled Projections
SSP	: Shared Socioeconomic Pathways
SCS	: Soil Conservation Service
SEMAF	: Société d'Exploitation de Manantali et Félou
SDE	: Société de Distribution d'Electricité
SOGEM	: Société de Gestion de l'Énergie de Manantali
OMM	: Organisation Météorologique Mondiale
OMVS	: Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal
USACE	: US Army Corps of Engineers
WCRP	: World Climate Research Program

TABLE DES MATIERES

Dédicaces	i
Remerciements	ii
Résumé	iii
Abstract	iv
Liste des abréviations.....	v
Table des matières	vi
Liste des tableaux	x
Liste des figures	xi
I. Introduction	1
II. présentation générale de la structure d'accueil	3
II.1. Historique.....	3
II.2. Organigramme	3
III. Revue de la littérature sur la modélisation hydrologique et les impacts du changement climatique sur les ressources en eau	5
III.1. Modélisation hydrologique	5
III.1.1. Définition des concepts	5
III.1.2. Importance de la modélisation hydrologique	5
III.1.3. Classification des modèles hydrologiques.....	5
III.1.4. Synthèse de quelques études hydrologiques menées sur le bassin Bafing	6
III.2. Cadre conceptuel et méthodologique de la modélisation climatique : définitions, évolutions et outils de projection	7
IV. Matériel et méthodes	9
IV.1. Présentation de la zone d'étude.....	9
IV.1.1. Présentation du barrage et de la centrale de Manantali	9
IV.1.1.1. Barrage de Manantali	9
IV.1.1.2. Lac de retenue	9
IV.1.2. Situation géographique et localisation.....	10

IV.1.3.	Caractéristiques climatiques du bassin Bafing	10
IV.1.4.	Réseau hydrographique	11
IV.1.5.	Géologie du bassin Bafing.....	12
IV.1.6.	pédologie du bassin Bafing.....	13
IV.1.7.	Hydrogéologie du bassin Bafing	13
IV.1.8.	Population du bassin Bafing	14
IV.1.9.	Activités économiques du bassin Bafing.....	14
IV.1.9.1.	Activités agricoles et pastorales	14
IV.1.9.2.	Activités de pêche et de foresterie.....	15
IV.1.9.3.	Activités industrielles et minières	16
IV.2.	Matériel	16
IV.2.1.	Données de l'étude	16
IV.2.2.	Choix du modèle.....	18
IV.2.3.	Logiciels utilisés	18
IV.3.	Méthodologie	19
IV.3.1.	Caractérisation hydro-géomorphologique du bassin versant.....	19
IV.3.1.1.	Délimitation du bassin Bafing	19
IV.3.1.2.	Caractéristiques physiques du bassin versant.....	19
IV.3.1.3.	Indice de compacité K_G	19
IV.3.1.4.	Rectangle équivalent	19
IV.3.1.5.	Détermination de la courbe hypsométrique.....	20
IV.3.1.6.	Indice global de pente.....	20
IV.3.1.7.	Dénivelée spécifique	20
IV.3.1.8.	La densité de drainage	20
IV.3.1.9.	Indices de pluie.....	21
IV.3.2.	Analyse de la variabilité climatique de la station de Bafing Mankan	21
IV.3.2.1.	Test d'homogénéité	21

IV.3.2.2.	Détection de tendance par le test de Mann–Kendall dans les séries de pluie et de débit annuels	22
IV.3.3.	Mise en route du modèle HEC-HMS	22
IV.3.3.1.	Présentation du modèle Hydrologic Engineering Center	22
IV.3.3.2.	Données d'entrée de modélisation	25
IV.3.4.	Critères de performances du modèle HEC-HMS	25
IV.3.5.	Modèles de projection climatique.....	26
IV.3.5.1.	Choix des modèles climatiques	27
IV.3.5.2.	Calcul de l'évapotranspiration potentielle sur la période future	29
V.	Résultats et discussions	30
V.1.	Caractérisation hydro-géomorphologique du bassin versant	30
V.1.1.	Courbe hypsométrique du bassin versant de Bafing en amont de Manantali.	30
V.1.2.	Carte des pente et Profil en long du cours d'eau du bassin Bafing	31
V.1.3.	Indice de pluies standardisés	33
V.1.4.	Analyse de la stationnarité des séries de pluies annuelles.....	34
V.1.4.1.	Test d'homogénéité.....	34
V.1.4.2.	Test de Mann–Kendall dans les séries de pluie et de débit annuels	34
V.2.	Schéma conceptuel du bassin Bafing avec le logiciel HEC-GeoHMS	36
V.3.	Calage et de validation des modèles	37
V.4.	Calage du modèle HEC-HMS.....	37
V.5.	Validation du modèle HEC-HMS	40
V.6.	Simulation des débits à l'horizon 2036-2065	42
V.6.1.	Choix des modelés climatiques	42
V.6.2.	Analyse des données climatiques futures	45
V.6.3.	Simulation des débits sous les scénarios ssp2-4.5 et ssp5-8.5.....	50
V.6.3.1.	Horizon proche 2036-2065 sous ssp2-4.5.....	50
V.6.3.2.	Horizon proche 2036-2065 sous ssp5-8.5.....	51
V.6.4.	Proposition de stratégies d'adaptation et d'atténuation des impacts du	

changement climatique.....	53
V.6.4.1. Risques liés aux effets du changements climatique	53
V.6.4.2. Quelques stratégies d'adaptation et d'atténuation de l'impact des changements climatiques.....	53
V.6.5. Limites de l'étude	55
Conclusion et recommandations	56
Bibliographie.....	I
Annexes	IV

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Caractéristique des ouvrages hydrauliques (Groupement Manantali, 1991)	9
Tableau 2 : Classification de la sécheresse en fonction de l'ISP (Ardoin, 2004)	21
Tableau 3 : Types de corrélation et interprétation du coefficient	22
Tableau 4 : Synthèse des données d'entrées du modèle HEC-HMS	25
Tableau 5 : Appréciation des valeurs de NSE (Nash & Sutcliffe, 1970)	25
Tableau 6 : Appréciation des valeurs du critère PBIAS (Yonaba, 2020)	26
Tableau 7 : Synthèse des modèles climatiques du Projet NEX-GDDP -CMIP6 utilisés.....	29
Tableau 8 : Caractéristiques morphométriques du bassin Bafing.....	30
Tableau 9 : Résultat du test d'homogénéité sur les données de Bafing Makanan.....	34
Tableau 10 : Paramètres déterminés par HEC- GeoHMS	37
Tableau 11 : Paramètres d'entrée du modèle HEC-HMS.....	38
Tableau 12 : Valeurs des paramètres avant et après optimisation	38
Tableau 13 : Résultats du calage du modèle	40
Tableau 14 : Résultats de la validation du modèle HEC-HMS	41
Tableau 15 : Statistiques descriptives des précipitations mensuelles pour différents MCG ..	43
Tableau 16 : Critères d'évaluation de la sensibilité des précipitations en fonction des 14 modèles.....	43

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Organigramme de la SEMAF	4
Figure 2 : Carte de localisation du bassin Bafing dont l'exutoire est à Manantali	10
Figure 3 : Evolution de la pluviométrie à la station de Bafing Makanan de 1990-2022	11
Figure 4 : Evolution de la température annuelle (https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/) de 1990-2022	11
Figure 5 : Carte du réseau hydrographique du bassin Bafing dont l'exutoire est à Manantali	12
Figure 6 : Carte des sols du bassin Bafing dont l'exutoire est à Manantali	13
Figure 7 : Méthodologique de traitement des données pour l'obtention du climat futur à Manantali (Yonaba, 2020).....	27
Figure 8 : Courbe hypsométrique du bassin versant de Bafing en amont de Manantali.....	31
Figure 9 : Carte des pentes du bassin de Bafing dont l'exutoire est à Manantali	32
Figure 10 : Profil en long du cours d'eau.....	32
Figure 11 : Indices standardisés des pluies de Makanan 1990 à 2022	33
Figure 12 : Evolution des séries hydro-climatique de la station de Bafing Makanan sur la période 1990 à 2022 avec les courbes de tendances associées : (a) pluie annuelle et (b) débit moyen annuel.	35
Figure 13 : Schématisation du bassin Bafing en amont du lac avec HEC-GeoHMS	36
Figure 14 : Hydrogrammes simulé et observé pour le calage du modèle	39
Figure 15 : Hydrogrammes simulé et observé pour la validation du modèle	41
Figure 16 : Comparaison graphique des précipitations moyenne-mensuelles	42
Figure 17 : Pluie moyenne-mensuelles simulée par les modèles climatiques.....	44
Figure 18 : Pluie moyenne-mensuelles à Makanan simulée par la moyenne EMM en période 1990-2014.....	45
Figure 19 : Température moyenne mensuelles à Makanan simulée par la moyenne d'ensemble multi-modèle (EMM) en période 1990-2014	45
Figure 20 : Pluies moyenne-mensuelles à l'horizon 2036-2065 sous SSP2-4.5 et SSP5-8.5.	46
Figure 21 : Variation relative des précipitations entre les périodes futures et la période de référence	47
Figure 22 : Boîtes à moustaches des précipitations annuelles sur la période de référence et sur la période future	48
Figure 23 : ETP moyenne-mensuelles à l'horizon 2036-2065 sous SSP2-4.5 et SSP5-8.5....	49
Figure 24 : Variation relative de l'ETP entre les périodes futures et la période de référence	50
Figure 25 : Boîtes à moustaches des débits journaliers sous SSP2-4.5 et sur la période de	

référence	51
Figure 26 : Boîtes à moustaches des débits journaliers sous ssp5-8.5et sur la période de	
référence	52

I. INTRODUCTION

Le réchauffement climatique, causé par des changements durables dans notre système climatique, constitue une menace avec des conséquences énormes sur différents secteurs de développement (PNUD, 2018). Le Sahel, zone semi-aride au climat déjà fragile, est particulièrement exposé à ces bouleversements. Entre les années 1950 et 1985, la région a enregistré une baisse significative des précipitations pouvant atteindre 30 % dans certaines zones (Nicholson, 2005), accompagnée d'une variabilité pluviométrique marquée, suivie d'un retour à la normale autour des années 1990 (Lebel & Ali, 2009). Dans le même temps, les températures moyennes ont fortement augmenté, et les projections du GIEC (2022) estiment une hausse de +2 à +4,5 °C à l'horizon 2100, selon les scénarios d'émissions. Cette élévation thermique intensifie l'évapotranspiration potentielle (de 10 à 25 % selon les estimations), accentuant ainsi le stress hydrique sur les ressources agricoles et les écosystèmes.

L'Afrique de l'Ouest, en raison de sa vulnérabilité, est probablement l'une des régions les plus affectées par les impacts des changements climatiques. Cette vulnérabilité est amplifiée par la situation économique de la région, sa forte croissance démographique et la dépendance considérable de la population aux ressources naturelles (Noblet et al, 2018). Avec le changement climatique et la variabilité climatique qui s'en est suivie, ainsi que l'accroissement de la population, une pression croissante s'exerce sur l'environnement. Cela aggrave les risques de pénurie, de dégradation des terres et de conflits d'usage, il devient plus que nécessaire d'utiliser de façon aussi rationnelle que possible les ressources en eau.

Le Mali, situé au cœur de l'Afrique de l'Ouest, subit depuis plus de 3 décennies d'importants changements climatiques, principalement marqués par une réduction généralisée des précipitations, variant entre 5 et 20 % selon les régions (Mahe et al, 2005) . Cette diminution entraîne dans la majorité des cas, une diminution des écoulements fluviaux comprise entre 10 et 50 %, en fonction des caractéristiques hydrologiques du bassin versant (Arnell, 1999).

Le barrage de Manantali, implanté sur le Bafing, qui est considéré comme la branche mère du fleuve Sénégal, sur lequel sont situées les centrales hydroélectriques de Manantali, Gouina et Félou est exploité depuis 1987. Il dispose d'un réservoir de 11 km³ (Bader, 2010), qui lui permet de réguler fortement le débit du cours d'eau et d'alimenter les trois centrales en cascades. Depuis plus de dix ans, le lac de Manantali subit des variations climatiques, entraînant d'une part une baisse significative du niveau d'eau, (187 m IGN, pour un volume de 3,4 milliards de m³ avec une superficie de 275 km²) ce qui a entraîné une diminution de la production annuelle d'énergie. D'autre part, le niveau du lac a parfois augmenté de manière importante, atteignant

son seuil critique (208,5 m IGN pour une retenue d'eau de plus de 11 milliards de m³ et une superficie couvrant 477 km²). Cela contraint la société d'Exploitation de Manantali et Félou (SEMAF) à effectuer d'importants lâchers d'eau sur des périodes pouvant durer jusqu'à un ou deux mois, afin de garantir la sécurité de l'ouvrage.

Chaque année, l'administration de SEMAF détermine un quota annuel d'énergie, d'une moyenne de 800 GWhs, qui doit être réparti entre les sociétés de distribution d'électricité (SDE) des trois pays riverains à savoir le Mali, la Mauritanie et le Sénégal (Bader, 2014). Cependant, le respect de ce quota devient de plus en plus difficile en raison des fluctuations significatives des apports hydriques liées aux impacts du changement climatique.

Dans ce contexte, il est essentiel d'anticiper l'évolution des aléas climatiques, en particulier les régimes des précipitations, afin de mieux comprendre leur impact futur sur le Mali et plus précisément sur le bassin du Bafing à Manantali, dans la région de Kita. Cette compréhension est cruciale pour garantir le respect des quotas énergétiques annuels futurs. La modélisation hydrologique apparaît comme un outil clé pour évaluer l'impact du changement climatique sur les écoulements à l'exutoire d'un bassin versant. C'est dans cette optique que s'inscrit la présente étude, dont le thème est : « **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** ».

L'objectif principal de cette étude est de contribuer à une meilleure connaissance des ressources en eau du bassin du Bafing Makanan pour une gestion durable afin de garantir une Production Hydroélectrique optimale des Centrales en Cascades.

Plus spécifiquement, il s'est agi de :

- ✚ Caractériser physiquement et hydrologiquement le bassin versant Bafing ;
- ✚ Mettre en œuvre le modèle hydrologique HEC-HMS pour la simulation des écoulements du bassin versant Bafing ;
- ✚ Evaluer l'impact du changement climatique sur les ressources en eau du Bafing à l'horizon 2050.

Ce rapport est organisé en cinq sections principales. Après l'introduction, nous présenterons la structure d'accueil, puis une revue de la littérature sur la modélisation hydrologique ainsi que les projections climatiques sera abordée. Ensuite, nous décrirons le matériel et la méthodologie utilisés pour atteindre les objectifs de cette étude. Les résultats seront présentés et analysés, avant de conclure par une synthèse et des recommandations issues de cette étude.

II. PRESENTATION GENERALE DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL

II.1. HISTORIQUE

La Société d'Exploitation de Manantali et de Félou (SEMAF-SA), filiale opérationnelle de la SOGEM (Société de Gestion de l'Énergie de Manantali), organe spécialisé de l'Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal (OMVS), a été créée en 2014. Cette création fait suite à la fin du contrat de gestion déléguée confié, depuis 2001, à un consortium mené par ESKOM (Afrique du Sud) et en partenariat avec Hydro-Québec International, pour l'exploitation et la maintenance de la centrale hydroélectrique de Manantali. Ce partenariat avait été établi dans un contexte de transfert de compétences progressif et d'appui à la mise en service des installations. Après plus d'une décennie de gestion externalisée, les États membres de l'OMVS ont fait le choix stratégique de reprendre le contrôle opérationnel de leurs infrastructures énergétiques. C'est dans cette logique qu'est née la SEMAF, dont la mission principale est d'assurer l'exploitation et la maintenance des centrales hydroélectriques de Manantali et de Félou, tout en renforçant la maîtrise régionale des compétences techniques et la souveraineté énergétique des pays membres (Mali, Mauritanie et Sénégal). Depuis sa création, la SEMAF s'efforce d'exploiter et de maintenir ces installations avec efficacité, tout en relevant les défis croissants liés à la variabilité climatique et à la gestion durable des ressources en eau.

II.2. ORGANIGRAMME

L'organigramme de la SEMAF-SA (Figure 1), approuvé lors de la 19^e session du conseil d'administration tenue en novembre 2021, reflète une organisation structurée autour de la direction générale, à laquelle sont rattachés plusieurs services transversaux et de soutien stratégique. Ces services incluent notamment l'assistant technique du directeur général, l'auditeur interne, la cellule de passation des marchés, le service juridique, les bureaux pays (Bamako, Nouakchott, Dakar), ainsi que les conseillers techniques. L'organigramme comprend également neuf directions opérationnelles : la direction de la production, la direction du transport, la direction de la maintenance, la direction des finances et du commercial, la direction du contrôle, du suivi et de l'évaluation, la direction des ressources humaines, la direction des moyens généraux, la direction du centre de formation aux métiers, ainsi que la direction qualité, santé, sécurité et environnement.

Durant notre stage, nous avons été rattachés à la Direction de la Production, dont la mission est d'animer le service de gestion des eaux et l'ensemble des centrales de production afin d'atteindre les objectifs de production d'énergie électrique et de satisfaire les besoins en eau et en électricité, dans le respect des contraintes de sûreté, de sécurité et environnementales.

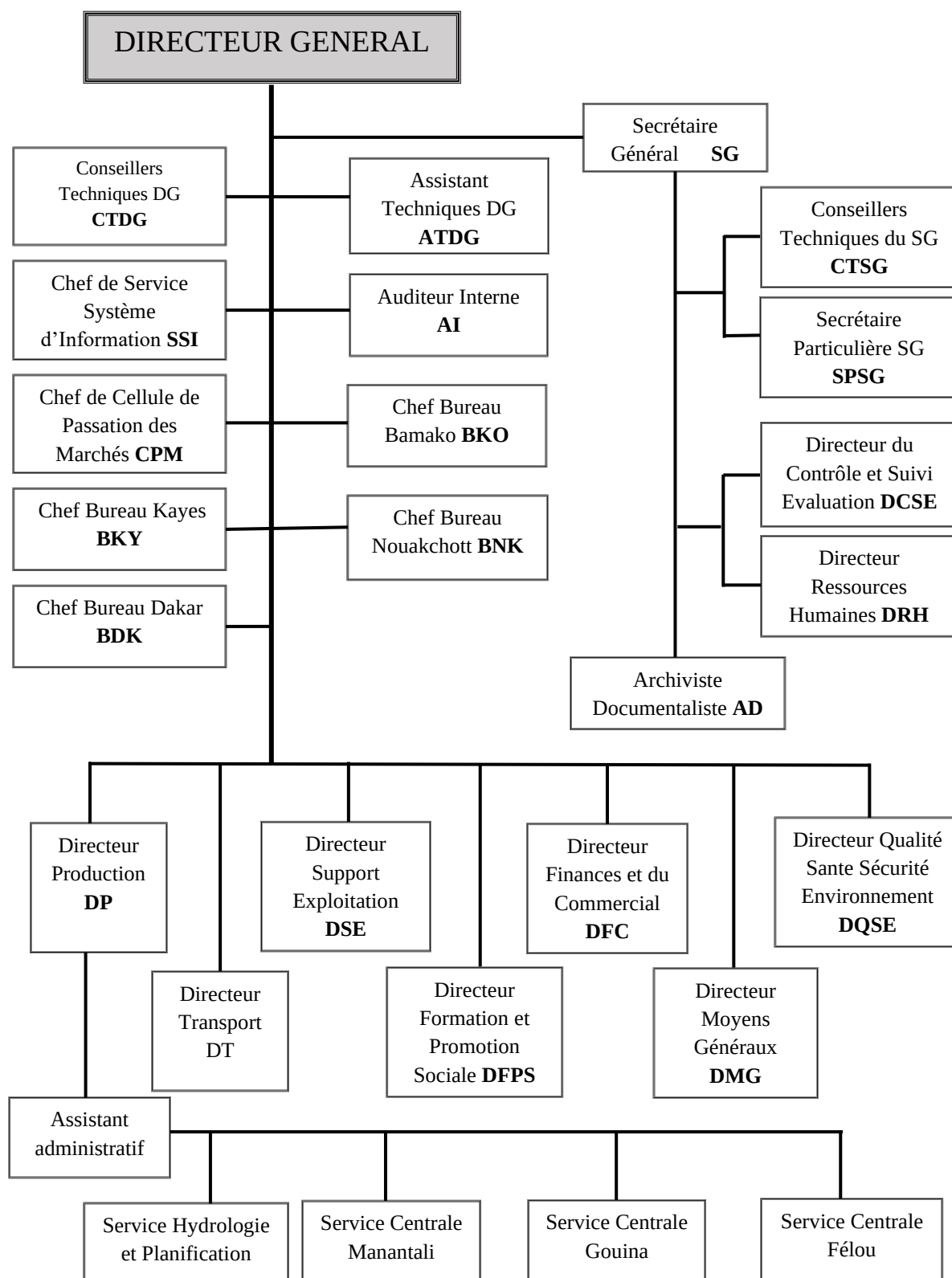


Figure 1 : Organigramme de la SEMAF (Novembre 2021)

III. REVUE DE LA LITTÉRATURE SUR LA MODELISATION HYDROLOGIQUE ET LES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES RESSOURCES EN EAU

III.1. MODELISATION HYDROLOGIQUE

III.1.1. DEFINITION DES CONCEPTS

- ✚ Un modèle est un outil permettant de reproduire la réalité de manière simplifiée, en s'appuyant sur des approximations (Dassargues, 2022). Il ne reflète donc pas la réalité exacte. Quant à la modélisation, elle consiste à créer un modèle.
- ✚ Un modèle hydrologique, également appelé modèle pluie-débit, vise à reproduire la réponse en débit d'un bassin versant aux observations de pluviométrie à un pas de temps défini (Tazen, 2015). Il permet de transformer les données climatiques en une estimation des débits, aussi proche que possible de ceux observés ou attendus dans le bassin versant étudié.

III.1.2. IMPORTANCE DE LA MODELISATION HYDROLOGIQUE

La modélisation peut apporter des réponses à diverses questions liées à l'eau, à la gestion des risques et des ressources. Parmi celles-ci, on peut citer :

- ✚ La simulation des débits afin de combler les lacunes dans les séries de données, de reconstituer les débits historiques (puisque les données pluviométriques couvrent généralement des périodes plus longues que celles des débits) et de faciliter les analyses statistiques ;
- ✚ La prédétermination des débits de crue ou d'étiage ;
- ✚ La prévision des crues et des étiages dans un futur proche ou lointain.

Ces problématiques font ressortir deux aspects importants : celui de l'évaluation du risque et celui de la gestion de la ressource. Dans le cas de notre étude, on s'intéresse à la gestion de l'eau du lac de Manantali pour une optimisation de la production électrique.

III.1.3. CLASSIFICATION DES MODELES HYDROLOGIQUES

Il existe une grande variété de modèles hydrologiques, chacun étant choisi en fonction des objectifs spécifiques et du domaine d'application. Selon Yonaba (2020), trois critères principaux peuvent être utilisés pour classer ces modèles :

La façon dont les processus sont décrits, l'échelle spatiale, et l'échelle temporelle. La typologie de ses modèles est détaillée dans l'Annexe 1.

