



**ANALYSE DE L'IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET DE
L'AMENAGEMENT D'UN BAS-FOND SUR LE REGIME
HYDROLOGIQUE DU BASSIN VERSANT : CAS DU BASSIN
VERSANT DE BANKANDI-LOFING A DANO (BURKINA FASO)**

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

SPECIALITE : GENIE CIVIL ET HYDRAULIQUE

OPTION : INFRASTRUCTURE ET RESEAU HYDRAULIQUE

Présenté et soutenu publiquement le 28 Septembre 2020 par

DAKPEDE Vignon Romaris

Encadrant 2iE : **Dr Dial NIANG**

Maître Assistant

Enseignant chercheur en hydrologie

Maître de stage : **Dr Jean HOUNKPE**

Spécialiste en Changements Climatiques et Ressources en Eau

WASCAL

Structure d'accueil du stage: **WASCAL Competence Center**

Jury de Soutenance:

Président : Dr. Sossou SERAM

Rapporteurs : M. Roland YONABA

M. Axel BELEMTOUGRI

Promotion [2019-2020]



Dédicace

Je tiens à dédier ce modeste travail :

A mes parents Lucien et Joséphine DAKPEDE ainsi qu'à mes frères Arnaud, Junior DAKPEDE pour leur soutien, leur confiance et leur amour infini au quotidien.

Citation

*Cet univers ne serait pas grand-chose s'il n'abritait pas
les gens qu'on aime.*

Stephen Hawking

Remerciement

Je ne saurais débiter cette rubrique sans remercier **L'Éternel Dieu tout puissant**, lui sans qui rien n'est, et sans la bénédiction ainsi que la grâce de qui, mon parcours à l'institut 2iE ainsi que ce travail n'auraient jamais été accomplis.

Je souhaiterais adresser mes remerciements, les plus sincères à l'endroit de toutes les équipes, aussi bien pédagogiques qu'administratives de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) pour m'avoir accueilli et intégré dans un environnement multiculturel au sein duquel j'ai pu m'épanouir et acquérir à la fois savoir-faire et savoir-vivre.

Par le biais du chef de département, le **Pr Abdou LAWANE GANA**, je profite également pour remercier particulièrement, tout le département « Génie Civil et Hydraulique », pour tout le savoir ainsi que les vertus qu'ils m'ont transmis tout au long de cette formation, dans les domaines du génie civil et de l'hydraulique.

J'adresse également l'expression de ma profonde gratitude et ma haute reconnaissance au :

Dr. DIAL Niang, mon encadreur académique, pour sa disponibilité ainsi que le soutien et la patience dont il a fait preuve dans le suivi et l'encadrement, et cela malgré la distance.

Prof Kehinde Olufunso OGUNJOBI, Directeur de recherche du Centre de Compétence de WASCAL, pour m'avoir offert l'opportunité de faire ce stage au sein de son Institut.

Dr Jean HOUNKPE, mon encadreur externe, pour son suivi et ses conseils, lui qui malgré ses nombreuses responsabilités en tant que chercheur au sein du Centre de compétence de WASCAL, m'a accordé du temps et surtout de la confiance tout au long du travail.

Toute l'équipe du Centre de Compétence de WASCAL, pour m'avoir accueilli, intégré et permis de vivre cette aventure incroyable à ses côtés.

Que toutes les personnes non citées, qui m'ont soutenu et continue de me soutenir de près ou de loin, trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

Résumé

La présente étude évalue l'impact du changement climatique et des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique du bassin versant de Bankandi-Lofing en combinant simulation hydrologique, application de scénarios de changement climatique à travers des modèles climatiques régionaux HadGEM2-ES/RegCM4 et MPI-ESM-MR/RegCM4 et des analyses statistiques. Le signal de changement climatique projeté sur le bassin versant a été analysé en comparant les simulations d'une période future (2031-2060) aux observations historiques (1981-2010). Les données simulées par les modèles climatiques régionaux ont été corrigées avec la méthode du quantile mapping. L'impact du changement climatique sur l'eau de surface a été analysé en simulant les débits historiques et futurs à l'aide des modèles hydrologiques GR4J et HBV qui ont été préalablement calés et validés sur le bassin avec des performances évaluées par des critères (NSE, KGE et R^2).

Les résultats de la modélisation indiquent que GR4J et HBV reproduisent de manière satisfaisante les comportements hydrologiques de la zone d'étude. Le modèle HadGEM projette une augmentation de la température de 1,2 à 4,4°C contre 0,1 à 2,9°C pour MPI. Quant à la pluie, le modèle HadGEM projette une diminution annuelle de 4% tandis que MPI prévoit une augmentation moyenne d'environ 30%. Le sens de variation des débits projetés correspondent aux sens de variation des précipitations. Les débits simulés varient entre les modèles hydrologiques pour le même modèle climatique. Le modèle HadGEM projette une diminution du débit moyen annuel. Cette diminution est estimée à 25% par le GR4J et à 9% par HBV. Le modèle MPI projette une augmentation qui est estimée à 27% par GR4J et 16% par HBV.

Les analyses effectuées sur les données d'avant et d'après aménagement du bas-fond de Bankandi ont révélé que les débits observés en 2018 ne sont pas uniquement dû à l'amélioration de la capacité de drainage du périmètre mais aussi à la pluie décennale tombée cette année.

Mots clés : Changement climatique, Modèle hydrologique, Bankandi-Lofing, Adaptation au changement climatique

Abstract

This study assesses the impact of climate change and the Bankandi lowland developments on the hydrological regime of the Bankandi-Lofing watershed by combining hydrological simulation, application of climate change scenarios through HadGEM2-ES and MPI-ESM-MR regional climate models and statistical analyses. The projected climate change signal over the watershed was analysed by comparing simulations of a future period (2031-2060) with historical observations (1981-2010). The data simulated by the regional climate models were corrected using the quantile mapping method. The impact of climate change on surface water was analysed by simulating historical and future flows using the GR4J and HBV hydrological models which were previously calibrated and validated on the basin with performances evaluated by criteria (NSE, KGE and R2).

The results of the modelling indicate that GR4J and HBV reproduce the hydrological behaviour of the study area in a satisfactory manner. The HadGEM model projects a temperature increase of 1.2 to 4.4°C compared to 0.1 to 2.9°C for MPI. As for rainfall, the HadGEM model projects an annual decrease of 4% while MPI forecasts an average increase of around 30%. The direction of variation of the projected flows corresponds to the direction of variation of rainfall. Simulated flows vary between hydrological models for the same climate model. The HadGEM model projects a decrease in the mean annual flow. This decrease is estimated at 25% by the GR4J and 9% by HBV. The MPI model projects an increase which is estimated at 27% by GR4J and 16% by HBV.

Analyses carried out on pre- and post-development data for the Bankandi lowland revealed that the flows observed in 2018 are not only due to the improved drainage capacity of the perimeter but also to the decadal rainfall this year.

Keywords: Climate change, Hydrological model, Bankandi-Lofing, Adaptation to climate change

Liste des abréviations

CAD:	Casier Arroseur Drain
CEDEAO:	Communauté Economique des Etats membres de l’Afrique de l’Ouest
CMIP5-ESM:	Couple Model Intercomparison Project Phase 5- Earth System Models
CORDEX:	Coordinated Regional Downscaling Experiment
DCN:	Digette en Courbe de Niveau
DGM:	Direction Générale de la Météorologie
GES:	Gaz à Effet de Serre
GIEC:	Groupe d’expert Intergouvernemental sur l’Evolution du Climat
HADGEM2-ES:	Hadley Center Global Environment Model version 2-Earth System configuration
ICTP:	International Centre For Theoretical Physics
KGE:	Kling Gupta Efficiency
MCG:	Modèle Climatique Global
MCR:	Modèle Climatique Regional
MPI-ESM-MR:	Max-Planck Institute Earth System Model-Medium Resolution
NSE:	Nash Sutcliffe Efficiency
PNA:	Plan National d’Adaptation au changement climatique
RCP:	Representative Concentration Pathways
RegCM4:	Regional Climat Model version 4
WASCAL:	West African Science Service Centre for Dry Land and Adapted Land Use
WWDR:	World Water Development Report
R ² D ²	Rank Resampling for Distributions and Dependences
dOCT	Dynamical Optimal Transport Correction
SDSM	Statistical downscaling model
MRec	Matrix Recorrelation
MBC _n	Multivariate Bias Correction with N-dimensional probability density function transform

Table des matières

<i>Dédicace</i>	i
<i>Citation</i>	ii
Remerciement.....	iii
Résumé	iv
Abstract	v
Liste des abréviations	vi
Liste des tableaux	xi
I. Introduction générale.....	1
1.1. Contexte général.....	1
1.2. Problématique.....	2
1.3. Objectif de l'étude	3
1.4. Les questions de recherches	3
1.5. Plan de rédaction	4
II. Revue de littérature	5
2.1. La modélisation hydrologique.....	5
2.2. La modélisation climatique	6
2.2.1. Principe de base de la modélisation climatique.....	6
2.2.2. Les différents types de modèles.....	7
2.2.3. La correction de biais	7
2.2.4. Les scénarios climatiques	8
2.3. Le changement climatique.....	9
2.4. Impact du changement climatique sur le régime hydrologique à l'échelle locale	10
2.5. Aménagement hydroagricole et régime hydrologique	11
III. Matériels et Méthode.....	12

Impact du changement climatique et des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique du bassin versant de Bankandi-Lofing à Dano.

3.1. Matériel	12
3.1.1. Zone d'étude	12
3.1.1.1. Généralité.....	12
3.1.1.2. Climat	14
3.1.1.3. Hydrologie.....	15
3.1.1.4. Le sol	15
3.1.1.5. Végétation.....	16
3.1.2. Données utilisées	17
3.1.2.1. Données d'entrée des modèles hydrologiques.....	17
3.1.2.2. Les données utilisées pour l'évaluation des impacts climatiques.....	17
3.1.3. Outils de traitement	18
3.1.3.1. R studio.....	18
3.1.3.2. HBV Light	18
3.1.3.3. ETo Calculator.....	18
3.1.3.4. Outil SIG.....	19
3.2. Méthodes	19
3.2.1. Modélisation hydrologique avec les modèles GR4J et HBV	19
3.2.1.1. Description du modèle pluie-débit journalière GR4J	19
3.2.1.2. Description du modèle HBV	24
3.2.1.3. Calage et validation des modèles.....	28
3.2.2. Correction de biais de données climatiques issues des modèles climatiques HadGEM et MPI	29
3.2.3. Calcul de l'ETo historique et future avec l'équation de Hargreaves-Samani (ETo-HS)	30
3.2.4. Simulation des débits historiques et futurs à l'aide des données corrigées	31
3.2.5. Tests statistiques sur les données d'avant et d'après aménagement.....	31

Impact du changement climatique et des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique du bassin versant de Bankandi-Lofing à Dano.

IV.	: Résultats Et Discussions	33
4.1.	Résultats	33
4.1.1.	Calages et validations des modèles hydrologiques.....	33
4.1.1.1.	Le modèle GR4J	33
4.1.1.2.	Le modèle HBV	36
4.1.2.	Correction de biais des données de projection climatique pour le bassin versant de Dano (précipitation et température)	40
4.1.2.1.	Précipitations	40
4.1.2.2.	Température	43
4.1.3.	Quelques statistiques des données avant et après correction des précipitations.....	45
4.1.3.1.	Précipitations historiques observées et simulées.....	45
4.1.3.2.	Projection future des pluies sur le bassin de Bankandi-Lofing à Dano	46
4.1.4.	Quelques statistiques des données avant et après correction des températures.....	47
4.1.4.1.	Températures historiques observées et simulées.....	47
4.1.4.2.	Projection future des températures sur le bassin de Bankandi-Lofing à Dano	48
4.1.5.	Evapotranspiration potentielle	49
4.1.6.	Impact des changements climatiques sur les débits du bassin versant Bankandi-Lofing à Dano	50
4.1.7.	Impact de l'aménagement du bas-fond de Bankandi sur le débit observé à l'exutoire de Lofing.....	55
4.2.	Discussion	57
4.2.1.	Modélisation hydrologique.....	57
4.2.2.	Correction des biais dans les données climatiques et signes du changement climatique	58
4.2.3.	Impact du changement climatique sur le débit	58
4.2.4.	Impact de l'aménagement de Bankandi sur le débit observé à l'exutoire du bassin versant.	

Impact du changement climatique et des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique du bassin versant de Bankandi-Lofing à Dano.

V. Proposition des stratégies d'adaptation au changement climatique61

VI. Conclusion et perspectives62

Bibliographiesxiv

ANNEXES xviii

Liste des tableaux

Tableau 1 : Les caractéristiques des trois groupes de modèles hydrologiques.....	5
Tableau 2 : Paramètres de calage du modèle HBV.....	27
Tableau 3 : Résultats de calage du modèle GR4J.....	33
Tableau 4 : Tableau présentant les paramètres de calage et les critères de performances.....	34
Tableau 5 : Bilan hydrologique annuelle en mm du bassin versant de Bankandi-Lofing pour le modèle GR4J.....	36
Tableau 6 : Paramètres de calage du modèle HBV.....	38
Tableau 7 : Récapitulatif des critères de performances de calage et validation du modèle HBV..	39
Tableau 8 : Bilan hydrologique annuel en mm du bassin versant de Bankandi-Lofing pour le modèle HBV.....	39

Liste des figures

Figure 1 : Le site d'étude du bassin versant de Bankandi-Lofing, Burkina Faso, Province de Ioba, Commune de Dano.....	13
Figure 2 : Bassin versant de Bankandi-Lofing. a) Bassin versant, b) Aménagement de Bankandi	14
Figure 3: Caractéristiques climatiques de la région de Dano (Idrissou 2020)	15
Figure 4: Schéma de la structure du modèle GR4J (Perrin et al, 2003).....	20
Figure 5: Structure du modèle HBV (Seibert, 2005).....	25
Figure 6: Fonction de réponse (Seibert J. 2005)	27
Figure 7: Comparaison entre les débits simulés et observés pour la période de calage (2016-2017)	33
Figure 8: Nuage de points des débits simulés et observés en mm/j pour le calage de GR4J avec une représentation de l'intervalle de confiance de 95%.....	34
Figure 9 : Comparaison entre les débits simulés et observés pour la période de validation (2018)	35
Figure 10 : Nuage de points des débits simulés et observés en mm/j pour la validation de GR4J avec une représentation de l'intervalle de confiance de 95%.	35
Figure 11 : Débits observés et simulés par HBV pour le calage du modèle HBV.....	37
Figure 12 : Nuage de point des débits observés et simulés en mm/j pour le calage du modèle HBV avec une représentation de l'intervalle de confiance à 95%.	37
Figure 13 : Comparaison entre débits simulés et observés pour la validation du modèle HBV	38
Figure 14 : Nuage de point des débits observés et simulés en mm/j pour la validation du modèle HBV avec une représentation de l'intervalle de confiance à 95%.....	39
Figure 15 : Diagramme Quantile-Quantile pour la comparaison entre la pluie observée et la pluie simulée par le modèle HadGEM2-ES et MPI-ESM-MR.	41
Figure 16 : Représentation des fonctions de densité cumulatives des données de pluies observées et simulées des modèles HadGEM2-ES et MPI_ESM_MR. (En noir la pluie observée, et en rouge la pluie simulée)	41
Figure 17 : Diagramme Quantile-Quantile montrant l'ajustement entre la pluie observée et la pluie simulée par le modèle HadGEM2-ES et MPI-ESM-MR après correction.	42

Impact du changement climatique et des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique du bassin versant de Bankandi-Lofing à Dano.

Figure 18 : Représentation des fonctions de densité cumulatives des données pluviométriques observées et simulées des modèles HadGEM2-ES et MPI-ESM-MR avant et après correction (En noir la pluie observée, en rouge la pluie simulée sans correction et en vert la pluie simulée corrigée).42

Figure 19 : Diagramme Quantile-Quantile montrant l’ajustement entre les températures observées simulées par le modèle HadGEM2-ES et MPI-ESM-MR avant correction.....43

Figure 20 : Représentation des fonctions de densité cumulatives des données de température observées et simulées des modèles HadGEM et MPI_ESM_MR avant correction.....44

Figure 21 : Diagramme Quantile-Quantile montrant l’ajustement entre les températures observées et simulées par le modèle HadGEM2-ES et MPI-ESM-MR après correction.44

Figure 22 : Représentation des fonctions de densité cumulatives des températures observées et simulées des modèles HadGEM et MPI_ESM_MR avant et après correction (En noir les températures observées, en rouge les températures simulées sans correction et en vert les températures simulées corrigées).44

Figure 23 : Comparaison entre la moyenne mensuelle des données de pluie historique observées et simulées par le modèle HadGEM2-ES et MPI-ESM-MR sans et avec correction de biais.....46

Figure 24 : Comparaison entre la moyenne mensuelle des données historiques observées et futures simulées par le modèle HadGEM2-ES et MPI-ESM-SR sans et avec correction de biais.47

Figure 25 : Comparaison entre la moyenne mensuelle des données de température historiques observées et futures simulées par le modèle HadGEM2-ES et MPI-ESM-MR sans et avec correction de biais.48

Figure 26 : Comparaison entre la moyenne mensuelle des données de températures historiques observées et future simulées par le modèle HadGEM et MPI-ESM-MR.49

Figure 27 : Comparaison entre les ETP historiques et futures calculées avec les températures observées et simulées par le modèle HadGEM2-ES et MPI-ESM-MR.....50

Figure 28 : Comparaison entre les débits moyens mensuels historiques et futurs simulés par les modèles hydrologiques GR4J et HBV.53

Figure 29 : Comparaison entre les débits annuels historiques et futurs simulés par les modèles hydrologiques GR4J et HBV.....54

Figure 30: 1) Débits moyens mensuels avant et après aménagement ;2) Pluies moyennes mensuelles avant et après aménagement.56

Impact du changement climatique et des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique du bassin versant de Bankandi-Lofing à Dano.

I. Introduction générale

1.1. Contexte général

Les ressources en eau sont reconnues comme une préoccupation majeure pour le développement durable d'une société (Haddeland et al., 2014), du fait son importance dans la vie quotidienne et pour la production agricole. Cependant, elles sont limitées, inégalement accessible dans différentes régions du monde et mise à l'épreuve par la demande mondiale en eau de plus en plus croissante (WWDR, 2015). En Afrique de l'ouest où la majorité de la population dépendent de l'agriculture pluviale, une gestion rationnelle et durable des ressources en eau est cruciale pour la réduction de la pauvreté, la sécurité alimentaire et la préservation de l'environnement.

Le Rapport Mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau WWDR, (2015) identifie la gestion et la protection des ressources en eau comme un défi majeur pour le développement durable de l'Afrique en particulier l'Afrique subsaharienne. Ce rapport met en évidence la croissance démographique et économique comme des pressions majeures sur les écosystèmes fournissant l'eau et les services liés à l'eau. L'urbanisation, l'expansion des terres agricoles, la déforestation, la pollution, etc. figurent parmi les nombreux facteurs affectant directement ces écosystèmes (MA, 2005). Tout aussi important, le changement climatique et la variabilité climatique menacent la disponibilité de l'eau dans la région.

Selon la Communauté Economique des États de l'Afrique de l'Ouest (CEDEAO 2017), la population de la région de la CEDEAO sera d'environ un milliard et celle du Burkina Faso atteindra plus de 60 millions en 2050. Ces projections démographiques annoncent clairement que la pression sur l'eau dans les années à venir se poursuivra en s'accéléralant.

En plus de cette pression démographique sur l'eau, la pluie, principale source d'eau douce, est soumise à une variabilité spatiale et temporelle accrue. Les changements climatiques globaux qui sont projetés pendant les années à venir à cause des émissions de gaz à effet de serre de nature anthropique GIEC, (2013) vont entraîner une modification spatiale et temporelle des températures et régimes de précipitations en Afrique de l'Ouest (Sylla et al., 2016). Cette modification va grandement influencer sur la disponibilité de l'eau dans la région (Sylla et al., 2018)

Par conséquent, il est nécessaire de comprendre les processus hydrologiques impliqués dans l'approvisionnement en eau ainsi que des différents moteurs et facteurs affectant ces processus afin

Impact du changement climatique et des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique du bassin versant de Bankandi-Lofing à Dano.

de pouvoir mettre en place des stratégies d'adaptation et de mitigation efficaces. Un certain nombre d'études menées en Afrique de l'Ouest au cours des dernières décennies représentent des progrès significatifs dans l'évaluation des impacts hydrologiques de facteurs comme l'utilisation des terres (Schmengler, 2011; Bossa, 2012) et le climat (Karambiri et al., 2011). Ces études ont permis d'améliorer les connaissances relatives à l'impact de l'utilisation des terres et du changement climatique sur l'hydrologie. Il a été retenu de ces travaux : que l'extension des terres agricoles a déclenché l'érosion des sols (Schmengler, 2011), que l'utilisation des terres est connue pour avoir un impact plus important sur l'hydrologie terrestre par rapport au changement climatique dans certaines régions (Bossa, 2012), et qu'il a été démontré que le signal de changement de débit projeté dépendait principalement du signal de changement des précipitations dans les régions où les terres n'ont pas subi de grandes modifications (Karambiri et al., 2011).

1.2. Problématique

La quantité limitée de précipitations reçue par le Burkina Faso, ainsi que la forte évapotranspiration potentielle qui y règne en raison des températures élevées, en fait un pays sujet à la rareté des ressources en eau et donc physiquement sensible aux variations climatiques. Dans ce contexte, il apparaît donc crucial de connaître tout d'abord comment l'exposition aux aléas climatiques (i.e., les régimes de précipitations) évoluera dans le futur au Burkina Faso, afin de comprendre comment cette nouvelle exposition aux variations climatiques, combinée à la sensibilité des réservoirs hydrologiques du pays, impactera ses ressources en eau.

Cette étude va porter sur le bassin versant de Dano au Burkina Faso. Un bassin versant à forte potentiel agricole et sur lequel ont été installés plusieurs aménagements hydroagricoles. Très peu d'études sur l'impact du changement climatique sur les ressources en eau ont été menées dans le bassin versant de Dano à différentes échelles, un bassin du sud-ouest du Burkina Faso. Les trois cas recensés à ce jour proviennent de Yira, (2016); Op de Hipt et al., (2018); Idrissou, (2020) qui ont utilisés des modèles climatiques différents. Ces études ont fait état d'un comportement incertain du changement climatique futur et de son impact sur les ressources en eau du bassin versant du Dano en générale. De plus, les trois études ont appliqué chacune un modèle hydrologique unique. De ce fait, l'incertitude liée au choix du modèle de simulation hydrologique n'a pas été quantifiée.

Dans le cadre de ce travail, on s'intéresse à l'étude des impacts du changement climatique et des aménagements de Bankandi sur la ressource en eau du bassin versant de Bankandi-Lofing un sous

Impact du changement climatique et des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique du bassin versant de Bankandi-Lofing à Dano.

bassin versant de Dano. Cette étude permettra de prévoir les bouleversements possibles dus à une variabilité de la pluviométrie sur cette zone et de prendre les dispositions adéquates pour atténuer leurs conséquences. La présente étude propose l'application de deux modèles hydrologiques. En outre, elle élargit la base des modèles climatiques utilisés dans l'évaluation des impacts du changement climatique pour le bassin versant du Dano. Par conséquent, l'étude fournit (i) une compréhension complémentaire de l'impact du changement climatique sur les ressources en eau dans sous bassin versant de Dano, (ii) un élément d'analyse d'incertitude supplémentaire qui est le choix du modèle hydrologique utilisé dans l'évaluation de l'impact hydrologique du changement climatique et (iii) et une analyse de l'influence des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le débit à l'exutoire du bassin versant.

1.3. Objectif de l'étude

L'objectif global de l'étude est d'améliorer la gestion des ressources en eau dans la région de l'Afrique de l'Ouest en mettant l'accent sur le bassin versant du Dano. Il vise à fournir des informations sur l'impact potentiel du changement climatique et de l'utilisation des terres sur les ressources en eau du bassin versant.