III.1.4. SYNTHÈSE DE QUELQUES ÉTUDES HYDROLOGIQUES MENEES SUR LE BASSIN BAFING

Plusieurs travaux de modélisation hydrologique ont été effectués sur le bassin du Bafing. On peut citer entre autres :

- ✚ (Soussou et al., 2011) ont implémenté les modèles hydrologiques globaux GR4J et GR2M sur le bassin du Bafing en amont de Bafing-Makanan. Il est ressorti que le modèle GR4J est moins performant pour simuler les débits de pointe, mais il reproduit avec précision les débits moyens et les débits d'étiage.
- ✚ Sane et al. (2017) ont examiné le comportement des débits à deux stations hydrométriques situées sur le bassin du Bafing en amont du barrage de Manantali : Bafing Makanan à l'entrée du barrage et Dakka Saidou en amont de cette station. En analysant les débits moyens annuels (DMA) et les débits moyens mensuels (DMM) sur la période de 1961 à 2013, ils ont utilisé des tests d'indépendance, d'homogénéité, et de tendance. Les résultats ont révélé une variabilité aléatoire des débits, avec des ruptures détectées autour des années 1970, tant à l'échelle mensuelle qu'annuelle. Une tendance générale à la baisse des écoulements a été observée, suivie d'une reprise à la hausse après les années 1990.
- ✚ Soussou et al. (2021) ont modélisé le bassin versant du Bafing, en amont de Bafing Makanan en utilisant le modèle hydrologique semi-distribué à base physique SWAT (*Soil Water Assessment Tool*). Il est ressorti que le modèle SWAT calé et validé pouvait être considéré comme un outil fiable pour la gestion du barrage de Manantali à l'horizon 2090.
- ✚ Gaye (2022) a réalisé une étude visant à modéliser les effets du changement climatique sur les ressources hydriques du bassin versant du Bafing, situé dans le haut bassin du fleuve Sénégal, en utilisant le modèle hydrologique GR4J. Il est ressorti que le modèle GR4J parvient à reproduire correctement les hydrogrammes observés, bien que les débits de pointe puissent parfois être sous-évalués ou surestimés.
Les performances du modèle GR4J ont été évaluées à l'aide du critère de Kling-Gupta (KGE) et du pourcentage de biais (PBIAS), avec des résultats de KGE de 0,9116 pour Dakka Saidou et 0,9097 pour Bafing Makanan, et des PBIAS de 0,3 et 0,2 respectivement.

Les études hydrologiques menées sur le bassin du Bafing ont apporté une compréhension approfondie des dynamiques hydrologiques et des impacts potentiels du changement climatique sur cette région critique du fleuve Sénégal. Les modèles utilisés, tels que SWAT, GR4J et

GR2M, ont montré une capacité significative à simuler les écoulements actuels et à projeter les tendances futures, y compris les risques de diminution des débits moyens sous certains scénarios climatiques. Toutefois, la plupart de ces études présentent certaines limites, notamment une performance réduite pour la simulation des crues extrêmes, une sensibilité aux données d'entrée parfois limitées en qualité ou en résolution spatiale, et une prise en compte partielle des incertitudes liées aux modèles climatiques et aux scénarios d'émissions. De plus, certains modèles comme GR4J et GR2M restent globalement adaptés aux simulations à long terme des débits moyens, mais moins aptes à représenter les réponses hydrologiques fines à l'échelle événementielle.

Cependant, pour approfondir cette analyse et valider les résultats obtenus, notre étude se propose d'utiliser le modèle HEC-HMS (*Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System*). Ce choix se justifie par ses capacités spécifiques de modélisation événementielle et continue, ainsi que par sa flexibilité structurelle, qui en font un outil complémentaire et robuste par rapport aux modèles GR4J, GR2M et SWAT, déjà appliqués sur le bassin du Bafing. Contrairement aux modèles GR4J et GR2M, qui sont des modèles globaux à base conceptuelle principalement conçus pour la simulation à long terme des débits moyens, le modèle HEC-HMS permet une représentation plus détaillée des processus hydrologiques à l'échelle d'un événement pluvieux, ce qui est particulièrement utile pour analyser les crues extrêmes, la réponse rapide du bassin, ou encore les impacts à court terme du changement climatique. L'implémentation du modèle HEC-HMS sur le bassin du Bafing permettra non seulement de valider et de comparer les résultats obtenus avec ceux des modèles précédents, mais aussi d'affiner la compréhension des dynamiques hydrologiques extrêmes et de leur évolution dans un contexte de variabilité et de changement climatique.

III.2. CADRE CONCEPTUEL ET METHODOLOGIQUE DE LA MODELISATION CLIMATIQUE : DEFINITIONS, EVOLUTIONS ET OUTILS DE PROJECTION

Le climat, en tant que phénomène global et complexe, influence profondément toutes les formes de vie sur la planète. Selon l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM), le climat se définit comme la synthèse des conditions météorologiques d'une région donnée, caractérisée par des statistiques à long terme des variables atmosphériques.

Selon le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC 2021), une projection climatique est une simulation de l'évolution du climat futur, basée sur des hypothèses concernant les concentrations futures de gaz à effet de serre, les scénarios socio-économiques, et les réponses du système climatique modélisées à l'aide de modèles numériques globaux et

régionaux.

Depuis la fin des années 1960, des changements climatiques significatifs ont été observés, marqués par des variations importantes des précipitations (Zoure, 2019). Diverses hypothèses, comme celles des télé-connections liées aux variations de température de surface, des océans, ont été avancées pour expliquer ces fluctuations climatiques.

Pour anticiper les modifications climatiques futures et leurs impacts, de nombreux centres de recherche internationaux ont développé des modèles climatiques numériques simulant la réponse du climat à divers forçages naturels et anthropiques. Parmi les initiatives majeures, le Programme Mondial de Recherche sur le Climat (WCRP) a lancé le Projet d'inter comparaison des modèles couplés (CMIP), dont la phase 6 (CMIP6) sert de base aux rapports d'évaluation du GIEC, notamment le sixième rapport d'évaluation (AR6) publié entre 2021 et 2022 (IPCC, 2021).

La phase 6 du CMIP (CMIP6) a généré environ 100 modèles climatiques globaux (MCG), basés sur cinq scénarios d'émission de gaz à effet de serre (GES) appelés SSP (*Shared Socioeconomic Pathways*). Ces scénarios vont du SSP1-1.9, qui représente un scénario très ambitieux visant à limiter le réchauffement à 1,5°C, au SSP5-8.5, qui est le plus pessimiste avec des émissions de GES élevées jusqu'en 2100. Entre ces deux extrêmes, on trouve des trajectoires intermédiaires telles que le SSP1-2.6, le SSP2-4.5, et le SSP3-7.0, qui couvrent une gamme de résultats climatiques en fonction des niveaux de forçage radiatif simulés (O'Neill et al., 2021).

Les modèles climatiques du CMIP6 couvrent l'ensemble du globe, mais leurs simulations initiales présentent une résolution relativement faible, de l'ordre de 100 à 300 km ou plus. Cette limitation réduit leur capacité à représenter avec précision les variations climatiques à petite échelle. Pour y remédier, plusieurs initiatives ont procédé à une désagrégation spatiale des modèles climatiques globaux (MCG) afin d'obtenir des données plus détaillées. C'est dans cette optique que le projet NEX-GDDP-CMIP6 (*NASA Earth Exchange – Global Daily Downscaled Projections from CMIP6*) a appliqué une désagrégation spatiale à 0,25° x 0,25° (~25 km x 25 km), permettant ainsi une meilleure représentation des variations climatiques locales.

IV. MATERIEL ET METHODES

IV.1. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

IV.1.1. PRESENTATION DU BARRAGE ET DE LA CENTRALE DE MANANTALI

IV.1.1.1. BARRAGE DE MANANTALI

Cet ouvrage implanté sur le Bafing est exploité depuis 1987. C'est un barrage-poids dont les deux digues latérales sont en enrochement. Il dispose d'un réservoir de 11 km³ qui lui permet de régulariser fortement le débit du cours d'eau (Bader, 2014).

Le barrage de Manantali joue trois rôles essentiels, qui sont :

- ✚ réduire les crues excessives pour prévenir leurs effets destructeurs ;
- ✚ maintenir les débits en période d'étiage pour permettre la navigation sur le fleuve Sénégal et assurer l'approvisionnement en eau pour l'irrigation et les besoins des populations ;
- ✚ produire en moyenne 800 GWh d'énergie électrique par an.

IV.1.1.2. LAC DE RETENUE

OMVS (2018) stipule que le lac de retenue couvre une superficie d'environ 477 km², contient au maximum 11 milliards de m³ dont 8 milliards sont utilisables pour la production d'électricité. Le Tableau 1 présente les caractéristiques des principaux ouvrages de la SEMAF.

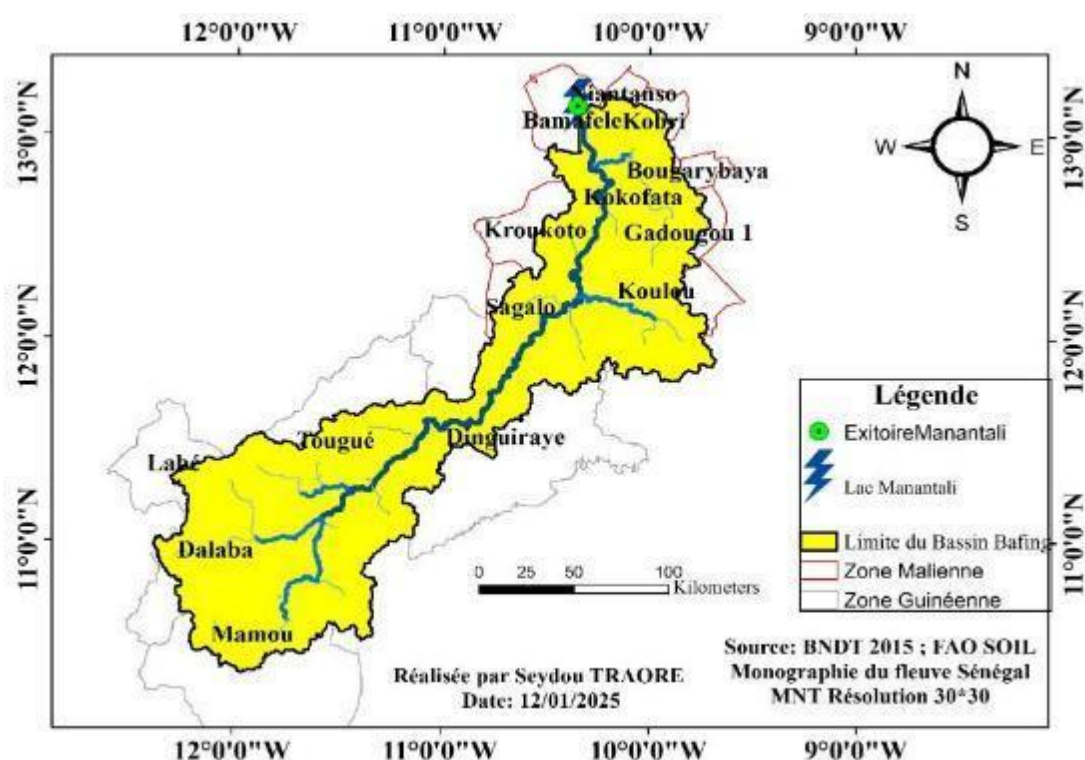
Tableau 1 : Caractéristique des ouvrages hydrauliques (Groupement Manantali, 1991)

Barrage	
Hauteur (fondation)	70 m
Longueur	1476,35 m
Réservoir ou Lac de Manantali	
Volume	11 km ³ dont 8 km ³ sont utilisables
Superficie	477 km ²
Centrale hydroélectrique	
Hauteur de chute	65 m
Débit d'équipement	575 m ³ .s ⁻¹
Nombre de turbines	5*40MW
Type de turbines	Kaplan
Productible moyen	800 GWh/an

IV.1.2. SITUATION GEOGRAPHIQUE ET LOCALISATION

Le bassin versant du Bafing est situé en Afrique de l'Ouest, entre les latitudes 10°23' et 13°48' Nord, et les longitudes 10°49' et 12°08' Ouest (Figure 2). Il couvre une superficie d'environ 38 000 km² et s'étend sur deux pays : la République de Guinée, où se trouve la majeure partie du bassin et la République du Mali, où il se jette dans le réservoir de Manantali (Bader, 2014).

La zone d'étude s'étale ainsi depuis les hauteurs de Mamou et Dalaba, en Guinée jusqu'à l'amont du barrage de Manantali, situé au Mali marquant l'exutoire du bassin. Ce bassin constitue la principale source du fleuve Sénégal à travers son affluent le Bafing, et joue un rôle stratégique dans l'hydrologie de la région.



IV.1.3. CARACTERISTIQUES CLIMATIQUES DU BASSIN BAFING

Sur le plan climatique, le bassin du Bafing présente une diversité climatique : sub-guinéen au sud et soudanien au nord (Sane et al., 2017), il est caractérisée par une saison de pluie s'étendant d'avril à octobre (Bodian et al., 2012; Gaye, 2022).

L'analyse des données pluviométriques issues de la station de Bafing Makanan sur la période 1990-2022 révèle une variabilité interannuelle significative des précipitations, avec des hauteurs annuelles allant de 800 mm à 1 700 mm, comme l'illustre la Figure 3. Cette figure met également en évidence les précipitations journalières maximales, qui varient fortement d'une année à l'autre, atteignant des valeurs supérieures à 120 mm, ce qui témoigne

d'événements pluviométriques extrêmes potentiellement générateurs de crues rapides.

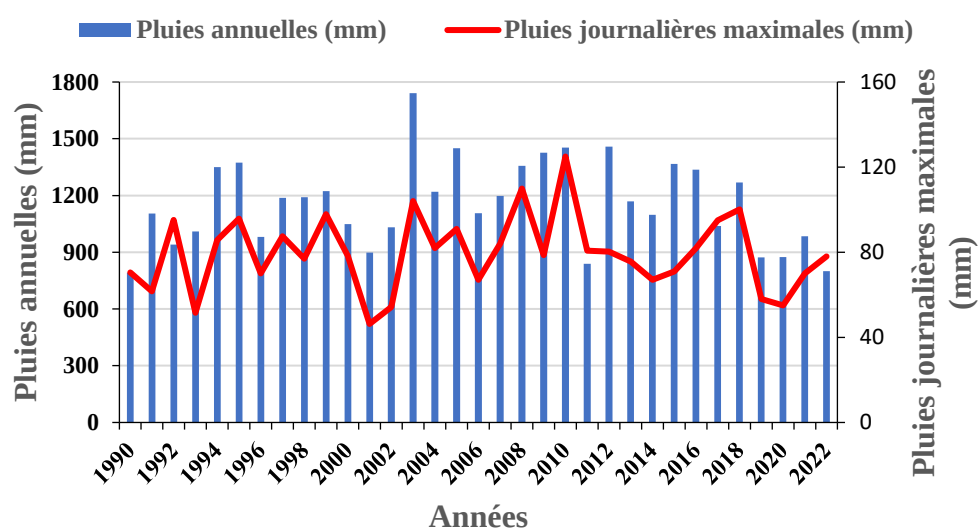


Figure 3 : Evolution de la pluviométrie à la station de Bafing Makanan de 1990-2022

Les températures sont généralement modérées, avec des valeurs minimales atteignant 15°C en décembre-janvier et des maxima pouvant aller jusqu'à 45°C entre avril et mai (Figure 4). La température moyenne est d'environ 29°C (<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>).

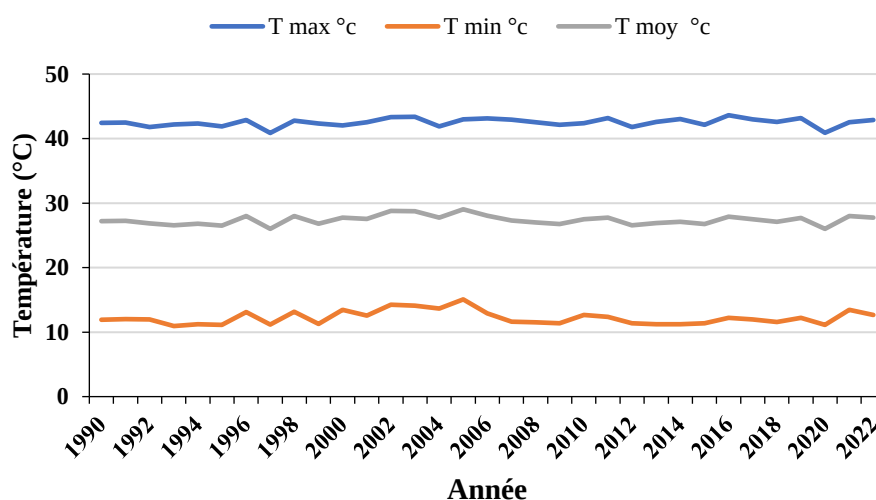


Figure 4 : Evolution de la température annuelle (<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>) de 1990-2022

IV.1.4. RESEAU HYDROGRAPHIQUE

Long de 556 km, le Bafing prend sa source à une altitude de 800 mètres dans le Fouta-Djalon en Guinée et se dirige vers le nord en traversant les plateaux de la région soudanienne avant d'atteindre Manantali. Il draine plus de la moitié du débit total du fleuve Sénégal avec 430 m³/s de débit moyen annuel (Gaye, 2022; NDAO, 2023) . Le réseau hydrographique du Bafing

jusqu'à Manantali (Figure 5) comprend plus de 66 cours d'eau dont les plus importants sont la Téné, la Kioma, le Koukoutamba (NDAO, 2023; OMVS, 2017).

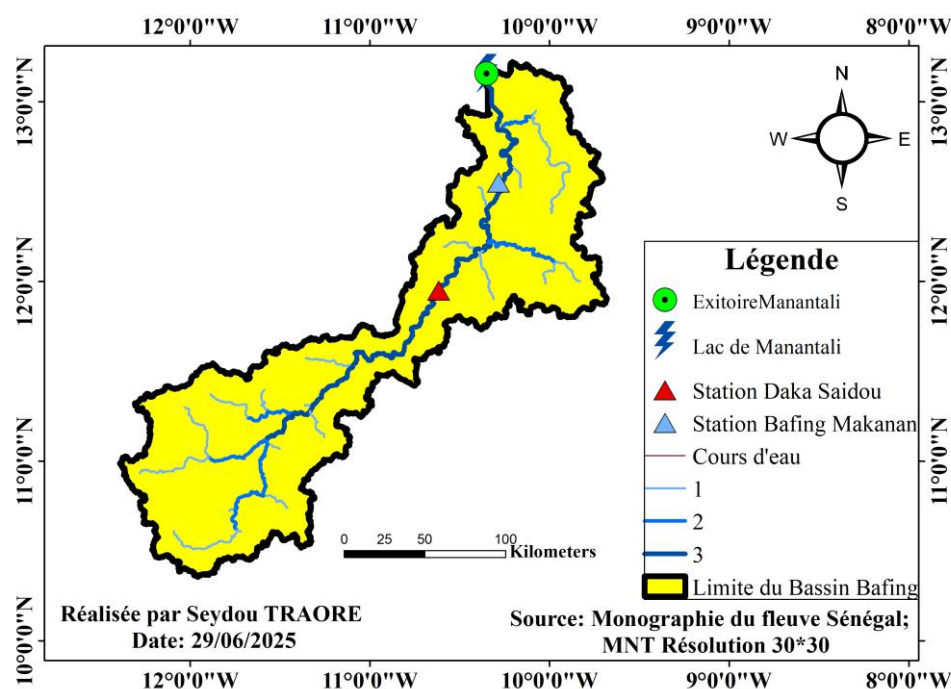


Figure 5 : Carte du réseau hydrographique du bassin Bafing dont l'exutoire est à Manantali

IV.1.5. GEOLOGIE DU BASSIN BAFING

Le bassin du Bafing, situé dans la partie supérieure du fleuve Sénégal, s'inscrit dans une zone géologiquement ancienne et complexe, dont l'histoire est intimement liée à celle de la région ouest-africaine (Michel, 1975; NDAO, 2023). En effet, cette portion du haut bassin du fleuve Sénégal appartient au craton ouest-africain, une vieille plateforme continentale stable constituée de formations précambriennes profondément remaniées au cours des temps géologiques. L'analyse géologique du bassin du Bafing met en évidence trois grandes unités structurales : le socle ancien, le Paléozoïque et le Tertiaire. Le socle ancien est formé de roches métamorphiques birrimiennes telles que les schistes, micaschistes, quartzites et des roches basiques transformées en roches vertes, souvent intrudées par des granites syncinématiques et post-tectoniques formant des massifs dans des régions comme Dalaba, Dinguiraye ou Kayes (M. Diallo, 2015). Le Paléozoïque, qui repose en discordance sur le socle birrimien, est caractérisé par des formations sédimentaires composées principalement de grès, de quartzites et de calcaires, qui façonnent les plateaux du Tambacounda, du Mandingue et du Fouta Djallon. Ces reliefs complexes donnent naissance à des formes géomorphologiques notables telles que les seuils rocheux et les chutes d'eau de Gouina et de Félou. Le Tertiaire, moins représenté, se manifeste à l'est du bassin, près de Nioro, avec des affleurements de sables argileux et de grès du

Continental Terminal. Ce paysage géologique, associant des roches métamorphiques anciennes à des formations sédimentaires plus récentes, modifie le relief et joue un rôle clé dans la dynamique hydrologique du bassin, influençant le cours des eaux et la morphologie du territoire (Bader, 2014).

IV.1.6. PEDOLOGIE DU BASSIN BAFING

Cette région (Figure 6) se situe en plein cœur de la zone foutanienne, caractérisée par des sols ferrallitiques montagnards. Cependant, comme l'ont indiqué plusieurs chercheurs (Maignien en 1953, Bonfils en 1954, Vas Es et Pereira Barreto en 1962), la formation des sols dans le Fouta-Djalon est largement influencée par le colluvionnement, une conséquence directe de l'érosion hydrique (selon Maignien). Le ruissellement y est si important qu'on pourrait considérer tous les sols comme étant très érodés, avec une forte présence de colluvionnement (d'après Bonfils). À ce facteur dominant s'ajoutent également des processus de cuirassement anciens, récents ou en cours, dus aux mouvements du fer. En se basant sur la classification française des sols, les principaux types observés dans la région sont : les sols Minéraux Bruts (Lithosols), les sols Jeunes ou peu Évolués (Cambisols eutriques), les sols Ferrallitiques (Acrisols ferriques) et les sols Hydromorphes (Gleysols eutriques) (Bader, 2014).

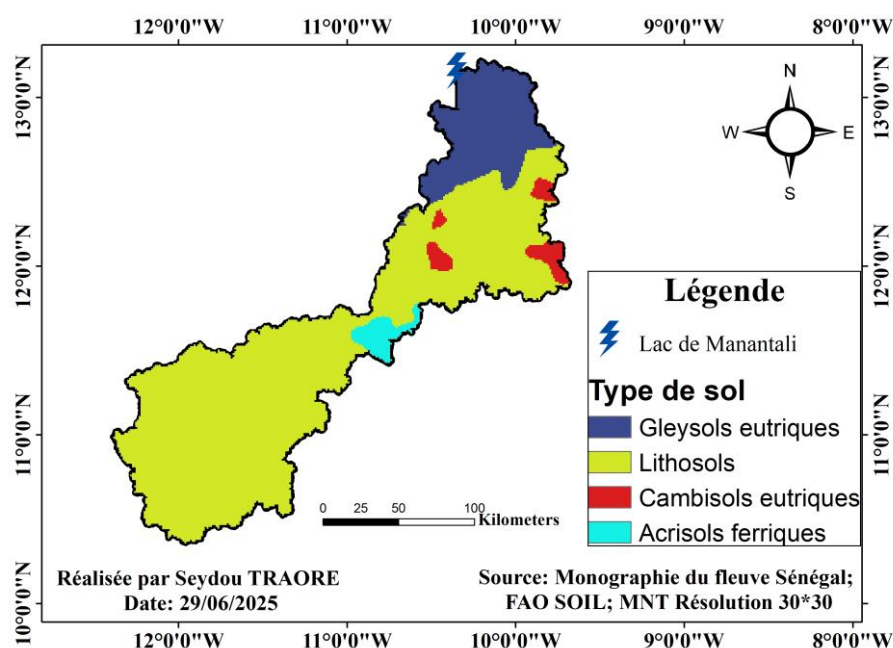


Figure 6 : Carte des sols du bassin Bafing dont l'exutoire est à Manantali

IV.1.7. HYDROGEOLOGIE DU BASSIN BAFING

Le bassin du fleuve Sénégal se situe à la convergence de deux grands systèmes hydrogéologiques (Diene, 2023) : d'une part, les aquifères étendus du bassin Sénégal-Mauritanien (BASM), partagé entre la Mauritanie, le Sénégal, la Gambie et la Guinée-Bissau,

et d'autre part, une partie du bassin de Taoudéni, réparti entre la Mauritanie, le Mali et l'Algérie. En parallèle, des aquifères discontinus sont présents dans des formations cristallines et cristallophylliennes, notamment en Guinée et au Mali (Upton & Dochartaigh, 2016). Ces zones se caractérisent par des aquifères de socle, dont la productivité est souvent limitée en raison de la fracturation des roches sous-jacentes (Traore et al., 2018). Les nappes y sont généralement semi-continues ou confinées aux fractures. Au Mali, par exemple, les aquifères méta-sédimentaires du sud et du sud-ouest contiennent des nappes multicouches semi-confinées, avec des débits variables en fonction de la densité des fractures (Diene, 2023).

IV.1.8. POPULATION DU BASSIN BAFING

En 2020, la population du bassin du Bafing était estimée à environ 830 200 habitants, avec une densité de 21 habitants par km², selon les prévisions du Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux du bassin du fleuve Sénégal à l'horizon 2050 (SDAGE 2050), cette population devrait dépasser 1 246 000 habitants, atteignant ainsi une densité de 32 habitants par km² (OMVS, 2023).

Sur le plan ethnographique, plusieurs groupes sont présents dans la région. En Guinée, le bassin du Bafing est principalement peuplé de Peuls (ou Fulani), présents en grand nombre dans la région du Fouta Djallon, ainsi que de Malinkés et de Soussous dans certaines zones périphériques, notamment dans les préfectures de Koundara, Gaoual, Tougué et Dinguiraye. Du côté Malien, les populations riveraines appartiennent majoritairement aux groupes malinkés, kassonkés et peuls, avec également une présence moins importante de bambaras. Le sous-bassin du Bafing représente ainsi plus de 9 % de l'ensemble du bassin du fleuve Sénégal, qui s'étend sur environ 350 000 km² et une population majoritairement rurale avec 46% de taux d'urbanisation (OMVS, 2023).

IV.1.9. ACTIVITES ECONOMIQUES DU BASSIN BAFING

IV.1.9.1. ACTIVITES AGRICOLES ET PASTORALES

Le bassin du Bafing, situé dans une zone où l'agriculture et l'élevage jouent un rôle clé dans la subsistance des populations locales, avec des pratiques agricoles qui varient en fonction des conditions hydro-climatiques. En Guinée, l'agriculture itinérante sur brûlis de céréales comme le riz, le fonio, le mil et le sorgho est prédominante, accompagnée de cultures d'arachides et de tubercules (manioc, patate douce, igname) aux abords des petits cours d'eau. La culture en tapade, particulièrement pratiquée par les Peulhs, est une agriculture intensive basée sur l'utilisation de fumier et de matériaux organiques, tandis que les bas-fonds accueillent des

cultures inondées et de décrue, comme la patate et le riz (IDS, 2018). Dans la partie Malienne du bassin, les systèmes agricoles sont similaires à ceux du Massif du Fouta Djallon avec l'agriculture itinérante, les cultures de tapade et la culture de décrue. Cependant, la culture cotonnière y connaît une expansion notable (IDS, 2018).

L'agriculture irriguée est principalement pratiquée dans la vallée et le delta du fleuve, mais seulement une partie du potentiel irrigable du bassin (estimé à 375 000 hectares) est exploitée, avec 130 000 hectares en état de production (OMVS, 2017). L'usage intensif d'engrais chimiques et de pesticides, associé à un mauvais drainage, contribue à la dégradation progressive de la qualité des eaux.

L'élevage reste une activité économique majeure dans le bassin du Bafing, notamment dans sa partie sahélienne, où prédominent le pastoralisme nomade et la transhumance. En Mauritanie, cette zone abrite une proportion importante du cheptel national : 33 % des bovins, 44 % des petits ruminants, et 23 % des camélins (OMVS, 2017). De même, au Sénégal et au Mali, les bovins et petits ruminants constituent une grande partie du cheptel national. En Guinée, les 9 préfectures du bassin regroupent 36 % des bovins et 33 % des petits ruminants du pays. Bien que la population humaine du bassin ne représente que 16 % de la population totale des quatre pays riverains (OMVS, 2017).

IV.1.9.2. ACTIVITES DE PECHE ET DE FORESTERIE

Dans le bassin du Bafing, les activités de pêche et de foresterie jouent un rôle essentiel dans la vie des populations locales, bien que leur importance varie selon les zones. Concernant la foresterie, les pratiques d'émouillage, qui consistent à couper des branches d'arbres, sont courantes en fin de saison sèche lorsque les pâturages se raréfient. Cette méthode vise à répondre aux besoins alimentaires du bétail, mais elle contribue à l'appauvrissement des sols et à l'aggravation de l'érosion. Le surpâturage, souvent exacerbé par la croissance démographique et l'expansion des terres agricoles, provoque également une dégradation des sols, rendant les terres vulnérables à l'érosion éolienne et hydrique. De plus, les feux précoces utilisés par les éleveurs pour la régénération des pâturages peuvent parfois entraîner des feux de brousse incontrôlés, aggravant la destruction des terres.

Quant à la pêche, bien qu'historiquement une activité significative dans le bassin, son rôle a diminué au fil des décennies. Dans les années 1970, environ 6,1 % de la population active du bassin se consacrait à la pêche, soit à temps plein, soit à temps partiel (OMVS, 2017). Cependant, des études récentes de l'OMVS montrent que seulement 1 % de la population considère aujourd'hui la pêche comme leur activité principale. Toutefois, près de 10 % des

habitants du bassin la pratiquent comme une activité secondaire, et au Mali, 25 % des personnes interrogées la classent comme leur troisième activité la plus importante (OMVS, 2023). Ainsi, bien que la pêche ait perdu en importance, elle reste une source de subsistance complémentaire pour une partie de la population.

IV.1.9.3. ACTIVITES INDUSTRIELLES ET MINIERES

L'exploitation minière est intense dans le bassin du fleuve Sénégal, surtout le haut bassin, et contribue fortement à la dégradation des terres et à la pollution des eaux.

Dans le bassin du Bafing, partagé entre la Guinée et le Mali, les activités industrielles et minières occupent une place prépondérante, contribuant à la fois à l'économie locale et à la dégradation de l'environnement. En Guinée, l'exploitation de la bauxite et de l'or représente des industries majeures. L'orpaillage, une forme d'exploitation artisanale de l'or, est particulièrement répandu dans les sous-bassins du Bafing et du Bakoye, notamment dans les Préfectures de Dinguiraye et Siguiri. Ce phénomène, bien qu'ancien a pris de l'ampleur ces dernières années. Au Mali, l'exploitation de l'or se fait à la fois de manière industrielle et artisanale, avec des sites d'orpaillage actifs, notamment dans le sous-bassin de la Falémé. L'orpaillage artisanal dans cette région est pratiqué par un nombre croissant de personnes, atteignant environ 200 000 individus (OMVS, 2017). Cette activité, bien qu'importante pour la subsistance de nombreuses familles, provoque une dégradation significative des sols et une pollution accrue des cours d'eau, affectant ainsi l'ensemble de l'écosystème du bassin du Bafing.

IV.2. MATERIEL

IV.2.1. DONNEES DE L'ETUDE

Dans cette étude, la base de données établie regroupe des informations issues de diverses sources. Il s'agit principalement de données hydrométriques, climatiques observées et simulées, topographiques, de modèles numériques de terrain (MNT), ainsi que du CN grid.

Les données hydrométriques et climatiques observées

Ces données proviennent du service d'hydrologie et de planification de la SEMAF. Elles couvrent une période de 33 ans (de 1990 à 2022) avec des relevés journaliers de débits et de précipitations. Ces données sont exemptes de lacunes. Les données hydrométriques utilisées dans cette étude proviennent de la station de Bafing Makanan, tandis que les données de précipitations ont été collectées auprès des stations de Manantali, Bafing Makanan et Dakka Sadou. Les données de température, quant à elles, ont été téléchargées depuis le site de la NASA

(<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>), elles couvrent une période de 33 ans (1990 à 2022) avec des relevés mensuels et annuels. L'évapotranspiration potentielle (ETP) a été calculée par la méthode de Hargreaves & Samani (1985).

Les données climatiques simulées

Les données des modèles climatiques issues du projet NEX-GDDP-CMIP6 à l'horizon 2100 ont été utilisées, en considérant la période de 1990 à 2014 comme la période de référence et la période de 2036 à 2065 (horizon 2050) pour la projection, sous les scénarios d'émissions de GES (SSP2-4.5 et SSP5-8.5) à un pas de temps journalier. Cette étude s'appuie sur trois variables (précipitations, température maximale et minimale) issues de 14 modèles climatiques globaux du projet NEX-GDDP. Les données historiques de ces modèles seront comparées aux observations sur la période de référence. Les modèles climatiques reproduisant au mieux les données observées seront retenus pour forcer le modèle hydrologique afin de simuler des débits futurs. Ces données climatiques simulées sont téléchargeables sur (<https://ds.nccs.nasa.gov/thredds/ncss/AMES/NEX/GDDP-CMIP6/>).

Les données cartographiques

Ce sont essentiellement des données vectorielles sous forme de « shapefile » provenant de la BNDT/2015.

Le modèle numérique de terrain MNT

Le modèle numérique de terrain (MNT) utilisé est de type SRTM *Worldwide Elevation Data* (résolution de 1 arc-seconde, version SRTM V3), converti au format Geo.tiff après délimitation précise de la zone d'étude.

Grille CN

La grille CN représente les coefficients de ruissellement (CN ou *Curve Number*) utilisés dans la méthode du *Soil Conservation Service* (SCS), également connue sous le nom de méthode SCS-CN ou méthode du numéro de courbe. Ce modèle hydrologique sert à estimer le ruissellement direct dans un bassin versant, en tenant compte de plusieurs facteurs, tels que l'occupation du sol, le type de sol et l'état d'humidité initial du bassin. Les valeurs de CN varient entre 100 pour les surfaces d'eau et 30 pour les sols très perméables ayant une forte capacité d'infiltration. Le CN grid a été obtenu grâce aux données sur l'occupation des sols et les types de sols. Ces données proviennent respectivement de Copernicus Global Land (<https://lcviewer.vito.be/2015>) et de la FAO Digital Soil Map of the World (<https://www.fao.org/land-water/land/land-governance/land-resources-planning-toolbox/category/details/en/c/1026564/>).

IV.2.2. CHOIX DU MODELE

Avec la multiplication des modèles hydrologiques, dont la complexité ne cesse d'augmenter et leur application à des bassins de tailles variées allant de petites parcelles (d'environ quelques dizaines de m²) à la méso-échelle, le choix d'un modèle devient une étape cruciale il doit être guidé par des objectifs de recherche clairs et précis (Karambiri, 2003; Yonaba, 2020).

Ainsi, pour choisir un modèle hydrologique, on se base sur les éléments suivants :

- ✚ La disponibilité des données d'entrée,
- ✚ Les possibilités de simulation,
- ✚ La complexité du modèle, incluant un nombre plus ou moins important de paramètres d'entrée,
- ✚ Le coût du modèle ainsi que l'équipement requis peuvent également avoir un impact sur le choix de l'utilisateur. Il doit être comparé en fonction du budget de l'étude à réaliser.

Pour notre étude, nous avons opté pour un modèle semi-distribué, à savoir le « *Hydrologic Engineering Center's Hydraulic Modeling System* » (HEC-HMS). Les motivations derrière ce choix sont les suivantes :

- ✚ La disponibilité des données d'entrée,
- ✚ HEC-HMS offre à l'utilisateur la possibilité de sélectionner une combinaison modulaire en fonction de ses données, de ses objectifs, et surtout de son expérience,
- ✚ Il permet de prendre en compte les différents paramètres relatifs aux écoulements et au bassin versant,
- ✚ HEC-HMS est un logiciel gratuit avec une interface conviviale dont le renseignement des données d'entrée est simple.

IV.2.3. LOGICIELS UTILISES

Divers outils ont été employés pour mener à bien cette étude. Il s'agit principalement de :

- ✚ Google Earth Pro, pour la délimitation de la zone d'étude ;
- ✚ Global Mapper 22.1, pour le téléchargement du SRTM et la conversion en Geo.tiff (Dem)
- ✚ ArcGIS 10.4 (avec ses extensions Arc-hydro-tools, et HEC-GeoHMS) pour le traitement du Dem ainsi que le découpage du bassin versant en plusieurs sous bassin versants élémentaires, afin de déterminer les paramètres physiques exigés par HEC-HMS,
- ✚ HEC-HMS pour la modélisation hydrologique du bassin versant,
- ✚ Pack Microsoft Office, pour les calculs et la rédaction,
- ✚ Zotero, pour la gestion bibliographique.

IV.3. METHODOLOGIE

Toute démarche scientifique repose sur l'utilisation de méthodes, de techniques et d'outils adaptés afin d'obtenir les résultats souhaités. La méthodologie représente l'approche adoptée pour atteindre les objectifs de notre étude.

IV.3.1. CARACTERISATION HYDRO-GEOMORPHOLOGIQUE DU BASSIN VERSANT

IV.3.1.1. DELIMITATION DU BASSIN BAFING

Le bassin versant désigne à la fois une zone topographique, délimitée par une ligne de partage des eaux et une surface, où les précipitations sont interceptées et peuvent être drainées vers l'exutoire via le réseau hydrographique (FAO, 1996). Tous les écoulements qui se forment à l'intérieur de cette zone doivent franchir la section définie pour continuer leur parcours en aval. Dans le cadre de cette étude, la délimitation du bassin versant a été réalisée à l'aide du logiciel ArcGIS 10.4, avec l'extension Arc Hydro Tools, en s'appuyant sur un Modèle Numérique de Terrain (MNT) de type SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), avec une résolution spatiale de 30 mètres.

IV.3.1.2. CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DU BASSIN VERSANT

Elle reflète l'étendue du bassin versant et a une influence significative sur le débit ; car plus la surface est importante, plus la quantité d'eau que récolte le bassin est importante. En fonction de la taille du bassin versant, on distingue quatre catégories établies par Rodier dans le bulletin 54 de la FAO. La superficie et le périmètre du bassin ont été déterminés à l'aide du logiciel ArcGIS.

IV.3.1.3. INDICE DE COMPACTITE K_G

Appelé également coefficient de forme ou coefficient de Gravelius (K_G), il correspond au rapport du périmètre du bassin à celui d'un cercle de même superficie.

$$k_G = 0.282 * \frac{P}{\sqrt{S}} \quad (1)$$

Avec

P [km] : le périmètre du bassin versant

S [km²] : la surface du bassin versant

si $K_G = 1$: Bassin versant circulaire

$1 < K_G < 1,3$: Bassin versant compact

$K_G > 1,3$: Bassin versant allongé

IV.3.1.4. RECTANGLE EQUIVALENT

C'est un rectangle qui a la même superficie, le même indice de compacité et la même distribution hypsométrique que le bassin versant. Sa longueur et sa largeur sont déterminées

respectivement par les équations 2 et 3.

$$L = \frac{P + \sqrt{P^2 - 16S}}{4} \quad (2) \text{ Avec}$$

$$l = \frac{S}{L} \quad (3)$$

P : le périmètre du bassin versant [km] ;

S : la surface du bassin versant [km²] ;

l : la largeur du rectangle équivalent [km]

L : la longueur du rectangle équivalent [km]

IV.3.1.5. DETERMINATION DE LA COURBE HYPSONOMETRIQUE

La courbe hypsométrique est une représentation graphique des altitudes en fonction des surfaces cumulées ramenées en pourcentage (S. Diallo, 2021). Elle permet de décrire la morphologie du relief d'un bassin versant. Cette courbe évolue avec le temps, au fur et à mesure que l'érosion modifie le bassin.

IV.3.1.6. INDICE GLOBAL DE PENTE

L'indice global de pente est un paramètre morphométrique qui caractérise le relief d'un bassin versant. Il fournit une estimation de la pente moyenne du terrain, influençant directement la vitesse des écoulements de surface et les processus d'érosion, il est défini par l'équation 4.

$$I_g = \frac{H_{5\%} - H_{95\%}}{L} \quad (4)$$

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.3.1.7. DENIVELEE SPECIFIQUE

La dénivelée spécifique correspond au produit entre l'indice global des pentes I_g (I_g corrigé) et la racine carrée de la superficie S du bassin. On peut distinguer différentes classes de relief en fonction de D_s.

$$D_s = I_g * \sqrt{S} \quad (5)$$

Avec

D_s : dénivelée spécifique [m]

S : la surface du bassin versant [km²]

I_g : Indice global de pente [m/km]

IV.3.1.8. LA DENSITE DE DRAINAGE

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 6.

$$D_d = \frac{\sum L_i}{S} \quad (6)$$

Avec

D_d : densité de drainage [km/km²]

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

S : la surface du bassin versant [km²]

IV.3.1.9. INDICES DE PLUIE

L'étude pluviométrique a été réalisée à partir des données de précipitations annuelles et des pluies journalières maximales annuelles enregistrées à la station de Bafing Makanan, en raison de la disponibilité de ces informations.

L'analyse des données pluviométriques a permis de faire une appréciation globale de la tendance des précipitations à travers les Indice Standardisé des Précipitations (ISP), créé en 1993 par McKee et al (équation 7). Cet indice caractérise la sévérité de la sécheresse dans une zone donnée (Tableau 2).

Tableau 2 : Classification de la sécheresse en fonction de l'ISP (Ardoin, 2004)

Classe de ISP	Degré de la sécheresse
ISP>2	Humidité extrême
1<ISP < 2	Humidité forte
0<ISP<1	Humidité modérée
0>ISP>-1	Sécheresse Modérée
-1>ISP>-2	Sécheresse forte
ISP<-2	Sécheresse extrême

$$ISP = \frac{P_{an} - \overline{P_{an}}}{\sigma} \quad (7)$$

Avec

ISP : Indice des pluies

P_{an} : Pluie annuelle (mm)

$\overline{P_{an}}$: Moyenne des pluies annuelles (mm)

σ : Ecart type (mm)

IV.3.2. ANALYSE DE LA VARIABILITE CLIMATIQUE DE LA STATION DE BAFING MAKANAN

IV.3.2.1. TEST D'HOMOGENEITE

L'homogénéité entre les séries de précipitations et de débits annuels a été vérifiée à l'aide de tests statistiques non paramétriques, notamment le test de corrélation sur les rangs de Spearman implémenté dans le package trend du logiciel R. Ce test non paramétrique, qui ne nécessite pas de supposer que les données suivent une distribution spécifique permet d'évaluer l'homogénéité d'une série temporelle.

Le coefficient de Spearman noté τ , est compris entre -1 et $+1$. Une valeur proche de $+1$ indique une forte corrélation monotone croissante, tandis qu'une valeur proche de -1 signale une forte corrélation décroissante (Ali Abd Al-Hameed, 2022). Plus la valeur se rapproche de 0, plus la relation est faible ou inexistante Tableau 3.

Tableau 3 : Types de corrélation et interprétation du coefficient

Valeur du coefficient de corrélation	Signification
1	Corrélation positive parfaite
0,70 à 0,99	Forte association positive
0,50 à 0,69	Corrélation positive modérée
0,01 à 0,49	Faible corrélation positive
0	Absence de relation positive

IV.3.2.2. DETECTION DE TENDANCE PAR LE TEST DE MANN-KENDALL DANS LES SERIES DE PLUIE ET DE DEBIT ANNUELS

Une rupture se définit par le changement dans la loi de probabilité de la série chronologique à un instant donné, le plus souvent inconnu (Ardoin, 2004).

Afin de détecter une évolution temporelle (tendance monotone) dans les séries annuelles de pluie et de débit moyen, nous avons utilisé le test non paramétrique de Mann-Kendall, implémenté via la fonction `mk.test` du package `trend` dans R (Pohlert, 2023). Lorsque la p-value est supérieure à 0,05, cela indique une absence de tendance monotone significative, suggérant que l'hypothèse nulle ne peut pas être rejetée. En revanche, si la p-value est inférieure à 0,05, cela suggère l'existence d'une rupture ou d'une évolution significative dans la série analysée.

IV.3.3. MISE EN ROUTE DU MODELE HEC-HMS

IV.3.3.1. PRESENTATION DU MODÈLE HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER

HEC-HMS est un modèle déterministe et conceptuel développé en 1998 par les ingénieurs de l'armée américaine (USACE). Le modèle HEC-HMS permet d'effectuer aussi une modélisation continue sur de longues périodes, grâce à l'intégration de modules de calcul des différents processus tels que l'évapotranspiration et l'humidité. HEC-HMS est également un modèle semi-distribué qui divise un bassin versant en plusieurs sous-bassins, chacun étant considéré comme ayant des caractéristiques homogènes.

a. Choix du type de modélisation

Il est possible d'effectuer deux types de modélisation hydrologique avec HEC-HMS. Il s'agit

de la modélisation événementielle ou continue. Dans le cadre de notre étude, nous effectuons une modélisation continue au pas de temps journalier du bassin enfin de Comprendre le fonctionnement hydrologique du bassin versant (Scharffenberg & Fleming, 2006).

b. Organisation du modèle

Le modèle HEC-HMS est divisé en trois composantes qui sont la modélisation du bassin versant ou modèle physique du bassin, la modélisation de la pluviométrie et les spécifications particulières ou spécifications de contrôle de modélisation.

Modèle physique du bassin

La modélisation du bassin versant consiste à découper le bassin versant en plusieurs sous bassins versants élémentaires, afin de déterminer les paramètres physiques exigés par HEC-HMS. Ainsi, l'outil HEC-GeoHMS, basé sur les Systèmes d'Information Géographique (SIG) a été utilisé pour délimiter le bassin à l'aide du logiciel ArcMap d'ESRI. Les détails concernant cette première composante du modèle sont fournis en Annexe 2.

Spécifications météorologiques

Après la modélisation du bassin, le modèle est importé dans HEC-HMS pour procéder à la modélisation météorologique. Celle-ci intègre les données de précipitations et d'évapotranspiration, indispensables au calcul de la réponse hydrologique du bassin versant.

Spécifications de contrôle

Dans cette dernière composante, nous nous concentrerons sur quatre fonctions essentielles à savoir la fonction de production, la fonction de transfert, la fonction objective, et la fonction d'optimisation automatique. Chaque fonction possède ses propres méthodologies, et leur sélection n'est pas toujours simple.

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. Nous avons retenu le formalisme « 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 » (Batiennon, 2021; Scharffenberg & Fleming, 2006). Ce formalisme se caractérise par un seul paramètre, le « Lag Time » ou temps de retard entre le pic de crue et le pic de précipitation, calculé à partir des valeurs CN, spécifiques à chaque sous-bassin. Le CN a été généré avec la commande « *Subbasin Parameters From Raster* » de HEC-GeoHMS en utilisant le CNgrid comme entrée.

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) :

$$T_c = \frac{L^{0.8} * [(1000/CN) - 9]^{0.7}}{4407 * p^{0.5}} \quad (8)$$

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. Fonction objective

Elle est utilisée pour évaluer la performance du modèle en comparant les résultats simulés aux observations. Chaque formalisme de la fonctions objectives permet de mesurer l'écart entre les simulations et les observations selon des critères spécifiques. Le HEC-HMS comporte 7 fonctions objectives. Nous avons retenu la fonction objective Somme des carrés des résidus « *Sum of squared residuals* » parcequ'elle a données de meilleurs résultat dans plusieurs études (Batiennon, 2021; Ferraz et al., 2021).

d. Fonction d'optimisation automatique

Elle permet de calibrer les paramètres du modèle en minimisant les écarts entre les débits observés et simulés. HEC-HMS propose notamment deux méthodes : la méthode du gradient univarié et la méthode de Nelder-Mead, également appelée « méthode du simplex ».

Dans notre étude, nous avons choisi la méthode de Nelder-Mead, car elle ne nécessite pas le calcul de dérivées, est robuste face aux irrégularités de la fonction objectif et s'adapte bien aux problèmes non linéaires. Étant donné que la modélisation pluie-débit d'un bassin versant repose sur des processus hydrologiques complexes et non linéaires, cette méthode s'avère plus appropriée.

IV.3.3.2. DONNEES D'ENTREE DE MODELISATION

Le Tableau 4 présente l'ensemble des données d'entrée qui ont été utilisées pour la préparation du modèle HEC-HMS sur le bassin versant du Bafing.