Les objectifs spécifiques assignés à ces travaux consistent à :

- Caler et valider un ensemble de modèles hydrologiques sur la zone d'étude ;
- Evaluer l'impact des changements climatiques sur le régime hydrologique du bassin versant de Dano après une correction des biais des données climatiques simulées ;
- Evaluer l'impact des aménagements réalisés dans le bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique de bassin versant ;
- Proposer quelques mesures d'amélioration de la gestion des ressources en eau du bassin versant dans le contexte des changements climatiques.

1.4. Les questions de recherches

Les questions de recherche suivantes ont été abordées afin d'atteindre les objectifs :

- Quelles sont les performances des modèles hydrologiques lors du calage et la validation ?
- Quels sont les changements projetés par rapport aux eaux de surface du bassin versant dans les années 2031 à 2060 ?

Impact du changement climatique et des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique du bassin versant de Bankandi-Lofing à Dano.

- Comment est-ce que les aménagements du bas-fond de Bankandi influencent le régime hydrologique du bassin de Bankandi-Lofing ?
- Quelles sont les stratégies pour minimiser les impacts du changement climatique sur les ressources en eau de surface dans le bassin versant?

1.5. Plan de rédaction

Le présent rapport est structuré en cinq (05) parties. La première partie présente l'introduction générale, la deuxième partie traite de la revue de littérature sur le changement climatique et les ressources en eau. La troisième partie aborde le matériel et la méthodologie adoptés pour atteindre les objectifs de l'étude tandis que la quatrième partie présente les résultats et la discussion. Pour finir, la cinquième partie propose quelques stratégies d'amélioration de la gestion des ressources dans le contexte du changement climatique.

II. Revue de littérature

2.1. La modélisation hydrologique

Le cycle hydrologique est un phénomène naturel qui représente la voie entre les grands réservoirs d'eau liquide, solide ou de vapeur d'eau sur terre : les océans, l'atmosphère, les lacs, les rivières d'eau, les eaux souterraines et les glaciers. Le moteur de ce cycle est l'énergie solaire, qui provoque une évaporation intense (Albergel and Braudeau, 1992). La nature et la complexité des processus hydrologiques conduisent à un large nombre de modèles hydrologiques dont les représentations sont différentes. Ils peuvent être classés en trois groupes : « empiriques, conceptuels et physiques » (Tableau 1, Devia et al., (2015)). Le choix d'un modèle hydrologique repose sur sa capacité à représenter des processus hydrologiques et sa capacité à les décrire spatialement au sein du bassin versant.

C'est un outil essentiel pour comprendre la dynamique des bassins versants, dans l'utilisation rationnelle des ressources en eau de ce bassin, et dans la lutte contre les catastrophes naturelles liées aux inondations (SAMBOU et al., 2011). Les modèles hydrologiques sont utilisés pour quantifier et évaluer les ressources en eau, ce qui est essentiel pour comprendre les changements des ressources en eau et améliorer la gestion des ressources en eau

Tableau 1 : Les caractéristiques des trois groupes de modèles hydrologiques.

Modèle empirique	Modèle conceptuel	Modèle basé sur la physique
Modèle basé sur les données ou modèle de la boîte noire	Modèle paramétrique ou modèle de boîte grise	Modèle mécanique ou modèle de la boîte blanche
Implique mathématique équations, dérive les valeurs des séries chronologiques disponibles	Basé sur la modélisation de réservoirs et Inclue des équations semi-empiriques avec une base physique	Basé sur la distribution spatiale, évaluation des paramètres décrivant les caractéristiques physiques
Peu de considération pour les caractéristiques et les processus du système	Les paramètres sont dérivés des données de terrain et d'étalonnage	Exige des données sur l'état initial état du modèle et la morphologie du bassin versant

Impact du changement climatique et des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique du bassin versant de Bankandi-Lofing à Dano.

Puissance prédictive élevée, faible profondeur explicative	Simple et peut être facilement implémenté en code informatique	Modèle complexe, Exige expertise humaine et capacité de calcul
Ne peut pas être généré vers d'autres bassins versants	Exige de grandes données hydrologiques et météorologiques	Souffre des problèmes relatifs à l'échelle.
Ex : ANN, Unit hydrograph	Ex : Modèle HBV, TOPMODEL	Ex : SHE ou modèle MIKESHE, SWAT
Valable dans les limites d'un domaine donné	Le calage implique l'ajustement de courbe ce qui rend difficile l'interprétation physique	Valable pour une large gamme de situation.

Source : Devia et al., 2015

2.2. La modélisation climatique

2.2.1. Principe de base de la modélisation climatique

Pour représenter l'ensemble des processus du système climatique, les scientifiques ont développé des modèles climatiques qui sont des outils numériques basés sur des équations mathématiques qui prennent en compte les principes fondamentaux de la conservation de la masse, de l'énergie, de l'eau et de la quantité de mouvement. Ces équations, donc les modèles climatiques, décrivent le comportement et les interactions entre les différentes composantes du système climatique (l'atmosphère, les océans, les fleuves, le sol, etc.) sous des forçages externes tels que la radiation solaire, les aérosols, ainsi que les émissions naturelles et anthropiques de gaz à effet de serre (GES)(Ly et al., 2019). Pour la modélisation, l'atmosphère et l'océan sont divisés en boîtes distinctes ou cellules de grille ou encore mailles. La taille des mailles détermine la résolution du modèle. Dans chaque maille on simule des variables (mouvement de l'air, les radiations, les températures, les précipitations, etc.) pour les climats passés, présents et à venir. Ainsi, les modèles climatiques constituent actuellement des outils indispensables pour l'analyse de la vulnérabilité des populations. Avec de telles informations, il devient possible de prévoir les impacts potentiels des changements climatiques tout en favorisant un développement résilient au climat (Ly et al., 2019)

2.2.2. Les différents types de modèles

En modélisation climatique, on distingue deux catégories des modèles : les modèles climatiques globaux (MCG) et les modèles climatiques régionaux (MCR). A la différence des modèles globaux, les modèles régionaux permettent en particulier d'affiner la qualité de l'information issue de la modélisation. Les modèles globaux ont une résolution classique variant de 100 à 300km. Des techniques dites de descentes d'échelles permettent de passer du MCG au MCR en tenant compte plus finement de l'effet de l'orographie, ce qui n'est pas assez sensible avec les modèles globaux pour une certaine région. Le modèle régional est obtenu en forçant les conditions aux limites régionales par un modèle global, ce qui permet de prendre en compte, au niveau régional, des informations sur la circulation générale atmosphérique, de l'influence des températures de surface des océans (Ly et al., 2019).

Les modèles régionaux peuvent avoir des résolutions de l'ordre de 10 à 50km. Heinzeller et ses partenaires, en collaboration avec les équipes de WASCAL et l'Université de Bonn ont récemment développés des simulations régionales pour l'Afrique de l'Ouest de 12km de résolution horizontale (Heinzeller et al., 2018). Ces simulations permettent de combler les gaps en termes d'informations adéquates, d'améliorer la qualité des informations produites et d'anticiper sur les effets néfastes de la variabilité et des changements climatiques (Heinzeller et al., 2018). La résolution spatiale des modèles a été significativement améliorée.

2.2.3. La correction de biais

Compte tenu de la faible résolution des modèles et des problèmes inhérents à la paramétrisation physique ou résolution des équations mathématiques notamment en ce qui concerne les processus liés à la précipitation (l'occurrence, l'intensité et la durée), on a recours à des méthodes alternatives indispensables pour la précision de l'information climatique à l'échelle locale. Ainsi, une évaluation rigoureuse doit être entreprise afin d'améliorer la simulation de la précipitation, pas seulement en termes de valeur moyenne, mais également en termes d'occurrence, d'intensité et de fréquence des événements pluvieux. La même correction de biais appliquée aux simulations historiques peut être appliquée aux simulations du climat futur sans influencer les tendances du changement climatique (Ly et al., 2019).

Plusieurs méthodes de correction des biais post traitement ont donc été développées dans la littérature au cours des deux dernières décennies, afin d'ajuster les simulations en fonction des

Impact du changement climatique et des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique du bassin versant de Bankandi-Lofing à Dano.

données historiques et obtenir des projections climatiques avec les attributs statistiques appropriés (Francois et al., 2020). Il existe des méthodes de correction univariées et multivariées (Francois et al., 2020). La plupart des méthodes de correction existantes et populaires sont univariées (correction quantile-quantile ou le quantile mapping), c'est-à-dire qu'elles corrigent une variable physique et un lieu à la fois. et ne peut donc pas reconstruire les dépendances inter-variables, spatiales ou temporelles des observations (Francois et al., 2020). De plus, les méthodes de correction des biais univariées ont été critiquées parce qu'elles altèrent certaines hypothèses de la RCM en modifiant la relation physique entre les variables climatiques, y compris la relation entre les précipitations et la température (Ehret et al., 2012; Maraun, 2016; Maraun et al., 2017). Récemment, certaines méthodes de correction de biais multivariées ont été proposées, avec différentes des approches visant à rétablir des dépendances multidimensionnelles (Francois et al., 2020). Parmi ces méthodes, nous pouvons citer le R^2D^2 , le dOCT, le SDSM, le MBCn, le MRec... Cependant, ces méthodes ne sont pas encore bien appréhendées par les chercheurs et les praticiens en raison de différences dans leur applicabilité et leurs hypothèses, ce qui peut conduire à des résultats différents (Francois et al., 2020). La plupart des méthodes de correction du biais reposent sur l'hypothèse que la distribution du biais dans la période historique ne change pas à l'avenir. Fondamentalement, l'hypothèse ne peut être vérifiée mais seulement falsifiée (Popper, 2002). Bien que Maraun et al. (2017) ont vivement critiqué la correction des biais, ils ne suggèrent pas de rejeter la correction des biais dans les études d'évaluation d'impact. Ils recommandent fortement une bonne compréhension des sources du biais du modèle climatique et le choix d'une méthode de correction du biais en conséquence. Pour plus de transparence sur l'incertitude induite par la correction du biais, certains auteurs ont recommandé de rapporter à la fois les résultats corrigés du biais et non corrigés (Ehret et al., 2012).

2.2.4. Les scénarios climatiques

Les scientifiques ont développé de nouveaux types de scénarios ou RCP, associés à des trajectoires de l'évolution des concentrations des différents gaz à effet de serre et de l'occupation des sols (Ly et al., 2019). Les scientifiques ont défini a priori quatre types de RCP (RCP8.5, RCP4.5, RCP6.0, RCP2.6) (Moss et al., 2010; Meinshausen et al., 2011). Les RCP ont été prolongés jusqu'à 2300 (Meinshausen et al., 2011). Cet horizon temporel est pertinent dans le domaine de la recherche et permet de comprendre les processus physiques à la base de la hausse prévue des concentrations de gaz à effet de serre sur les systèmes d'impacts biophysiques (ex. élévation du niveau de la mer), le

Impact du changement climatique et des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique du bassin versant de Bankandi-Lofing à Dano.

cycle de carbone (Ly et al., 2019). Une étude réalisée sur la trajectoire des RCP montre que le seul scénario sans équivalent est le RCP2.6 (IPCC, 2013). Il intègre les effets de politiques de réduction des émissions susceptibles de limiter le réchauffement planétaire à 2°C. Le scénario RCP8.5 prévoit une augmentation continue de la concentration des gaz à effet de serre sans politique de réduction aucune et en conséquence un réchauffement continu pour aller jusqu'à 12°C. Ce scénario est alors considéré comme un scénario pessimiste (Riahi et al., 2011).

D'après le 5^{ème} rapport d'évaluation du Groupe d'expert Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC, 2014), des études ont été effectuées sur les changements moyens des températures projetées suivant différentes périodes 2046-2065 (Moyen terme) et 2081-2100 (Long terme) à l'échelle mondiale. Ces études ont révélées que les projections sur le moyen terme montrent que les valeurs moyennes des températures globales simulées vont être quasi-similaires pour les scénarios RCP6.0 et RCP4.5 avec quelques différences par rapport au RCP2.6 sur le moyen terme.

Le scénario RCP8.5 demeure le scénario le plus extrême avec des valeurs moyennes de température pouvant atteindre 2.6°C sur le moyen terme. RCP2.6 est un scénario d'atténuation conduisant à un niveau de forçage radiatif très bas. Les deux scénarios de stabilisation sont le RCP4.5 et RCP6.0. Celui du RCP8.5 est un scénario à émission de gaz à effet de serre très élevées (Ly et al., 2019).

2.3. Le changement climatique

Le changement climatique fait référence à un changement statistiquement significatif de l'état ou de la variabilité climatique moyen, persistant pendant une période prolongée (Šanda et al., 2009). Le changement climatique est donc un changement d'état du climat qui peut être identifié par des changements dans la moyenne et / ou la variabilité de ses propriétés. Cette variabilité s'étend sur de longues périodes, généralement des décennies ou plus. Comme conséquences du changement climatique, on peut noter, le réchauffement du système climatique, l'élévation du niveau de la mer, la fonte des glaces, l'apparition de phénomènes climatiques extrêmes, tels que les tempêtes et les sécheresses, le changement du régime pluviométrique. Toutes ces conséquences ont des effets sur la santé, l'agriculture, la biodiversité, les écosystèmes et les ressources en eau.

Le réchauffement climatique est principalement causé par l'émission de gaz à effet de serre. En effet, ils jouent un rôle essentiel dans la régulation de la température terrestre. Lorsque la terre reçoit l'énergie du soleil sous forme de rayonnement, une partie est réfléchiée dans l'atmosphère par les nuages ou la surface de la terre. Le reste est momentanément absorbé avant d'être libéré sous

Impact du changement climatique et des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique du bassin versant de Bankandi-Lofing à Dano.

forme de chaleur. Les gaz à effet de serre interviennent alors pour bloquer partiellement les rayons infrarouges, provoquant l'augmentation de la chaleur moyenne à la surface de la terre. Les émissions de gaz à effet de serre anthropiques ont considérablement augmenté entre 1970 et 2010, avec une augmentation croissante au cours des dernières décennies.

Malgré l'introduction de plusieurs politiques pour les réduire, les émissions de gaz à effet de serre ont augmenté de 2,2% par an entre 2000 et 2010; c'est plus que dans la période 1970-2000, pendant laquelle ces émissions ont augmenté en moyenne de 1,3% par an. Sur la période évaluée par le GIEC (1970-2010), 78% de l'augmentation des émissions totales de gaz à effet de serre peuvent être attribuées à l'utilisation de combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz par exemple) et aux procédés industriels.

L'Afrique est l'un des continents les plus vulnérables au changement climatique compte tenu de la forte pression démographique (dégradation des terres et des forêts, diminution des ressources en eau), de la faiblesse des infrastructures, de l'extrême pauvreté, de la mauvaise intégration des technologies (GIEC 2007).

Au Burkina Faso, où 80% de la population vit de l'agriculture, les précipitations affectent grandement l'économie du pays. Des analyses de la Direction Générale de la Météorologie (DGM) montrent que la pluviométrie du Burkina Faso a changé au cours du XXe siècle. Les données observées au cours de cette période indiquent une tendance à la baisse des totaux annuels des précipitations sur l'ensemble du pays, une tendance à la baisse de l'indice sur le nombre de jours de pluie et une tendance à l'augmentation des poches de sécheresse PNA (2015) (Plan National d'Adaptation aux changements climatiques).

2.4. Impact du changement climatique sur le régime hydrologique à l'échelle locale

De nombreuses études d'impact hydrologique ont été menées dans la région. Aich et al., (2014) ont comparé l'impact du changement climatique sur l'écoulement fluvial dans quatre grands bassins fluviaux dans plusieurs régions africaines. (Kasei, 2010) a analysé le changement climatique dans le bassin de la Volta (400 000 km²) et (Bossa et al., 2014) dans le bassin de l'Ouémé (49 256 km²) au Bénin. Cependant, peu d'études ont étudié les impacts hydrologiques à l'échelle locale dans la région (Yira et al., 2017; Op de Hipt et al., 2018). Les études locales qui combinent les impacts du

Impact du changement climatique et des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique du bassin versant de Bankandi-Lofing à Dano.

changement climatique et d'utilisation des terres sur l'hydrologie avec un accent sur les vallées intérieures sont très rares dans la région de l'Afrique de l'Ouest (Op de Hipt et al., 2019).

2.5. Aménagement hydroagricole et régime hydrologique

Il est estimé que les pratiques d'utilisation des terres ont d'importants impacts tant sur la disponibilité que sur la qualité des ressources en eau. Ces impacts peuvent être à la fois favorables et défavorables. En vue de gérer de façon raisonnée les ressources en eau des bassins versants, il convient d'avoir une idée aussi claire que possible de la manière dont répondra le bassin versant aux modifications anthropiques. Il a été prouvé que le changement d'affectation des terres influence considérablement l'hydrologie de la région. Par conséquent, l'étude d'évaluation de l'impact hydrologique pourrait ne pas être réaliste si l'impact du changement d'affectation des terres n'est pas inclus dans les analyses (Yira et al., 2016)

III. Matériels et Méthode

3.1. Matériel

3.1.1. Zone d'étude

3.1.1.1. Généralité

La commune de Dano, chef-lieu de la province de Ioba, est située dans la région sud-ouest du Burkina Faso et couvre une superficie d'environ 195 km² (Figure 1). Elle est délimitée par la commune de Koper à l'est, les communes de Guéguéré et Dissin à l'ouest, la commune de Koti au nord, la commune de Fara au nord-est et la commune d'Oronkua au nord-ouest. La ville de Dano est divisée en 7 secteurs dont un seul entièrement subdivisé (secteur 4), trois secteurs partiellement divisés (secteurs 1, 2, 3) et les trois autres sans subdivision (secteurs 5, 6 et 7) avec 24 villages attachés. Elle abrite environ 55 000 personnes dont 63% vivent dans les zones rurales (Commune de Dano, 2013). Environ 80% de la population sont des petits agriculteurs qui pratiquent principalement une agriculture pluviale de subsistance. Les moyens de subsistance des agriculteurs sont mis en péril par le climat instable entraînant potentiellement des pertes de rendement en raison de sécheresses ou d'inondations.

Le bassin versant de Dano à l'exception de la frontière ouest, constituée des monts Ioba, la majorité du bassin versant est plat avec une pente moyenne de 2 à 3 degrés permettant la formation de vallées intérieures. Les moyens de subsistance des agriculteurs sont mis en péril par le climat instable entraînant potentiellement des pertes de rendement en raison de sécheresses ou d'inondations.

Impact du changement climatique et des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique du bassin versant de Bankandi-Lofing à Dano.

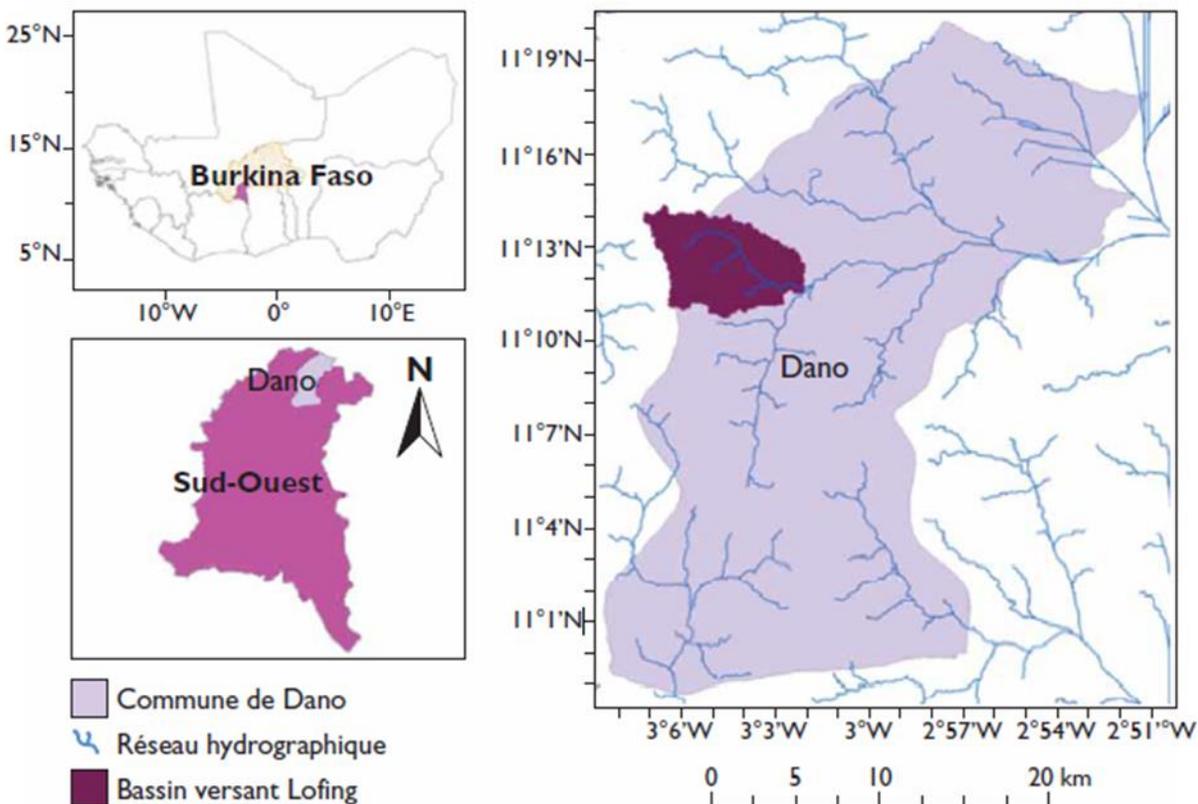


Figure 1 : Le site d'étude du bassin versant de Bankandi-Lofing, Burkina Faso, Province de Ioba, Commune de Dano

En ce qui concerne l'hydrographie, Dano est drainée par des ruisseaux intermittents qui sont des affluents de la Volta Noire ou de la rivière Mouhoun. La Volta noire est un fleuve transfrontalier entre trois pays à savoir le Burkina Faso, la Côte d'Ivoire et le Ghana.

Cette étude se concentre sur le bassin versant de Bankandi-Lofing (figure 2) qui couvre une superficie de 30 km² et l'aménagement de Bankandi, l'un des aménagements hydroagricoles du bassin. (Figure 2). Deux types d'aménagements principaux sont observés dans le bassin versant. Ceux basés sur la rétention d'eau au moyen de digues en courbe de niveau (« DCN ») et ceux basés au contraire sur le drainage au moyen de digues de partition et canaux parallèles (casiers+arroseurs/draines « CAD »). Ces derniers sont conçus pour parer à deux aléas contraires, l'inondation (par la fonction de drainage des canaux) et la sécheresse (par l'irrigation possible à partir des canaux de drainage).

Impact du changement climatique et des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique du bassin versant de Bankandi-Lofing à Dano.

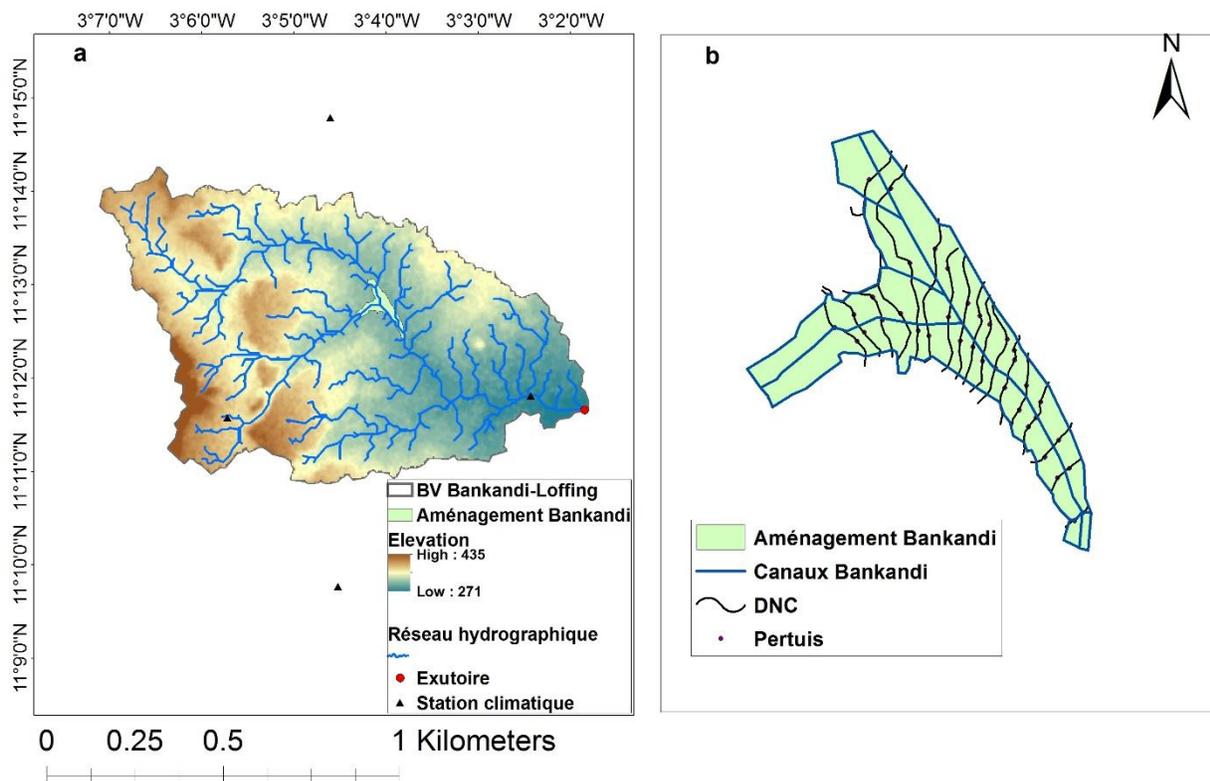


Figure 2 : Bassin versant de Bankandi-Lofing. a) Bassin versant, b) Aménagement de Bankandi

Le bas-fond de Bankandi, aménagé en 2005 sur une superficie de 22 ha, est devenu inexploitable par excès d'eau depuis 2009. Des actions correctives ont été engagées début 2018 avec le creusement de canaux afin de faciliter le drainage. La question qui se pose alors est celle du maintien de fonctionnalité des DCN pour conserver de l'eau et de l'amélioration apportée par les canaux pour réguler les lames d'eau sans entraîner un excès de drainage.

3.1.1.2. Climat

Le climat est de type soudano-sahélien avec une pluviométrie annuelle de 800-1200 mm concentrée en une saison des pluies uni-modale commençant en mai et se terminant en octobre (Figure 2). La pluviométrie annuelle moyenne de 1970 à 2013 est de 886 mm. Plus de 77% des précipitations annuelles se produisent de juin à septembre, août enregistrant les précipitations les plus élevées (225 mm ou 25% des précipitations annuelles). Les températures journalières minimales et maximales moyennes sont respectivement de 21°C et 32°C avec une température moyenne quotidienne globale de 28°C de 1970 à 2013. Le mois le plus chaud de l'année est avril avec une température moyenne de 30,9 ° C tandis que le plus froid est août avec une température moyenne

Impact du changement climatique et des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique du bassin versant de Bankandi-Lofing à Dano.

de 25,7 ° C. La différence de précipitations entre le mois le plus sec et le mois le plus humide est de 253 mm.

Cependant, le régime pluviométrique ouest-africain a été l'un des plus affectés par la variabilité climatique et le changement climatique au cours des cinq dernières décennies avec des sécheresses désastreuses (sécheresse au Sahel) dans les années 1970 et 1980 (Lebel and Ali, 2009).

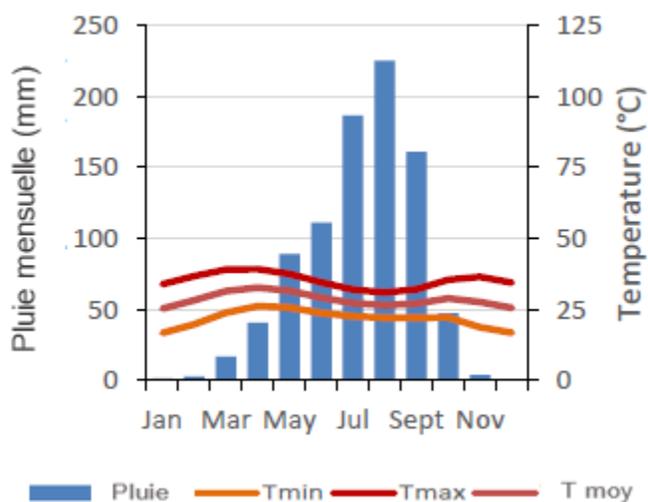


Figure 3: Caractéristiques climatiques de la région de Dano (Idrissou 2020)

3.1.1.3. Hydrologie

Plusieurs ruisseaux sont drainés dans le bassin versant. Cependant, ces rivières s'assèchent pendant la saison sèche. Le régime fluvial est régi par le front de la zone de convergence intertropicale. Les tempêtes enregistrées pendant la saison des pluies provoquent des ruissellements (pour la période de juin à octobre). La présence d'eau souterraine dans la zone serait associée au développement d'une porosité secondaire, comme des joints, des fractures, des cisaillements et des fissures. En conséquence, les systèmes aquifères du bassin versant seraient très discontinus avec des compartiments individuels dans lesquels une circulation isolée des eaux souterraines se produit (Amisigo and Van de Giesen, 2005).

3.1.1.4. Le sol

La ville de Dano est située dans un bassin constitué de cuirassés latéritiques. Il repose sur un massif granitique très étendu et couvre la majeure partie de la zone bâtie de la ville. Cependant, on observe certains graviers latéritiques à haute perméabilité (dans les zones accessibles) et une section d'armure latéritique indurée qui ne peut être percée avec une pioche et qui est susceptible d'être

Impact du changement climatique et des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique du bassin versant de Bankandi-Lofing à Dano.

imperméable. Le terrain très accidenté facilite l'érosion des sols grâce à un ruissellement très rapide. Les principaux types de sols rencontrés sont (Monographie de la commune de Dano, avril 2006 ; PSA-DANO, 2017):

- Sols de graviers (Wora) en état de dégradation continue: Ces sols sableux en surface et sablo-argileux profonds, occupent près de 18% de la zone urbaine et sont concentrés dans les secteurs 2 et 3. Ils sont propices à la culture d'arachides, haricots (niébé) et millet.
- Les sols bruns eutrophes sur matériaux argileux issus de roches basiques (Gbaan): ils sont sablo-limoneux en surface et argileux en profondeur. Ils sont caractérisés par un humus à haute activité biologique, une bonne structure, un complexe de saturation en calcium élevé et une couleur brun rougeâtre dans l'horizon B. Répartis sur environ 14% de la surface de la ville, ils sont concentrés au niveau du secteur 1. Fertilité satisfaisante car riche en matière organique, ils sont adaptés à la production de maïs, haricots, mil, coton, cacahuètes, etc.
- Les sols ferrugineux lessivés (Dalempou): schistes parfois graveleux, ces sols se caractérisent par leur forte teneur en oxydes et hydroxydes de fer ou de manganèse qui leur donne une couleur rouge, ocre ou noire. Ils sont pauvres en matière organique et occupent une grande partie de la surface de la ville, environ 69%. Ils sont sableux en surface, argileux en profondeur puis de faible perméabilité et porosité. Ils se produisent dans les secteurs 3, 4, 5, 6 et dans une partie du secteur 7. Il existe une autre catégorie de sols, appelés sols hydromorphes, qui se trouvent principalement autour des rivières. Ils occupent environ 5% de la zone urbaine et conviennent à la riziculture et au jardinage.

3.1.1.5. Végétation

Le bassin versant de Dano fait partie du domaine phytogéographique soudanais qui est la savane et la forêt. La végétation naturelle de ce secteur se caractérise par :

- Une couche herbacée composée d'*Andropogon pseudapricus*, *Elionurus elegans*, *Loudetia togoensis*, *Pennisetum pedicellatum*, *Schizachyrium exile*, *Aristida adsenscionis*, *Cenchrus biflorus*, *Ctenium elegans*, *Cymbopogon schoenanthus*, *Schoenefeldia gracilis*, etc.
- Espèces d'arbres dominées par *Faidherbia albida*, *Lannea microcarpa*, *Parkia biglobosa*, *Tamarindus indica*, *Vitellaria paradoxa*, *Acacia erythrocalyx*, *Anogeissus leiocarpa*, *Celtis integrifolia*, *Diospyros mespiliformis*, *Pterocarpus erinaceus*, etc.

Impact du changement climatique et des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique du bassin versant de Bankandi-Lofing à Dano.

- La plupart de la végétation primaire a été convertie en agriculture et en jachère à long terme au cours des dernières décennies. Les principales cultures sont: *Sorghum bicolor* (sorgho), *Gossypium hirsutum* (coton), *Zea mays* (maïs), *Pennisetum glaucum* (mil), *Oryza sativa* et *Oryza glaberrima* (riz, produit dans les vallées intérieures), *Vigna unguiculata* (niébé, souvent associé au sorgho), *Arachis hypogaea* (arachide) et *Sesamum indicum* (sésame).
- Une particularité de Dano (et du sud-ouest du pays) est l'utilisation intensive du bois de chauffage pour produire de la bière locale appelée "dolo". Environ 6 442 tonnes de bois sont utilisées chaque année pour la production de cette boisson locale (Fotseu et al., 2012), constituant ainsi un facteur supplémentaire de dégradation de la végétation naturelle.

3.1.2. Données utilisées

3.1.2.1. Données d'entrée des modèles hydrologiques

Les données hydroclimatiques à pas de temps journalier (pluie, températures, rayonnement solaire, vitesse du vent, débit) utilisées pour le calage et la validation des modèles hydrologiques dans cette étude proviennent de la base de données du centre de compétences WASCAL. Elles couvrent la période de 2014 à 2018. Les données météorologiques proviennent de quatre stations (Lofing, Bankandi, Larè, Fondation Dreyer). Les données de débits proviennent des installations de WASCAL à l'exutoire du bassin versant de Lofing.

3.1.2.2. Les données utilisées pour l'évaluation des impacts climatiques.

Les observations historiques de pluie et de température utilisées pour cette étude proviennent des stations synoptiques de Boromo et Gaoua qui sont des installations de la Direction Générale de la Météorologie du Burkina Faso (DGM). Ces données couvrent la période de 1970 à 2013. Mais la période qui nous intéresse dans cette étude va de 1981 à 2010.

En plus des données observées, il y a les simulations historiques et futures de la pluie et la température des modèles climatiques HadGEM2-ES/RegCM4 et MPI-ESM-MR/RegCM4. Ces données simulées couvrent pour la période historique de 1970 à 2005 et pour la période future de 2006 à 2100. Les simulations MCG-MCR ont été réalisées dans le cadre du projet CORDEX-Afrique. Les modèles HadGEM2-ES et MPI-ESM-MR utilisés sont des modèles globaux du CMIP5 (Taylor et al., 2012) qui ont subi une descente d'échelle à une résolution de 25km sur la région de l'Afrique de l'Ouest. Ce forçage a été réalisé sous les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 du

Impact du changement climatique et des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique du bassin versant de Bankandi-Lofing à Dano.

GIEC. Le scénario utilisé pour notre étude est celui du RCP8.5 qui prévoit une augmentation de la concentration du gaz à effet de serre. Les équations utilisées pour réaliser la descente d'échelle du MCG à un MCR est la version 4 du Modèle Climatique Régional (RegCM4 ; Giorgi et al., (2012)) du Centre International de la Physique Théorique (ICTP) développées pour le compte du projet CORDEX Afrique. De plus le modèle RegCM4 présente une bonne performance dans la simulation des précipitations de la mousson de l'Afrique de l'Ouest (Sylla et al., 2016).

3.1.3. Outils de traitement

3.1.3.1. R studio

R Studio est un environnement de développement intégré pour R, un langage de programmation pour le calcul statistique et les graphiques. Il est disponible en deux formats : RStudio Desktop est une application de bureau standard tandis que RStudio Server s'exécute sur un serveur distant et permet d'accéder à RStudio à l'aide d'un navigateur Web. Voici le lien d'accès pour le téléchargement de R studio : <https://www.rstudio.com/products/rstudio/download/>. R studio a été utilisé pour l'exécution du modèle du Génie Rural GR4J, pour effectuer la correction des biais des simulations des modèles climatiques et pour les analyses statistiques.

3.1.3.2. HBV Light

HBV light est un logiciel conçu pour implémenter le modèle hydrologique HBV. Il a été développé à l'Université d'Uppsala (et encore amélioré à l'Université d'État de l'Oregon, SLU-Uppsala et à l'Université de Stockholm) par Jan Seibert et a été programmé avec la motivation d'améliorer la convivialité, en particulier en ce qui concerne l'utilisation à des fins éducatives. L'idée derrière cette nouvelle version de HBV light, est de fournir une version Windows pour la recherche et l'éducation. Les équations de base sont conformes à la SMHI-version HBV-6 (Bergström, 1992). Le lien d'accès du logiciel HBV light est : <https://www.geo.uzh.ch/en/units/h2k/Services/HBV-Model/HBV-Download.html>.

3.1.3.3. ETo Calculator

ETo calculator est un logiciel développé par la Division des terres et des eaux de la FAO. Sa fonction principale est de calculer l'évapotranspiration de référence (ETo) selon les normes de la FAO. ETo calculator évalue ETo à partir de données météorologiques au moyen de l'équation de Penman-Monteith. Cette méthode a été choisie par la FAO comme référence car elle se rapproche

Impact du changement climatique et des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique du bassin versant de Bankandi-Lofing à Dano.

étroitement ETo des plantes à l'emplacement évalué, est basée sur la physique et incorpore explicitement des paramètres physiologiques et aérodynamiques. Le logiciel a permis de calculer l'ETo journalière de la période 2014 à 2018 utilisée pour les modèles hydrologiques. Le lien de téléchargement du logiciel est:

http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/faowater/Applications/EToCalculator64Bit.zip

3.1.3.4. Outil SIG

Le logiciel de SIG utilisé est ArcGIS. L'outil ArcGIS a été utilisé pour caractériser et délimiter le bassin versant, calculer les surfaces d'influence des quatre stations synoptiques à l'aide de la méthode du polygone de Thiessen afin de calculer la moyenne spatiale de la pluie pour le bassin versant.

3.2. Méthodes

3.2.1. Modélisation hydrologique avec les modèles GR4J et HBV

Une analyse quantitative de l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau dans un système hydrologique nécessite des modèles de simulation qui représentent adéquatement les caractéristiques du système. L'étude a adopté une approche multi-modèle combinant deux modèles hydrologiques conceptuels HBV et GR4J, tous deux accessibles au public.

3.2.1.1. Description du modèle pluie-débit journalier GR4J

▪ Introduction

Le modèle GR4J (modèle du Génie Rural à 4 paramètres Journalier) est un modèle pluie-débit global à quatre paramètres. Son développement a été initié au Cemagref au début des années 1980, avec pour objectif de mettre au point un modèle de simulation pluie-débit robuste et fiable en vue d'utilisations pour des applications de gestion de la ressource en eau et d'ingénierie (dimensionnement d'ouvrage, prévision des crues et des étiages, gestion de réservoirs, détection d'impact...).

Ce modèle a connu plusieurs versions qui ont permis d'améliorer progressivement les performances du modèle. C'est la version de Perrin et al., (2003) qui est présentée ici.

Bien que GR4J soit un modèle empirique, sa structure l'apparente à des modèles conceptuels à réservoirs, avec une procédure de suivi de l'état d'humidité du bassin qui permet de tenir compte

Impact du changement climatique et des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique du bassin versant de Bankandi-Lofing à Dano.

des conditions antérieures et d'en assurer un fonctionnement en continu. Sa structure associe un réservoir de production et un réservoir de routage, des hydrogrammes unitaires ainsi qu'une fonction d'ouverture sur l'extérieur non atmosphérique permettant de simuler le gros du comportement hydrologique du bassin.

▪ **Description mathématique (Perrin et al., 2003)**

Un schéma de la structure est donné à la Figure 4. P_k est la pluie journalière du jour k et E l'évapotranspiration potentielle moyenne pour le même jour calendaire.

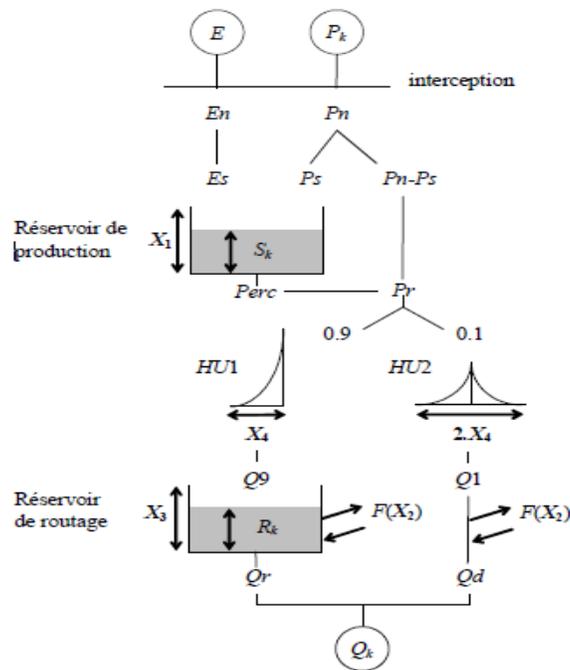


Figure 4: Schéma de la structure du modèle GR4J (Perrin et al, 2003)

Neutralisation

La première opération est la neutralisation de P_k par E pour déterminer une pluie nette P_n et une évapotranspiration nette E_n calculée par

Si $P_k \geq E$ alors $P_n = P_k - E$ et $E_n = 0$ Eq. 1

Si $P_k < E$ alors $P_n = 0$ et $E_n = E - P_k$ Eq. 2

Fonction de rendement

Impact du changement climatique et des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique du bassin versant de Bankandi-Lofing à Dano.

Dans le cas où P_n est différent de zéro, une partie de P_s de P_n alimente le réservoir de production et est calculée par :

$$P_s = \frac{X_1 \left(1 - \left(\frac{S_k}{X_1} \right)^2 \right) \tanh \left(\frac{P_n}{X_1} \right)}{1 + \frac{S_k}{X_1} \tanh \left(\frac{P_n}{X_1} \right)} \quad \text{Eq. 3}$$

Où X_1 (mm) est la capacité maximum du réservoir de production et S_k le contenu du réservoir de production au début du jour k .

Dans le cas contraire, lorsque E_n est différent de zéro, une quantité d'évaporation E_s est retirée du réservoir de production. Elle est donnée par :

$$E_s = \frac{S_k \left(2 - \left(\frac{S_k}{X_1} \right)^2 \right) \tanh \left(\frac{E_n}{X_1} \right)}{1 + \left(2 - \frac{S_k}{X_1} \right) \tanh \left(\frac{E_n}{X_1} \right)} \quad \text{Eq. 4}$$

Le contenu du réservoir qui résulte de ces opérations est donnée par :

$$S' = S_k + P_s - E_s \quad \text{Eq. 5}$$

Percolation

$$Perc = S' \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{4 S'}{9 X_1} \right)^4 \right]^{-\frac{1}{4}} \right\} \quad \text{Eq. 6}$$

Par la suite, le contenu du réservoir devient :

$$S_{k+1} = S' - Perc \quad \text{Eq. 7}$$

Et la quantité d'eau P_r qui atteint finalement la partie routage du modèle est donnée par :

$$P_r = Perc + (P_n - P_s) \quad \text{Eq. 8}$$

Hydrogrammes unitaires

P_r est divisée en deux composantes d'écoulement, 90% étant routés par un hydrogramme unitaire $HU1$ et réservoir de routage de 10% par un hydrogramme unitaire symétrique $HU2$. $HU1$ et $HU2$ dépendent du même paramètre de X_4 , temps de base de $HU1$ exprimé en jours.

Impact du changement climatique et des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique du bassin versant de Bankandi-Lofing à Dano.

Les ordonnées des hydrogrammes sont calculées à partir des courbes en S notées respectivement $SH1$ et $SH2$, qui correspondent aux fonctions cumulées de l'hydrogramme. $SH1$ est définie en fonction du temps par :

$$\text{Pour } t \leq E \quad SH1(t) = 0 \quad \text{Eq. 9}$$

$$\text{Pour } 0 < t < X_4 \quad SH1(t) = \left(\frac{t}{X_4}\right)^{\frac{5}{2}} \quad \text{Eq. 10}$$

$$\text{Pour } t \geq X_4 \quad SH1(t) = 1 \quad \text{Eq. 11}$$

$SH2$ est définie de façon similaire par :

$$\text{Pour } t \leq 0 \quad SH2(t) = 0 \quad \text{Eq. 12}$$

$$\text{Pour } 0 < t \leq X_4 \quad SH2(t) = \frac{1}{2} \left(\frac{t}{X_4}\right)^{\frac{5}{2}} \quad \text{Eq. 13}$$

$$\text{Pour } X_4 < t < 2.X_4 \quad SH2(t) = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{4 S'}{9 X_1}\right)^4 \quad \text{Eq. 14}$$

$$\text{Pour } t \geq 2.X_4 \quad SH2(t) = 1 \quad \text{Eq. 15}$$

Les ordonnées de $HU1$ et $HU2$ sont alors calculées par :

$$UH1(j) = SH1(j) - SH1(j - 1) \quad \text{Eq. 16}$$

$$UH2(j) = SH2(j) - SH2(j - 1) \quad \text{Eq. 17}$$

Où j est un entier.

A chaque pas de temps k , les sorties $Q9$ et $Q1$ des deux hydrogrammes correspondent à la convolution des pluies antérieures par la clé de répartition donnée par l'hydrogramme discrétisé et sont calculées par :

$$Q9(k) = 0,9. \sum_{j=1}^I UH1(j). Pr(k - j + 1) \quad \text{Eq. 18}$$

$$Q1(k) = 0,1. \sum_{j=1}^m UH(j). Pr(k - j + 1) \quad \text{Eq. 19}$$

Où $I = \text{int}(X_4) + 1$ et $m = \text{int}(2.X_4) + 1$, avec $\text{int}(\cdot)$ désignant la partie entière.

Fonction d'échange avec l'extérieur non atmosphérique

Un échange souterrain en eau est calculé par :

Impact du changement climatique et des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique du bassin versant de Bankandi-Lofing à Dano.

$$F = X_2 \left(\frac{R_k}{X_3} \right)^{\frac{7}{2}} \quad \text{Eq. 20}$$

où R_k est le niveau dans le réservoir en début de pas de temps, X_3 la capacité à un jour du réservoir et X_2 le coefficient d'échange en eau qui peut être positif dans le cas d'apports, négatif dans le cas de pertes vers des nappes profondes ou nul. En fait, l'interprétation physique de cette fonction d'échange n'est pas directe.

Réservoir de routage

Le niveau dans le réservoir de routage est modifié en ajoutant la sortie Q_9 de l'hydrogramme $HU1$ et F :

$$R' = \max(0; R_k + Q_9(k) + F) \quad \text{Eq. 21}$$

Il se vidange ensuite en une sortie Q_r donnée par :

$$Q_r = R' \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{R'}{X_3} \right)^4 \right]^{-\frac{1}{4}} \right\} \quad \text{Eq. 22}$$

Le niveau dans le réservoir devient

$$R_{k+1} = R' - Q_r \quad \text{Eq. 23}$$

Écoulement total

La sortie Q_1 de l'hydrogramme $HU2$ est soumise au même échange pour donner la composante d'écoulement Q_d :

$$Q_d = \max(0; Q_1(k) + F) \quad \text{Eq. 24}$$

Le débit total Q est donné par :

$$Q_k = Q_r + Q_d \quad \text{Eq. 25}$$

▪ Paramètres

Le modèle GR4J ne comporte que quatre paramètres à caler :

X_1 :	capacité du réservoir de production	(mm)
X_2 :	coefficient d'échanges souterrains	(mm)
X_3 :	capacité à un jour du réservoir de routage	(mm)
X_4 :	temps de base de l'hydrogramme unitaire $HU1$	(j)

Le scripte R qui a permis l'implémentation du modèle GR4J est détaillé en annexe 1.

3.2.1.2. Description du modèle HBV

▪ Introduction

Le modèle hydrologique universel HBV (Lindström et al., 1997) est un modèle conceptuel global à l'échelle du bassin versant qui est capable de calculer le débit pour divers forçages et mécanismes. Ce modèle est connu pour sa robustesse, malgré sa simplicité relative. Pour simplifier d'avantage le modèle, certaines composantes peuvent être rendues inactives.