Tableau 4 : Synthèse des données d'entrées du modèle HEC-HMS

Variable	Source
Précipitations	Station de Manantali, de Bafing Makanan et de Dakkasadou (pluie)
Température (min et max)	NASA (https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/)
Débits observés	Station hydrométrique de Bafing Makanan
Relief et pente	Modèle numérique de terrain de type SRTM résolution 30 m
Sols	FAO Soil Map (DSMW) (WWW.fao.org)
Occupation des sols	Global Land cover (https://lcviewer.vito.be/download)

IV.3.4. CRITERES DE PERFORMANCES DU MODELE HEC-HMS

Une analyse visuelle des résultats d'une simulation ne constitue pas une évaluation objective du modèle. Il est donc nécessaire de recourir à des critères quantitatifs pour comparer les simulations aux données observées. Dans le cadre de notre étude, nous avons choisi deux critères de performances à savoir :

Le critère de Nash-Sutcliffe (NSE), qui est le plus utilisé en hydrologie pour mesurer la qualité de l'ajustement, est défini par l'Équation 9. Le Coefficient de Nash-Sutcliffe permet d'évaluer la performance d'un modèle hydrologique en comparant les débits simulés par le modèle aux débits observés. (Nash & Sutcliffe, 1970). Le Tableau 5 illustre les critères de performance de Nash.

$$NSE = 1 - \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum(Q_{obs} - Q_{obs\text{moy}})^2} \quad (9)$$

Q_{obs} : Débits observés
 Q_{sim} : Débits simulés
 $Q_{obs\text{moy}}$: Moyenne des débits observés

Tableau 5 : Appréciation des valeurs de NSE (Nash & Sutcliffe, 1970)

Critère de Nash	Performance du modèle
$NSE \geq 0,90$	Excellent
$0,90 \geq NSE \geq 0,75$	Performant
$0,75 \geq NSE \geq 0,50$	Acceptable
$0,50 \geq NSE \geq 0$	Peu performant / Non satisfaisant

Le pourcentage de biais (PBIAIS) C'est le pourcentage de la variation totale entre les valeurs simulées et les valeurs observées. Une valeur idéale de ce pourcentage est de 0, avec des valeurs faibles d'amplitudes indiquant une simulation parfaite (Moriassi et al., 2007) . Il est calculé selon l'équation 10. Les valeurs du critère PBIAS sont présentées dans le Tableau 6.

$$PBIAIS = \frac{\sum(Q_{obs}-Q_{sim})*100}{\sum Q_{obs}} \quad (10)$$

Où Q_{sim} et Q_{obs} désignant respectivement le débit simulé et observés

Tableau 6 : Appréciation des valeurs du critère PBIAS (Yonaba, 2020)

Valeur PBIAS	Performance du modèle
$PBIAS \leq \pm 5\%$	Très Bonne
$\pm 5\% \leq PBIAS \leq \pm 10\%$	Bonne
$\pm 10\% \leq PBIAS \leq \pm 15\%$	Satisfaisant
$PBIAS \geq \pm 15\%$	Non satisfaisant

IV.3.5. MODELES DE PROJECTION CLIMATIQUE

La démarche adoptée pour l'obtention du climat futur à Manantali repose sur l'utilisation de 14 modèles climatiques globaux (MCG) issus du projet NEX-GDDP-CMIP6, sous les scénarios d'émissions SSP2-4.5 et SSP5-8.5 (Figure 7). Le choix des scénarios SSP2-4.5 et SSP5-8.5 se justifie par leur complémentarité dans l'évaluation des risques climatiques futurs. SSP2-4.5 représente un scénario modéré avec des politiques climatiques partielles et un forçage radiatif de 4,5 W/m² en 2100, considéré comme la trajectoire la plus probable selon les tendances actuelles. SSP5-8.5 constitue un scénario pessimiste caractérisé par une forte croissance économique basée sur les énergies fossiles sans politiques climatiques ambitieuses, atteignant 8,5 W/m² de forçage radiatif. Ensemble, ces deux scénarios offrent une fourchette d'incertitude couvrant les trajectoires climatiques plausibles, du modéré au pessimiste, permettant d'évaluer la robustesse des projections climatiques et d'informer la prise de décision en considérant différents niveaux de risque pour notre région d'étude, conformément aux recommandations du GIEC pour les études d'impact régional.

Dans un premier temps, une sélection des MCG est effectuée en retenant ceux qui reproduisent le mieux la moyenne mensuelle observée sur la période 1990-2014, selon des critères statistiques tels que l'erreur moyenne absolue (MAE) et l'erreur de biais moyenne (MBE). Cette étape permet de constituer un ensemble réduit de MCG, utilisé ensuite pour générer une moyenne d'ensemble multi-modèle (EMM).

L'approche multi-modèles consiste à combiner les résultats de plusieurs modèles climatiques afin de réduire les incertitudes individuelles et d'obtenir une projection plus représentative des conditions futures. En effet, la moyenne de plusieurs modèles connue sous le nom de moyenne d'ensemble multi-modèle (EMM), permet de lisser les erreurs systématiques et de mieux capturer la variabilité du climat futur car chaque modèle présente ses propres biais. L'application de cette moyenne EMM réduit significativement ces biais, éliminant ainsi la nécessité d'une méthode de correction supplémentaire. À partir de cette EMM, les précipitations et les températures journalières pour la station de Bafing Makanan à l'horizon 2050 sont obtenues. Ces données de températures servent ensuite au calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP) journalière future, qui combinée aux précipitations futures, permet de simuler le débit futur à Manantali à l'horizon 2050.

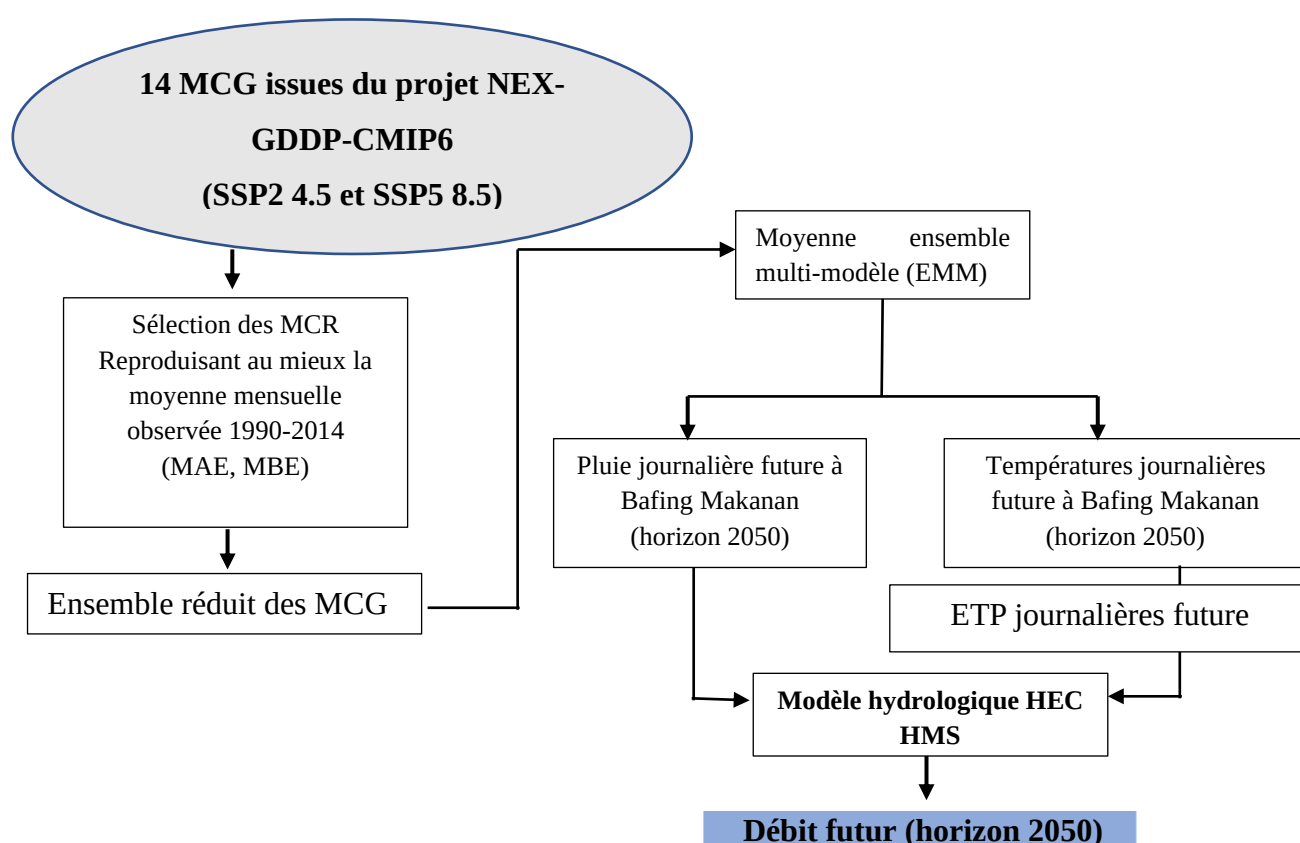


Figure 7 : Méthodologique de traitement des données pour l'obtention du climat futur à Manantali (Yonaba, 2020)

IV.3.5.1. CHOIX DES MODELES CLIMATIQUES

Pour la simulation de la réponse hydrologique sur la période future, dans le cadre de cette étude, les sorties des modèles climatiques globaux (MCG), qui est un ensemble de données climatiques de haute résolution dérivé des simulations du CMIP6 (jusqu'à 25 km), ont été

utilisées. Ces données sont disponibles pour la période 1950-2099 couvrant l'ensemble du territoire et sont téléchargeables dans la base de données du projet NEX-GDDP (<https://ds.nccs.nasa.gov/thredds/ncss/AMES/NEX/GDDP-CMIP6/>). En effet, ces données sont corrigées pour les biais par la méthode statistique dite CDF-t (Cumulative Distribution Function transform). Cette méthode de correction des biais des données climatiques (précipitations et température) simulées a pour objectif de reproduire fidèlement les caractéristiques climatiques observées, tant à l'échelle journalière qu'annuelle, tout en intégrant leur variabilité saisonnière (Tazen, 2015). Les variables climatiques considérées sont les précipitations (P), ainsi que les températures maximales (Tmax) et minimales (Tmin), à un pas de temps journalier et une résolution spatiale de 0,25° x 0,25°. Ces données proviennent de 14 modèles climatiques (Tableau 7), avec des simulations couvrant la période historique de 1990 à 2014 et des projections futures sous les scénarios d'émission de GES (SSP2-4.5 et SSP5- 8.5). Afin de constituer un ensemble multi-modèles pertinent pour représenter au mieux les écoulements observés à la station de Bafing Makanan, des indices quantifiant les écarts entre les moyennes mensuelles observées et simulées par les modèles ont été évalués sur la période de référence (historique). Il s'agit de l'erreur de biais moyen (MBE), et de l'erreur de biais absolu (MAE), données respectivement par les équations 11 et 12 (Akisanola & Ogunjobi, 2017; Yonaba, 2020) .

$$MBE_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_{i,k}^{sim} - p_{i,k}^{obs}) \quad (11)$$

$$MAE_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |p_{i,k}^{sim} - p_{i,k}^{obs}| \quad (12)$$

Où $p_{i,k}^{sim}$ et $p_{i,k}^{obs}$ représentent respectivement la somme des pluies simulée et observée pour le mois, $i \in \{1, \dots, 12\}$, $n = 12$ (le nombre de mois dans l'année). L'indice k représente un modèle climatique (MC) considéré dans l'ensemble des 14 MCG. La valeur optimale pour ces deux indices est nulle. Les MCG qui réduisent au maximum ces trois indices d'erreur ont été privilégiés (S. Diallo, 2021; Yonaba, 2020).

Tableau 7 : Synthèse des modèles climatiques du Projet NEX-GDDP -CMIP6 utilisés

MCG	Institutions	Résolution spatiale
NorESM2-MM	Norwegian Climate Centre (NCC)	0.25*0.25
NorESM2-LM		
MRI-ESM2-0	Meteorological Research Institute (MRI), Japon	
MPI-ESM1-2-LR	Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M), Allemagne	
MPI-ESM1-2-HR		
MIROC6	The University of Tokyo Center for Climate System Research – Japon	
MIROC-ES2L		
IPSL-CM6A-LR	Institut Pierre-Simon Laplace Climate Modeling Center	
FGOALS-g3	Institute of Atmospheric Physics (IAP), Chinese Academy of Sciences, Chine	
EC-Earth3	Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI) – Pays-Bas	
CNRM-ESM2-1	Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM), France	
CNRM-CM6-1		
CMCC-ESM2	Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (CMCC), Italie	
CMCC-CM2-SR5		

IV.3.5.2. CALCUL DE L'EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE SUR LA PERIODE FUTURE

L'ETP journalière sur les périodes future 2036-2065 a été calculée à partir de la méthode de Hargreaves & Samani (1985) qui s'appuie sur les valeurs journalières de températures minimales et maximales (équations 13). Cette méthode a été retenue car elle nécessite peu de données et elle permet d'estimer les valeurs d'ETP très proches de celles obtenues avec la formule de Penman-Monteith qui est plus complexe (Tazen, 2015; Yonaba, 2020; Zoure, 2019).

$$ETP = 0.0023 R_a (T_{\max} - T_{\min})^{0.5} (T + 17.8) \quad (13)$$

ETP en mm/jour, **R_a** rayonnement au sommet de l'atmosphère ou rayonnement extraterrestre [$\text{MJ.m}^{-2}.\text{jr}^{-1}$], **T_{max}** et **T_{min}** représentent respectivement les températures maximales et minimales journalières (°C), **T**=(**T_{max}** + **T_{min}**)/2 la température moyenne journalière (°C) (Raziei & Pereira, 2013) .

V. RESULTATS ET DISCUSSIONS

V.1. CARACTERISATION HYDRO-GEOMORPHOLOGIQUE DU BASSIN VERSANT

Le Tableau 8 présente la synthèse des caractéristiques morphométriques du bassin versant de Bafing. On observe que le bassin du Bafing est un vaste bassin versant caractérisé par une forme allongée ($K_G > 1$) et un relief marqué. Sa pente moyenne est de 0,077 m/km, ce qui témoigne d'un profil de terrain modérément incliné. En raison de sa grande superficie et de la structure de son relief, le bassin présente une dynamique hydrologique importante. Les caractéristiques morphométriques du bassin, telles que sa forme allongée, sa grande variation d'altitude et sa faible densité de drainage, jouent toutes un rôle crucial dans la détermination des écoulements d'eau et des processus hydrologiques dans la région.

Tableau 8 : Caractéristiques morphométriques du bassin Bafing

Caractéristiques morphométriques	Unités	Valeurs
Superficie (S)	km ²	27589,14
Périmètre (P)	km	1690,97
Coefficient de Gravelius (K_G)	-	2,9
Longueur du rectangle équivalent (L)	km	805,2
Largeur du rectangle équivalent (l)	km	34,3
Altitude maximum (Hmax) (H (5%))	m	635.2
Altitude minimum (Hmin) (95%)	m	208
Dénivelée (Profil en long) (H5% - H95%)	m	427,2
Altitude 5% de superficie cumulée (H (5%))	m	910
Altitude 95% de superficie cumulée (H (95%))	m	245
Longueur du cours d'eau (L_{long})	km	556,06km
Indice global de pente (I_g)	m/km	0,8
Pente moyenne (I)	m/km	0,077
Dénivelée spécifique (D_s)	m	137,2
Densité de drainage Dd	km/km ²	0,043

V.1.1. COURBE HYPOMETRIQUE DU BASSIN VERSANT DE BAFING EN AMONT DE MANANTALI

La Figure 8 montre que le bassin du Bafing se caractérise par une topographie diversifiée, avec des zones de relief prononcé au niveau des zones supérieures du bassin et des zones plus plates

vers l'aval. Ces caractéristiques influencent directement les écoulements et la gestion des ressources en eau, en particulier pour les infrastructures telles que le barrage de Manantali.

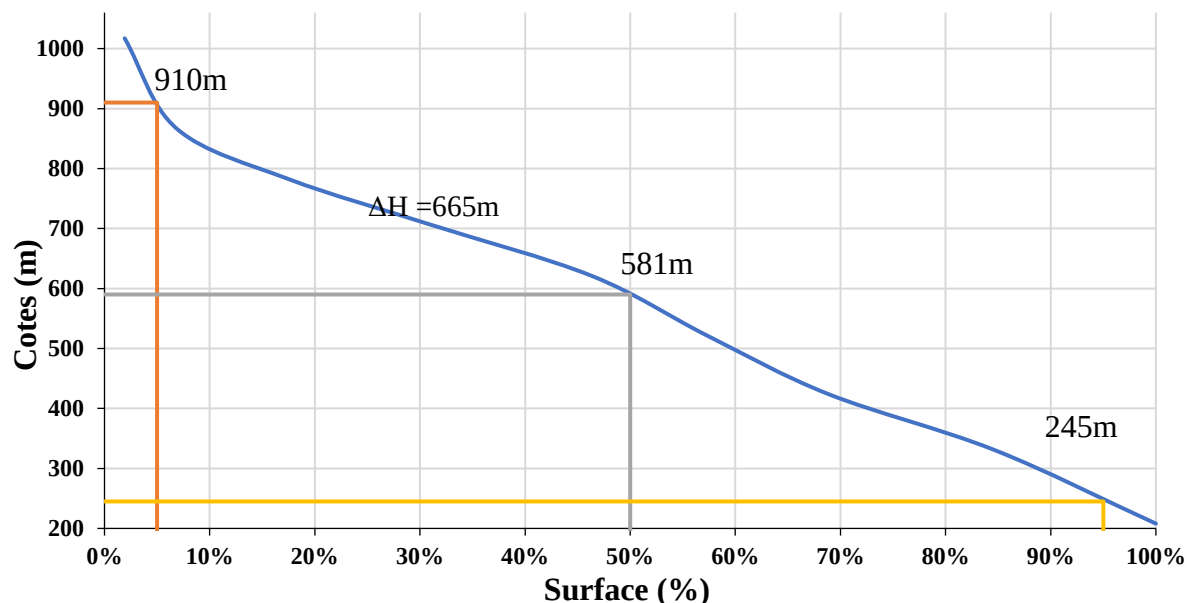


Figure 8 : Courbe hypsométrique du bassin versant de Bafing en amont de Manantali

V.1.2. CARTE DES PENTE ET PROFIL EN LONG DU COURS D'EAU DU BASSIN BAFING

La carte des pentes du bassin versant de Bafing Makanan (Figure 9) avec des classes de pente allant de 0 % à 68.38 %, illustre la diversité topographique du bassin. Elle met en évidence les zones à fortes pentes favorisant un ruissellement rapide et une érosion accrue, ainsi que les zones à faibles pentes propices à l'infiltration et à l'agriculture.

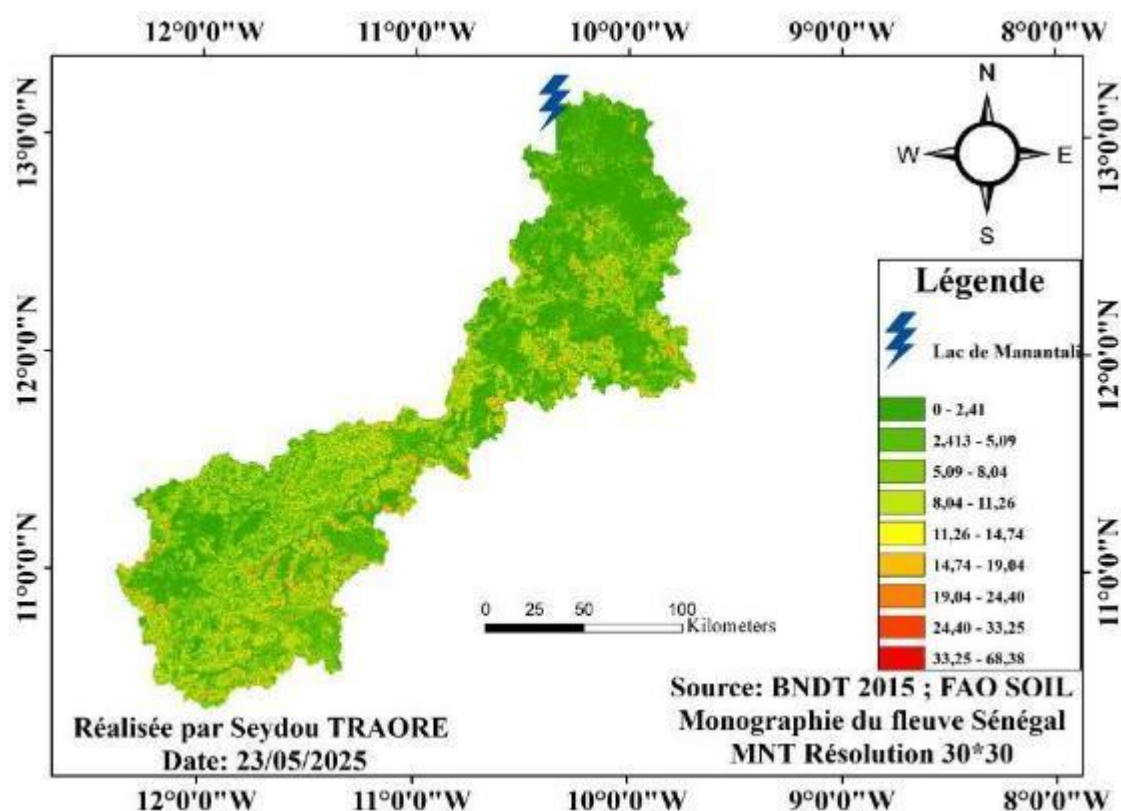


Figure 9 : Carte des pentes du bassin de Bafing dont l'exutoire est à Manantali

La courbe des pentes (Figure 10), basée sur le profil du cours d'eau, montre une dénivellée totale de 427,2 m entre une altitude maximale de 635,2 m et une altitude minimale de 208 m. Elle met en évidence les zones où les pentes fortes augmentent la vitesse de l'eau et celles où les pentes plus douces favorisent le dépôt des sédiments.

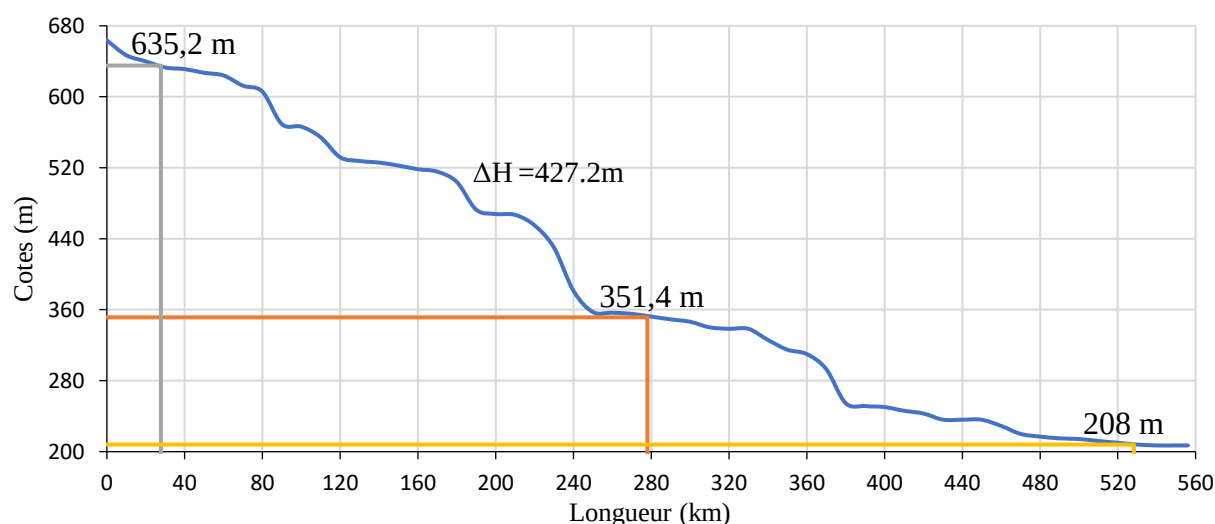


Figure 10 : Profil en long du cours d'eau

V.1.3. INDICE DE PLUIES STANDARDISES

La Figure 11 montre les indices de précipitation standardisés à la station de Makanan sur la période 1990 à 2022. Les valeurs négatives de l'indice signalent des conditions sèches par rapport à la période considérée, tandis que des valeurs positives indiquent des conditions plus humides.