Ce modèle simule le débit horaire en utilisant comme entrées la température et la précipitation horaires, ainsi que les estimations mensuelles de l'évapotranspiration potentielle. Il prend en compte les caractéristiques topographiques comme la superficie et l'altitude pour la discrétisation spatiale du domaine d'étude en zones homogènes. Le modèle HBV consiste en une fonction de production pour l'écoulement vertical (Figure 5) où la fonte de la neige est calculée par la méthode des degrés-jours, où la recharge de la nappe et l'évapotranspiration réelle sont des fonctions du stockage en eau actuel dans le réservoir sol et où la formation de l'écoulement de surface se fait à travers trois réservoirs dont le premier est non-linéaire. Pour les fonctions de production neige et sol, les calculs sont réalisés pour chaque zone. Ainsi le modèle est semi-distribué alors que les paramètres de la fonction de transfert sont globaux par sous-bassin.

Le modèle HBV et ses variantes ont été appliqués dans un grand nombre de pays et d'environnements (Graham and Bergström, 2000). Bergström (1992) mentionne des applications à plus de 200 bassins dans 30 pays, y compris des bassins nivaux et glaciaires des Alpes, de l'Himalaya, de Nouvelle-Zélande, du Groenland et d'Amérique du Nord, des bassins arctiques en Scandinavie et en Alaska du nord, et des bassins à environnements de basse latitude tant humides que semi-arides comme au Panama.

Impact du changement climatique et des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique du bassin versant de Bankandi-Lofing à Dano.

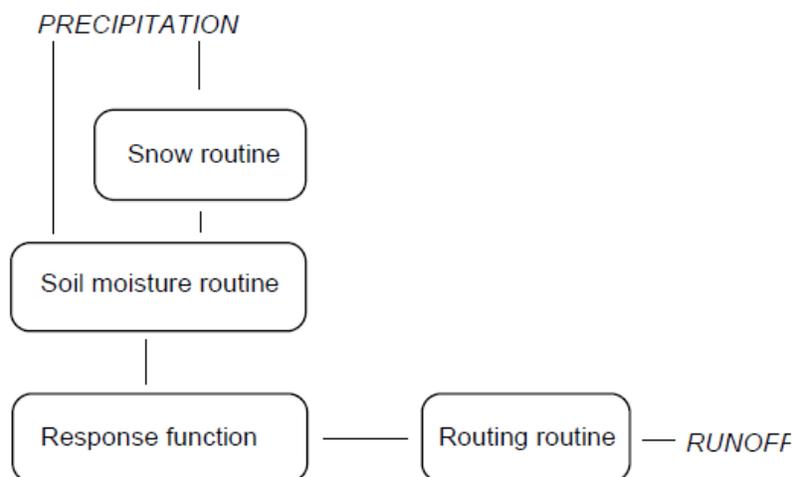


Figure 5: Structure du modèle HBV (Seibert, 2005)

▪ **Description mathématique (Bergström, 1976)**

Le modèle simule le débit quotidien en utilisant les précipitations quotidiennes, la température et l'évapotranspiration potentielle comme entrée. Les précipitations sont simulées sous forme de neige ou de pluie selon si la température est supérieure ou inférieure à une température seuil, TT [$^{\circ}C$]. Toutes les précipitations simulées comme de la neige, c'est-à-dire tombant lorsque la température est inférieure à TT , est multiplié par un facteur de correction des chutes de neige, $SFCF$ [-]. La fonte des neiges est calculée avec la méthode des degrés-jours (Equation 26). L'eau de fonte et les précipitations sont retenues dans le manteau neigeux jusqu'à ce qu'il dépasse une certaine fraction, CWH [-], de l'équivalent en eau de la neige. L'eau liquide dans le manteau neigeux gèle selon l'équation 27. Pour cette étude, le module de la neige a été désactivé.

La pluie et la fonte des neiges (P) sont divisées en eau de saturation du sol et la recharge des eaux souterraines en fonction de la relation entre la teneur en eau du sol (SM [mm]) et sa plus grande valeur (FC [mm]) (équation 28). L'évaporation réelle du sol est égale à l'évaporation potentielle si SM/FC est supérieur à LP [-] tandis qu'une réduction linéaire est utilisée lorsque SM/FC est inférieur à LP (équation 29). La recharge des eaux souterraines est ajoutée au réservoir supérieur des eaux souterraines (SUZ [mm]). $PERC$ [$mm d^{-1}$] définit la percolation maximale débitée du réservoir supérieur au réservoir inférieur des eaux souterraines (SLZ [mm]). L'écoulement des eaux souterraines est calculé comme la somme de deux ou trois équations linéaires du flux sortant selon que SUZ est au-dessus de la valeur seuil, UZZ [mm], ou non (équation 30). Cet écoulement

Impact du changement climatique et des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique du bassin versant de Bankandi-Lofing à Dano.

est enfin transformé par une fonction de pondération triangulaire définie par le paramètre **MAXBAS** (Equation 31) pour donner le débit simulé [mm d⁻¹].

Si différentes zones d'élévation sont utilisées, le changement de la précipitation et la température en fonction de l'élévation sont calculés à l'aide des deux paramètres **PCALT [% / 100 m]** et **TCALT [°C / 100 m]** (Équation 31 et 32).

La moyenne à long terme de l'évaporation potentielle, **E_{pot,M}** pour un certain jour de l'année peut être corrigée à sa valeur au jour t, **E_{pot}(t)**, en utilisant les écarts de la température, **T(t)**, de sa moyenne à long terme, **T_M**, et un facteur de correction, **CET [°C⁻¹]** (équation 32).

$$Fonte = CFMAX(T(t) - TT) \quad \text{Eq. 26}$$

$$Gèle = CFR CFMAX(TT - T(t)) \quad \text{Eq. 27}$$

$$\frac{recharge}{P(t)} = \left(\frac{SM(t)}{FC} \right)^{BETA} \quad \text{Eq. 28}$$

$$E_{act} = E_{pot} \min \left(\frac{SM(t)}{FC \cdot LP}, 1 \right) \quad \text{Eq. 29}$$

$$Q_{Ground\ Water}(t) = K_2 SLZ + K_1 SUZ + K_0 \max(SUZ - UZL, 0) \quad \text{Eq. 30}$$

$$Q_{sim}(t) = \sum_{i=1}^{MAXBAS} c(i) Q_{Ground\ Water}(t - i + 1) \quad \text{Eq. 31}$$

$$\text{Où } c(i) = \int_{i-1}^i \frac{2}{MAXBAS} - \left| u - \frac{MAXBAS}{2} \right| \frac{4}{MAXBAS^2} du$$

$$P(h) = P_0 \left(1 + \frac{PCALT(h - h_0)}{10000}, 1 \right) \quad \text{Eq. 32}$$

$$T(h) = T_0 - \frac{TCALT(h - h_0)}{100} \quad \text{Eq. 33}$$

$$E_{pot}(t) = (1 + CET(T(t) - T_M)) E_{pot,M} \quad \text{Eq. 34}$$

$$\text{Mais } 0 \leq E_{pot}(t) \leq 2 E_{pot,M}$$

La routine de réponse du modèle est présentée par la figure 6

Impact du changement climatique et des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique du bassin versant de Bankandi-Lofing à Dano.

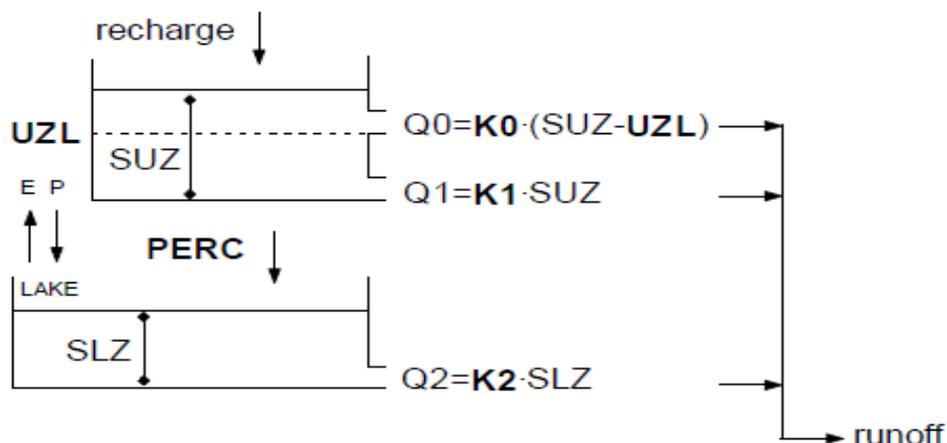


Figure 6: Fonction de réponse (Seibert J. 2005)

▪ **Les paramètres du modèle HBV**

Le modèle HBV comporte 14 paramètres de calage. Les paramètres qui seront utilisés pour le calage dans cette étude sont ceux qui concernent la routine de l'évaporation et du sol, la routine de réponse et la routine de l'eau du sous-sol. Le tableau 2 présente ces paramètres.

Tableau 2 : Paramètres de calage du modèle HBV

	Description
Routine de l'évaporation et du sol	
FC (mm)	Humidité maximale du sol
LP (-)	Seuil d'humidité du sol pour la réduction de l'évaporation
BETA (-)	Coefficient de forme
Routine de l'eau du sous-sol et de réponse	
K ₀ (jour)	Coefficient de récession
K ₁ (jour)	Coefficient de récession
K ₂ (jour)	Coefficient de récession
UZL (mm)	Seuil des flux sortant
PERC (mm/jour)	Flux maximal sortant du réservoir supérieur au réservoir inférieur.
MAXBAS (jours)	Routage, longueur de la fonction de pondération.

3.2.1.3. Calage et validation des modèles

Le calage est la phase au cours de laquelle le jeu de paramètres du modèle est optimisé. Pour l'optimisation, un algorithme est généralement utilisé. Dans la présente étude, l'algorithme générique intégré et l'optimisation de Powell (GAP optimisation) Seibert, (2000) a été utilisé pour le calage et la validation de HBV-light. Pour le modèle GR4J, l'algorithme utilisé est celui intégré dans le package AirGR (Coron et al., 2017, 2020) développé par le Groupe de recherche en hydrologie des bassins versants de l'INRAE (France). Le script R ayant servi à implémenter le modèle est détaillé en Annexe 1.

Le calage des deux modèles s'est fait sur la période 2016 -2017 et la validation sur 2018. La période de mise en route choisi pour les deux modèles est l'année 2015.

Le critère d'ajustement ou fonction objectif permet de mesurer la pertinence du modèle en comparant les débits observés aux débits simulés. Le critère de Nash (Nash et Sutcliffe, 1970) encore appelé NSE (Nash Sutcliffe Efficiency) dans le langage R et le Kling-Gupta Efficiency (KGE) ont été utilisés.

▪ Le critère de Nash (NSE)

Le coefficient d'efficacité de Nash-Sutcliffe (NSE) est utilisé pour évaluer le pouvoir prédictif des modèles hydrologiques. C'est une statistique normalisée qui détermine l'amplitude relative de la variance résiduelle («bruit») par rapport à la variance des données mesurées («information») (Nash and Sutcliffe, 1970). Il est défini comme :

$$NSE = 1 - \left(\frac{\sum(Q_{sim} - Q_{obs})^2}{\sum(Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \right) \quad \begin{array}{l} \text{Eq.} \\ 35 \end{array}$$

Le critère de Nash – Sutcliffe peut varier de $]-\infty; 1]$. Une efficacité de 1 (NSE = 1) signifie une correspondance parfaite du débit modélisé avec les données observées. Une efficacité de 0 (NSE = 0) indique que les prédictions du modèle sont aussi précises que la moyenne des données observées, tandis qu'une efficacité inférieure à zéro (NSE <0) se produit lorsque la moyenne observée est un meilleur prédicteur que le modèle ou, en d'autres termes, lorsque la variance résiduelle (décrite par le numérateur dans l'expression ci-dessus) est plus grande que la variance des données (décrite par le dénominateur). Essentiellement, plus l'efficacité du modèle est proche de 1, plus le modèle est

Impact du changement climatique et des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique du bassin versant de Bankandi-Lofing à Dano.

précis. Des valeurs seuils pour indiquer un modèle de qualité satisfaisante ont été suggérées entre $0,5 < NSE < 0,65$ (Ritter and Muñoz-Carpena, 2013).

▪ **Le critère de Kling-Gupta (KGE)**

Cette mesure de la qualité de l'ajustement a été développée par Gupta et al., (2009) pour fournir une décomposition intéressante de l'efficacité de Nash-Sutcliffe (et donc de l'erreur quadratique moyenne), ce qui facilite l'analyse de l'importance relative de ses différentes composantes (corrélation, biais et variabilité) dans le cadre de la modélisation hydrologique. Le critère de Kling-Gupta varie de $]-\infty; 1]$. Essentiellement, plus la valeur est proche de 1, plus le modèle est précis. La formule de KGE est définie par :

$$KGE = 1 - \sqrt{((r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2)} \quad \text{Eq. 36}$$

Avec :

r = Coefficient de corrélation linéaire en Q simulé et Q observé

α = $\sigma_{sim}/\sigma_{obs}$

β = μ_{sim}/μ_{obs}

3.2.2. Correction de biais de données climatiques issues des modèles climatiques HadGEM2-ES/RegCM4 et MPI-ESM-MR/RegCM4

Les modèles HadGEM et MPI ont été évalués pour obtenir une estimation des variables historiques simulées pour le bassin versant. Pour ce fait, les simulations historiques des deux modèles ont été comparées aux variables climatiques historiques observées fournies par le Service météorologique national (DGM) du Burkina Faso. Comme présenté dans le chapitre 3, la température simulée non corrigée par l'ensemble des modèles est inférieure à la température observée avec un écart modéré. Les précipitations simulées par le modèle HadGEM présentaient des biais tels qu'une surestimation des précipitations annuelles tandis que celles simulées par le modèle MPI présentaient des biais tels qu'une surestimation. Une correction du biais de précipitation a donc été appliquée au deux MCR-MCG suivant la méthode du quantile mapping non paramétrique utilisant la méthode des quantiles empiriques (Gudmundsson et al., 2012). Pour chaque membre, une fonction de transfert a été déterminée en utilisant les précipitations observées et modélisées pour la période historique; par la suite, la fonction de transfert a été appliquée aux scénarios climatiques projetés (période 2031-2060). Le test de Mann Kendall au 5% a été également appliqué sur les simulations

Impact du changement climatique et des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique du bassin versant de Bankandi-Lofing à Dano.

historiques de pluies avant et après correction pour s'assurer que la méthode de correction appliquée n'a pas modifiée les tendances simulées au départ par les modèles climatiques. Le package R utilisé pour réaliser la correction des biais est qmap. Le script R ayant servi à réaliser la correction des biais est présenté en Annexe 2.

3.2.3. Calcul de l'ETo historique et future avec l'équation de Hargreaves-Samani (ETo-HS)

Afin de pouvoir simuler les débits historiques et futurs avec les données simulées des modèles climatiques, nous avons calculé l'évapotranspiration potentielle avec l'équation de Hargreaves and Samani, (1985). Cette équation a été choisie parce qu'elle ne prend en compte que la température et latitude. Latitude est prise en compte dans des équations mathématique pour déterminer la radiation solaire du milieu d'étude. La formule de l'ETo de Hargreaves et Samani, (1985) est définie comme suit :

$$ETo = 0,0135(KT)(R_a)(TD)^{1/2}(TC + 17,8) \quad \text{Eq. 37}$$

Avec :

$$TD = T_{max} - T_{min}(^{\circ}C)$$

TC est la température moyenne journalière

R_a est le rayonnement extraterrestre

KT un coefficient empirique dont les valeurs recommandées par Hargreaves, (1994) est de KT=0,19 pour les côtières et KT=0,162 pour les zones non côtières.

Calcul de Ra [MJ/m²/d]

$$R_a = 117,5 \times dr \times (\omega_s \times \sin \varphi \times \sin \delta + \cos \varphi \times \cos \delta \times \sin \omega_s) / \pi \quad \text{Eq. 38}$$

Avec :

$\varphi = \text{Latitude}$

dr est la distance relative entre la terre et le soleil

$$dr = 1 + 00334 \times \cos\left(\frac{2\pi J}{365}\right) \text{ où } J \text{ est le jour julien} \quad \text{Eq. 39}$$

ω_s est l'angle de l'heure du coucher du soleil

$$\omega_s = \cos^{-1}\left(-\frac{\sin \varphi \times \sin \delta}{\cos \varphi \times \cos \delta}\right) \quad \text{Eq. 40}$$

δ est la déclinaison solaire

$$\delta = 23,45 \times \sin\left(\frac{360}{365}[J + 284]\right) \quad \text{Eq. 41}$$

3.2.4. Simulation des débits historiques et futurs à l'aide des données corrigées

L'évaluation des impacts du changement climatique sur le régime de l'eau du bassin versant nécessite les données de débits historiques et futurs. Ces données de débit sont simulées par les modèles hydrologiques HBV et GR4J. Ainsi nous aurons à faire une comparaison entre les débits historiques simulés et débits futurs simulés ainsi que la comparaison entre la simulation entre les deux modèles climatiques. La simulation des débits est réalisée à l'aide des valeurs des paramètres obtenues lors du calage des modèles hydrologiques. Les données d'entrées pour la simulation des débits sont la pluie, la température et l'évapotranspiration calculée avec l'équation de Hargreaves-Samani (1985).

3.2.5. Tests statistiques sur les données d'avant et d'après aménagement

Dans le but d'évaluer l'impact que la construction des canaux de drainage dans le bas fond de Bankandi sur le débit à l'exutoire de Loffing, une comparaison entre la moyenne des débits avant aménagement et après aménagement est réalisée à l'aide de test statistique au seuil significative de 5%. Cette méthodologie de travail pour l'évaluation de l'impact a été adopté en fonction des données disponible.

Les données d'avant aménagement couvrent la période de 2014 à 2017 et celles d'après aménagement couvre l'année 2018. Nous pouvons remarquer qu'il n'y a pas assez de données pour la période après aménagement. Cet état de chose est dû aux problèmes techniques (matériel défectueux) et sécuritaire rencontré par les installations de WASCAL à l'exutoire de Loffing notamment pour la période 2019. Il faut aussi noter qu'il s'agit d'un aménagement assez récent, donc les données mesurées sont donc limitées.

Les tests statistiques réalisés sur les données sont :

- Le test de Shapiro et Wilk (1965) pour vérifier si les échantillons sont normalement distribués ;
- Le two samples t-test pour la comparaison de moyennes et F-test de Fisher pour la comparaison des variances si les échantillons suivent une distribution normale ;

Impact du changement climatique et des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique du bassin versant de Bankandi-Lofing à Dano.

- Le test de Wilcoxon, (1945) pour la comparaison des médianes si les échantillons ne sont pas normalement distribués.

IV. : Résultats Et Discussions

4.1. Résultats

4.1.1. Calages et validations des modèles hydrologiques.

4.1.1.1. Le modèle GR4J

Calage du modèle GR4J

Le modèle GR4J a été implémenté sur R à l'aide du package AirGR, et l'algorithme de C. Michel (Annexe 1) a été utilisé pour le calage automatique. Le principe du calage est de faire varier les paramètres X1, X2, X3, X4 du modèle entre les valeurs limites proposées par le CEMAGREF, jusqu'à l'obtention des valeurs optimum des critères de Nash, KGE et le coefficient de corrélation R². Les résultats du calage réalisé du 01/01/2016 au 31/12/2017 sont présentés dans le tableau 3.

Tableau 3 : Résultats de calage du modèle GR4J

X ₁ (mm)	X ₂ (mm)	X ₃ (mm)	X ₄ (jour)	NSE (Q)	KGE (Q)	R ²
2095	-0.235	25.533	1.212	0.7324	0.7028	0,7472

D'après les valeurs de critères de Nash, KGE et la superposition des deux courbes des débits simulés et observés (Figure7), nous pouvons dire que le calage est assez persuasif pour notre bassin. Les débits de pointe pendant l'année 2016 sont bien reproduits par le modèle GR4J, ce qui n'est pas le cas pour les débits de pointe de l'année 2017.

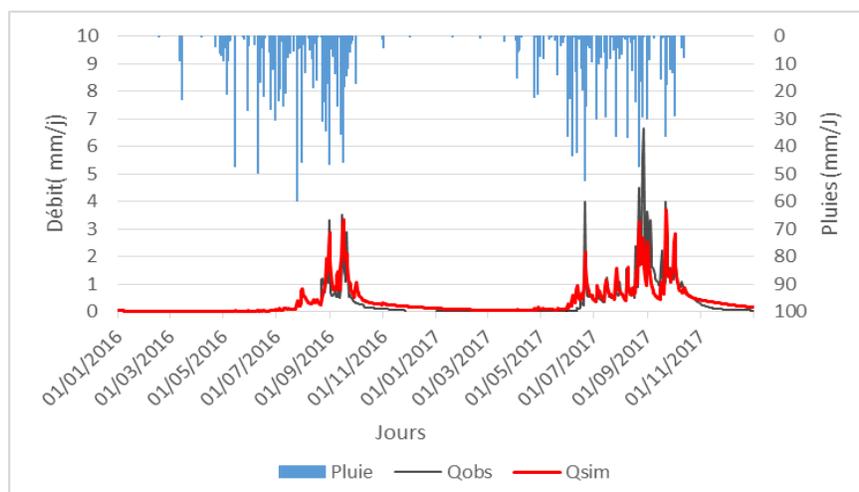


Figure 7: Comparaison entre les débits simulés et observés pour la période de calage (2016-2017)

Impact du changement climatique et des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique du bassin versant de Bankandi-Lofing à Dano.

Pour mieux apprécier les résultats du calage, plusieurs graphiques ont été représentés (Figure 7,8). La Figure 8 présente la corrélation entre les débits simulés et observés. Comme on peut le voir les nuages de points sont regroupés autour de la première bissectrice indiquant une bonne simulation avec un coefficient de détermination de 0,7472. Malgré le manque de données pendant la période 2016, le modèle GR4J a pu produire une bonne simulation de manière globale. Cela prouve la robustesse du modèle. Cependant on remarque que le modèle sous-estime les débits de pointe, cela pourrait s'expliquer par l'incertitude associée aux mesures de débit de pointe.

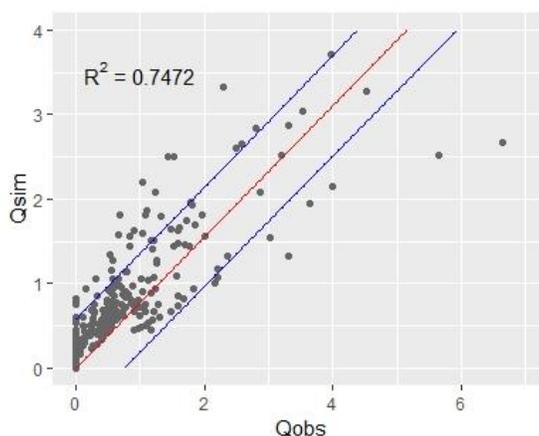


Figure 8: Nuage de points des débits simulés et observés en mm/j pour le calage de GR4J avec une représentation de l'intervalle de confiance de 95%.

Validation du modèle GR4J

Considérant les résultats satisfaisants du calage, les mêmes paramètres ont été utilisés pour la validation. Le tableau 4 présente les critères de performances de la validation. D'après les valeurs des critères de Nash, KGE et du coefficient de détermination R^2 qui sont toutes supérieures à 0.5, on peut dire que la validation du modèle GR4J sur l'année 2018 est bonne.

Tableau 4 : Tableau présentant les paramètres de calage et les critères de performances

X_1 (mm)	X_2 (mm)	X_3 (mm)	X_4 (Jour)	NSE(Q)	KGE(Q)	R^2
2095	-0,235	25,533	1,212	0,7126	0,6820	0,7289

Les débits observés et les débits simulés pendant la validation à l'échelle journalière (Figure 9) et le nuage de points associés (Figure 10) sont présentés ci-dessous. De manière globale, le modèle

Impact du changement climatique et des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique du bassin versant de Bankandi-Lofing à Dano.

reproduit assez bien les variations observées au niveau des débits observés. Cependant, les débits de pointe pendant la période de validation ne sont pas bien simulés par le modèle. La figure 10 indique qu'il y a une bonne corrélation entre les débits observés et simulés, avec un coefficient de détermination de 0,7305. Les résultats de la validation exprimés par les critères de Nash, KGE, R^2 et l'allure des courbes, montrent que la modélisation pluies-débit avec le modèle GR4J est satisfaisante.

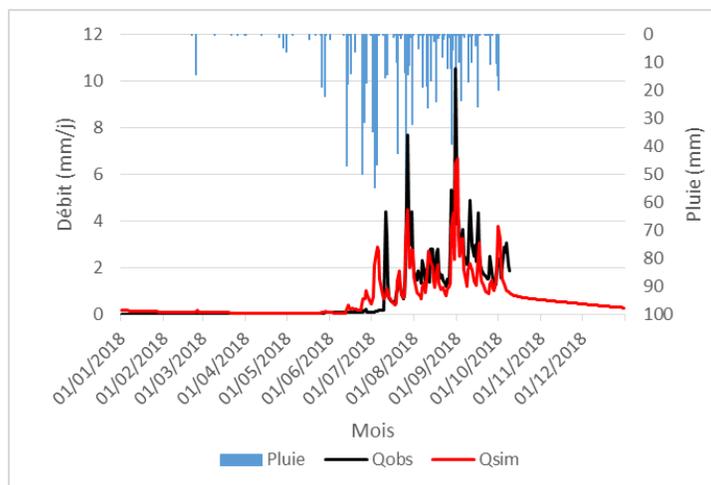


Figure 9 : Comparaison entre les débits simulés et observés pour la période de validation (2018)

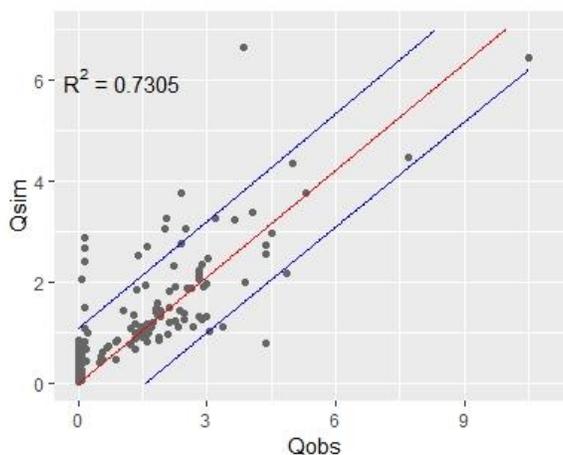


Figure 10 : Nuage de points des débits simulés et observés en mm/j pour la validation de GR4J avec une représentation de l'intervalle de confiance de 95%.

Le tableau 5 présente le bilan hydrologique annuel obtenu à partir du modèle GR4J. L'évapotranspiration réelle calculée par le modèle pour le calage et la validation représente

Impact du changement climatique et des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique du bassin versant de Bankandi-Lofing à Dano.

respectivement 45% et 44% de l'évapotranspiration potentielle. Les coefficients de ruissellement calculés montrent que le bassin versant a un taux d'infiltration élevé. Les valeurs négatives de la variation de stock indiquent un déficit hydrique.

Tableau 5 : Bilan hydrologique annuelle en mm du bassin versant de Bankandi-Lofing pour le modèle GR4J

	Calage	Validation
Pluie (mm)	979,15	1028,7
ETP(mm)	1995,23	1991,14
ETR (mm)	907,6	874,93
Qobs (mm)	106	189
Qsim (mm)	128,6	207,6
Coef ruissellement obs %	11%	18%
Coef ruissellement sim %	13%	20%
Variation de stock (ΔS en mm)	-57,05	-53,83

4.1.1.2. Le Modèle HBV

Calage du modèle HBV

La figure 11 présente les débits simulés et observés pour la période de calage de 01/01/2016 à 31/12/2017 pour le modèle hydrologique HBV. D'après les valeurs des critères de NASH et KGE présentées dans le tableau 7 (respectivement de 0,53 et 0,57), nous pouvons dire que le calage est acceptable mais pas assez satisfaisant. La figure 12 présente la corrélation entre les débits observés et simulés et avec un coefficient de détermination R^2 de 0,6553. Il peut être estimé que la corrélation est bonne. Mais remarquons que le modèle a tendance à sous-estimer les pics de débit, ce qui a été observé au niveau de modèle GR4J. Ceci pourrait s'expliquer par les incertitudes liées aux mesures des débits (particulièrement les débits élevés) ou au calage des paramètres. Etant donné que les deux modèles utilisent les mêmes données d'entrées, le contraire n'aurait pas été normal. En observant le graphe des débits simulés, nous remarquons que le modèle a simulé une bonne partie des débits manquant pendant la période 2016..

Impact du changement climatique et des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique du bassin versant de Bankandi-Lofing à Dano.

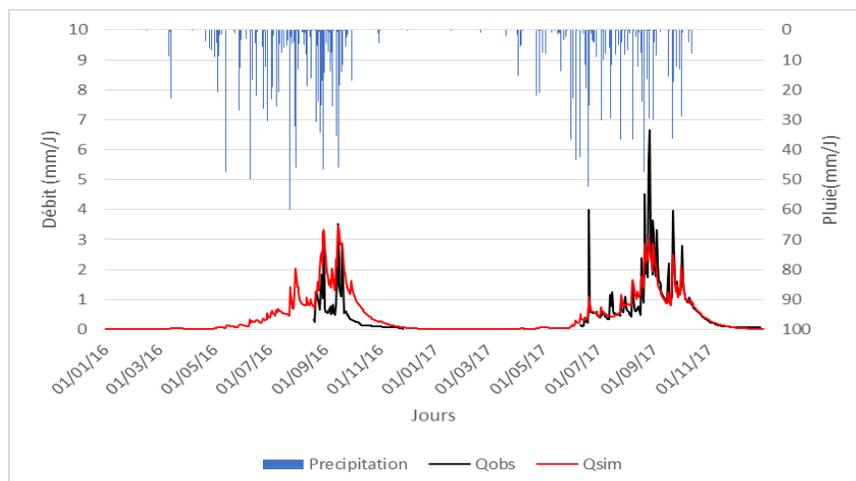


Figure 11 : Débits observés et simulés par HBV pour le calage du modèle HBV

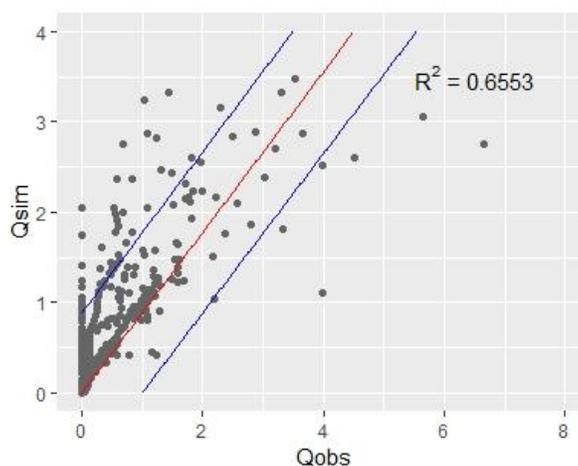


Figure 12 : Nuage de point des débits observés et simulés en mm/j pour le calage du modèle HBV avec une représentation de l'intervalle de confiance à 95%.

Validation du modèle HBV

Pour la validation du modèle, les paramètres déterminés lors du calage ont été utilisés pour une période différente (01/01/2018-31/12/2018). Ces paramètres sont consignés dans le tableau 6. Les critères de NASH, KGE obtenu lors de la validation qui sont respectivement de 0,52 et 0,56 reflètent le résultat obtenu lors du calage. En observant la figure 13 nous remarquons qu'en plus du fait que le modèle sous-estime les débits de pointes, il a grandement sous-estimé les débits de la période de 2018. Malgré la faible performance du modèle il existe une bonne corrélation avec

Impact du changement climatique et des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique du bassin versant de Bankandi-Lofing à Dano.

un coefficient de détermination ($R^2=0,7677$) entre les débits observés et simulés lors de la validation (figure 14).

Les valeurs des critères de performances obtenues pour le calage et la validation sont consignées dans le tableau 6

Tableau 6 : Paramètres de calage du modèle HBV

Paramètres	Intervalles	Valeurs
FC (mm)	1000-2000	1977,906
LP	0,3-0,5	0,301
BETA	1-1,3	1,266
PERC (mm/j)	1-2	1,684
UZL (mm)	500-501	500,185
K0 (1/d)	0,1-0,5	0,306
K1 (1/d)	0,01-0,2	0,173
K2 (1/d)	0,00005-0,1	0,055
MAXBAS (d)	1-2	1,321

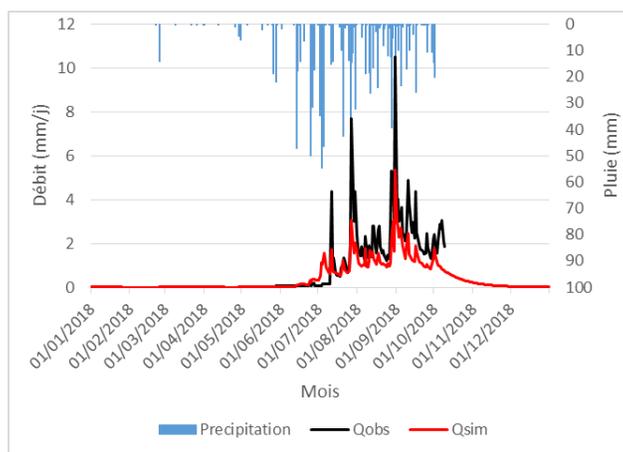


Figure 13 : Comparaison entre débits simulés et observés pour la validation du modèle HBV

Le tableau 8 présente le bilan hydrologique annuel obtenu à partir du modèle HBV. Pour le calage, le modèle simule un débit moyen annuel plus élevé que le débit moyen annuel observé. Cela peut s'expliquer par le fait que le modèle à simuler une bonne partie des débits manquant. L'ETR calculé par le modèle calage et la validation représente respectivement 46% et 45% de l'ETP. Les valeurs

Impact du changement climatique et des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique du bassin versant de Bankandi-Lofing à Dano.

de ruissellement obtenues prouvent une fois de plus que le bassin à un coefficient d'infiltration élevé. Notons la variation de stock est également négative pour le modèle.

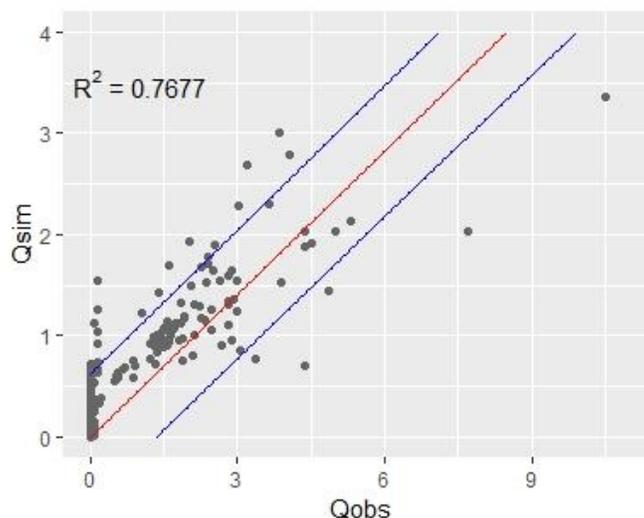


Figure 14 : Nuage de point des débits observés et simulés en mm/j pour la validation du modèle HBV avec une représentation de l'intervalle de confiance à 95%

Tableau 7 : Récapitulatif des critères de performances de calage et validation du modèle HBV

Critères de performances	NSE	KGE	R ²
Calage	0,53	0,57	0,6553
Validation	0,52	0,56	0,7677

Tableau 8 : Bilan hydrologique annuel en mm du bassin versant de Bankandi-Lofing pour le modèle HBV

	Calage	Validation
Pluie (mm)	979,15	1028,7
ETP(mm)	1995,23	1991,14
ETR (mm)	912	900,14
Qobs (mm)	106	189
Qsim (mm)	158,12	150,3
Coef ruise obs %	11%	18%
Coef ruise sim %	16%	15%

Variaton de stock (ΔS en mm)	-90,97	-21,74
--	--------	--------

4.1.2. Correction de biais des données de projection climatique pour le bassin versant de Dano (précipitation et température)

4.1.2.1. Précipitations

Deux modèles climatiques ont été considérés dans cette étude. Il s'agit de HadGEM2-ES/RegCM4 et MPI_ESM_MR/RegCM4 de CORDEX Africa (Sylla et al 2016). Les projections de température et de précipitation étant sujettes à des incertitudes surtout à cause de leurs grandes résolutions, il convient de corriger ces grandeurs en faisant une descente d'échelle. Cette correction s'est basée sur la comparaison des précipitations (respectivement la température) simulées par les modèles climatiques régionaux sélectionnés avec les données observées de précipitations (respectivement de température) sur le terrain en utilisant la méthode du 'quantile mapping' décrite dans la méthodologie.

La figure 15 présente les pluies simulées par les modèles HadGEM2-ES et MPI_ESM_MR et les pluies observées pour la période historique de 1981 à 2010 ; les données étant rangées par ordre décroissant. De cette figure, on note que les données historiques simulées par les deux modèles ne sont pas trop éloignées de la réalité en ce qui concerne les pluies de faibles intensités. Cependant, pour les hauteurs de pluies élevées, on remarque un grand décalage des pluies simulées par les deux modèles par rapport à la première bissectrice justifiant la nécessité de faire une correction de ces données avant leur utilisation.

La figure 16 présente la fréquence cumulée des pluies simulées par les deux modèles climatiques (HadGEM2-ES et MPI_ESM_MR) et celle des données de pluies observées. On note une superposition acceptable des courbes dans les deux cas. Cependant, la fréquence des petites valeurs a besoin d'être ajustée.

Impact du changement climatique et des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique du bassin versant de Bankandi-Lofing à Dano.

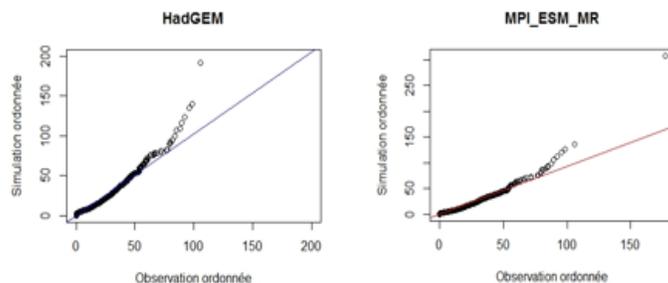


Figure 15 : Diagramme Quantile-Quantile pour la comparaison entre la pluie observée et la pluie simulée par le modèle HadGEM2-ES et MPI-ESM-MR.

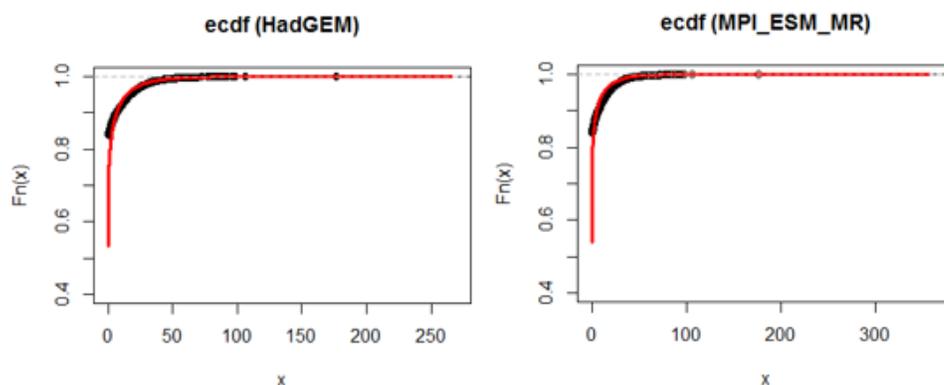


Figure 16 : Représentation des fonctions de densité cumulatives des données de pluies observées et simulées des modèles HadGEM2-ES et MPI_ESM_MR. (En noir la pluie observée, et en rouge la pluie simulée)

Après la correction des biais avec la méthode du quantile mapping nous avons des résultats assez satisfaisants présentés au niveau des figures 17 et 18. Comme l'illustre les deux graphes de la figures 17, l'ajustement de la droite de régression avec les données simulées des deux modèles est très satisfaisant. Le même constat peut se faire avec les graphes de la figure 18 qui présentent les courbes de fréquence cumulative des données simulées non corrigées en rouge, des données corrigées en vert et qui sont parfaitement superposées aux données observées en noir que l'on n'arrive pas voir à cause de la superposition.

Impact du changement climatique et des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique du bassin versant de Bankandi-Lofing à Dano.

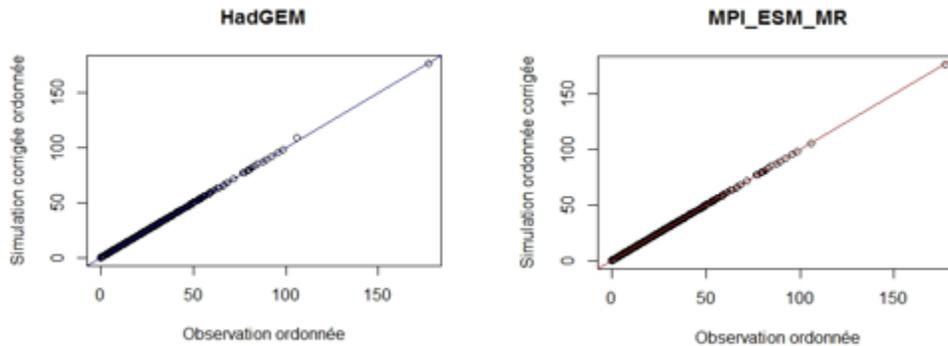


Figure 17 : Diagramme Quantile-Quantile montrant l'ajustement entre la pluie observée et la pluie simulée par le modèle HadGEM2-ES et MPI-ESM-MR après correction.

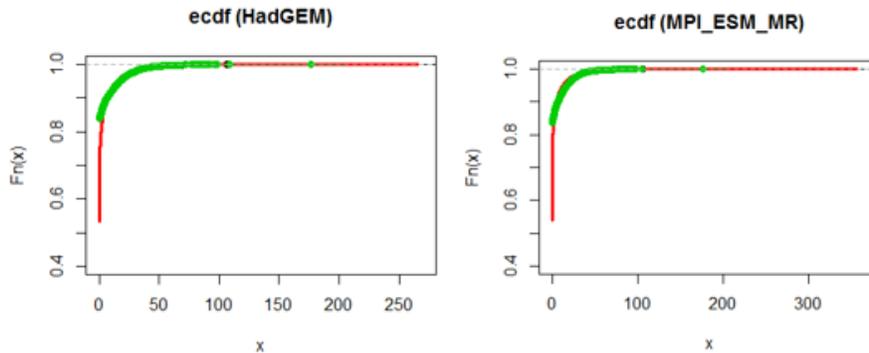


Figure 18 : Représentation des fonctions de densité cumulatives des données pluviométriques observées et simulées des modèles HadGEM2-ES et MPI-ESM-MR avant et après correction (En noir la pluie observée, en rouge la pluie simulée sans correction et en vert la pluie simulée corrigée).

Le test de Mann-Kendall réalisé au seuil de 0,05 (Annexe 3) sur les données historiques : les observations, données de HadGEM2-ES avant et après correction, les données de MPI-ESM-MR avant et après correction nous donne des p-value supérieurs au seuil significatif choisi alors il n'y a pas des preuves statistiquement significatives qu'une tendance est présente dans les données des séries chronologiques. Il peut également observer sur les graphes en Annexe 3 que l'allure des droites de tendance avant correction des données climatiques n'a pas changé après la correction des biais. Nous pouvons donc affirmer que la correction de Biais n'a pas affectée la tendance des données climatiques.

4.1.2.2. Température

La figure 19 présente le diagramme Quantile-Quantile des températures historiques simulées du modèle HadGEM avec les températures observées, et les températures historiques du modèles MPI avec les données observées. Vu la dispersion des points autour de la droite de régression dans les deux cas, on peut donc dire qu'il y a une forte corrélation entre les données simulées par les deux modèles et les données observées. Les graphes de la figure 20 représentent les fréquences cumulées des données simulées en rouge et celle des données observées en noir. Les courbes ont la même allure mais ne se superposent pas. On peut dire que les deux modèles simulent des températures faibles par rapport aux températures observées. Ce qui indique une nécessité de correction des températures simulées par les deux modèles climatiques sur la zone d'étude.

Les figures 21 présente la distribution des températures simulées corrigées et celles observées autour de l'axe de régression. Pour les deux modèles, HadGEM et MPI on peut également remarquer l'ajustement parfait des points à la droite de régression, ce qui une fois de plus montre la forte concordance entre les données simulées et observées. Avec la figure 22, on observe qu'après correction, la courbe des fréquences cumulées des données simulées corrigées en vert se superpose parfaitement avec celle des données observées en noir.

Sur ces figures et pour chaque modèle on dit qu'il y a eu amélioration des données simulées par les deux modèles. Après correction les graphiques indiquent qu'elles se rapprochent mieux des données observées.

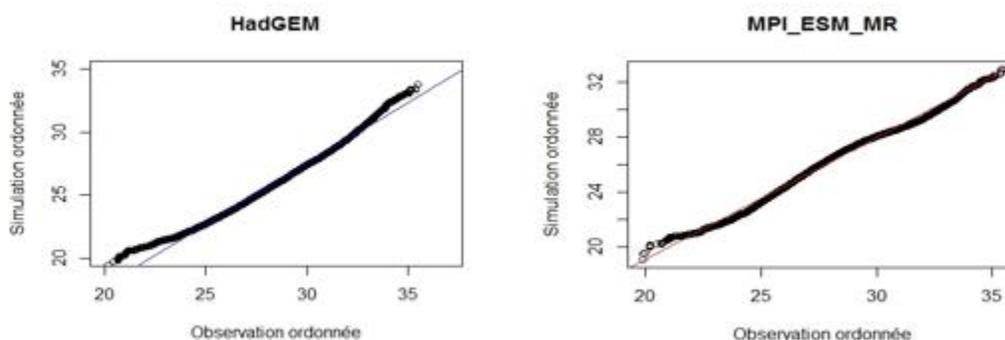


Figure 19 : Diagramme Quantile-Quantile montrant l'ajustement entre les températures observées simulées par le modèle HadGEM2-ES et MPI-ESM-MR avant correction.

Impact du changement climatique et des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique du bassin versant de Bankandi-Lofing à Dano.

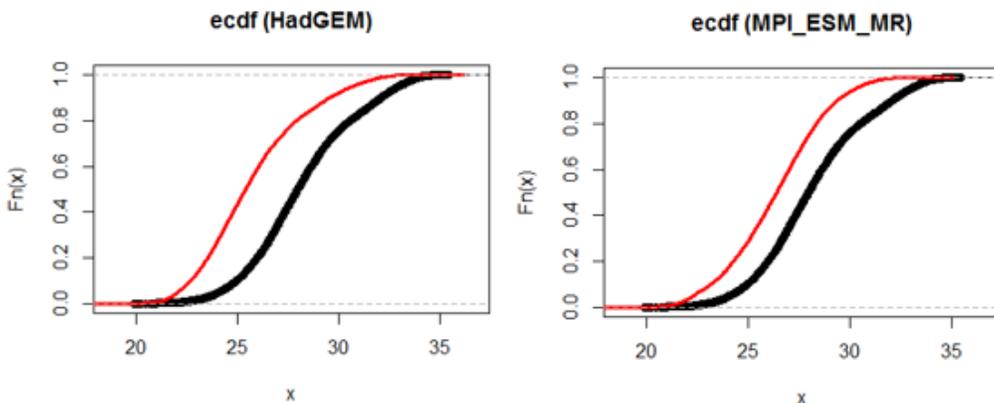


Figure 20 : Représentation des fonctions de densité cumulatives des données de température observées et simulées des modèles HadGEM et MPI_ESM_MR avant correction

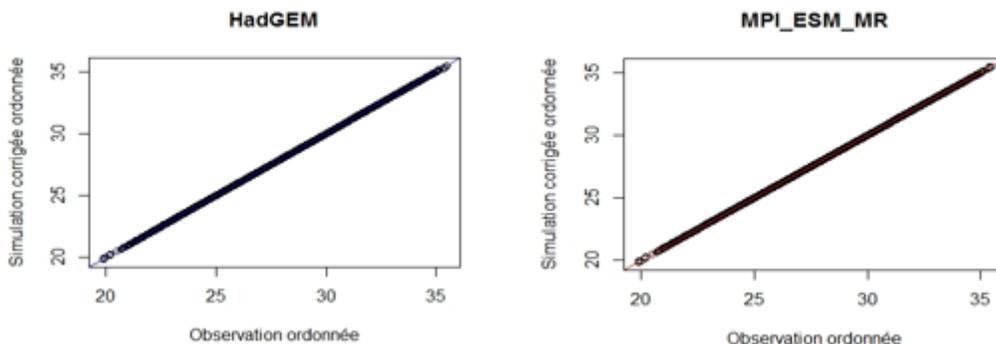


Figure 21 : Diagramme Quantile-Quantile montrant l'ajustement entre les températures observées et simulées par le modèle HadGEM2-ES et MPI-ESM-MR après correction.