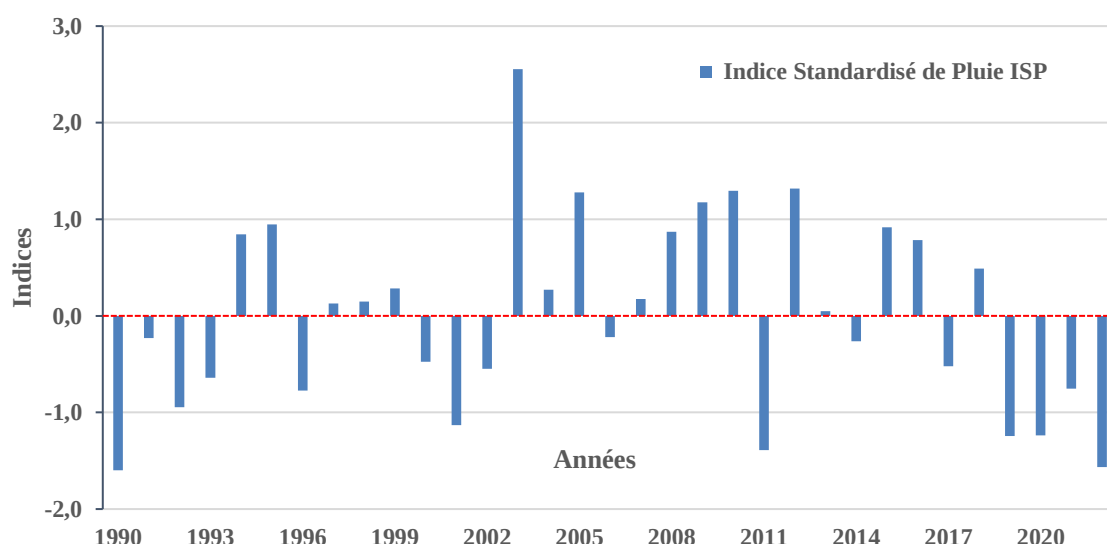


Figure 11 : Indices standardisés des pluies de Makanan 1990 à 2022

L'analyse de la Figure 11, qui représente l'évolution de l'Indice Standardisé de Précipitations (ISP) à Makanan de 1990 à 2022, révèle une alternance frappante entre périodes sèches et humides, soulignant la forte variabilité interannuelle des précipitations dans le bassin du Bafing. Selon la classification d'Ardoin (2004), l'année 1990 et 2022 est marquée par une sécheresse extrême ($ISP < -2$), témoignant d'une anomalie pluviométrique sévère. Cinq autres années à savoir 1993, 2001, 2011, 2019 et 2020 se situent dans la catégorie de la sécheresse forte ($-2 < ISP \leq -1$), indiquant des déficits hydriques marqués, tandis que huit années (1992, 1996, 2000, 2002, 2006, 2014, 2017 et 2021) traduisent une sécheresse modérée ($-1 < ISP \leq 0$). À l'inverse, huit autres années (1991, 1994, 1995, 1997, 1998, 1999, 2004 et 2007) ont connu une humidité modérée ($0 < ISP \leq 1$), tandis que quatre années (2005, 2009, 2010 et 2012) ont atteint un niveau d'humidité élevé ($1 < ISP \leq 2$). L'année 2003 se distingue particulièrement par une humidité extrême ($ISP > 2$), liée à une pluviométrie exceptionnellement élevée.

Un examen chronologique montre une transition progressive vers des conditions plus humides après 2002, puisque 8 années sur 13 de la période 1990-2002 appartiennent aux catégories de sécheresse (modérée à extrême), alors que de 2003 à 2022, pas moins de 12 années figurent

parmi les années humides (modérées à extrêmes). Néanmoins, la persistance d'années de sécheresse sévère dans les deux dernières décennies (2001 et 2020) témoigne du fait que la variabilité pluviométrique, bien que globalement orientée vers un rétablissement, reste prononcée.

V.1.4. ANALYSE DE LA STATIONNARITE DES SERIES DE PLUIES ANNUELLES

V.1.4.1. TEST D'HOMOGENEITE

Le test de Spearman a été appliqué entre les séries annuelles de précipitations et de débits pour évaluer l'association entre les variables (précipitations et débits) sur la période 1990–2022 (Tableau 9). Pour les deux variables à savoir précipitations et débits, le niveau de risque $\alpha = 0,05$, pour 33 séries d'observations annuelles. Le coefficient de corrélation de Spearman ($\tau = 0,50$) indique une relation positive modérée entre les précipitations annuelles et le débit moyen annuel. Cette association bien que significative n'est pas parfaitement linéaire mais montre tout de même une tendance nette : lorsque les précipitations augmentent, le débit tend aussi à s'accroître. Le p-value très faible (0,0034), nettement inférieure au seuil conventionnel de 0,05 confirme que cette corrélation est statistiquement significative, ce qui signifie que la probabilité que cette liaison soit due au hasard est extrêmement faible (0,34 %).

Tableau 9 : Résultat du test d'homogénéité sur les données de Bafing Mamanan

Paramètres	Valeur
Niveau de risque (α)	0 ,05
Nombre d'observations N (1990 à 2022)	33
p-value	0,0034
Coefficient de corrélation de Spearman entre pluie et débits annuels (τ)	0,495

V.1.4.2. TEST DE MANN–KENDALL DANS LES SERIES DE PLUIE ET DE DEBIT ANNUELS

Les analyses des tendances des séries temporelles de pluie et de débit ont été réalisées à l'aide du test de Mann-Kendall et de la pente de Theil-Sen (Figure 12). Pour les données de pluie, le test de Mann-Kendall a révélé un taux de Kendall de 0 avec un p- value de 0,083, qui est supérieure au seuil critique de 0,05 indiquant une absence de tendance monotone significative. La pente de Theil-Sen pour les précipitations est estimée à environ -0,0093, suggérant une légère tendance à la baisse bien que non significative statistiquement. En revanche pour les données de débit, le test de Mann-Kendall a montré un taux de Kendall de 0,303 avec un p-value de 0,013, qui est inférieure au seuil critique de 0,05 indiquant une tendance positive modérée. La pente de Theil-Sen pour le débit est estimée à environ 1,923 m³/s par an, révélant

une tendance significative à la hausse dans les débits moyens annuels. Ces résultats indiquent donc une légère tendance à la baisse des précipitations et une tendance à la hausse des débits sur la période 1990 à 2022.

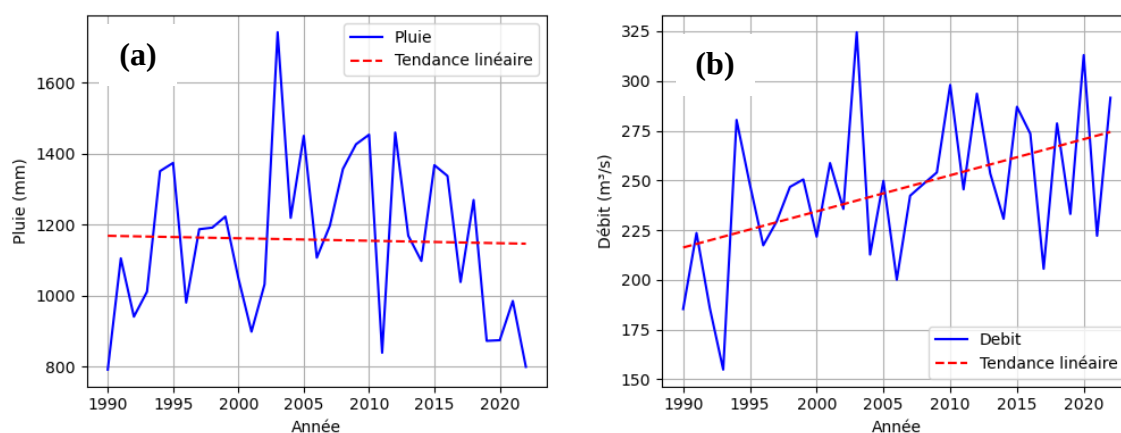


Figure 12 : Evolution des séries hydro-climatique de la station de Bafing Makanan sur la période 1990 à 2022 avec les courbes de tendances associées : (a) pluie annuelle et (b) débit moyen annuel.

Les résultats des tests statistiques de Spearman et de Mann–Kendall apportent des éclairages complémentaires sur les relations et les tendances dans les séries temporelles de précipitations et de débits. Le test de Spearman a révélé une corrélation monotone positive modérée ($\tau = 0,50$; $p = 0,0034$) entre les précipitations annuelles et les débits moyens annuels, ce qui suggère qu'en moyenne les années les plus pluvieuses tendent à produire des débits plus élevés. En revanche, l'application séparée du test de Mann–Kendall aux deux séries révèle des dynamiques contrastées. La série des précipitations annuelles ne présente aucune tendance significative (p -value = 0,083) malgré une faible baisse apparente. À l'opposé, la série des débits montre une tendance significative à la hausse (p -value = 0,013 ; $\tau = 0,30$) indiquant une évolution progressive au fil du temps. Ces observations confirment la nécessité de combiner plusieurs méthodes pour caractériser les changements hydrologiques (Pohlert, 2023). Ces résultats mettent en lumière l'importance de prendre en compte des facteurs multiples dans l'analyse des tendances et la gestion des ressources en eau. En effet, bien que les précipitations et les débits soient partiellement corrélés, les tendances divergentes suggèrent l'influence d'autres variables. Par exemple les changements d'occupation des sols (urbanisation, déforestation) peuvent affecter les régimes de ruissellement et d'infiltration, entraînant des modifications des écoulements de surface (DeFries et al., 2004). Par ailleurs la gestion hydraulique notamment via la régulation des barrages comme celui de Manantali, peut lisser ou accentuer les variations de débit en stockant ou restituant l'eau selon les besoins. Enfin les variations climatiques interannuelles, les pratiques agricoles (irrigation, cultures de contre-saison), ainsi que les

interventions anthropiques globales (changement d'affectation des terres, ouvrages hydrauliques) sont autant de facteurs pouvant perturber la relation directe entre pluie et débit observée dans les données historiques.

V.2. SCHEMA CONCEPTUEL DU BASSIN BAFING AVEC LE LOGICIEL HEC-GEOHMS

La schématisation du bassin versant réalisée à l'aide du logiciel HEC-GeoHMS (Figure 13), nous a permis de le subdiviser en huit sous-bassins (W160 à W300). Ces unités présentent des superficies allant de 1 833,77 km² (W230) à 6 556,07 km² (W200). Chaque sous-bassin est caractérisé par son Curve Number (CN), indicateur essentiel de la rétention et du ruissellement, avec des valeurs comprises entre 61,89 (W300) et 80,81 (W200), reflétant des différences notables de réponse à la précipitation. En outre le plus long chemin hydraulique, c'est-à-dire la distance maximale que peut parcourir l'eau jusqu'à l'exutoire varie de 102,84 km (W230) à 262,03 km (W200). Ces données sont synthétisées dans le Tableau 10

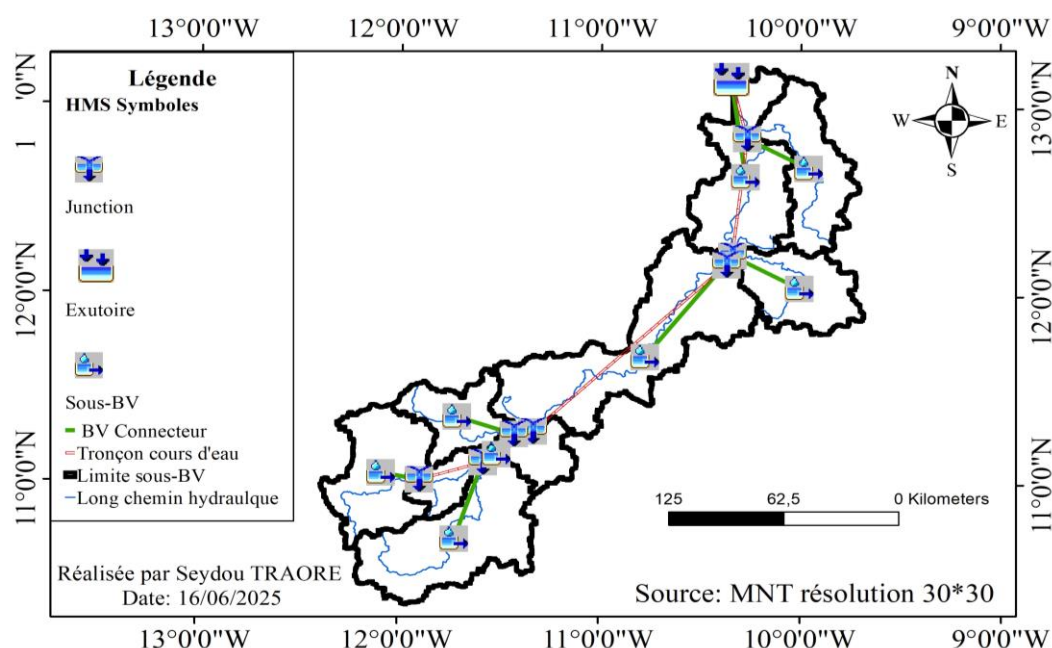


Figure 13 : Schématisation du bassin Bafing en amont du lac avec HEC-GeoHMS

Tableau 10 : Paramètres déterminés par HEC- GeoHMS

Sous-BV	Superficie (km ²)	CN	Plus long chemin hydraulique (km)
W160	3936,76	67,25	183,88
W170	2981,71	76,45	160,50
W190	2456,59	78,25	120
W200	6556,07	80,81	262,03
W230	1833,77	71,15	102,84
W260	2144,08	67,5	112,29
W290	3216,21	64,32	104,28
W300	4462,96	61,89	178,40

V.3. CALAGE ET DE VALIDATION DES MODELES

La série de données utilisée pour la simulation couvre la période de 1990 à 2022 et est subdivisée en deux sous-séries principales. Dans un premier temps, les paramètres seront calibrés sur la période allant de 1990 à 2006, puis validés sur celle de 2007 à 2022. Par la suite, un nouvel ajustement sera effectué sur la période 2007-2022, avec une validation sur la période 1990-2006, conformément à la méthode du test d'échantillonnage croisé (split-sample test).

V.4. CALAGE DU MODELE HEC-HMS

Caler un modèle consiste à rapprocher le plus possible son comportement de celui du bassin modélisé, c'est-à-dire reproduire le mieux possible le comportement hydrologique du bassin. Pour y parvenir, on déterminera sur un échantillon d'événements de référence (données observées), un ou plusieurs jeux de paramètres avec lesquels les simulations du modèle approchent au mieux les hydrogrammes de la base de données de référence. Les paramètres à optimiser sont ceux qui sont sensibles au modèle. Ils sont détaillés dans le Tableau 11.

Tableau 11 : Paramètres d'entrée du modèle HEC-HMS

Modules	Formalismes utilisés	Paramètres	Etat de sensibilité	Plages Min	Plages Max
Estimation évapo-transpiration	Méthode de la canopée (<i>simple canopy</i>)	Etat initial de la canopée (mm)	Non sensible	0,001	1500
		Stockage maximum de la canopée (mm)	Sensible	0,001	1500
		Coefficient de culture	Sensible	0,0100	1,5
Fonction de production	Perte Initiale et Constante (<i>Initial and Constant Loss</i>)	Déficit initial (mm)	Non sensible	0,001	1000
		Taux d'infiltration constant (mm/h)	Non Sensible	0,001	300
		Surface imperméable (%)	Sensible	0	100
Fonction de transfert	Hydrogramme unitaire de la SCS (<i>SCS Unit Hydrograph</i>)	Temps de réponse du bassin (min)	Sensible	0,1000	30000

Une fois les paramètres sensibles au modèle identifiés, nous avons procédé au calage afin d'obtenir un hydrogramme simulé aussi proche que possible de l'observé. Les résultats avant et après l'optimisation sont récapitulés dans le Tableau 12. Les valeurs initiales (avant calibration) correspondent aux paramètres par défaut ou calculés automatiquement, comme le Tlag (mn). Certaines valeurs sont souvent définies à 0 %, comme la superficie imperméable qui représente la part du sous-bassin directement connectée (toits, routes, parkings, etc.). Autrement dit, ce sont des surfaces où toute la pluie devient ruissellement immédiat sans infiltration, ce qui influence significativement les volumes et la vitesse d'écoulement.

Tableau 12 : Valeurs des paramètres avant et après optimisation

Sous bassins versants	W160		W170		W190		W200	
Calage	Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après
Stock. Max. de la canopée (mm)	100	100	100	100	100	100	100	250
Coéf de culture	1	1	1	1,1	1	1,1	1	1
Surf. Imper. (%)	0	4	0	0	0	5	0	6
Tlag(min)	1992,17	28992	1359,78	22918	712,27	26925	2153,64	25124
Sous bassins versants	W230		W260		W290		W300	
Calage	Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après
Stock. Max. de la canopée (mm)	100	300	100	150	100	500	100	800
Coéf de culture	1	0,5	1	1,1	1	0,8	1	1
Surf. Imper. (%)	0	10	0	2	0	10	0	3
Tlag(min)	308,93	2945	573,94	10573	497,04	25593	1488,52	19829

Le stockage maximal de la canopée varie significativement, avec des valeurs particulièrement élevées pour certains sous-bassins comme W200 (250 mm) et W300 (800 mm), reflétant ainsi une forte densité végétale dans ces zones. Les coefficients de culture, proches de 1 pour la plupart des sous-bassins, traduisent une activité évapotranspiratoire moyenne à élever à l'exception de W230 (0,5), ce qui indique une végétation moins dense. Les pourcentages de surfaces imperméables sont également hétérogènes, atteignant 10 % pour les sous-bassins W230 et W290, suggérant la présence de zones urbanisées ou compactées qui augmentent le ruissellement. Enfin les temps de latence augmentent considérablement après calage, ce qui traduit une meilleure représentation des caractéristiques morphologiques et des processus d'écoulement propres à chaque sous-bassin.

Les deux courbes à savoir débit observé et simulé (Figure 14) présentent globalement la même tendance saisonnière, marquée par des pics de débit lors des périodes de crues et des phases de basses eaux (étiages). Cela montre que le modèle est capable de reproduire de manière satisfaisante le comportement hydrologique observé. Toutefois des différences notables sont visibles, notamment au niveau des pics de crues où les débits simulés sont parfois sous-estimés par rapport aux débits observés. Ces écarts peuvent s'expliquer par le nombre limité de stations climatiques disponibles dans le bassin versant. Malgré cela, le modèle parvient à représenter correctement les phases de montée et de descente des crues ainsi que les périodes d'étiage, bien que des variations d'intensité restent visibles entre les deux courbes.

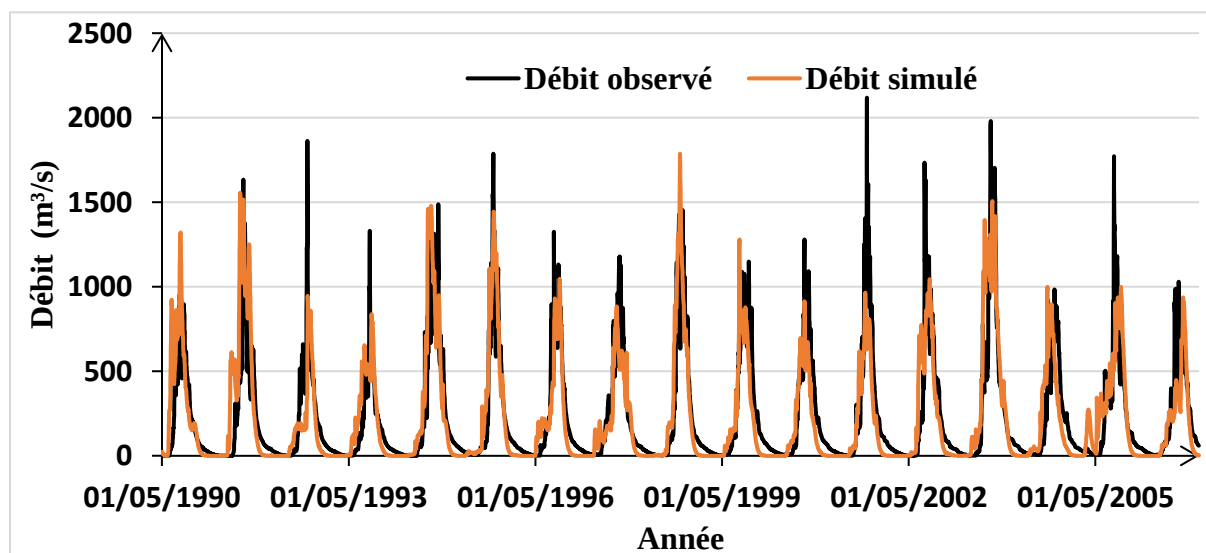


Figure 14 : Hydrogrammes simulé et observé pour le calage du modèle

Les résultats du calage présentés dans le Tableau 13, montrent que les hydrogrammes simulés et observés sont globalement bien proches. Le coefficient de détermination R^2 de 0,71 indique

une bonne corrélation entre les valeurs des débits simulées et observées, ce qui suggère que le modèle explique une grande partie de la variance des données observées. Le coefficient de Nash-Sutcliffe (NSE) de 0,679, qui se situe dans la plage des valeurs indiquant une bonne performance du modèle (entre 0,65 et 0,9), traduit une capacité satisfaisante du modèle à reproduire les processus hydrologiques observés. De plus, le biais en pourcentage (PBIAS) de -2,58 % confirme que les volumes simulés sont très proches des volumes observés, tandis que l'erreur standardisée (RMSE Std Dev) de 0,6 reflète une faible dispersion des erreurs. La différence entre les volumes totaux observés (4 483,14 mm) et simulés (4 367,65 mm) est négligeable. Bien que les débits de pointe simulés (1 787,7 m³/s) soient inférieurs à ceux observés (2 119,0 m³/s), le modèle reste performant dans l'estimation des crues.

Tableau 13 : Résultats du calage du modèle

Critères d'efficacité	R ²	Nash	Pbiais	RMSE
Valeur	0,71	0,68	-2,58	0,6

V.5. VALIDATION DU MODELE HEC-HMS

La validation a été réalisée pour évaluer la performance du modèle en appliquant le même jeu de paramètres déterminé lors du calage. Cette étape permet de vérifier la pertinence du modèle pour reproduire fidèlement le comportement hydrologique et de confirmer la qualité des paramètres calibrés. La période de validation couvre les années 2007 à 2022.

La Figure 15 montre que l'hydrogramme simulé lors de la phase de validation correspond de manière globale à l'hydrogramme observé, même si la précision est légèrement inférieure à celle obtenue lors du calage. Malgré certaines différences observées lors des crues et des étiages, dans l'ensemble les deux hydrogrammes montrent une bonne similitude.

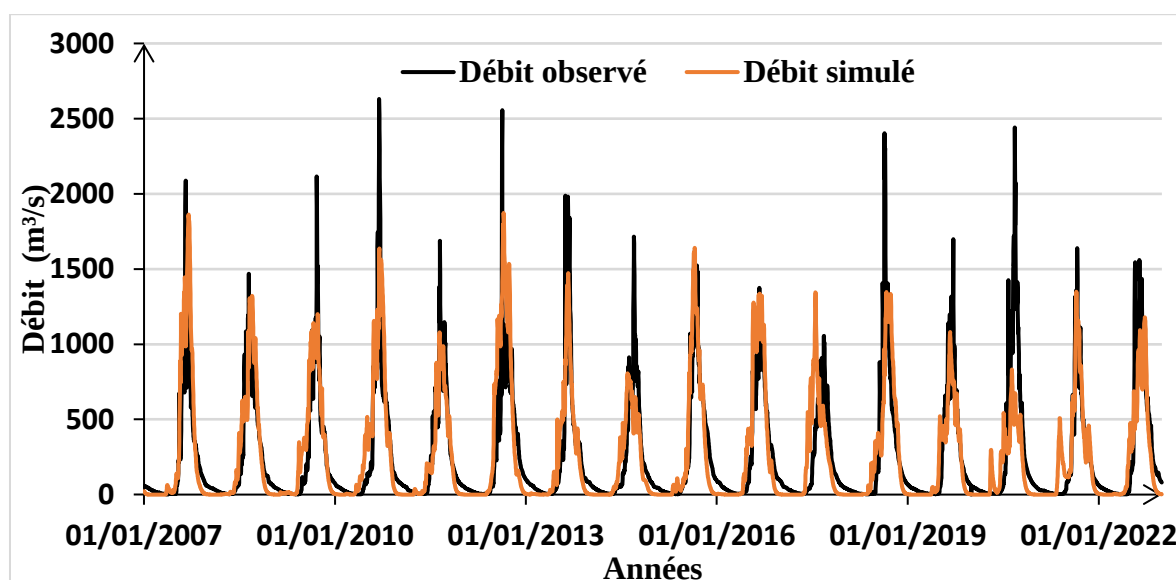


Figure 15 : Hydrogrammes simulé et observé pour la validation du modèle

Les résultats de la validation, présentés dans le Tableau 14 montrent une correspondance plutôt satisfaisante entre les hydrogrammes observés et simulés. Le débit de pointe simulé atteint 1 831 m³/s le 13 septembre 2007 alors que le débit de pointe observé, enregistré le 11 septembre 2010 est nettement supérieur avec 2 632 m³/s. Cette sous-estimation des débits de crue reflète toutefois une certaine insuffisance du modèle dans la reproduction des événements extrêmes.