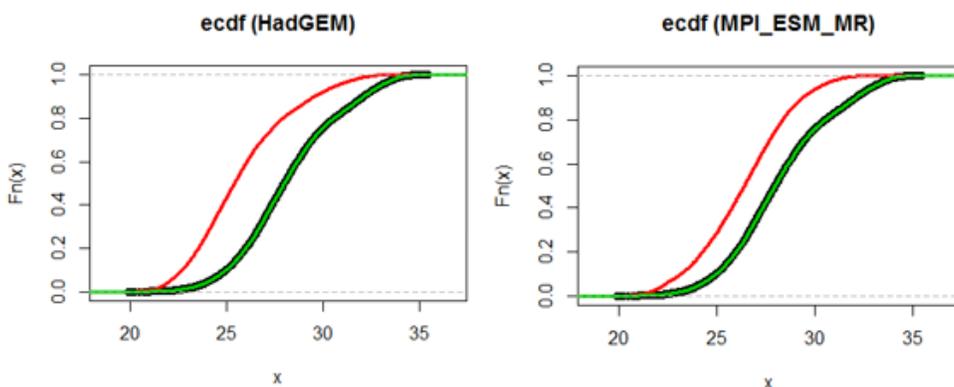


Figure 22 : Représentation des fonctions de densité cumulatives des températures observées et simulées des modèles HadGEM et MPI_ESM_MR avant et après correction (En noir les températures observées, en rouge les températures simulées sans correction et en vert les températures simulées corrigées).

4.1.3. Quelques statistiques des données avant et après correction des précipitations

4.1.3.1. Précipitations historiques observées et simulées

La figure 23 présente les moyennes mensuelles de la pluie historique simulée par les modèles HadGEM et MPI en comparaison avec la moyenne mensuelle des données de pluie historique observées. La période historique couvre les années 1981 à 2010. La configuration annuelle des précipitations est en général bien représentée par tous les MCR-MCG. Le modèle HadGEM2-ES simule la pluie maximale en Août exactement comme nous le montre les données observées tandis le modèle MPI-ESM-MR simule la plus maximale en septembre.

La figure 23-1 présente le comportement des données historiques simulées non corrigées du biais en comparaison avec les observations. Le modèle HadGEM simule des pluies plus élevées que celles observées en juillet et août. Pendant les autres mois il n'y a pas une grande différence en les simulations et les observations. Il présente une moyenne annuelle de 894,6 mm contre 843,9 mm pour les observations soit un excédent de 6%. Quant au modèle MPI, le mois le plus arrosé est septembre avec une pluviométrie de 183,7 mm. La pluviométrie simulée par le modèle pendant les 8 premiers mois est inférieure aux observations. La simulation moyenne annuelle du modèle est de 769,1 mm contre 843,9 mm observée soit un déficit de -9%. Les données non corrigées de biais des deux modèles présentent des résultats assez proches de la réalité.

La figure 23-2 présente la moyenne mensuelle des simulations historiques corrigées des deux modèles en comparaison avec la moyenne mensuelle des données observées.

Pour le modèle HadGEM, nous pouvons observer un équilibre entre les valeurs mensuelles sauf en juillet et Août où les quantités de pluies dépassent les quantités observées. Pour le mois de juillet nous avons une valeur de 202 mm contre 177,2 mm observée soit une différence de 24,8 mm. Pour le mois d'Août nous avons une valeur de 263,3 mm contre 217 mm soit une différence de 46,3 mm. Après correction le modèle simule une moyenne annuelle de 849,6 mm contre 843,9 mm observée soit un excédent annuel de 1% par rapport aux observations. Ce qui prouve que la correction a améliorée les résultats de la simulation en ce sens qu'il rapproche plus de la réalité.

En ce qui concerne le MPI, l'équilibre est aussi observé pendant tous les mois de l'année sauf en septembre où nous avons une différence assez remarquable. La quantité de pluie obtenue par le modèle est de 207,1 mm contre 158 mm pour les données observées soit une différence de 49,1

Impact du changement climatique et des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique du bassin versant de Bankandi-Lofing à Dano.

mm. La moyenne annuelle après correction du modèle est de 868,9 mm contre 843,9 mm observée soit un excédent de 3%. Après la correction de biais des deux modèles, nous pouvons dire que les deux modèles présentent des résultats plus convaincants.

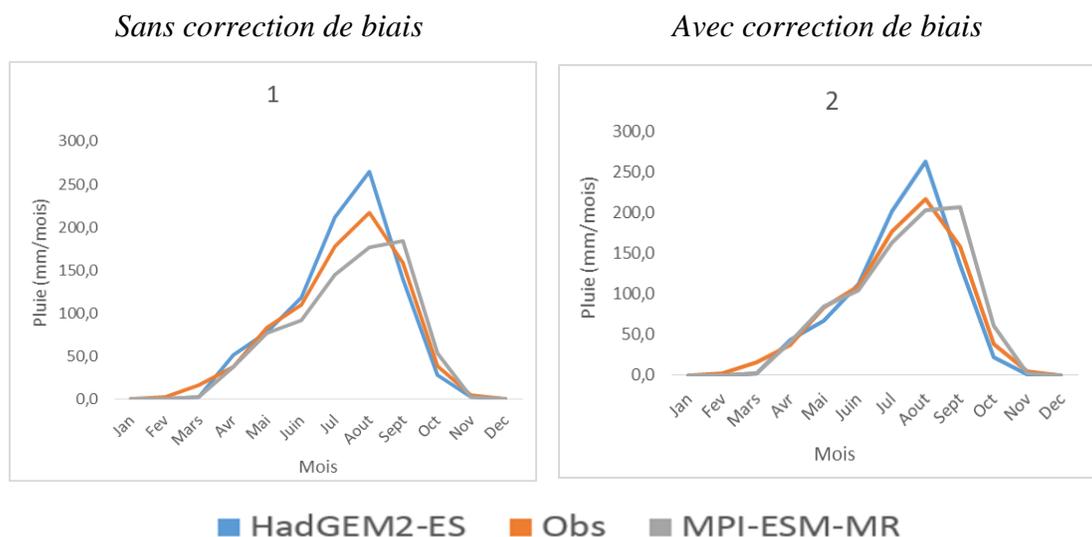


Figure 23 : Comparaison entre la moyenne mensuelle des données de pluie historique observées et simulées par le modèle HadGEM2-ES et MPI-ESM-MR sans et avec correction de biais

4.1.3.2. Projection future des pluies sur le bassin de Bankandi-Lofing à Dano

La figure 24 présente les résultats des simulations futures non corrigées et corrigées du biais en comparaison avec les données historiques. La période future couvre les années de 2031 à 2060 soit une période de 30 ans.

La simulation du modèle HadGEM non corrigée du biais présente une pluviométrie moyenne annuelle de 861,27 mm. Après correction, il projette une pluie moyenne annuelle de 811,3 mm qui est inférieure à 843,9 mm la moyenne annuelle de la pluie historique observée, soit une diminution de -4%, impliquant une probable diminution de la pluie annuelle dans le futur pour la zone d'étude. Cependant, le modèle simule pendant les mois de juin, juillet et août, des pluies moyennes mensuelles supérieures aux observations indiquant que cette période pourrait être plus arrosée dans le futur que ce qui est présentement observée.

Le modèle MPI non corrigé du biais présente une moyenne annuelle de 821,37 mm. Après correction, il projette une pluviométrie moyenne annuelle de 1099,2 mm ce qui est supérieure à la moyenne annuelle de la pluie historique observée cela est en contradiction avec les projections du

Impact du changement climatique et des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique du bassin versant de Bankandi-Lofing à Dano.

modèle climatique précédent. D'après les graphes, le modèle simule des pluies mensuelles supérieures aux pluies mensuelles historiques observées impliquant plus de disponibilité en eau pour les différents usages. Cette augmentation de la pluviométrie future est estimée à 30%.

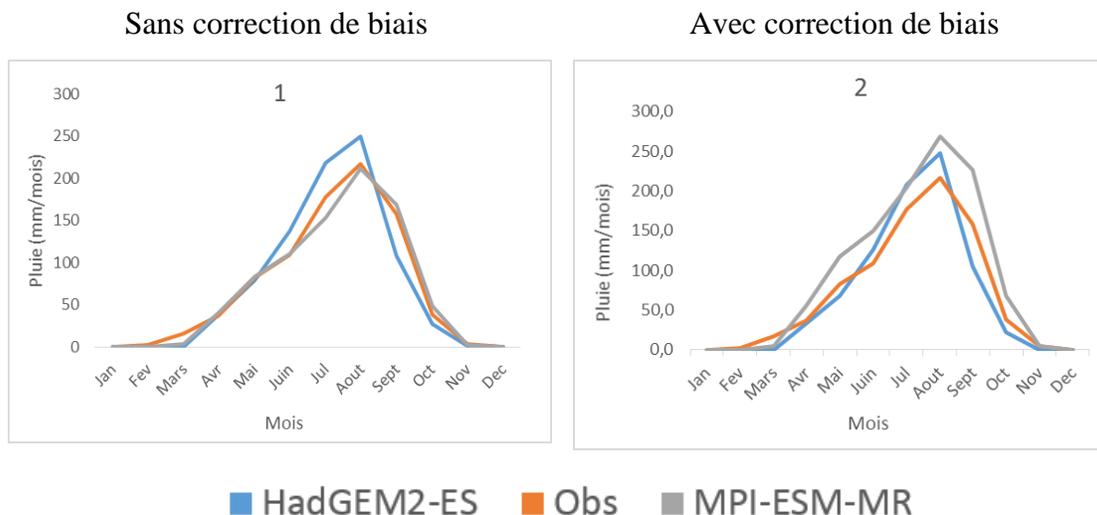


Figure 24 : Comparaison entre la moyenne mensuelle des données historiques observées et futures simulées par le modèle HadGEM2-ES et MPI-ESM-SR sans et avec correction de biais.

4.1.4. Quelques statistiques des données avant et après correction des températures

4.1.4.1. Températures historiques observées et simulées

La figure 25 présente la différence entre les simulations de la température historique non corrigée et corrigée des modèles HadGEM et MPI en comparaison avec les observations historiques de températures. Les deux modèles reproduisent parfaitement la configuration de la température de l'air tout au long de l'année.

Cependant, d'après la figure 25-1 qui présente les données des deux modèles sans correction, nous pouvons dire que les deux modèles sous-estiment la température ambiante avec un écart allant jusqu'à 3°.

La figure 25-2 nous présente les simulations de température corrigées des deux modèles en comparaison avec les données de température observées. Après la correction de biais des données simulées nous remarquons qu'il n'y pas une différence significative entre les données simulées par les deux modèles et les données observées. Ce qui prouve une fois de plus la bonne performance des données corrigées du biais. Les deux modèles simulent la température maximale en avril comme observée au niveau des données de référence. Le modèle HadGEM simule une température

Impact du changement climatique et des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique du bassin versant de Bankandi-Lofing à Dano.

maximale de 32,27°C légèrement supérieure à 32,04°C observé. Le modèle MPI simule une température maximale de 31,20°C inférieure à la température moyenne observée.

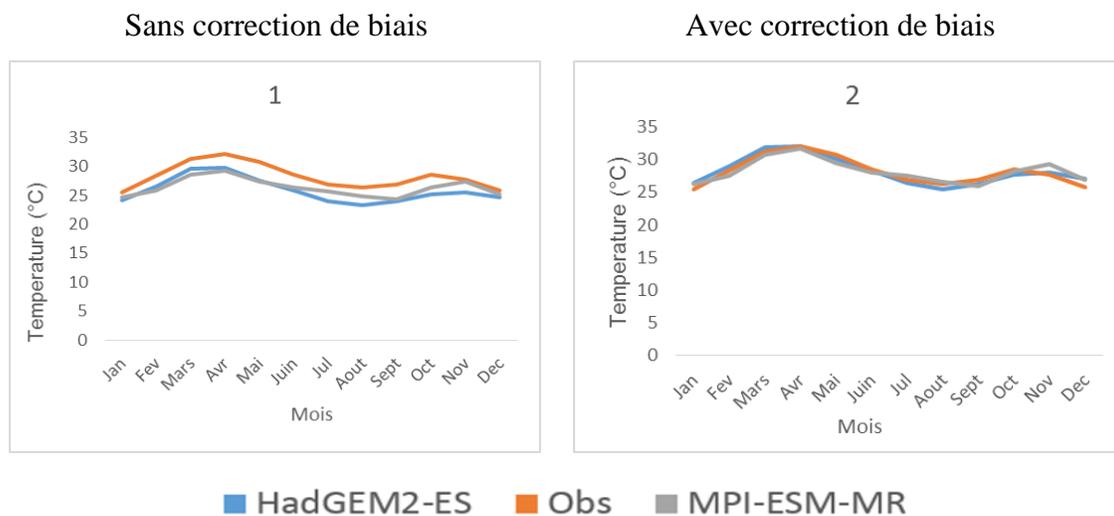


Figure 25 : Comparaison entre la moyenne mensuelle des données de température historiques observées et simulées par le modèle HadGEM2-ES et MPI-ESM-MR sans et avec correction de biais.

4.1.4.2. Projection future des températures sur le bassin de Bankandi-Lofing à Dano

Les graphes de la figure 26 présentent les résultats des simulations de températures futures (2031 à 2060), corrigées et non corrigées en comparaison avec les observations historiques. La distribution de la température ambiante tout au long de l'année est bien représentée par les deux modèles dans le futur. Sur la figure 26-1 nous pouvons remarquer que les simulations futures non corrigées des deux modèles ne diffèrent pas des températures historiques observées. Mais comme il a été mis en évidence dans la section 1.4.1, les simulations des modèles sans correction du biais sous-estiment la température ambiante.

Après correction, le modèle HadGEM simule des températures plus élevées que les observations historiques, ce qui est conforme à l'augmentation de la température moyenne globale. Les pics de températures futurs sont en moyenne de 34,08°C en mars et de 34,24°C en avril contre respectivement 31,21°C et 32,04°C observées dans les mêmes mois pendant la période de référence. Les basses températures futures sont en août de 27,48°C et en septembre de 28,28°C contre 26,31°C et 26,88°C observées pendant la période de référence.

Impact du changement climatique et des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique du bassin versant de Bankandi-Lofing à Dano.

Pour le modèle MPI, les pics de température futures seront également de 32,83°C en mars et de 33,47°C en avril contre 31,21°C et 32,04°C observées pendant la période de référence, ce qui est en accord avec les observations globales. Les basses températures seront observées en août (27,51°C) et en septembre (27,46°C).

En résumé, le modèle HadGEM projette une augmentation moyenne de la température 1,2-4,4°C tout au long de l'année et le modèle MPI projette une augmentation moyenne de 0,1-2,9°C

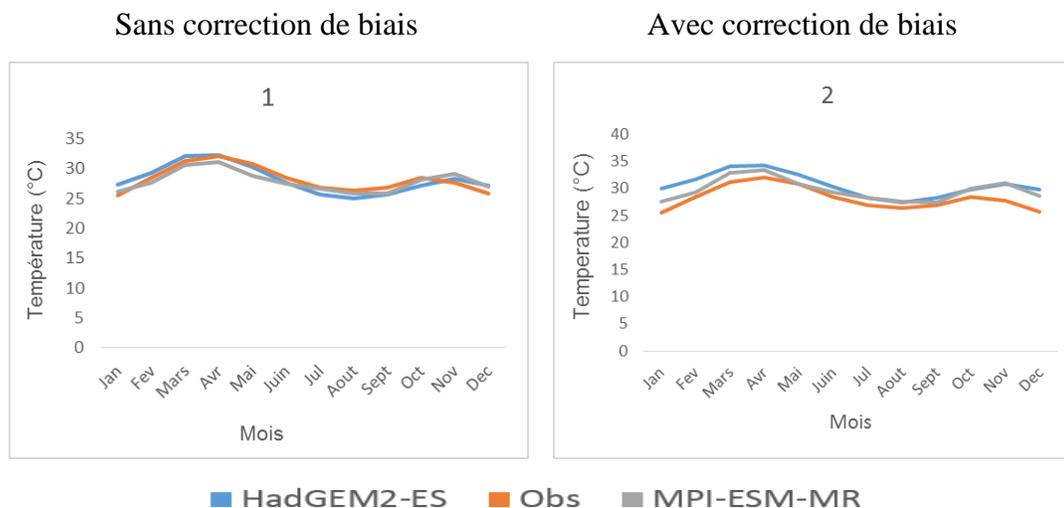


Figure 26 : Comparaison entre la moyenne mensuelle des données de températures historiques observées et future simulées par le modèle HadGEM et MPI-ESM-MR.

4.1.5. Evapotranspiration potentielle

La transpiration et l'évaporation d'une culture de référence sans disponibilité d'eau limitée sont désignées par évapotranspiration potentielle (ETP). C'est un paramètre très important dans les études hydrologiques. Dans cette étude, il entrera en compte pour la simulation des débits historiques et futurs.

La figure 27 présente une comparaison entre les évapotranspirations calculées à l'aide de la méthode de Hargreaves and Samani (1982). La figure 27-1 présente les valeurs de l'ETP calculées avec les températures observées ainsi que celles calculées avec les températures historiques simulées par les modèles HadGEM et MPI. On constate que les ETP calculées évoluent de la même façon. Les valeurs les plus élevées de l'ETP sont observées en mars et avril et les faibles valeurs sont observées en juillet, août et septembre. Les courbes de la figure 27-2 présente les ETP futures

Impact du changement climatique et des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique du bassin versant de Bankandi-Lofing à Dano.

calculées à l'aide des températures simulées par les modèles HadGEM et MPI pour le futur. Les deux modèles indiquent une augmentation de l'évapotranspiration pendant la période sèche. Mais en début de la période pluvieuse jusqu'en juillet les valeurs observées sont très proches. Notons que le modèle HadGEM présente des valeurs d'évapotranspirations plus élevées que le modèle MPI.

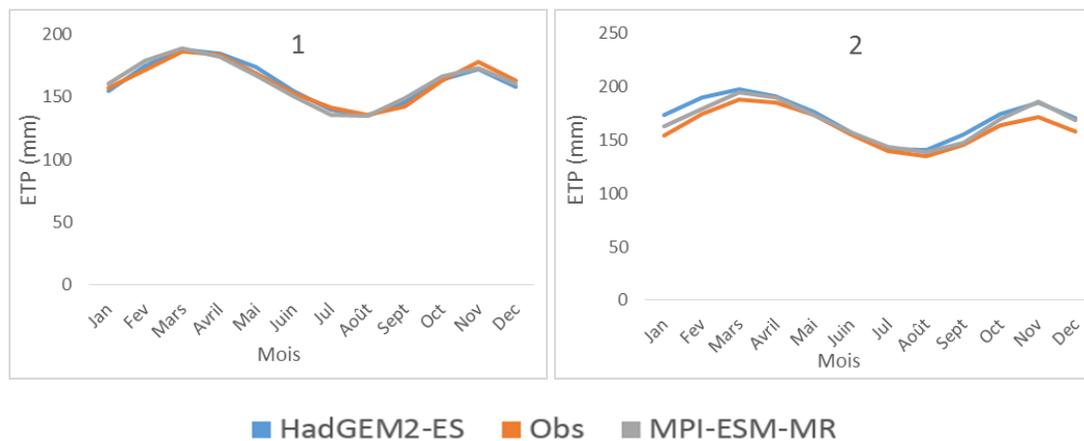


Figure 27 : Comparaison entre les ETP historiques et futures calculées avec les températures observées et simulées par le modèle HadGEM2-ES et MPI-ESM-MR.

4.1.6. Impact des changements climatiques sur les débits du bassin versant Bankandi-Lofing à Dano

Afin d'évaluer l'impact du changement climatique sur le débit à l'exutoire de lofing, les débits historiques et futurs sont simulés par les modèles hydrologique GR4J et HBV en utilisant les données corrigées issues des modèles climatiques. Des comparaisons ont été faites entre les débits en fonction des modèles climatiques pour mettre en évidence une diminution ou une augmentation du débit pendant la période future.

La figure 28 présente la moyenne mensuelle des débits simulés par les modèles hydrologiques HBV et GR4J à l'aide des données climatiques simulées par les modèles HadGEM et MPI. Pour le modèle HadGEM, la moyenne mensuelle des débits futurs simulés par les deux modèles hydrologiques GR4J et HBV est inférieure à celle des débits mensuels historiques simulés. Cela peut s'observer sur le graphe de différence exprimé en pourcentage qui est négatif pendant tous les mois de l'année. Le modèle GR4J simule la montée des eaux en juin tandis que pour le modèle

Impact du changement climatique et des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique du bassin versant de Bankandi-Lofing à Dano.

HBV, la montée débute en mai et déjà en juin nous avons un débit de 5 mm/mois. Le débit maximum simulé en août par le modèle GR4J est de 10,9 mm/mois pour la période historique et de 9,2 mm/mois pour la période future soit une diminution de 16%. Le modèle HBV simule des débits beaucoup plus élevés dont le maximum observé en Août est de 28,28 mm/mois pour la période historique et de 26,5 mm/mois pour la période future soit une diminution de 6%. Nous pouvons également observer que le modèle HadGEM simule une crue étalée d'août à septembre. Le modèle GR4J présente une moyenne annuelle historique de 36,63 mm/an et une moyenne annuelle future de 27,62 soit une diminution de 25%. Le modèle HBV présente une moyenne annuelle historique de 86,8 mm/an et une moyenne annuelle future de 79,3 mm/an soit une diminution de 9%.

En ce qui concerne le modèle MPI, la moyenne mensuelle des débits futurs simulés par les deux modèles hydrologiques GR4J et HBV est supérieure à celle des débits mensuels historiques simulés. Cela peut s'observer sur le graphe de différence exprimé en pourcentage qui est positif pendant tous les mois de l'année. La montée des eaux commence en juin pour le modèle GR4J et en avril pour le modèle HBV. Le débit maximum, observé en septembre pour le modèle GR4J est de 21,5 mm/mois pour la période historique et de 26,5 mm/mois pour la période future observé dans le même mois. Ce qui correspond à une augmentation de 23%. Le modèle HBV simule des débits beaucoup plus élevés dont le maximum observé en août est de 40,4 mm/mois pour la période historique et de 45,7 mm/mois pour la période future soit une augmentation de 13%. La crue est observée en septembre pour le modèle climatique MPI et elle n'est pas étalée. Le modèle GR4J présente un débit moyen annuel historique de 61,24 mm/an et un débit moyen annuel futur de 77,69 soit une augmentation de 27%. Le modèle HBV présente un débit moyen annuel historique de 125,46 mm/an et une moyenne annuelle future de 145,49 mm/an soit une augmentation de 16%.

La figure 29 présente la comparaison entre les débits annuels historique et future simulés par les modèles hydrologiques. Malgré que le modèle HBV a présenté une performance inférieure à celle de GR4J, on remarque que les débits annuels simulés par HBV sont plus proches des débits moyens annuels obtenus pour le calage et la validation. Les débits de GR4J sont nettement inférieurs.