En ce qui concerne les volumes totaux, le modèle a simulé un volume de 4 914,88 mm légèrement supérieur au volume observé de 4 769,33 mm. Cette différence acceptable traduit une bonne capacité du modèle à reproduire les écoulements cumulés.

Du point de vue des performances, le coefficient de Nash-Sutcliffe (NSE) évalué à 0,669 indique une similitude satisfaisante entre les débits simulés et observés. Le biais en pourcentage (PBIAS) de 3,05 %, reflète un biais modéré mais acceptable tandis que l'erreur quadratique moyenne normalisée (RMSE Std Dev) de 0,6, indique une faible dispersion des erreurs.

En conclusion, malgré une sous-estimation des débits de pointe le modèle HEC-HMS montre une performance satisfaisante sur une période différente de celle utilisée pour le calage, confirmant ainsi sa capacité à simuler correctement les écoulements du bassin versant.

Tableau 14 : Résultats de la validation du modèle HEC-HMS

Critères d'efficacité	R ²	Nash	Pbiais	RMSE
Valeur	0,71	0,67	3,05	0,6

V.6. SIMULATION DES DEBITS A L'HORIZON 2036-2065

V.6.1. CHOIX DES MODELES CLIMATIQUES

La comparaison des précipitations moyennes mensuelles simulées par les 14 modèles climatiques du projet NEX-GDDP-CMIP6 avec les données observées à la station de Bafing Makanan pour la période 1990-2014 est illustre par la Figure 16.

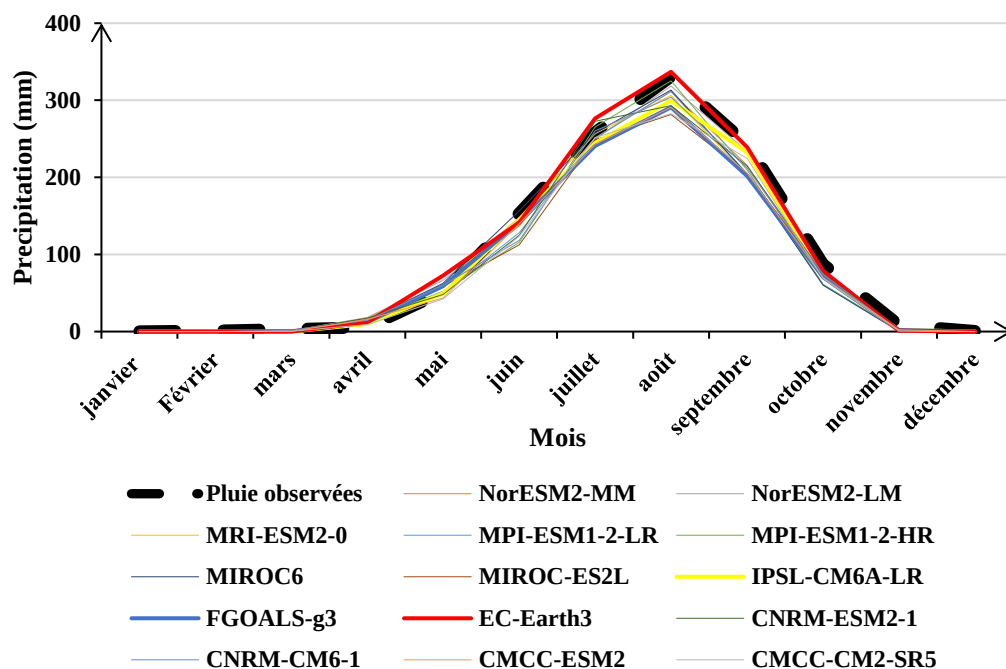


Figure 16 : Comparaison graphique des précipitations moyenne-mensuelles

Le critère graphique (Figure 16) montre que l'ensemble des 14 modèles climatiques globaux (MCG) est bien corrélé aux données d'observations, ce qui indique que les modèles ont une bonne capacité à reproduire la variabilité saisonnière des précipitations. Ce résultat est confirmé par le Tableau 15 montre que l'ensemble des 14 MCG ont tous un coefficient de détermination (R^2) très proche de 1 et des coefficients de variation assez proches de celui observé (1,266%) pour tous les modèles climatiques.

Tableau 15 : Statistiques descriptives des précipitations mensuelles pour différents MCG

Modèle	Moyenne (mm)	Écart-type (mm)	Coefficient de variation (%)	R ²
Observer	95,399	120,732	1,266	1
NorESM2-MM	88,601	112,797	1,273	0,9942
NorESM2-LM	92,358	115,482	1,250	0,9961
MRI-ESM2-0	88,961	111,882	1,258	0,9912
MPI-ESM1-2-LR	85,396	111,860	1,310	0,9911
MPI-ESM1-2-HR	87,086	116,442	1,337	0,9843
MIROC6	83,320	105,242	1,263	0,9883
IPSL-CM6A-LR	92,786	118,622	1,278	0,9979
FGOALS-g3	92,915	117,327	1,263	0,9946
EC-Earth3	96,584	123,226	1,276	0,9934
CNRM-ESM2-1	87,306	112,263	1,286	0,9862
CNRM-CM6-1	87,181	111,784	1,282	0,989
CMCC-ESM2	84,264	107,581	1,277	0,996
CMCC-CM2-SR5	83,669	109,384	1,307	0,9928

Toutefois, une évaluation plus profonde basée sur des critères de performance tels que l'erreur de biais moyen (MBE) et l'erreur absolue moyenne (MAE), a été réalisée afin d'identifier les modèles les plus performants. Ceux qui minimisent simultanément ces deux indicateurs d'erreur ont été sélectionnés pour mieux représenter les précipitations observées. Les résultats obtenus sont synthétisés dans le Tableau 16.

Tableau 16 : Critères d'évaluation de la sensibilité des précipitations en fonction des 14 modèles

MCG	MBE (mm/mois/an)	MAE (mm/mois/an)
NorESM2-MM	-6,798	10,292
NorESM2-LM	-3,042	7,620
MRI-ESM2-0	-6,438	9,836
MPI-ESM1-2-LR	-10,004	11,672
MPI-ESM1-2-HR	-8,314	10,942
MIROC6	-6,282	10,024
MIROC-ES2L	-12,079	15,000
IPSL-CM6A-LR	-7,613	8,324
FGOALS-g3	-8,484	10,783
EC-Earth3	1,185	7,482
CNRM-ESM2-1	-8,094	12,811
CNRM-CM6-1	-8,219	13,436
CMCC-ESM2	-11,135	12,831
CMCC-CM2-SR5	-11,731	12,930

Parmi les modèles climatiques évalués, EC-Earth3 se distingue comme étant excellent en termes de moyenne, d'écart-type et de R^2 . Ce modèle présente également les meilleures valeurs de MBE et MAE ce qui indique une très faible erreur moyenne et absolue, soulignant sa précision et sa fiabilité. D'un autre côté, IPSL-CM6A-LR se démarque par le R^2 le plus élevé, ce qui constitue un indicateur fort de sa capacité à reproduire fidèlement les observations. Ses valeurs de moyenne, d'écart-type et de coefficient de variation sont également très proches des observations, renforçant sa crédibilité. Enfin, bien que FGOALS-g3 soit légèrement moins performant que les deux autres modèles en termes de MBE et MAE, il affiche des valeurs de moyenne, d'écart-type et de coefficient de variation très proches des observations, accompagnées d'un R^2 élevé. En définitive, ensemble multi-modèle (EMM) constitué se compose de 03 modèles climatiques globaux qui sont : **IPSL-CM6A-LR**, **FGOALS-g3** et **EC-Earth3**. La Figure 17 présente le profil moyenne -mensuel des pluies pour les modèles qui se rapprochent au mieux à la pluviométrie de la station de Bafing Makanan.

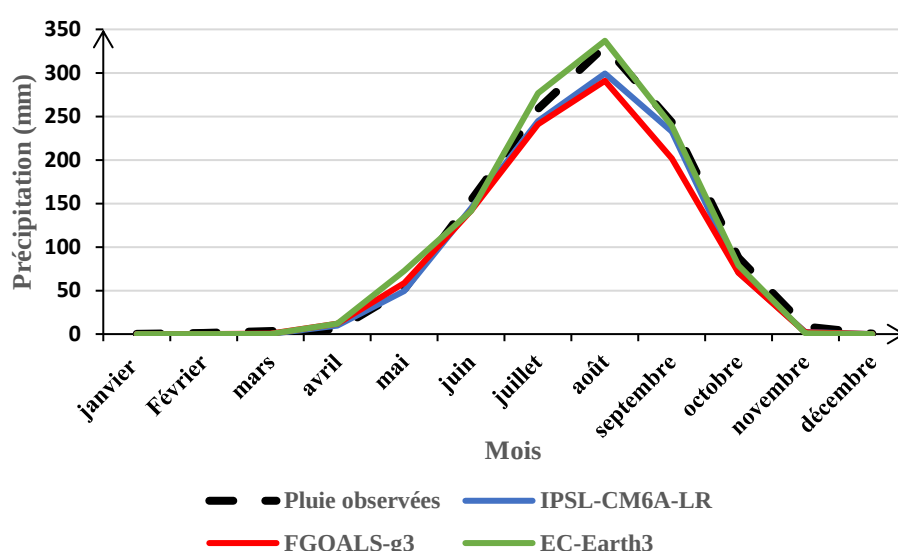


Figure 17 : Pluie moyenne-mensuelles simulée par les modèles climatiques

Après avoir sélectionné les trois modèles climatiques présentant la meilleure similitude avec les données pluviométriques observées à la station de Bafing Makanan, nous avons effectué une moyenne des résultats de ces trois modèles. Cette démarche permet de réduire les incertitudes associées à chacun de ces modèles tout en obtenant une estimation plus fiable et représentative des tendances climatiques. Cette moyenne est illustrée par la Figure 18.

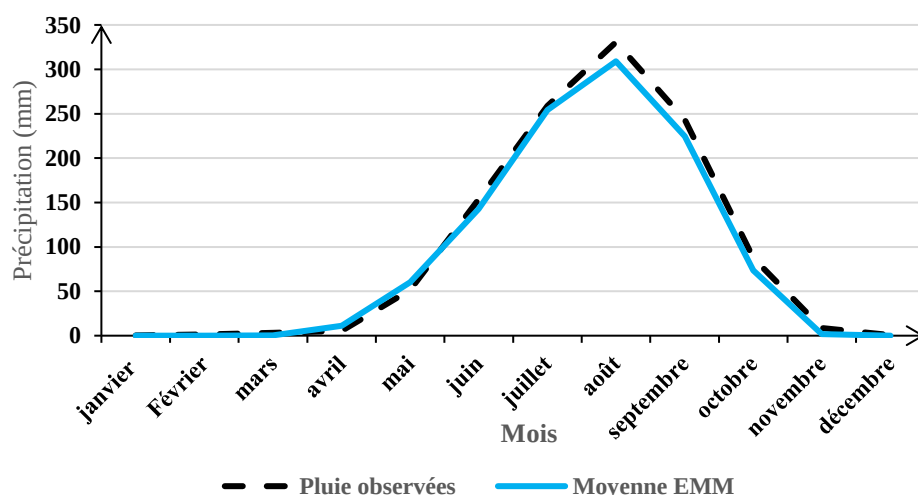


Figure 18 : Pluie moyenne-mensuelles à Makanan simulée par la moyenne EMM en période 1990-2014

Le cycle saisonnier de la température moyenne mensuelles à Makanan, simulé par la moyenne d'ensemble multi-modèle (EMM) sur la période 1990-2014 est présente par la Figure 19. Les cycles saisonniers des températures maximales et minimales observées (Tmax et Tmin) se révèlent similaires à ceux de l'historique climatique représenté par la moyenne EMM. Toutefois, entre juin et décembre des écarts sont observés entre les températures maximales observées et celles simulées par la moyenne multi-modèle, ainsi qu'entre janvier et mai pour les températures minimales. Ces écarts peuvent être attribués à des variations naturelles du climat ainsi qu'à des incertitudes et des biais dans les modèles climatiques.

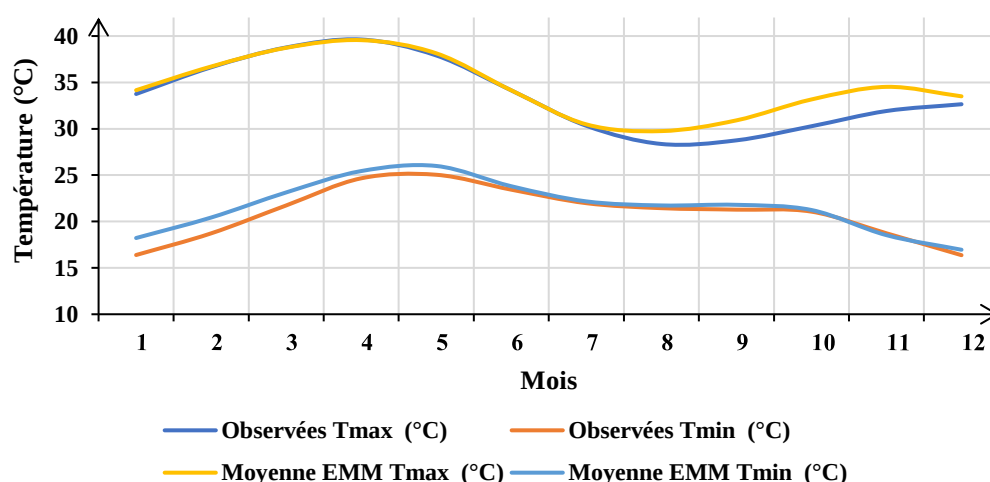


Figure 19 : Température moyenne mensuelles à Makanan simulée par la moyenne d'ensemble multi-modèle (EMM) en période 1990-2014

V.6.2. ANALYSE DES DONNEES CLIMATIQUES FUTURES

📊 Analyse des précipitations sur la période 2036-2065

L'analyse a porté sur les moyennes mensuelles des précipitations pour la période 2036-2065, selon les scénarios SSP2-4.5 et SSP5-8.5. D'après la Figure 20, une saison des pluies qui débute tôt et une fin retardée ont été observées. Les précipitations maximales sont enregistrées au mois d'août pour les deux scénarios, avec un pic d'environ 300 mm pour le SSP2-4.5 et 250 mm pour SSP5-8.5. On observe une pluie maximale d'environ 350 mm et se produit également au mois d'août.

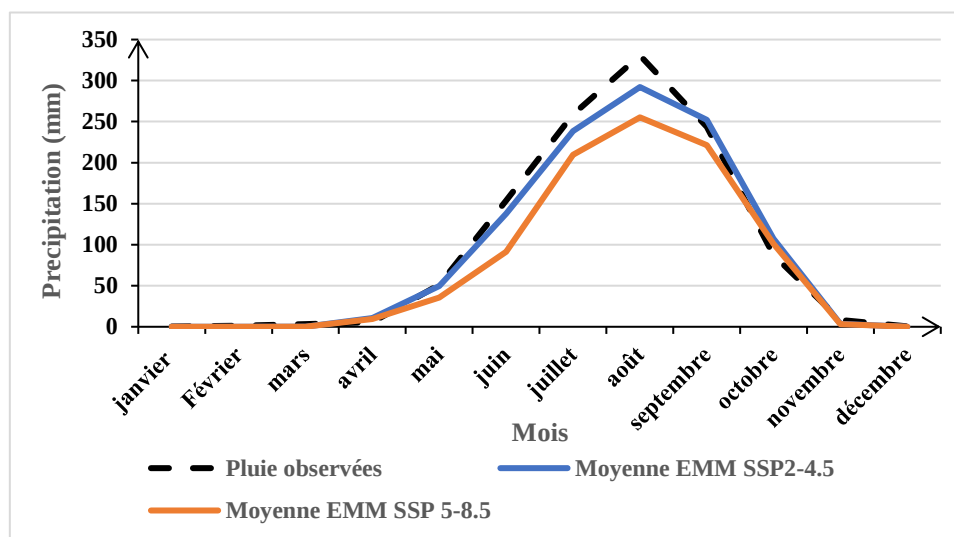


Figure 20 : Pluies moyenne-mensuelles à l'horizon 2036-2065 sous SSP2-4.5 et SSP5-8.5

La Figure 21 montre la variation relative des précipitations entre les périodes futures SSP2-4.5 et SSP5-8.5 et la période de référence (observée) pour chaque mois de l'année. Les valeurs au-dessus de 0% indiquent une augmentation des précipitations par rapport à la période de référence. Par exemple, le mois d'avril montre une augmentation significative des précipitations pour les deux scénarios, avec une hausse particulièrement marquée pour le scénario SSP2-4.5. Les valeurs en dessous de 0% indiquent une diminution des précipitations par rapport à la période de référence. Par exemple les mois de janvier, février, mars, et décembre montrent une diminution des précipitations pour les deux scénarios, avec des diminutions plus prononcées pour le scénario SSP5-8.5.

Le scénario SSP2-4.5 montre généralement des variations moins extrêmes que le scénario SSP5-8.5. Par exemple en avril, l'augmentation des précipitations est plus marquée dans le scénario SSP2-4.5, tandis que les diminutions sont plus prononcées pour le scénario SSP5-8.5 en janvier, février et décembre. En outre, le mois d'octobre montre également des augmentations significatives des précipitations pour les deux scénarios, bien que le scénario SSP2-4.5 présente souvent des variations plus modérées.

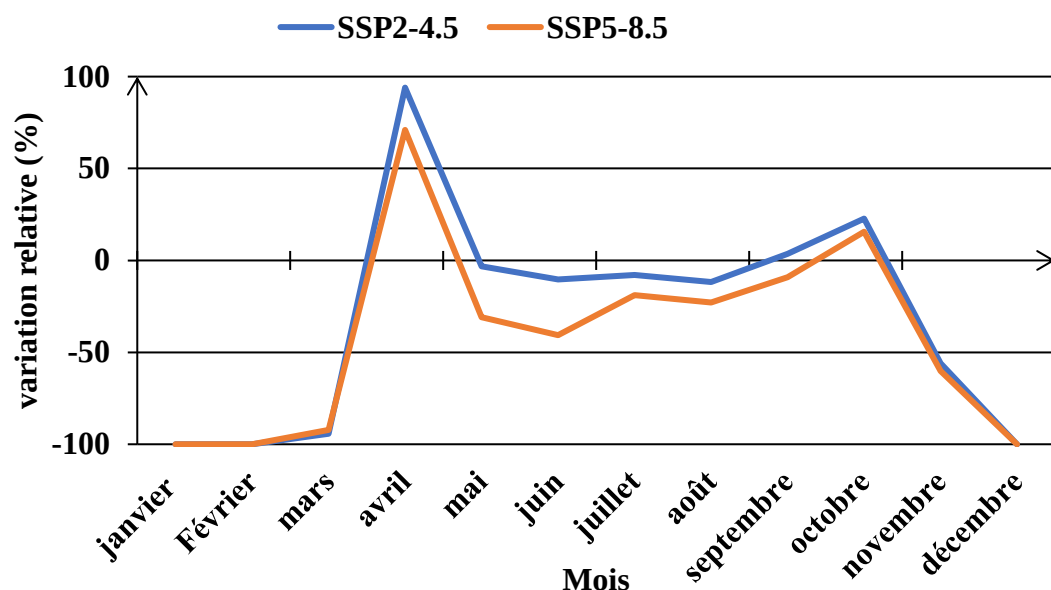


Figure 21 : Variation relative des précipitations entre les périodes futures et la période de référence

La Figure 22 illustre la distribution des précipitations annuelles pour chaque ensemble de données. La boîte noire, représentant les précipitations observées montre une médiane d'environ 1200 mm avec une variabilité s'étendant de 980 mm à 1700 mm. Concernant la boîte jaune (SSP2-4.5), la médiane est légèrement inférieure à celle des observations avec une variabilité allant d'environ 1000 mm à 1100 mm indiquant une légère diminution des précipitations annuelles par rapport aux observations. Sous le scénario SSP5-8.5, représenté par la boîte orange la médiane est plus basse que celle des observations et du scénario SSP2-4.5 avec une variabilité allant d'environ 900 mm à 1000 mm ce qui indique une diminution plus marquée des précipitations annuelles par rapport aux observations.

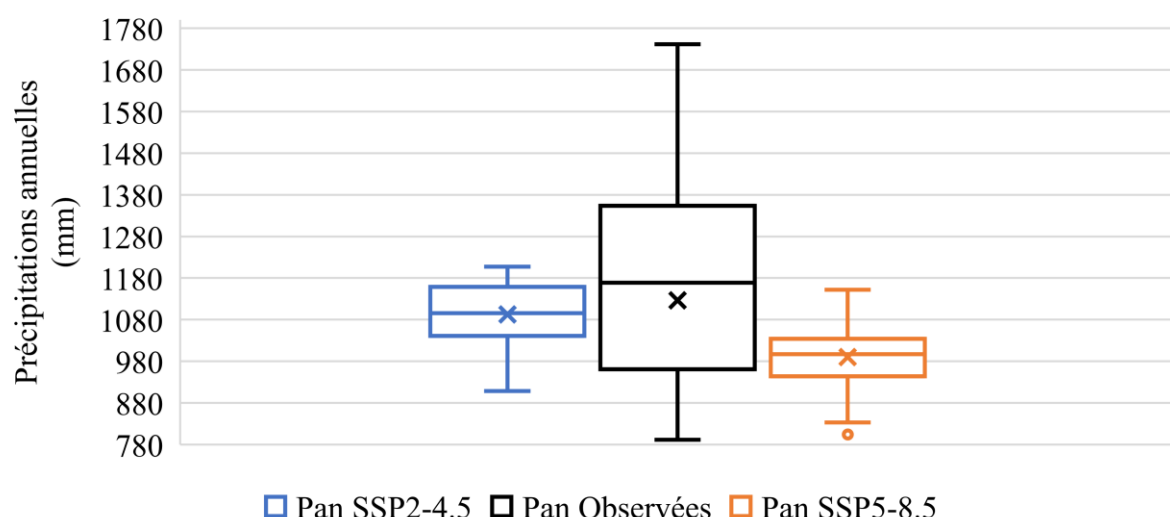


Figure 22 : Boîtes à moustaches des précipitations annuelles sur la période de référence et sur la période future

Cette analyse met en évidence une tendance générale à la baisse des précipitations futures dans le bassin, plus marquée sous le scénario SSP5-8,5. Elle souligne ainsi l'importance d'intégrer ces projections dans la planification de la gestion de l'eau.

🔗 Analyse de l'ETP sur la période 2036-2065

Pour estimer l'ETP de la période future, nous avons utilisé un modèle de calcul simple demandant peu de données. La méthode de Hargreaves et Samani (1985) a été retenue pour le calcul de l'ETP journalière.

La Figure 23 présente l'évolution mensuelle de l'évapotranspiration potentielle (ETP) historique et projetée à l'horizon 2036-2065 selon les scénarios climatiques SSP2-4.5 et SSP5-8.5. On observe une augmentation généralisée de l'ETP dans les deux scénarios par rapport aux valeurs historiques, particulièrement marquée de janvier à mai. Cette période correspond à une forte insolation et à des températures maximales élevées favorisant ainsi l'évaporation.

Cependant, une diminution de l'ETP est observée entre juin et octobre, période correspondant à la saison des pluies, durant laquelle l'humidité élevée de l'air et la couverture nuageuse limitent l'évaporation sous les scénarios SSP2-4.5 et SSP5-8.5. Ces résultats soulignent une intensification du déficit hydrique futur, notamment durant la saison sèche ce qui pourrait accentuer la pression sur les ressources en eau du bassin du Bafing.

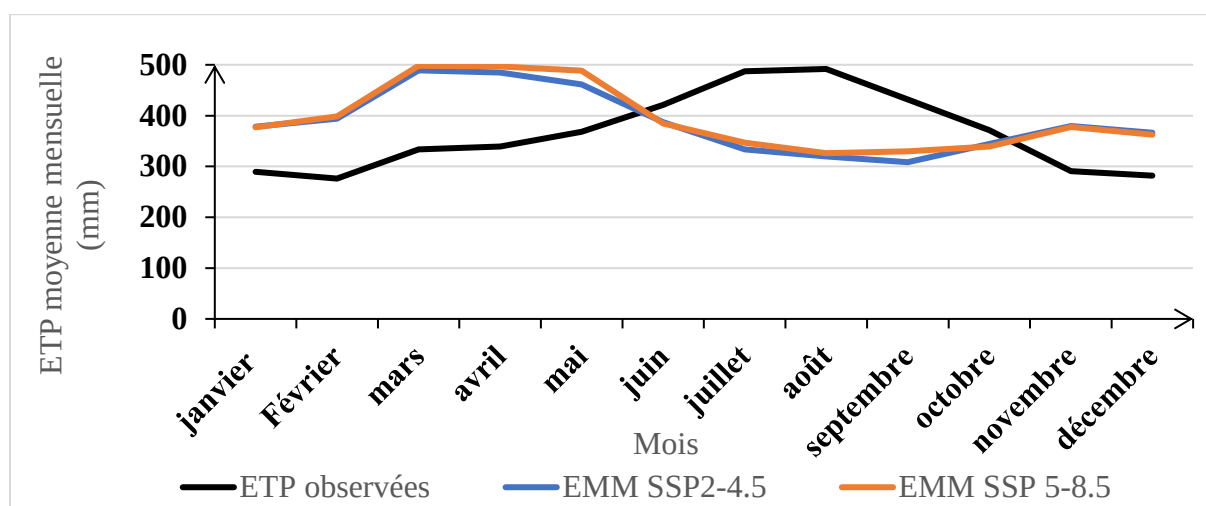


Figure 23 : ETP moyenne-mensuelles à l'horizon 2036-2065 sous SSP2-4.5 et SSP5-8.5

L'analyse de la Figure 24 montre la variation relative de l'évapotranspiration potentielle (ETP) entre les périodes futures et la période de référence selon deux scénarios climatiques SSP2-4.5 et SSP5-8.5. Pour le scénario SSP2-4.5, on observe une hausse notable de l'ETP entre février et avril atteignant environ +40 % liée à l'augmentation progressive des températures pré-saison des pluies. Ensuite, une baisse très marquée (supérieure à -30 %) apparaît en pleine saison des pluies (juillet-août) vraisemblablement due à un refroidissement temporaire. À partir d'août, l'ETP commence à augmenter à nouveau atteignant +30 % en novembre avec un retour vers des niveaux proches de la référence en décembre. Concernant le scénario SSP5-8.5, on remarque une amplification des mêmes tendances avec un pic presque doublé en mars indiquant un risque accru d'assèchement pré-saisonnier. Pendant la saison des pluies, l'ETP chute considérablement (jusqu'à environ -60 %) ce qui pourrait atténuer partiellement l'impact du stress hydrique sur les cultures. En fin d'année, la hausse atteint +60 % signalant une prolongation de la période à forte évaporation.

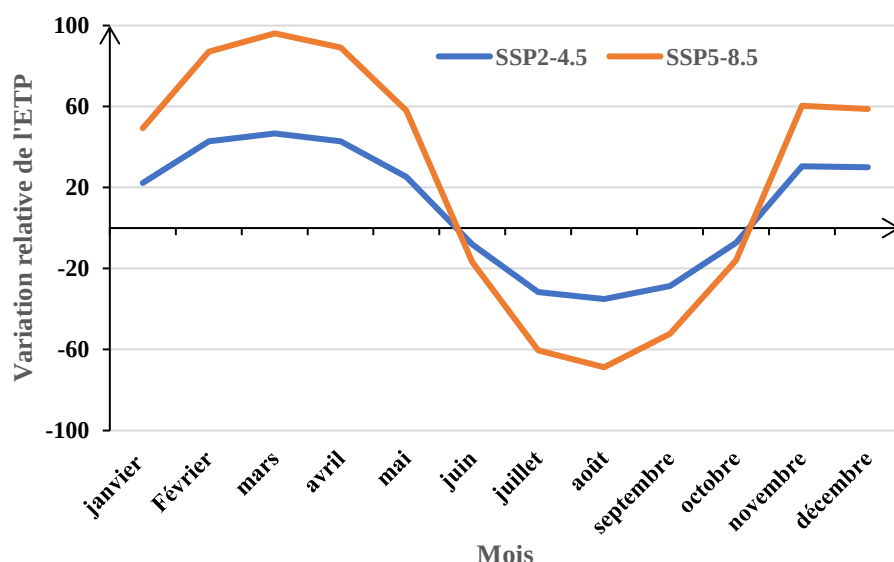


Figure 24 : Variation relative de l'ETP entre les périodes futures et la période de référence

V.6.3. SIMULATION DES DEBITS SOUS LES SCENARIOS SSP2-4.5 ET SSP5-8.5

V.6.3.1. HORIZON PROCHE 2036-2065 SOUS SSP2-4.5

Les débits simulés sous SSP2-4.5 (Figure 25) présentent une médiane d'environ $50 \text{ m}^3/\text{s}$, inférieure à celle des débits observés d'environ $70 \text{ m}^3/\text{s}$. Cet écart d'environ $20 \text{ m}^3/\text{s}$ suggère une sous-estimation des écoulements par le modèle. Le premier quartile (Q1) de chaque distribution est proche de $0 \text{ m}^3/\text{s}$, tandis que le troisième quartile (Q3) atteint $200 \text{ m}^3/\text{s}$ pour SSP2-4.5 contre $300 \text{ m}^3/\text{s}$ pour les valeurs observées. De plus, les débits maximaux atteignent environ $600 \text{ m}^3/\text{s}$ pour SSP2-4.5 alors que les observations enregistrent des pointes jusqu'à $900 \text{ m}^3/\text{s}$, indiquant une sous-évaluation des crues extrêmes par HEC-HMS. Comme l'ont souligné les travaux de Gaye (2022) et NDAO (2023) sous SSP2-4.5 les débits simulés sont plus faibles, plus homogènes et moins extrêmes que ceux mesurés à la station de Bafing-Makanan.

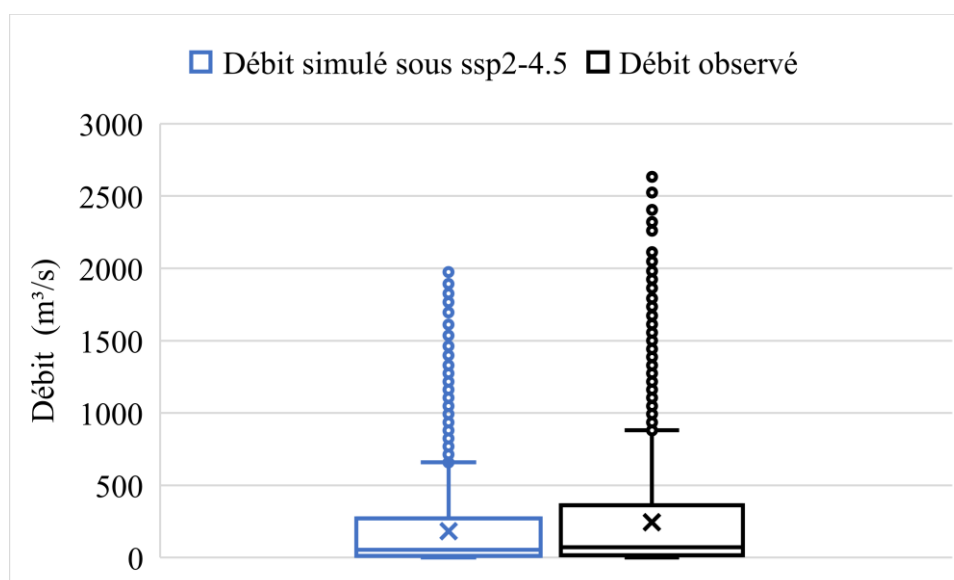


Figure 25 : Boîtes à moustaches des débits journaliers sous SSP2-4.5 et sur la période de référence

V.6.3.2. HORIZON PROCHE 2036-2065 SOUS SSP5-8.5

Les débits simulés sous SSP5-8.5 (Figure 26) révèlent une médiane faible d'environ 20 m³/s, alors que la médiane observée est d'environ 70 m³/s soit une différence marquée de 50 m³/s. Le premier quartile (Q1), proche de zéro dans les deux distributions témoigne d'une domination d'années à très faibles débits. En revanche, le troisième quartile (Q3) sous SSP5-8.5 atteint à peine 150 m³/s tandis que Q3 des données observées se situe au-delà de 300 m³/s soulignant une variabilité hydrologique deux fois plus marquée dans la réalité. Quant aux extrêmes, les valeurs maximales simulées sous SSP5-8.5 plafonnent à environ 500 m³/s contre 900 m³/s observés, ce qui révèle une nette sous-estimation des crues. Ce constat est confirmé par Gaye (2022), qui indique une baisse de 20 à 30 % des débits projetés sous SSP5-8.5 dans le bassin du Bafing bien que le modèle hydrologique utilisé soit le GR4J.

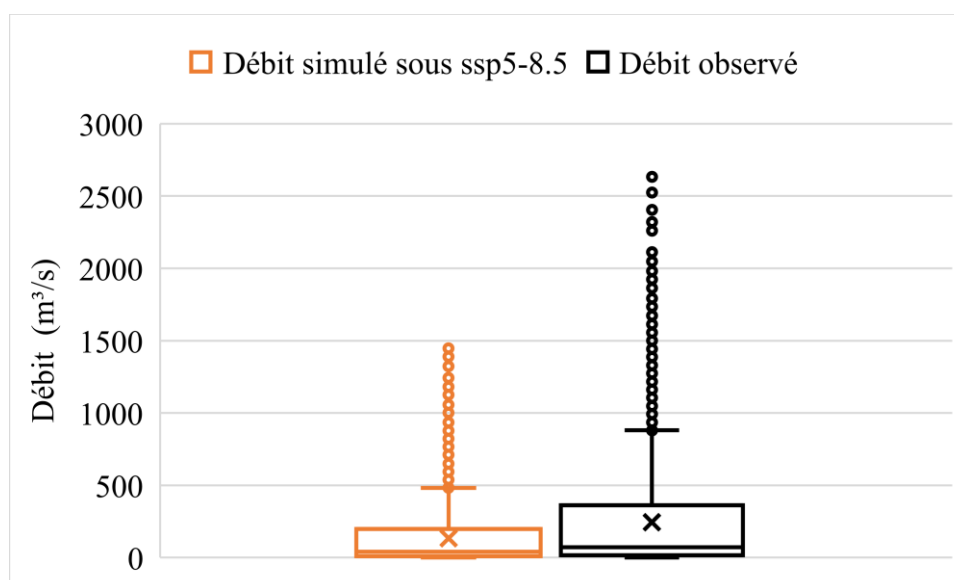


Figure 26 : Boîtes à moustaches des débits journaliers sous ssp5-8.5 et sur la période de référence

Les projections climatiques indiquent une réduction significative des précipitations annuelles par rapport à la période de référence, de l'ordre de 8,3 % sous le scénario SSP2-4.5 et de 20,8 % sous le scénario SSP5-8.5. Ces résultats sont confirmés par les travaux de Mahe et al. (2005). Parallèlement, l'évapotranspiration potentielle (ETP) déjà élevée actuellement, augmente nettement sous ces scénarios. Sous le scénario SSP2-4.5, l'ETP diminue de plus de 30 % entre juillet et août, tandis que le scénario SSP5-8.5 enregistre une hausse de plus de 50 % en fin d'année. Ce changement radical limite la quantité d'eau restituée aux cours d'eau en période de débit élevé.

Sur le plan hydrologique, cette combinaison se traduit par une réduction notable des débits simulés par HEC-HMS, comme cela a été confirmé par le coefficient de corrélation de Spearman ($\tau = 0,50$), indiquant une relation positive modérée entre les précipitations annuelles et le débit moyen annuel. On observe une diminution de 28,6 % sous le scénario SSP2-4.5, avec une médiane passant de 70 m³/s pour les données observées à environ 50 m³/s, et une diminution de 61,4 % sous le scénario SSP5-8.5, où la médiane chute à 20 m³/s. Le troisième quartile (Q3) baisse également, atteignant 150 m³/s pour le scénario SSP5-8.5 contre plus de 300 m³/s observés, de même que les crues maximales pour les deux scénarios. Ces résultats illustrent comment une réduction des pluies, combinée à un ETP accru, amplifie le stress hydrique, entraînant une diminution plus marquée de la production énergétique et des ressources en eau, avec des implications lourdes pour l'irrigation.

V.6.4. PROPOSITION DE STRATEGIES D'ADAPTATION ET D'ATTENUATION DES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Compte tenu des évolutions observées des paramètres climatiques, notamment de la pluviométrie et de l'évapotranspiration potentielle, il apparaît clairement que ces changements influenceront les ressources en eau du lac de Manantali ainsi que les systèmes hydrauliques qui en dépendent. Il est alors légitime de s'interroger sur les risques que ces mutations climatiques pourraient engendrer, et de réfléchir aux stratégies à mettre en œuvre pour en atténuer les effets ou y faire face efficacement.

V.6.4.1. RISQUES LIES AUX EFFETS DU CHANGEMENTS CLIMATIQUE

Comme risques liés aux changements en cours et à venir, nous pouvons citer :

- la réduction précoce ou l'assèchement total de certains cours d'eau et affluents, réduisant les flux entrants vers le lac ;
- l'ensablement progressif des lits fluviaux et des plans d'eau, souvent aggravé par des pratiques agricoles intensives ou mal maîtrisées, peut affecter la capacité de stockage du réservoir ;
- la dégradation des écosystèmes, notamment par la disparition progressive du couvert végétal et des zones humides, entraîne une baisse de la recharge des nappes phréatiques et une évapotranspiration accrue, ce qui limite encore davantage les contributions aux écoulements ;
- l'intensification des phénomènes extrêmes tels que les crues (hausse des débits et modification du régime hydrologique) et les épisodes de sécheresse (déficit pluviométrique, stress hydrique), perturbe l'équilibre saisonnier des apports.

V.6.4.2. QUELQUES STRATEGIES D'ADAPTATION ET D'ATTENUATION DE L'IMPACT DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

S'adapter au changement climatique en cours consiste à réduire la vulnérabilité du bassin versant. Cette adaptation peut s'opérer à plusieurs niveaux. Il s'agit notamment de :

- Optimisation de la gestion du réservoir de Manantali face aux impacts du changement climatique

Révision des règles de gestion des lâchers d'eau

Les règles de lâchers d'eau actuelles, historiquement établies sur la base de séries climatiques passées, ne sont plus totalement adaptées aux nouvelles dynamiques hydrologiques simulées. Une révision s'impose, fondée sur l'analyse des régimes futurs des débits, afin de mieux

concilier la satisfaction des besoins en aval, la prévention des situations de stress hydrique et la sécurité du barrage.

Élaboration de scénarios de gestion anticipative en période de sécheresse

Face à la diminution des apports, particulièrement marquée dans le scénario SSP5-8.5, il devient crucial de mettre en place des scénarios de gestion préventive en cas de sécheresse prolongée. Ces scénarios doivent inclure la constitution d'un stock stratégique d'eau pendant les périodes humides, utilisable en cas de déficit hydrique. Une priorisation des usages (hydroélectricité, irrigation, eau domestique) peut être définie en période critique, selon une logique d'arbitrage concertée entre les États membres de l'OMVS.

Intégration de modèles de prévision hydrométéorologique

L'introduction d'outils de prévision à court et moyen terme (modèles météo-hydrologiques couplés) permettrait d'adapter de façon dynamique les décisions de gestion du réservoir. Ces modèles, alimentés par des données climatiques actualisées (pluie, température, humidité du sol), peuvent aider à anticiper les crues et les sécheresses, et ainsi optimiser les volumes à libérer ou à stocker. L'intégration de ces outils dans les systèmes de décision de la SEMAF et des autres gestionnaires contribuerait à renforcer la résilience du barrage face à l'incertitude climatique.

- Gestion intégrée et durable de la ressource en eau

Développer une **approche de gestion intégrée du bassin versant** en associant tous les acteurs (OMVS, SEMAF, agriculteurs, etc.) ;

Mettre en œuvre des **techniques d'économie d'eau** dans les usages agricoles (irrigation goutte-à-goutte, calendrier culturaux adaptés).

- Adaptation du secteur agricole

Promouvoir des **cultures à faible besoin en eau** ou à cycle court dans les périmètres irrigués ;
Former les agriculteurs aux **bonnes pratiques agroécologiques** pour limiter la pression sur les ressources hydriques.

- Sécurisation de la production hydroélectrique

Envisager l'**hybridation énergétique** (solaire, thermique) pour réduire la dépendance exclusive à l'hydroélectricité ;

Améliorer le rendement des turbines existantes pour **maximiser la production avec moins d'eau**.

- La protection des écosystèmes

En termes de protection des écosystèmes, la réhabilitation et la gestion des espaces naturelles, les actions de reboisement, la mise en place des techniques de luttés contre l'érosion, le

désensablement des cours et plans d'eau (barrages) constituent des voies d'adaptation au changement climatique.

V.6.5. LIMITES DE L'ETUDE

Avant de livrer les conclusions définitives de l'étude, il est bon de se demander quelles sont les sources d'erreurs importantes, s'il y a lieu, propres aux différentes étapes de calcul. Ce recul sur le travail effectué a pour but d'évaluer la part d'incertitude ou au contraire de signaler la confiance envers les résultats énoncés et de proposer, avec un esprit critique, des recommandations pour de futures études d'impacts.

L'une des premières limites concerne les hypothèses de travail adoptées dans la présente modélisation. Le modèle HEC-HMS a été calibré et validé en supposant que les conditions d'occupation du sol et d'usage des terres sont restées stationnaires durant toute la période étudiée, c'est-à-dire sans prise en compte de leur évolution dans le temps. Aucune projection future des états de surface n'a été intégrée au modèle, ce qui constitue une source d'incertitude, notamment dans un contexte de pression anthropique croissante et de changement climatique susceptible d'affecter l'infiltration, le ruissellement et l'évapotranspiration.

Lors du calage et de la validation du modèle HEC-HMS, nous constatons une sous-estimation des débits de pointe simulés malgré l'obtention de critère de performance de qualité ($Nash > 0,679$). Cela pourrait s'expliquer par le nombre limité de station climatique dans le BV (03 stations climatiques pour une superficie de plus de 27000 km²). La subdivision du bassin nous a permis d'obtenir 08 sous-bassins avec des superficies allant de 1833,77 km² à 6556,07 km². Il aurait fallu avoir une station pluviométrique par sous-bassin afin d'avoir des précipitations plus précises dans chaque sous-bassin. Cela aurait permis certainement d'améliorer la qualité du calage et de la validation du modèle. Malgré tout, les 03 stations pluviométriques utilisées pour calibrer HEC HMS peuvent être qualifiées de relativement satisfaisantes et ne constituent pas une source d'erreurs majeure. Compte tenu de l'hétérogénéité du bassin, une réelle amélioration de la représentativité pourrait provenir de l'ajout d'autres sources de données.

Par ailleurs, certaines fonctions employées dans HEC HMS restent très simplifiées par rapport au processus réel. Le processus d'infiltration/ruissellement représenté par un sol à deux couches peut largement être amélioré. L'emploi du modèle Soil Moisture Accounting (SMA) pourrait y contribuer. C'est le modèle le plus complet et le plus adapté dans HEC HMS pour la modélisation en continu. Cependant, il est plus complexe et nécessiterait sans doute un temps plus important pour être calibré et des données additionnelles comme l'humidité du sol.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

La présente étude vise à comprendre le comportement hydrologique du bassin du fleuve Bafing dont l'exutoire est à Manantali face aux phénomènes de changement climatique dans l'optique d'une meilleure planification et gestion des ressources en eau du lac. Pour ce faire, nous avons d'abord analysé l'évolution des paramètres climatiques et hydrologiques et mis en évidence leurs impacts sur les ressources en eau. Ensuite, une modélisation pluie-débit a été effectuée à travers le modèle HEC-HMS complétée par la projection climatique à l'horizon 2036-2065 suivant les scénarios climatiques ssp2-4.5 et ssp5-8.5.

Le modèle a été calé et validé avec un critère de Nash de 67,9 % témoignant d'un bon ajustement entre les débits observés et simulés. Pour les projections futures du climat du bassin, la moyenne d'Ensemble Multi-Modèle (EMM) prévoit une hausse générale des températures, et une baisse des précipitations et des débits à l'horizon 2036-2065 suivant les 2 scénarios.

Il faut noter que les résultats de cette recherche présentent certaines limites et incertitudes malgré le fait que les scénarios obtenus semblent s'accorder quant à une bonne simulation des débits annuels observés. La sous-estimation des débits simulés sont généralement liées aux nombres de station limité dans le bassin. Cela constitue une des limites dans l'optique d'une bonne modélisation.

Dans l'optique d'améliorer la qualité des résultats de cette étude, la prise en compte des recommandations suivantes par la SEMAF serait appréciable. Il s'agit de :

- ✚ Utiliser un modèle qui intègre la dynamique des états de surface et qui comble les chroniques de débits comme le modèle SWAT ;
- ✚ Utiliser des méthodes de corrections de biais multivariées afin de prendre en compte les liens entre les variables climatiques ;
- ✚ Augmenter le nombre de station hydro-climatique dans le bassin ;
- ✚ Suivis permanent des écoulements au niveau des exutoires ;
- ✚ Intégrer les changements climatiques dans leur modèle de planification en utilisant les résultats de cette étude ;
- ✚ Faire une étude comparative entre modèle HEC HMS et le logiciel SIMULSEN que la société utilise.