Par rapport au modèle climatique, les différences négatives sont plus observées au niveau de HadGEM, ce qui signifie que la période future (2031-2060) sera moins humide que la période de référence selon le modèle HadGEM tandis pour MPI elle sera plus humide.

Impact du changement climatique et des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique du bassin versant de Bankandi-Lofing à Dano.

Impact du changement climatique et des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique du bassin versant de Bankandi-Lofing à Dano.

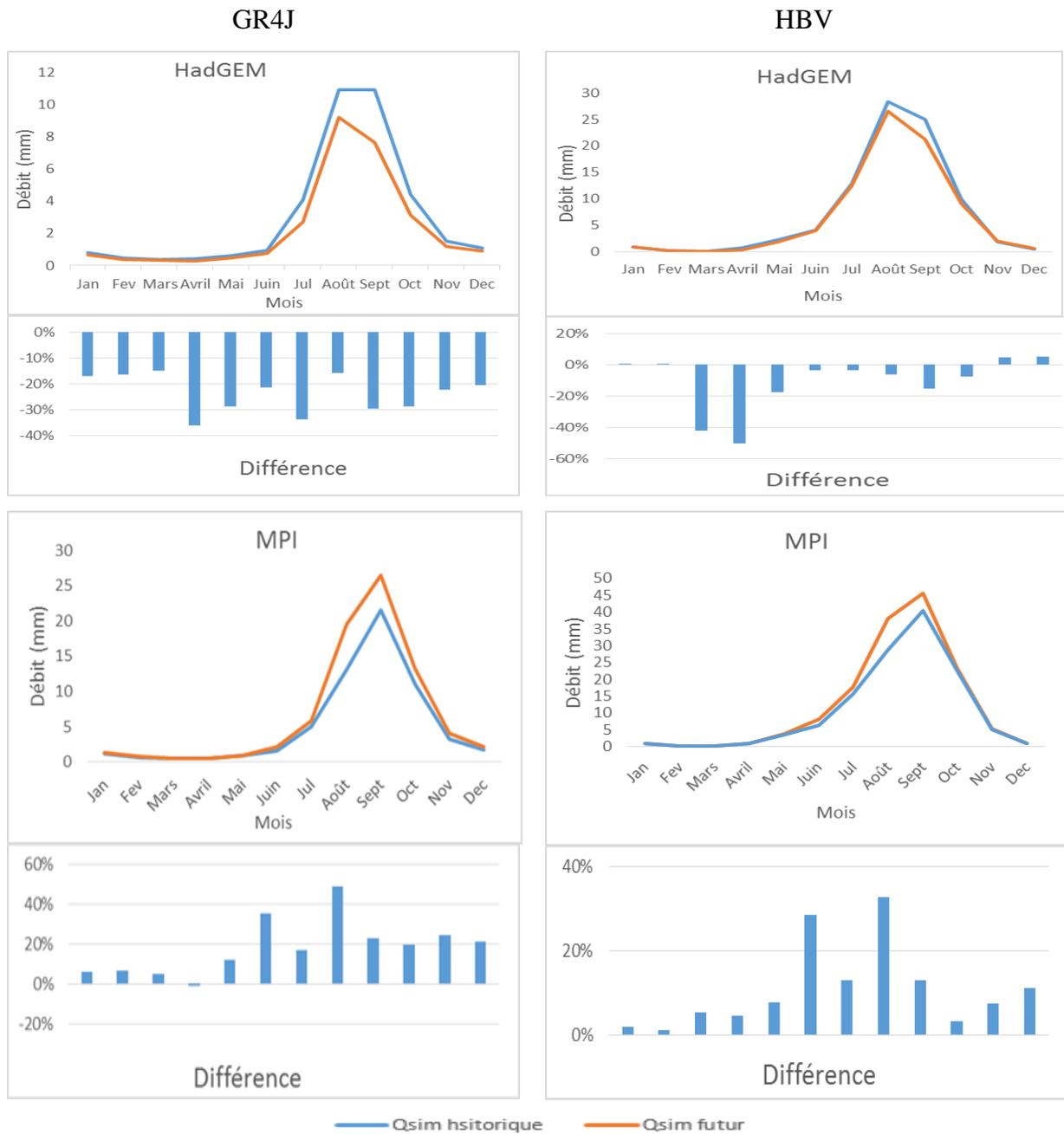


Figure 28 : Comparaison entre les débits moyens mensuels historiques et futurs simulés par les modèles hydrologiques GR4J et HBV.

Impact du changement climatique et des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique du bassin versant de Bankandi-Lofing à Dano.



Figure 29 : Comparaison entre les débits annuels historiques et futurs simulés par les modèles hydrologiques GR4J et HBV.

4.1.7. Impact de l'aménagement du bas-fond de Bankandi sur le débit observé à l'exutoire de Lofing.

La figure 30 présente les débits moyens mensuels et la pluie moyenne mensuelle avant et après aménagement des canaux de drainage dans le bas-fond de bankandi.

La figure 30-1 présente une moyenne mensuelle des débits allant de 2014 à 2017, comparé avec les débits mensuels observés en 2018. D'après les observations, nous remarquons une réelle augmentation des débits observés à l'exutoire de loffing au cours de l'année 2018. Cette augmentation est surtout observée dans les mois de juillet, août et septembre. En observant la figure 30-2 nous pouvons dire que cette augmentation du débit est due à la quantité de pluie élevée tombée en 2018. Pour s'assurer de cette affirmation, des tests statistiques de comparaison ont été menés sur les données de pluie d'avant et d'après aménagement afin de voir s'il y a une différence significative au niveau des données de pluie d'avant et d'après aménagement.

Le test de Shapiro réalisé sur les données de pluie d'avant et d'après aménagement donne respectivement des p-value de 0,0157 et 0,002. Ces valeurs de p-value calculées sont inférieure à 0,05 le seuil critique choisi. Donc l'hypothèse nulle selon laquelle les séries de données suivent une distribution normale est rejetée. De ce fait, le test de Wilcoxon a été réalisé pour comparer les médianes des données de pluies. Après application du test de comparaison de deux échantillons appariés aux données de pluie d'avant et d'après aménagement, nous obtenons une probabilité p-value de 0,6241 ce qui est supérieur au seuil significatif de 0,05 choisi. L'hypothèse nulle selon laquelle les médianes des données de pluie d'avant et d'après aménagement ne sont pas significativement différent est acceptée.

Les mêmes tests ont été réalisés sur les données de débit d'avant et d'après aménagement. Ainsi, le test de Shapiro réalisé sur les données d'avant et d'après aménagement nous donne respectivement des p-values de 0,00078 et 0,00038. Ces probabilités obtenues sont inférieures à 0,05 le seuil significatif choisi. Ce test montre que les données d'avant et d'après aménagement ne suivent pas une distribution normale. De ce fait le test de Wilcoxon est réalisé pour la comparaison des médianes. Le p-value obtenu après la réalisation du test de Wilcoxon est de 0,622 ce qui est supérieur à 0,05 le seuil significatif choisi. Donc les données ne présentent pas une différence significative.

Impact du changement climatique et des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique du bassin versant de Bankandi-Lofing à Dano.

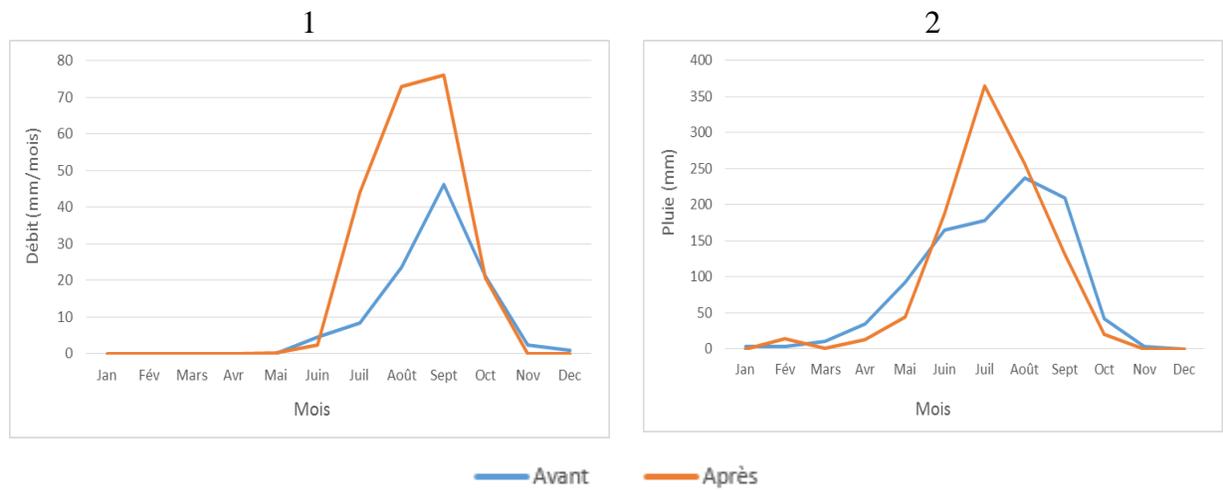


Figure 30: 1) Débits moyens mensuels avant et après aménagement ; 2) Pluies moyennes mensuelles avant et après aménagement.

4.2. Discussion

4.2.1. Modélisation hydrologique

L'évaluation des modèles GR4J et HBV se base sur les valeurs de critères de performance à savoir le critère de Nash- Sutcliffe (NSE) et de Kling-Gupta (KGE) et par les tracés des hydrogrammes observés et simulés pour le calage et la validation dans la zone d'étude. Le tableau 7 regroupe les valeurs des critères d'efficacité obtenues pendant le calage et la validation ainsi que les critères obtenus par Idrissou, (2020) et Yira, (2016) sur le même bassin avec le modèle hydrologique WaSIM. Les résultats issus du calage et validation du modèle GR4J donnent un bon résultat avec des critères de performance supérieurs à 0,7 en comparaison avec ceux d'Idrissou (2020) qui donnent de très bons résultats avec des critères supérieur à 0,8. Cependant, pour le modèle HBV, lors du calage nous avons obtenu des critères d'efficacité de l'ordre de 0,6 mais les paramètres obtenus ne nous permettaient pas d'avoir une bonne performance lors de la validation. Donc nous avons dû choisir les valeurs de paramètres qui garantissent des critères satisfaisant pour le calage et la validation. Ces faibles valeurs de critères obtenus par le modèle HBV peuvent être dues au manque de données de débit de l'année de 2016 et à l'exigence du modèle. Notons que la période de calage du modèle WaSIM est 2014-2015 et la validation sur la période 2016. D'après la valeur des paramètres obtenus lors de la phase de calage de GR4J, nous pouvons dire que le réservoir souterrain de notre bassin versant a une grande capacité (X_1 élevé) et transfère son flux vers un aquifère régional (X_2 négatif). Cet aspect du modèle GR4J a été abordé par Ben Khediri et Drogue, (2015)

Tableau 7: Tableau récapitulatif des critères de performance obtenu lors de notre étude et d'autres études sur le même bassin versant.

	Période	NSE	KGE	Période	NSE	KGE
		Calage			Validation	
GR4J	2016-2017	0,7324	70,28	2017-2018	0,7126	0,6820
HBV	2016-2017	0,53	0,57	2017-2018	0,52	0,56
WaSIM <i>Idrissou (2020)</i>	2014-2015	0,88	0,82	2016	0,77	0,57
HBV <i>Bossa et al., (2020)</i>	2017	0,75	0,70	2018	0,75	0,73
WaSiM Yira (2016)	2013	0,9	0,8	2014	0,9	0,7

4.2.2. Correction des biais dans les données climatiques et signes du changement climatique

La décision de n'utiliser que des variables climatiques corrigées du biais est motivée par le fait que la correction du biais réduit les incohérences et les écarts. Il rétablit le calendrier des saisons des pluies et minimise considérablement les écarts entre les nœuds (Yira et al. 2017). Cela conduit par la suite à une distribution saisonnière plus réaliste des précipitations et de la température de l'air. Par conséquent, la correction du biais rend les variables climatiques adaptées à l'évaluation de l'impact hydrologique du changement climatique (Johnson et Sharma, 2015; Muerth et al., 2012; Op de Hipt et al. 2018, Yira et al. 2017).

En comparaison à la période historique qui va de 1981 à 2010, une augmentation de la température est projetée pour la période future allant de 2031 à 2060 par les deux modèles régionaux HadGEM et MPI. Ces changements ont été également observés sur plusieurs ensembles de modèles climatiques appliqués à cette région (IPCC,2014). Yira et al. (2017) ont également reporté sur la période 2021 à 2050 une augmentation de la température allant de 0,1-2,3°C pour le scénario RCP4.5 et de 0,1-2,5°C pour le scénario RCP8.5. Toutefois, la plupart des modèles climatiques ne s'accordent pas sur la projection de la pluviométrie. Nous avons des modèles qui simulent une augmentation de la pluie (RAMCO-EARTH), d'autres qui simulent la baisse de la pluviométrie (CCLM-ESM and CCLM-EARTH) et enfin des modèles mixtes (CCLM-CNRM, HIRHAM-NorESM and HIRAM-EARTH) Yira et al. (2017). Bien que le modèle HadGEM simule une pluie moyenne annuelle future de -4% par rapport à la période de référence 1981-2010, on observe une augmentation de 14 à 17% pendant les mois pluvieux (juin, juillet, août). Le modèle MPI quant à lui simule une pluie moyenne annuelle de + 30% comparé à la période historique. Ces augmentations sont observées d'avril à octobre soit toute la période humide. En comparaison, les études de Yira et al.(2017) prévoient sur la période de 2021 à 2050 une augmentation de 3% (prévu par HIRHAM-NorESM/RCP 4.5) à 18% (prévu par CCLM-CNRM/RCP 8.5) et une diminution de -10 à -5%. Op de Hipt et al. (2018) ont observé une augmentation de +6 à +19% et une diminution de -11 à -4% pour le bassin versant de Dano.

4.2.3. Impact du changement climatique sur le débit

D'après les résultats de simulation obtenus des modèles hydrologiques, nous aurons une alternance entre la hausse et la baisse des débits annuels de la période de 2031 à 2060 en comparaison avec la

Impact du changement climatique et des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique du bassin versant de Bankandi-Lofing à Dano.

période de référence (1981-2010). Le modèle climatique HadGEM simule une moyenne annuelle à la baisse car GR4J simule une diminution de 25% du débit moyen annuel et HBV une diminution de 9%. Alors que le modèle climatique MPI présente une tendance de débit à la hausse car GR4J simule une augmentation de 27% du débit moyen annuel et HBV une augmentation de 16%. De faibles débits sont observés au niveau du modèle HadGEM en comparaison au modèle MPI. Cela est dû aux faibles pluies et aux températures élevées projetées par ce modèle.

Les tendances à la hausse et à la baisse sont observées lors de plusieurs études réalisées dans la région (Tableau 8). En revanche, Climate Analytics (2019) affirme à l'aide de plusieurs études réalisées qu'il existe un risque réel de diminution du ruissellement et du taux de recharge des aquifères sur la moitié sud-ouest du Burkina Faso d'ici la fin du 21^e siècle, atteignant localement entre -10 et -30% en moyenne sur l'année. Yira et al. (2017) ont obtenu une baisse de plus de 15% pour les modèles climatiques CCLM-ESM, CCLM-EARTH, et HIRHAM-EARTH (RCP8.5); et une augmentation des débits de 3 à 50% pour les modèles CCLM-CNRM, RAMCO-EARTH, HIRHAM-NorESM, et HIRHAM-EARTH (RCP4.5) pour la période 2021 à 2050.

Tableau 8: Quelques études réalisées sur les impacts du changement climatique sur les ressources en eau de l'Afrique de l'ouest.

Study	Location/size	GCM/RCM	Scenario	Reference period	Future period	Precipitation change (%)	Discharge change (%)
Ruelland et al. (2012)	Bani catchment, Mali/100 000 km ²	MadCM3 and MPI-M	A2	1961–1990	2041–2070	–2 to –10	–30 to –46
Mbaye et al. (2015)	Upper Senegal Basin, Senegal–Mali–Mauritania/ 218 00 km ²	REMO-MPI-ESM-LR	RCP4.5 and RCP8.5	1971–2000	2071–2100	negative trend	up to –80
Aich et al. (2014)	Niger Basin/ 2 156 000 km ²	HadGEM2-ES, IPSL-5 CM5A-LR, MIROC-ESM-CHEM, GFDL-ESM2M, NorESM1-M	RCP8.5	1970–1999	2070–2099	mixed trend	–50 to +50
Ardoïn-Bardin et al. (2009)	Sassandra, Ivory Coast/62 173 km ²	HadCM3-A2	–	1971–1995	2036–2065	11.4	38
Bossa et al. (2014)	Ouémé catchment, Benin/49 256 km ²	REMO-ECHAM5/ MPI-OM	A1B	2000–2009	2010–2029	–10	–18
Cornelissen et al. (2013)	Térou Catchment, Benin/2344 km ²	REMO-ECHAM5/ MPI-OM	B1	2001–2010	2031–2049	–11	–11
Kasei (2009)	Volta Basin/ 400 000 km ²	MM5 and REMO	B1	1991–2000 and 1961–2000	2030–2039 and 2001–2050	+12 and –6	+40 and –5

Source : Yira et al. (2017).

4.2.4. Impact de l'aménagement de Bankandi sur le débit observé à l'exutoire du bassin versant.

D'après la figure 24, nous pouvons dire que les débits observés après les aménagements des canaux de drainages sur le périmètre de Bankandi sont supérieurs à ceux observés avant les aménagements. Le test de Wilcoxon réalisé avec un p-value supérieur à 0,05 montre que cette différence n'est pas significative pour être attribuée aux aménagements. Les études effectuées par Serpantié et al., (2020) sur les effets des aléas d'inondation sur le bassin de Loffing-Bankandi indiquent que la pluie enregistrée en 2018 est une pluie décennale humide. Or les canaux de drainage ont la capacité d'évacuer un débit de 3,79 m³/s. Cette capacité d'évacuation est favorable pour les crues de période de retour de 2 ans (Hounkpè et al., 2020). La pluie de 2018 étant une pluie décennale donc va générer une crue décennale dont le débit évalué par Hounkpè et al., (2020) est de 5,40 m³/s. Les canaux n'ont pas été en mesure de s'assurer leur fonction, ce qui va occasionner une inondation de la zone. Si les canaux avaient la capacité d'évacuer un tel débit, le débit observé à l'exutoire de Loffing serait plus élevé. En conclusion nous pouvons dire que l'augmentation du débit observé en 2018 est due à la quantité de pluie tombée.

V. Proposition des stratégies d'adaptation au changement climatique

Avec plus de 80% de sa population pratiquant les activités agro-pastorales et sa position géographique bordant le désert du Sahara, le Burkina Faso est particulièrement concerné par l'adaptation au changement climatique. Les modèles climatiques actuels sont plus ou moins satisfaisants pour prévoir les évolutions de températures et ils prédisent des hausses de température pour le continent africain supérieures de 1,5°C à la moyenne mondiale (IPCC, 2007). Si la hausse de températures est imminente, des grandes incertitudes demeurent quant aux projections des précipitations au Sahel, ce qui rend difficile l'élaboration et la mise en œuvre de stratégies et de politiques d'adaptation adéquates aux différentes échelles. Cependant, la sécheresse qui a sévi au Sahel des années 70 à 80 a mis à nu la vulnérabilité de la population. Les conséquences étaient bien visibles et permettent la mise en place des stratégies d'adaptation à pareil aléas climatiques.

Alors qu'une augmentation de température est confirmée par l'étude actuelle, il existe des incertitudes sur les projections de précipitations dans le bassin versant du Dano, ce qui rend difficile la prédiction de la tendance des changements des eaux de surface.

En cas d'insuffisance d'eau pour la consommation, le pâturage et l'irrigation (comme le suggèrent les modèles prévoyant une diminution des ressources en eau), il est nécessaire de promouvoir la collecte et l'utilisation des eaux de pluie pour ces besoins. Il est également nécessaire d'encourager et de sensibiliser la population à l'utilisation des techniques de conservation des sols et de l'eau, à l'utilisation d'engrais organiques, etc. pour augmenter la capacité de rétention d'eau du sol. Les projections indiquant une augmentation des eaux de surface appellent à des mesures de réduction des risques d'inondation et d'érosion; les diguettes de pierre par exemple bien adaptées à la région devraient être encouragées.

Enfin, une stratégie de prévention et de gestion des catastrophes doit être développée à travers la construction d'ouvrages hydrauliques qui prennent en compte les changements des régimes hydrologiques et cartographient également les zones à risque. Sensibiliser également la population à investir dans l'entretien de ces structures et éviter de s'installer dans les zones à risque.

VI. Conclusion et perspectives

L'évaluation des impacts du changement climatique sur la ressource en eau du bassin versant de Bankandi-Lofing a été réalisée avec des MCR-MCG provenant du scénario RCP 8.5. L'étude a été basée sur ce scénario parce qu'il est le plus pessimiste en termes d'émission de gaz à effet de serre. En effet, vu la croissance démographique projetée et la dépendance vis-à-vis des énergies fossiles, il sera difficile de réduire les émissions de gaz à effet de serre si les politiques de réductions mise en place ne sont pas véritablement appliquées. Donc il est préférable de choisir un scénario qui prévoit une augmentation continue de la concentration des gaz à effet de serre pour les études d'impacts liées au changement climatique.

Les données des deux modèles climatiques, toutes provenant du projet CORDEX Afrique ont été utilisées comme données d'entrées des modèles hydrologiques pour simuler les débits, afin d'évaluer l'impact des changements climatique sur la ressource en eau du bassin versant. La capacité des modèles utilisés a simulé la pluviométrie et la température de référence a été évaluée en premier. Les deux modèles ont très bien reproduit la température historique après correction contrairement à la pluie où on observe de légers écarts. Etant donné que les débits dans le bassin versant dépendent fortement des pluies, une tendance claire de variation du débit n'a pas été identifiée, à cause de la variabilité des pluies simulées observées au niveau des deux modèles. De ce fait, il serait important de considérer l'augmentation et la diminution des ressources en eau pour la mise en place d'un plan d'adaptation.

Les résultats soulignent la nécessité de plus grands ensembles de projections pour estimer correctement les impacts du changement climatique sur les ressources en eau du bassin versant. Par conséquent, évaluer l'impact futur du changement climatique sur les ressources en eau pour la région doit être continuellement mise à jour avec l'amélioration des projections climatiques.

Concernant l'effet de l'aménagement du Bas-fond de Bankandi sur le débit observé à l'exutoire, le manque de données conséquent après aménagement ne nous a pas permis de réaliser une analyse approfondie. Il serait bénéfique de collecter plus de données sur l'aménagement afin d'avoir des résultats plus précis.