BIBLIOGRAPHIE

- Akinsanola, A. A., & Ogunjobi, K. O. (2017). Evaluation of present-day rainfall simulations over West Africa in CORDEX regional climate models. *Environ. Earth Sci.* 76. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6691-9>.
- Ali Abd Al-Hameed, K. (2022). Spearman's correlation coefficient in statistical analysis. *International Journal of Nonlinear Analysis and Applications*, 13(1), 3249-3255.
- Ardoïn, B. (2004). Variabilité hydrographiques et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne.
- Arnell, N. W. (1999). Climate change and global water resources. 9, S31-S49.
- Bader, J.-C. (2010). Gestion du barrage de Manantali sur le fleuve Sénégal : Analyse quantitative d'un conflit d'objectifs.
- Bader, J.-C. (2014). Monographie du fleuve sénégal 2014.
- 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).
- Bergaoui, M., & Alouini, A. (2001). Caractérisation de la sécheresse météorologique et hydrologique : Cas du bassin versant de Siliana en Tunisie. *Sécheresse* 04 (12) : 205-213.
- 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_2012.
- Dassargues, A. (2022). Formation en modélisation hydrogéologie dispensée à l'université de Liège 05-16 Septembre 2022.
- DeFries, R. S., Foley, J. A., & Asner, G. P. (2004). Land-use choices : Balancing human needs and ecosystem function. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2(5), 249-257. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2004\)002\[0249:LCBHNA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2004)002[0249:LCBHNA]2.0.CO;2)
- Diallo, M. (2015). Étude géologique et structurale du socle birrimien de la région de Kayes (Mali).
- Diallo, S. (2021). Modélisation pluie-débit du bassin versant de la Comoé a Folonzo (Burkina Faso) à l'horizon 2031-2050 par le modelé HEC-HMS.
- Diene. (2023). Rapport-OMVS_syntheses-hydrogeologiques : Etude pour l'évaluation de l'état des connaissances en eaux souterraines dans le bassin du fleuve Sénégal.
- 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'Afrique sahélienne et tropicale sèche.
- Ferraz, L. L., Sousa, L. F., Silva, L. S., Silva, J. O., Tagliaferre, C., Santos, C. A. S., & Rocha, A. F. (2021). Calibration and validation of the SWAT model for hydrological simulation in a basin in Western Bahia.
- Gaye, I. T. (2022). Modélisation des impacts du changement climatique sur les ressources en eau du bassin versant du Bafing (Haut Bassin du fleuve du Sénégal)_2022.
- IDS, O. (2018). Etudes Diagnostiques détaillées sur la déforestation et l'érosion des sols dans le haut bassin du fleuve Sénégal (Guinée, Mali) et l'élaboration de plan d'actions associé et calendrier de mise en œuvre.
- Karambiri, H. (2003). Crues 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 (Thèse de Doctorat). Université Paris VI : Pierre et Marie Curie.
- Lebel, T., & Ali, A. (2009). Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990–2007). 52-64.
- Mahe, G., Olivry, J. C., & Servat, E. (2005). Sensibilité des cours d'eau ouest-africains aux changements climatiques et environnementaux : Extrêmes et paradoxes_ Université Montpellier 2 _2005.
- Michel, P. (1975). Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Etude géomorphologique. 237-242.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., & Van Liew, M. W. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Soil & Water Division of ASABE, 50(3), 885-900.
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models. Journal of hydrology.
- NDAO, T. D. (2023). Optimisation de la planification saisonnière de la production hydroélectrique du Barrage de Manantali au Mali dans un contexte de pression et d'incertitudes climatiques.
- Nicholson, S. E. (2005). On the question of the “recovery” of the rains in the West African Sahel. 63, 615-641.
- Noblet, M., Faye, A., Camara, I., Seck, A., Sadio, M., & Bah, A. (2018). Etat des lieux des connaissances scientifiques sur les changements climatiques pour les secteurs des ressources en eau, de l'agriculture et de la zone côtière. Projet d'Appui Scientifique aux processus de Plans Nationaux d'Adaptation dans les pays francophones les moins avancés d'Afrique subsaharienne”. Climate Analytics GmbH, Berlin, 76 pages.
- OMVS. (2017). Plan d'Action Stratégique de Gestion des Problèmes Environnementaux Prioritaires du Bassin du Fleuve Sénégal 2017-2037.
- OMVS. (2023). Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux du bassin du fleuve Sénégal à l'horizon 2050.
- O'Neill, B. C., Tebaldi, C., van Vuuren, D. P., Lamarque, J. F., & Meehl, G. A. (2021). Climate model projections from the Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) of CMIP6. Copernicus Publications on behalf of the European Geosciences Union, 41.
- Pohlert, T. (2023). Package 'trend' : Non-Parametric Trend Tests and Change-Point Detection.
- Raziei, T., & Pereira, L. S. (2013). Estimation of ETo with Hargreaves–Samani and FAO-PM temperature methods for a wide range of climates in Iran. Agricultural water management.
- Rocha, N. R. (2014). Débits de crue et analyse hydrologique de petits bassins versants. Université Laval.
- Sane, M. L., Sambou, S., Ndione, D., Leye, I., Kane, S., & Badji, M. (2017). Analyse et traitement des séries de débits annuels et mensuels sur le fleuve Sénégal en amont du barrage de Manantali : cas des stations de Bafing Makana et Dakka Saidou_2017.
- Scharffenberg, W. A., & Fleming, M. J. (2006). Hydrologic modeling system HEC-HMS: user's manual. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.
- Soussou, S., Masseck, B., Badji Ansou, M., Edmond, N., Malanda, N., Bodian, A., Kuruma, M., Mariko, A., & Bamba, F. (2011). Calage et validation des modèles hydrologiques

- GR4J et GR2M sur le bassin du Bafing en amont de Bafing-Makana : Vers l'étude de l'impact du climat sur les ressources en eau de la retenue de Manantali_2011.
- Soussou, S., Sane, M. L., Leye, I., Didier, M., Kane, S., & Mamadou, B. (2021). Calage et validation de SWAT sur le bassin versant du Bafing (Fleuve Sénégal) en amont de Bafing Makana : vers une application à la gestion du barrage de Manantali_2021.
- Tazen, F. (2015). Simulation et optimisation du fonctionnement du barrage de Boura en zone soudanienne du Burkina Faso (These). Institut d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE), Ouagadougou.
- Teutschbein, C., & Seibert, J. (2012). Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods.
- Traore, A. Z., Bokar, H., Sidibe, A., & Upton, K. (2018). Atlas de l'eau souterraine en Afrique : Hydrogéologie du Mali.
- Upton, K., & Dochartaigh, Ó. (2016). Africa Groundwater Atlas : Hydrogeology of Guinea.
- Yonaba, O. R. (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) [Phdthesis, Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement] (2iE), Ouagadougou.
- Zoure, C. O. (2019). Étude des performances hydrologiques des techniques culturales dans un contexte de changement climatique en zone sahélienne du Burkina Faso.

ANNEXES

Annexe 1: Typologie des modèles -----	V
Annexe 2: Modélisation du bassin versant (Batiénon, 2021) -----	VI
Annexe 3 : Code R pour le test de corrélation sur le rang de Spearman-----	VIII
Annexe 4 : Code R pour la Détection de tendance par le test de Mann–Kendall -----	X
Annexe 5: Code R extraction de données NetCdf (températures)-----	XII
Annexe 6 : Code R extraction de données NetCdf (Précipitations) -----	XIV

Annexe 1: Typologie des modèles

Facteurs de classement	Sous classe	Caractéristiques des modèles
Description des processus ou Variables	Approche déterministe	Un modèle est qualifié de déterministe lorsque toutes ses variables sont considérées comme non aléatoires.
	Approche stochastique ou probabiliste	Il s'agit d'un modèle où les variables d'entrée sont traitées comme des variables aléatoires, définies par des fonctions de densité de probabilité.
	Modèles dérivés des données	Qui peuvent être des modèles empiriques (lesquels vont établir des relations entre les variables d'entrée et de sortie sans tenir compte des lois et processus internes du bassin versant), les modèles à base d'hydrogramme unitaire , les modèles de régression et d'auto-régression linéaire et les modèles non linéaires (Yonaba, 2020)
	Modèles dérivés des processus	Qui peuvent être des modèles physiques ou conceptuels . Les modèles physiques, s'appuient sur la connaissance physique du système et sur les lois de la physique pour tenter de décrire les mécanismes des écoulements internes au bassin versant. Les modèles conceptuels constituent une classe intermédiaire entre les modèles empiriques et physiques (Yonaba, 2020)
Spatialisation ou suivant la représentation de l'espace	Modèles globaux.	Un modèle est qualifié de global lorsque le bassin versant est modélisé comme un unique ensemble de réservoirs superposés.
	Modèles distribués	Il divise le bassin versant en plusieurs entités spatiales en se basant sur des critères hydrologiques.
	Modèles semi-distribués	Un modèle semi-distribués représenté le bassin par plusieurs modèles globaux indépendants les uns des autres. C'est-à-dire il regroupe les entités spatiales du modèle distribué en sous bassins versants.
La discrétisation temporelle	Événementiels	Les modèles événementiels permettent de simuler uniquement les processus hydrologiques lors d'un épisode de pluie (Yonaba, 2020)
	Continus	Les modèles continus reproduisent la réponse hydrologique de manière ininterrompue sur une période étendue, incluant les périodes de sécheresse.

Annexe 2: Modélisation du bassin versant (*Batienon, 2021*)

Etape 1 : Prétraitement du terrain

Les opérations réalisées dans cette étape sont : Correction du MNT par le remplissage des vides (**FillSinks**) : Lors de la réalisation du MNT plusieurs erreurs ont été commises provoquant ainsi des zones de dépressions. Dans cette opération on procède au remplissage de ces zones de dépressions en augmentant l'altitude des cellules afin de déterminer le sens de l'écoulement ; Sens de l'écoulement (**Flow Direction**) : Dans cette opération on détermine la direction de chaque cellule suivant huit (8) directions possibles (Nord, Nord-Est, Est, Sud, Sud-Est, Sud-Ouest, Ouest, Nord-Ouest) ; Accumulation de l'écoulement (**Flow accumulation**) : Détermination du nombre de cellules ascendantes s'écoulant dans une cellule donnée ; Définition des cours d'eau (**Stream Définition**) : Les cours d'eau sont classifiés sous forme de cellule à partir d'un seuil qui peut être soit comme une surface ou un nombre de cellules ; Segmentation des cours d'eau (**Stream Segmentation**) : Les cours d'eau sont segmentés ; Délimitation des sous bassins-versants (**Catchment Grid Delineation**) : Les limites des sous bassins versants ou les lignes de partage des eaux sont tracées pour chaque segment ; Polygones des sous bassins versants (**Catchment Polygone Processing**) : Conversion de la représentation en grille des sous bassins versants en représentation vectorielle ; Traitement des segments de cours d'eau (**Drainage Line Processing**) : Cette opération convertit les ruisseaux de la représentation en grille en représentation vectorielle. Agrégation des lignes de partage (**Adjoint Catchment Processing**) : Les sous bassins sont désagrégés à chaque confluence de ruisseaux ; Création de l'exutoire (batch point) : Définition de l'exutoire pour la délimitation du bassin versant ; Délimitation du bassin versant (**Batch watershed Delineation**) : Le bassin versant est délimité à travers l'exutoire déjà créé ci-dessus.

Etape 2 : Génération du projet Les opérations réalisées dans cette étape sont :

Commencement d'un nouveau projet (**Start New Project**) : Il s'agit dans cette opération de créer un nouveau projet. Génération du projet (**Generate project**) : génération de tous les éléments du prétraitement de terrain dans le nouveau projet.

Etape 3 : Extraction des caractéristiques du bassin versant

Les opérations réalisées dans cette étape sont énumérées comme suites : Détermination des longueurs des cours d'eau (**River length**) ; Détermination des pentes des cours d'eau (**River Slope**) ; Détermination de la pente de chaque sous bassin versant (**Basin Slope**) ; Détermination du plus long chemin hydraulique de chaque sous bassin versant (**Longest FlowPath**) ; Détermination des centroides des sous bassins versants (**Basin Centroid**) ; Détermination des altitudes de ces centroides (**Centroid Elevation**) ; Détermination du long chemin hydraulique,

allant du centroïde à l'exutoire de chaque sous bassin versant (**Centroid Longest FlowPath**) ;

Etape 4 : Paramétrage du modèle HEC-HMS

Les opérations réalisées dans cette étape sont énumérées comme suites : Sélection des modules (**Select HMS Process**) : Il s'agit de choisir la fonction de production, la fonction de transfert, l'écoulement de base et l'écoulement Fluvial ; Auto-nomination des cours d'eau : (River Auto Name) ;

Auto nomination des sous bassins versants (**Basin Auto Name**) ; Paramètres des sous bassins (**Sub Basin Parameters from Raster**) : Les paramètres diffèrent en fonction du choix des modules ;

Etape 5 : Schématisation du bassin versant

Les opérations réalisées de cette étape sont : Définition des unités du HEC-HMS (**Map to HMS Units**) ; Contrôle de toutes les opérations déjà réalisées (**Check Data**) : vérifier la concordance de ces opérations à travers le résumé proposé ; Schématisation du bassin versant (**HMS schematics**) : Cette opération permet de construire un réseau hydrologique simple qui contient les éléments du modèle. Elle crée une couche qui montre les nœuds des sous-bassins (placés aux centres des sous-bassins), les nœuds de jonction, l'exutoire, et la connexion entre ces éléments. Ajout des coordonnées géographiques (**Add coordinates**) : les coordonnées seront ajoutées aux nœuds et aux liaisons créés par la schématisation du bassin. Préparation des données pour l'exportation dans HEC-HMS (Prepare Data for Model Export) Enregistrement des sous bassins versants et des cours d'eau dans le dossier du projet (Background Shape File) Création du projet HMS (**Create HEC-HMS Project**) : C'est l'opération finale HEC GeoHMS, qui consiste à créer le projet pour prépa

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

```
# Charger readxl

library(readxl)

# Chemin de base

chemin_base <- "E:/SEMAF/PFE/Hydrologie/Modélisation/test trad/"

# Importer les fichiers

pluie_df <- read_excel(paste0(chemin_base, "plui.xlsx"))

debit_df <- read_excel(paste0(chemin_base, "hydro-moyennes-annuelles.xlsx"))

# Vérifier les noms de colonnes

names(pluie_df) # "Année", "Pluie"

[1] "Année" "Pluie"

names(debit_df) # "Année", "Débit moyen annuel (m³/s)"

[1] "Année"          "Débit moyen annuel (m³/s)"

# Extraire les vecteurs de données

pluie <- pluie_df$Pluie

debit <- debit_df$`Débit moyen annuel (m³/s)` # Utilisation des backticks appropriés

# Appliquer le test de Spearman

test_spearman <- cor.test(pluie, debit, method = "spearman", exact = FALSE)

# Afficher les résultats

cat("Résultats du test de Spearman :\n")

Résultats du test de Spearman :

cat(" - rho =", round(test_spearman$estimate, 3), "\n")

- rho = 0.495

cat(" - p-value =", signif(test_spearman$p.value, 3), "\n")

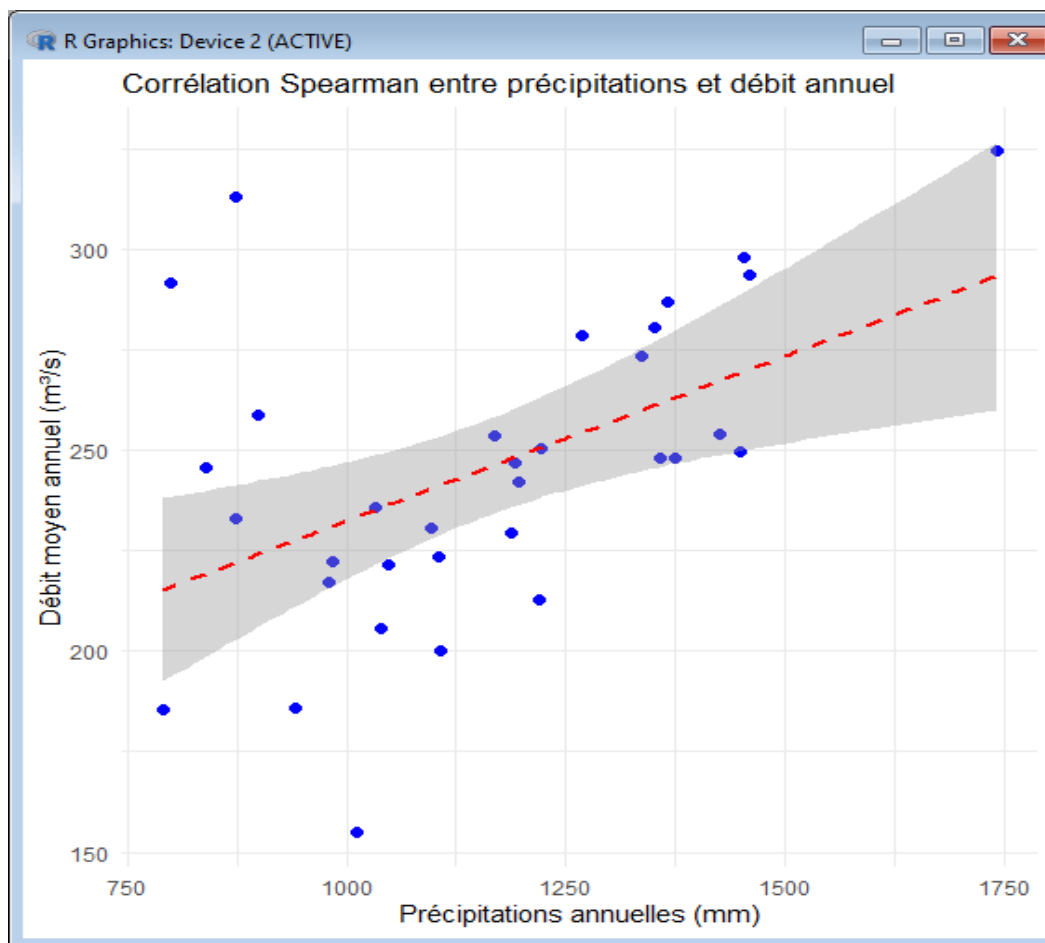
- p-value = 0.00338

# Charger ggplot2 pour une visualisation efficace

if (!require(ggplot2)) install.packages("ggplot2")

library(ggplot2)
```

```
# Créer un data frame pour ggplot
df_plot <- data.frame(Pluie = pluie, Debit = debit)
# Tracer
ggplot(df_plot, aes(x = Pluie, y = Debit)) +
+ geom_point(color = "blue", size = 2) +
+ geom_smooth(method = "lm", se = TRUE, color = "red", linetype = "dashed") +
+ labs(
+ title = "Corrélation Spearman entre précipitations et débit annuel",
+ x = "Précipitations annuelles (mm)",
+ y = "Débit moyen annuel (m³/s)"
+ ) +
+ theme_minimal()
`geom_smooth()` using formula = 'y ~ x'
y = "Débit moyen annuel (m³/s)"
```



Annexe 4 : Code R pour la Détection de tendance par le test de Mann–Kendall

```
library(ggplot2)

library(readxl)

# Charger les données

data <- read_excel("E:/SEMAF/PFE/Hydrologie/Modélisation/test trad/plui.xlsx")

# Créer le graphique

p <- ggplot(data, aes(x = Année, y = Pluie, color = "Pluies annuelles")) +

  geom_line(size = 1) + # uniquement la ligne de la courbe

  scale_color_manual(values = c("Pluies annuelles" = "blue")) +

  scale_x_continuous(

    breaks = seq(1990, 2020, by = 5),

    limits = c(1990, 2022)) +

  scale_y_continuous(

    breaks = seq(800, 1600, by = 200),

    limits = c(800, 1600)) +

  labs(x = "Année", y = "Précipitations (mm)", color = NULL) +

  theme_minimal(base_family = "Times New Roman", base_size = 12) +

  theme(

    legend.position = "top",

    legend.text = element_text(face = "bold", color = "black", size = 12),

    axis.title.x = element_text(face = "bold", color = "black", size = 12),

    axis.title.y = element_text(face = "bold", color = "black", size = 12),

    axis.text = element_text(face = "bold", color = "black", size = 12),

    panel.grid.major.x = element_line(color = "grey40", size = 0.4),

    panel.grid.major.y = element_line(color = "grey40", size = 0.4),

    panel.grid.minor = element_blank(),

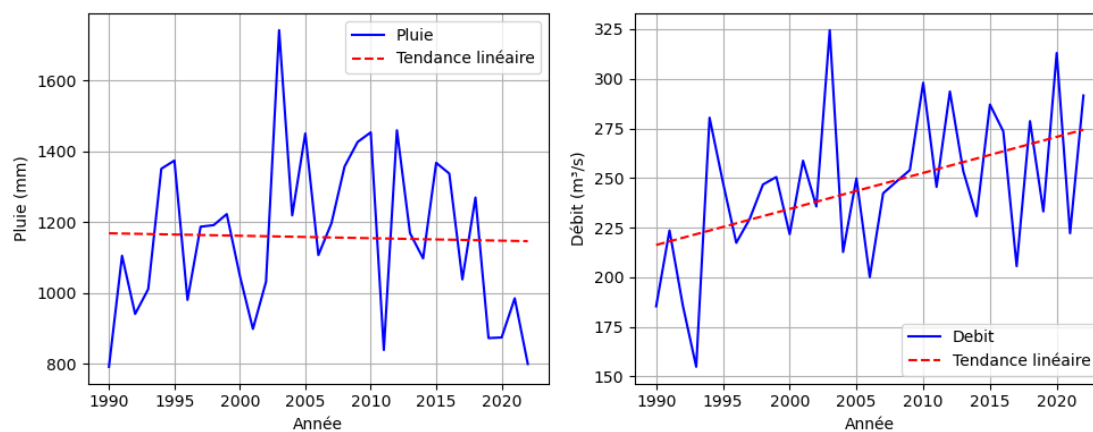
    panel.border = element_rect(color = "black", fill = NA, size = 0.5),
```

```
axis.line      = element_blank(),
```

```
plot.title     = element_blank())
```

```
# Afficher
```

```
print(p)
```



Annexe 5: Code R extraction de données NetCdf (températures)

```
# Effacer les objets en mémoire
rm(list = ls())

# Charger les packages nécessaires
library(raster)
library(readxl)
library(tidyverse)
library(openxlsx)

# Fixer le répertoire principal
setwd("C:/Users/user/Documents/Manantali proj/Projection/CMIP5AMMA/RCP45/Tmin/")

# Charger les coordonnées des stations
coord_station <- data.frame(
  X = -10.2833, # Longitude
  Y = 12.55    # Latitude)

# Chemin d'accès au fichier NetCDF
nc_file <- "tasmin_EWEMBI_1979-2013_0.5x0.5_day_MPI-ESM-
LR_africa_rcp45_r1i1p1_full.nc"

# Vérifier si le fichier NetCDF existe
> if (!file.exists(nc_file)) { stop("Le fichier NetCDF spécifié est introuvable. Veuillez vérifier
le chemin.") }

> # Charger les données NetCDF et convertir de Kelvin en Celsius
temp_brick <- brick(nc_file) - 273.15

# Extraction des données pour la station
temp_extract <- raster::extract(temp_brick, coord_station) %>%
  t(.) %>%
  round(., 3)

# Récupération des dates pour la période 2026-2065
dates <- seq(as.Date("1979-01-01"), as.Date("2013-12-31"), by = "day")

# Ajuster les longueurs des données extraites si nécessaire
temp_extract <- temp_extract[1:length(dates)]

# Créer un data.frame avec les résultats
result <- data.frame(
  Date = dates,
  Annee = format(dates, "%Y"),
```

```
Mois = format(dates, "%m"),  
Jour = format(dates, "%d"),  
Temp_min = temp_extract # Température minimale en °C  
)  
# Exporter les résultats au format Excel  
output_file <- "Resultat_Tasmin_MPI-ESM-LR_RCP45_2026_2065.xlsx"  
write.xlsx(result, output_file)  
# Confirmation  
print(paste("Extraction terminée et fichier Excel généré:", output_file))  
[1] "Extraction terminée et fichier Excel généré: Resultat_Tasmin_MPI-ESM-  
LR_RCP45_2026_2065.xlsx"
```

Annexe 6 : Code R extraction de données NetCdf (Précipitations)

```
# Effacer les objets en mémoire rm(list = ls())
# Charger les packages nécessaires
library(raster)
library(tidyverse)
library(openxlsx)
# Fixer le répertoire de travail
setwd("C:/Users/user/Documents/Manatali proj/Projection/CMIP5AMMA/Historique/")
# Charger les coordonnées de la station
coord_station <- data.frame(X = -10.2833, Y = 12.55) # Longitude et latitude de la station
# Charger le fichier NetCDF
nc_file <- "C:/Users/user/Documents/Manatali
proj/Projection/CMIP5AMMA/Historique/pr_EWEMBI_1979-
2013_0.5x0.5_day_HadGEM2-ES_africa_historical_r1i1p1_full.nc"
# Charger les données NetCDF
pcp_brick <- brick(nc_file)
# Extraction des données pour les coordonnées de la station
# Multiplication par 86400 pour convertir les précipitations journalières en mm/jour
pcp_extract <- raster::extract(pcp_brick * 86400, coord_station) %>%
  t(.) %>%
  round(., 3)
# Récupérer les dates à partir des données NetCDF (1990-01-01 à 2013-12-31)
dates <- seq(as.Date("1990-01-01"), as.Date("2013-12-31"), by = "day")
# Ajuster les longueurs si nécessaire
pcp_extract <- pcp_extract[1:length(dates)]
# Créer un data.frame avec les résultats
result <- data.frame(
  Date = dates,
  Annee = format(dates, "%Y"),
  Mois = format(dates, "%m"),
  Jour = format(dates, "%d"),
  Pcp = pcp_extract # Précipitations en mm/jour )
# Exporter les résultats au format Excel
write.xlsx(result, "Resultat_Precipitations_HadGEM2-ES_1990_2013.xlsx")
```

Confirmation

print("Extraction terminée et fichier Excel généré.")

[1] "Extraction terminée et fichier Excel généré."