Bibliographies

- Aich, V., Liersch, S., Vetter, T., Huang, S., Tecklenburg, J., Hoffmann, P., Koch, H., Fournet, S., Krysanova, V., Müller, E., 2014. Comparing impacts of climate change on streamflow in four large African river basins. *Hydrology & Earth System Sciences* 18.
- Albergel, J., Braudeau, E., 1992. Atelier de Formation aux Techniques d'Etude de l'eau dans le système Sol-Plante-Atmosphère.
- Amisigo, B., Van de Giesen, N., 2005. Using a spatio-temporal dynamic state-space model with the EM algorithm to patch gaps in daily riverflow series, with examples from the Volta Basin, West Africa.
- Ben Khediri, W., Drogue, G., 2015. Quel est l'impact de l'échantillonnage spatial des précipitations et de l'évapotranspiration potentielle sur le pouvoir prédictif d'un modèle hydrologique empirique ? *Climatologie* 12, 24 p. <https://doi.org/doi.org/10.4267/climatologie.1095>
- Bergström, S., 1992. The HBV model - its structure and applications. SMHI RH, Norrköping 32 pp.
- Bergström, S., 1976. Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments. SMHI RH, Norrköping 134 PP.
- Bossa, A.Y., 2012. Multi-scale modelling of sediments and nutrient flow dynamics in the Ouémé catchment (Benin) – towards an assessment of global change effects on soil degradation and water quality.
- Bossa, A.Y., Diekkrüger, B., Agbossou, E.K., 2014. Scenario-based impacts of land use and climate change on land and water degradation from the meso to regional scale. *Water* 6, 3152–3181.
- Coron, L., Delaigue, O., Thirel, G., Perrin, C., Michel, C., 2020. airGR: Suite of GR Hydrological Models for Precipitation-Runoff Modelling, R News. <https://doi.org/10.15454/EX11NA>
- Coron, L., Thirel, G., Delaigue, O., Perrin, C., Andréassian, V., 2017. The Suite of Lumped GR Hydrological Models in an R package. *Environmental Modelling and Software* 94, 166–171. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.05.002>
- Devia, G., Ganasri, B.P., Dwarakish, G.S., 2015. A Review on Hydrological Models. *Aquatic Procedia* 4, 1001–1007. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.126>
- Ehret, U., Zehe, E., Wulfmeyer, V., Warrach-Sagi, K., Liebert, J., 2012. HESS Opinions" Should we apply bias correction to global and regional climate model data?". *Hydrology & Earth System Sciences Discussions* 9.
- Fotseu, W., Blin, J., Sana, L., Sidibe, S., 2012. CARACTERISATION ET AMÉLIORATION D'UN FOYER A CUISSON DE «DOLO» EQUIPE D'UN BRULEUR A HUILE VEGETALE (JATROPHA).
- Francois, B., Vrac, M., Cannon, A., Robin, Y., Allard, D., 2020. Multivariate bias corrections of climate simulations: Which benefits for which losses? <https://doi.org/10.5194/esd-2020-10>
- Giorgi, F., Coppola, E., Solmon, F., Mariotti, L., Sylla, M., Bi, X., Elguindi, N., Diro, G., Nair, V., Giuliani, G., 2012. RegCM4: model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. *Climate Research* 52, 7–29.
- Graham, L.P., Bergström, S., 2000. Land surface modelling in hydrology and meteorology? lessons learned from the Baltic Basin.
- Gudmundsson, L., Bremnes, J.B., Haugen, J.E., Engen-Skaugen, T., 2012. Downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations—a comparison of methods. *Hydrology and Earth System Sciences* 16, 3383–3390.

Impact du changement climatique et des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique du bassin versant de Bankandi-Loffing à Dano.

- Gupta, H.V., Kling, H., Yilmaz, K.K., Martinez, G.F., 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology* 377, 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>
- Haddeland, I., Heinke, J., Biemans, H., Eisner, S., Flörke, M., Hanasaki, N., Konzmann, M., Ludwig, F., Masaki, Y., Schewe, J., 2014. Global water resources affected by human interventions and climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111, 3251–3256.
- Hargreaves, G., Samani, Z., 1985. Reference Crop Evapotranspiration From Temperature. *Applied Engineering in Agriculture* 1. <https://doi.org/10.13031/2013.26773>
- Hargreaves, G.H., 1994. Defining and using reference evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 120, 1132–1139.
- Heinzeller, D., Dieng, D., Smiatek, G., Olusegun, C., Klein, C., Hamann, I., Salack, S., Blifernicht, J., Kunstmann, H., 2018. The WASCAL high-resolution regional climate simulation ensemble for West Africa: concept, dissemination and assessment. *Earth System Science Data* 10, 815–835.
- Houknpè, J., Bossa, A.Y., Yira, Y., Fusillier, J.-L., Da, A.S., Keita, A., 2020. Fonctionnement hydrologique et hydraulique du bas-fond réaménagé de Bankandi (Province du Ioba, Burkina Faso) 11 p.
- Idrissou, M., 2020. Modeling water availability for smallholder farming in inland valleys under climate and land use / land cover change in Dano, Burkina Faso. Bonn.
- IPCC, 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>
- IPCC, 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)].* Cambridge University Press, , Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Karambiri, H., García Galiano, S., Giraldo, J., Yacouba, H., Ibrahim, B., Barbier, B., Polcher, J., 2011. Assessing the impact of climate variability and climate change on runoff in West Africa: the case of Senegal and Nakambe River basins. *Atmospheric Science Letters* 12, 109–115.
- Kasei, R.A., 2010. Modelling impacts of climate change on water resources in the Volta Basin, West Africa. Citeseer.
- Lebel, T., Ali, A., 2009. Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990–2007). *Journal of Hydrology* 375, 52–64.
- Lindström, G., Johansson, B., Persson, M., Gardelin, M., Bergström, S., 1997. Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. *Journal of hydrology* 201, 272–288.
- Ly, M., Segnon, A.C., D'haen, S., Totin, E., Noblet, M., Camara, I., Pfliegerer, P., 2019. Comprendre et interpreter les sorties des modeles climatiques pour la conduite des etudes de vulnerabilite: Guide a l'attention des praticiens.
- Maraun, D., 2016. Bias Correcting Climate Change Simulations - a Critical Review. *Current Climate Change Reports* 2, 211–220. <https://doi.org/10.1007/s40641-016-0050-x>
- Maraun, D., Shepherd, T.G., Widmann, M., Zappa, G., Walton, D., Gutiérrez, J.M., Hagemann, S., Richter, I., Soares, P.M., Hall, A., 2017. Towards process-informed bias correction of climate change simulations. *Nature Climate Change* 7, 764–773.

Impact du changement climatique et des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique du bassin versant de Bankandi-Loffing à Dano.

- Meinshausen, M., Smith, S.J., Calvin, K., Daniel, J.S., Kainuma, M., Lamarque, J.-F., Matsumoto, K., Montzka, S., Raper, S., Riahi, K., 2011. The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic change* 109, 213.
- Moss, R.H., Edmonds, J.A., Hibbard, K.A., Manning, M.R., Rose, S.K., Van Vuuren, D.P., Carter, T.R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463, 747–756.
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10, 282–290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Op de Hipt, F., Diekkrüger, B., Steup, G., Yira, Y., Hoffmann, T., Rode, M., 2018. Modeling the impact of climate change on water resources and soil erosion in a tropical catchment in Burkina Faso, West Africa. *Catena* 163, 63–77.
- Op de Hipt, F., Diekkrüger, B., Steup, G., Yira, Y., Hoffmann, T., Rode, M., Näschen, K., 2019. Modeling the effect of land use and climate change on water resources and soil erosion in a tropical West African catchment (Dano, Burkina Faso) using SHETRAN. *Science of the Total Environment* 653, 431–445.
- Perrin, C., Michel, C., Andréassian, V., 2003. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of hydrology* 279, 275–289.
- Popper, K., 2002. *The Logic of Scientific Discovery*, Routledge Classics. Taylor & Francis.
- Riahi, K., Rao, S., Krey, V., Cho, C., Chirkov, V., Fischer, G., Kindermann, G., Nakicenovic, N., Rafaj, P., 2011. RCP 8.5—A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change* 109, 33.
- Ritter, A., Muñoz-Carpena, R., 2013. Performance evaluation of hydrological models: Statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments. *Journal of Hydrology* 480, 33–45. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.12.004>
- SAMBOU, S., BOYE, M., MALANG, B.A., MALANDA-NIMY, E.N., SOUMARE, H., 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.
- Šanda, M., Kulasová, A., Císlarová, M., 2009. Hydrological processes in the subsurface investigated by water isotopes and silica. *Soil Water Res.* 4, 83–92.
- Schmengler, A.C., 2011. *Modeling Soil Erosion and Reservoir Sedimentation at Hillslope and Catchment Scale in Semi-Arid Burkina Faso*. University of Bonn, Germany.
- Seibert, J., 2005. *Manuel HBV light*.
- Seibert, J., 2000. Multi-criteria calibration of a conceptual runoff model using a genetic algorithm. *Hydrology and Earth System Sciences* 4, 215–224. <https://doi.org/10.5194/hess-4-215-2000>
- Serpantié, G., Dorée, A., Douanio, M., Somé, F., Hien, S., Bossa, A.Y., Fusillier, J.-L., Lidon, B., Sawadogo, A., Dabiré, N., 2020. Diagnostic rizicole des bas-fonds face aux risques climatiques. Les effets des aléas d'inondation (Lofing-Bankandi, Dano, Burkina Faso) 12 p.
- Sylla, M.B., Faye, A., Giorgi, F., Diedhiou, A., Kunstmann, H., 2018. Projected heat stress under 1.5 C and 2 C global warming scenarios creates unprecedented discomfort for humans in West Africa. *Earth's Future* 6, 1029–1044.
- Sylla, M.B., Nikiema, P.M., Gibba, P., Kebe, I., Klutse, N.A.B., 2016. Climate change over West Africa: Recent trends and future projections, in: *Adaptation to Climate Change and Variability in Rural West Africa*. Springer, pp. 25–40.

Impact du changement climatique et des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique du bassin versant de Bankandi-Loffing à Dano.

- Taylor, K.E., Stouffer, R.J., Meehl, G.A., 2012. An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society* 93, 485–498.
- Wilcoxon, F., 1945. Individual Comparisons by Ranking Methods. *Biometrics Bulletin* 1, 80–83. <https://doi.org/10.2307/3001968>
- WWDR, U.N.W.W.A.P., 2015. The United Nations World Water Development Report 2015: Water for a Sustainable World. UNESCO, Paris.
- Yira, Y., 2016. Modeling climate and land use change impacts on water resources in the dano catchment (Burkina faso, west africa). Bonn.
- Yira, Y., Diekkrüger, B., Steup, G., Bossa, A., 2016. Modeling land use change impacts on water resources in a tropical West African catchment (Dano, Burkina Faso). *Journal of Hydrology* 537, 187–199.
- Yira, Y., Diekkrüger, B., Steup, G., Bossa, A.Y., 2017. Impact of climate change on hydrological conditions in a tropical West African catchment using an ensemble of climate simulations. *Hydrology and Earth System Sciences* 21, 2143.

ANNEXES

Annexe 1 : Script R pour le calage automatique et la validation du modèle GR4J

Tableau 1 : Structure des données pour la mise en œuvre du modèle GR4J

DatesR	P	T	E	Qls	Qmm
2014-01-01	0.0	28.64674	9.0	-9999	-9999
2014-01-02	0.0	28.89380	9.2	-9999	-9999
2014-01-03	0.0	28.19631	9.5	-9999	-9999
2014-01-04	0.0	27.94506	10.9	-9999	-9999
2014-01-05	0.0	26.71830	10.2	-9999	-9999
2014-01-06	0.0	26.45068	9.1	-9999	-9999
2014-01-07	0.0	26.95172	8.6	-9999	-9999
2014-01-08	0.0	27.72480	8.3	-9999	-9999
2014-01-09	0.0	28.74365	8.5	-9999	-9999
2014-01-10	0.0	28.75479	8.9	-9999	-9999
2014-01-11	0.0	28.18003	9.2	-9999	-9999
2014-01-12	0.0	27.31987	9.5	-9999	-9999

DatesR regroupe les dates sous le format : Année-Mois-Jour

P représente la pluie journalière (mm)

T la température moyenne journalière (°C)

E l'évapotranspiration potentiel journalière (mm)

Qls le débit journalier (l/s)

Qmm le débit journalier (mm)

```

climatobs <- read.delim("file:///C:/donnees_dano/Input_Data_2.txt",header = T
, sep = "\t", dec = ".")

climatobs$DatesR = as.POSIXct(climatobs$DatesR, format="%Y-%m-%d", tz = "UTC"
)

climatobs$Qmm[climatobs$Qmm<0]=NA# Missing data

library(airGR)

## preparation of the InputsModel object
InputsModel <- CreateInputsModel(FUN_MOD = RunModel_GR4J, DatesR = climatobs$
DatesR, Precip = climatobs$P, PotEvap =climatobs$E)

## run period selection
    
```

Impact du changement climatique et des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique du bassin versant de Bankandi-Loffing à Dano.

```
Ind_Run <- seq(which(format(climatobs$DatesR, format = "%Y-%m-%d")== "2016-01-01"), which(format(climatobs$DatesR, format = "%Y-%m-%d")== "2017-12-31"))

## preparation of the RunOptions object
Param <- c(X1 = 257.238, X2 = 1.012, X3 = 88.235, X4 = 2.208)
RunOptions <- CreateRunOptions(FUN_MOD = RunModel_GR4J, InputsModel = InputsModel, IndPeriod_Run = Ind_Run)

## simulation
OutputsModel <- RunModel_GR4J(InputsModel = InputsModel, RunOptions = RunOptions, Param = Param)

## results preview
#climatobs$Qmm[climatobs$Qmm<0]=NA
plot(OutputsModel, which = "synth", Qobs = climatobs$Qmm[Ind_Run])

## efficiency criterion: Nash-Sutcliffe Efficiency
InputsCrit <- CreateInputsCrit(FUN_CRIT = ErrorCrit_NSE, InputsModel = InputsModel, RunOptions = RunOptions, Obs = climatobs$Qmm[Ind_Run])

OutputsCrit <- ErrorCrit_NSE(InputsCrit = InputsCrit, OutputsModel = OutputsModel)

##### Automatic Model Calibration (Optimisation) #####
## preparation of CalibOptions object
CalibOptions <- CreateCalibOptions(FUN_MOD = RunModel_GR4J, FUN_CALIB = Calibration_Michel)

## calibration
OutputsCalib <- Calibration(InputsModel = InputsModel, RunOptions = RunOptions, InputsCrit = InputsCrit, CalibOptions = CalibOptions, FUN_MOD = RunModel_GR4J, FUN_CALIB = Calibration_Michel)

## simulation
Param <- OutputsCalib$ParamFinalR
OutputsModel <- RunModel(InputsModel = InputsModel, RunOptions = RunOptions, Param = Param, FUN = RunModel_GR4J)

## results preview
plot(OutputsModel, which="synth", Qobs = climatobs$Qmm[Ind_Run])

## efficiency criterion: Nash-Sutcliffe Efficiency
InputsCrit <- CreateInputsCrit(FUN_CRIT = ErrorCrit_NSE, InputsModel = InputsModel, RunOptions = RunOptions, Obs = climatobs$Qmm[Ind_Run])

OutputsCrit <- ErrorCrit_NSE(InputsCrit = InputsCrit, OutputsModel = OutputsModel)
```

Impact du changement climatique et des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique du bassin versant de Bankandi-Loffing à Dano.

```
## efficiency criterion: Kling-Gupta Efficiency
InputsCrit <- CreateInputsCrit(FUN_CRIT = ErrorCrit_KGE, InputsModel = Input
sModel, RunOptions = RunOptions, Obs = climatobs$Qmm[Ind_Run])

OutputsCrit <- ErrorCrit_KGE(InputsCrit = InputsCrit, OutputsModel = OutputsM
odel)

##### Model Validation #####
## run period selection
Ind_Run_val <- seq(which(format(climatobs$DatesR, format = "%Y-%m-%d")=="2017
-01-01"), which(format(climatobs$DatesR, format = "%Y-%m-%d")=="2018-12-31"))

## preparation of the RunOptions object
RunOptions_val <- CreateRunOptions(FUN_MOD = RunModel_GR4J, InputsModel = Inp
utsModel, IndPeriod_Run = Ind_Run_val)

## simulation with parameters from Calibration
Param <- OutputsCalib$ParamFinalR
OutputsModel_Val <- RunModel_GR4J(InputsModel = InputsModel, RunOptions = RunO
ptions_val, Param = Param)

## results preview
climatobs$Qmm[climatobs$Qmm<0]=NA
plot(OutputsModel_Val, which="ts", Qobs = climatobs$Qmm[Ind_Run_val])

## efficiency criterion: Nash-Sutcliffe Efficiency
InputsCrit <- CreateInputsCrit(FUN_CRIT = ErrorCrit_NSE, InputsModel = Input
sModel, RunOptions = RunOptions_val, Obs = climatobs$Qmm[Ind_Run_val])
OutputsCrit <- ErrorCrit_NSE(InputsCrit = InputsCrit, OutputsModel = OutputsM
odel_Val)

## efficiency criterion: Kling-Gupta Efficiency
InputsCrit<- CreateInputsCrit(FUN_CRIT=ErrorCrit_KGE, InputsModel=InpusModel,
RunOptions=RunOptions_val, Obs=climatobs$Qmm[Ind_Run_val])

OutputsCrit <- ErrorCrit_KGE(InputsCrit=InputsCrit, OutputsModel=OutputsModel
_Val)
```

Annexe 2 : Script R pour la réalisation du « quantile mapping »

```
### david.gampe@lmu.de

require(qmap)
require(stats)
require(hydroGOF)# for rmse alone
```

Impact du changement climatique et des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique du bassin versant de Bankandi-Loffing à Dano.

```
# read in the text files: Observation
obs_new=read.delim("file:///C:/donnees_dano/Data_Extraction_RCM/Obaserved_Rainfall_Dano_Basin.txt", sep=",", header = F)

# read in the text files: Simulated for calibration
mod_new = read.delim("file:///C:/donnees_dano/Data_Extraction_RCM/pr_AFR-44_HadGEM2-ES_historical_r1i1p1_ICTP-RegCM4-3_4.3-rc1.txt",sep=",", header=F)

# read in the text files: Simulated Values to correct
mod_new_To_Correct = read.delim("file:///C:/donnees_dano/Data_Extraction_RCM/pr_AFR-44_HadGEM2-ES_historical_r1i1p1_ICTP-RegCM4-3_4.3-rc1.txt",sep=",", header = F)

# select a grid cell / column.
# (In reality: loop through all to correct the whole data set)
# in the lab session we will only explore a few grid cells
# first: check the calibration period
# change the calibration period
calibration.start="1981.01.01"
calibration.end="2010.12.31"

# Selecting the data column
ggg=2

# Getting the index corresponding to the calibration period
find.start = which(as.character(mod_new[,1]) ==calibration.start);find.start
find.end   = which(as.character(mod_new[,1]) ==calibration.end );find.end

# now get familiar with the data set, construct qqplots
# plot time series
plot(obs_new[find.start:find.end,ggg], mod_new[find.start:find.end,ggg], xlim=c(0,200),ylim=c(0,200))

plot(sort(obs_new[find.start:find.end,ggg]), sort(mod_new[find.start:find.end,ggg]))
lines(sort(obs_new[find.start:find.end,ggg]), sort(obs_new[find.start:find.end,ggg]))

# plot ecdfs
plot(ecdf(mod_new[find.start:find.end,ggg]),col=2)      # add original model data
plot(ecdf(obs_new[find.start:find.end,ggg]), add=T)     # reference data

# what does the plot tell you?

##### is there a bias in the data set?
# yes? Great, then let's start with the bias correction
```

Impact du changement climatique et des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique du bassin versant de Bankandi-Loffing à Dano.

```
# now perform the quantile mapping

newfit = fitQmapQUANT(obs_new[find.start:find.end,ggg],mod_new[find.start:find.end,ggg],wet.days=T,qstep=.0001,nboot=100)
mod_corr = doQmapQUANT(mod_new_To_Correct[,ggg],newfit)# Data for which quantile mapping will be done

# Saving the corrected data into a file/Please, modify the file name
write.csv(data.frame(Date=mod_new_To_Correct[,1],mod_new_To_Correct[,2], mod_corr),
          "C:/donnees_dano/Data_Extraction_RCM/Quantile-Mapping/pr_AFR-44_HadGEM2-ES_historical_Corrected.csv")

#add the cdf of the bias corrected data mod_corr to the plot
lines(ecdf(mod_corr),col=3)
```

```
# Plotting the corrected values

plot(sort(obs_new[find.start:find.end,ggg]), sort(mod_corr[find.start:find.end]), xlab = "Sorted Observation", ylab = "Sorted Corrected Simulation")
lines(sort(obs_new[find.start:find.end,ggg]), sort(mod_corr[find.start:find.end]), col=3)
abline(lsfite(sort(obs_new[find.start:find.end,ggg]), sort(obs_new[find.start:find.end,ggg])), col=4)
```

```
# evaluate the calibration period:

rmse(obs_new[find.start:find.end,ggg],mod_new[find.start:find.end,ggg])
rmse(obs_new[find.start:find.end,ggg],mod_corr[find.start:find.end])

plot(ecdf(obs_new[find.start:find.end,ggg]))
lines(ecdf(mod_new[find.start:find.end,ggg]),col=2)
lines(ecdf(mod_corr[find.start:find.end]),col=3)
```

```
qqplot(obs_new[,ggg],mod_new[,ggg],distribution = qnorm,xlim=c(0,200),ylim=c(0,200),xlab="obs",ylab="mod")

qqplot(obs_new[,ggg],mod_corr,distribution = qnorm,xlim=c(0,200),ylim=c(0,200),xlab="obs",ylab="mod")

#check ecdfs
plot(ecdf(obs_new[,ggg])) # reference data
lines(ecdf(mod_new[,ggg]),col=2) # add original model data
lines(ecdf(mod_corr),col=4) # add bias corrected model data
```

Impact du changement climatique et des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique du bassin versant de Bankandi-Loffing à Dano.

#Statistic: Annual Values

```
obs_new_Annual=mod_new_Annual=mod_corr_Annual=NA
for (i in 1:29){
  obs_new_Annual[i]=sum(obs_new[365*(i-1)+1: 365*i,ggg], na.rm=T)
  mod_new_Annual[i]=sum(mod_new[360*(i-1)+1: 360*i,ggg], na.rm=T)
  mod_corr_Annual[i]=sum(mod_corr[360*(i-1)+1: 360*i], na.rm=T)
}; cbind(obs_new_Annual,mod_new_Annual,mod_corr_Annual)
```

Annexe 3: Test de Mann-Kendall pour déterminer l'existence d'une tendance dans les données historiques observées et simulées.

MannKendall(Observed)

tau = -0.0621, 2-sided pvalue =0.64274

MannKendall(HadGEM2-ES)

tau = 0.131, 2-sided pvalue =0.31775

MannKendall(HadGEM2-ES.corrigé)

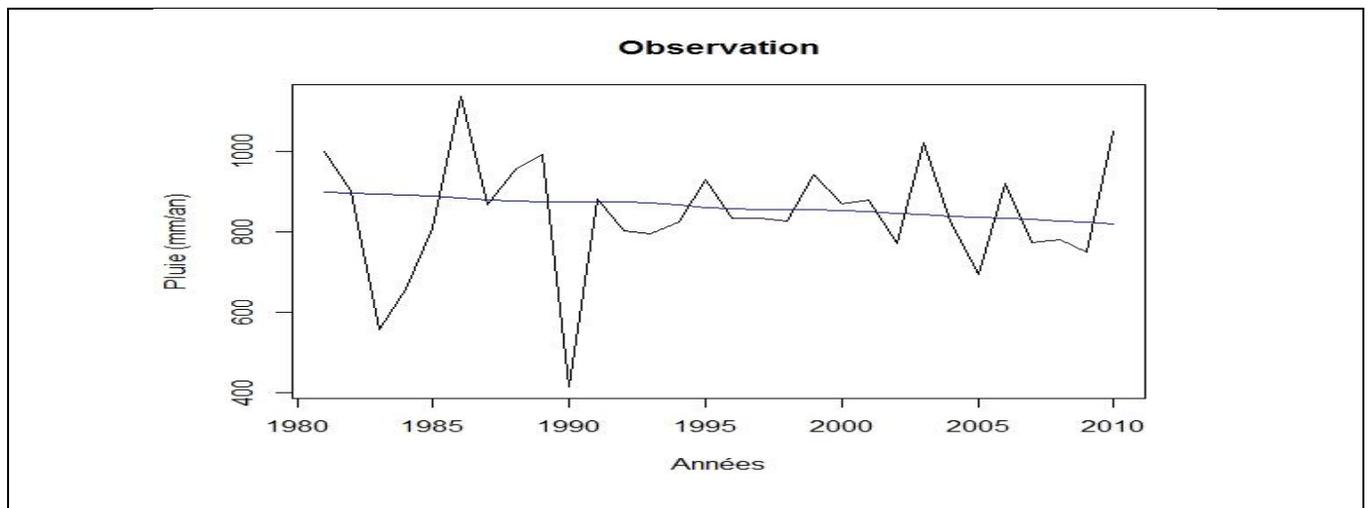
tau = 0.154, 2-sided pvalue =0.23899

MannKendall(MPI-ESM-MR)

tau = -0.0759, 2-sided pvalue =0.56806

MannKendall(MPI-ESM-MR Corrigé)

tau = -0.0483, 2-sided pvalue =0.72123



Impact du changement climatique et des aménagements du bas-fond de Bankandi sur le régime hydrologique du bassin versant de Bankandi-Loffing à Dano.

