

2023-08

Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte : Cas des bassins versants des rivières Ntahangwa et Ruvyironza

Irabaruta, Martial

UB, FSI

<https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/2004>

Téléchargé depuis le dépôt institutionnel officiel de l'Université du Burundi

République du Burundi
Ministère de l'éducation nationale
et de la recherche scientifique



Master en Génie Civil,
Aménagement et Maîtrise des
Projets

Université du Burundi

Faculté des Sciences de l'Ingénieur

Année Académique: 2021-2022

CONTRIBUTION A LA MODELISATION HYDROLOGIQUE AU BURUNDI PAR
ADAPTATION DE 3 MODELES HYDROLOGIQUES USUELS ET PAR
CONFIGURATION D'UN MODELE MIXTE : Cas des bassins versants des rivières
NTAHANGWA et RUVYIRONZA.

Mémoire

Présenté publiquement par :

Martial IRABARUTA

En vue de l'obtention du grade de Master en Génie Civil, Aménagement et Maîtrise des
Projets.

Soutenu le 14/08/2023 devant le jury composé de:

| | |
|--------------------------------------|----------------------------|
| Dr. Ir. NZEYIMANA Joseph | : Président |
| Dr. Ir. NIYONGABO Henri | : Lecteur principal |
| Dr. Ir. MVUYEKURE Jean Claude | : Directeur |
| Dr. Ir. NIBIGIRA Léonidas | : Membre |

Bujumbura: Le 14 Août 2023

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

IDENTIFICATION DES MEMBRES DU JURY

Dr-Ir NZEYIMANA Joseph : Président du Jury

Dr-Ir NIYONGABO Henri : Lecteur principal

Dr-Ir MVUYEKURE Jean Claude : Directeur de mémoire

Dr-Ir NIBIGIRA Léonidas: Membre du Jury

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

DEDICACES

A mes chers parents ;

A mes frères et sœurs ;

Au corps professoral de l'Université du Burundi, plus particulièrement à ceux de la Faculté des Sciences de l'ingénieur, Département de Génie-Civil ;

A ma très chère fiancée ;

A tous ceux qui me sont chers ;

Je dédie ce mémoire.

REMERCIEMENTS

En préambule de ce mémoire, je tiens à adresser mes sincères remerciements :

- A Dieu le Tout Puissant, pour m'avoir donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail ;
- A mon Directeur de mémoire, Dr-Ir MVUYEKURE Jean Claude, pour m'avoir honoré en acceptant de guider mes premiers pas dans la recherche. Je ne pourrai arriver à un tel aboutissement n'eut été ses conseils et orientations ;
- A mes chers parents, pour n'avoir ménagé aucun effort en m'entourant d'un environnement propice me permettant de savourer au gout sucré du savoir. Qu'ils trouvent en ce mémoire si modeste soit-il, l'expression de ma profonde gratitude ;
- A tous les enseignants que j'ai eu la chance de côtoyer depuis l'école maternelle jusqu'à la fin du cycle de master. Ils m'ont suffisamment outillé, ce qui me fera sans doute un futur cadre du pays responsable et hautement compétent ;
- A toute personne ayant contribué de près ou de loin, en m'encourageant pour que je puisse réussir ces deux formidables années académiques.

Résumé

Au pas de temps pluriannuel, l'approche par bilan fournit des modèles pluie- débit sous de simples formulations mathématiques reliant le débit(Q) à la pluie(P) et l'évapotranspiration potentielle(E), le tout en millimètres par an. Souvent, il s'agit de la différence entre la hauteur moyenne annuelle des précipitations et la quantité de l'évapotranspiration moyenne annuelle, les autres paramètres liés aux caractéristiques physiographiques du bassin versant étant supposés négligeables par les concepteurs de ces modèles.

Pour une meilleure compréhension et utilisation de ce type de modèles, le présent travail a tout d'abord repéré trois modèles hydrologiques existants dans la littérature qui étaient différents tant sur la forme et dans le fond, et a suivi une évaluation de la performance pour chaque modèle en étudiant la capacité de chaque modèle à reproduire qualitativement et quantitativement les débits à l'exutoire de chaque bassin versant, puis l'on a procédé à l'amélioration des trois modèles de calculs hydrologiques existants afin de les adapter et les rendre exploitables sur tous les bassins versants ayant les mêmes conditions météorologiques que celles des BV des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA.

Les trois modèles hydrologiques existants améliorés sont entre autre : le modèle SCS, le modèle OL'DEKOP, et celui de TIXERONT. Avant leur amélioration, les performances des trois modèles étaient toutes en dessous du seuil minimal de validité du modèle, c'est après l'amélioration des trois modèles que le niveau de performance a été au-dessus du seuil minimal de validité qui est le critère de NASH. Les résultats obtenus ont montré que sur le BV de la rivière NTAHANGWA, le modèle SCS est fiable à 91,99%, le modèle OL'DEKOP à 77,02%, et celui de TIXERONT à 91,26%, et que sur le BV de la rivière RUVYIRONZA à son exutoire sis à KIBAYA le modèle SCS est fiable à 94,34%, le modèle OL'DEKOP à 94,82%, et celui de TIXERONT à 94,62%, et au niveau de l'embouchure de la rivière RUVYIRONZA et la rivière WAGA, le modèle SCS est fiable à 95,75%, le modèle OL'DEKOP à 95,31%, et celui de TIXERONT à 93,42% .

Les résultats obtenus ont montré que le modèle SCS a beaucoup plus été performant par rapport aux deux autres modèles OL'DEKOP et TIXERONT.

Le présent travail ne s'est pas uniquement focalisé aux modèles hydrologiques existants, mais aussi à la configuration des modèles mixtes combinant les données pluviométriques et les caractéristiques physiographiques des bassins versants concernés par cette étude.

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

Pour ces modèles mixtes, le degré de fiabilité des résultats obtenus est satisfaisant seulement pour le BV de la rivière RUVYIRONZA. Les valeurs de NSE ont été de 90,76% pour le BV de la rivière RUVYIRONZA et 57,38% pour le BV de la rivière NTAHANGWA.

Abstract

At a multi-year time step, the balance approach provides rain-flow models using simple mathematical formulations linking flow (Q) to rain (P) and potential evapotranspiration (E), all in millimeters per year. Often, it is the difference between the average annual height of precipitation and the amount of annual average evapotranspiration, the other parameters related to the physiographic characteristics of the watershed being assumed to be negligible by the designers of these models. For a better understanding and use of this type of models, this work first identified three existing hydrological models in the literature which were different both in form and in substance, and followed a performance evaluation for each model by studying the ability of each model to reproduce qualitatively and quantitatively the flow at the outlet of each watershed, then we proceeded to improve the three existing hydrological calculation models in order to adapt them and make them usable on all watersheds having the same meteorological conditions as the BVs of the NTAHANGWA and RUVYIRONZA rivers. The three improved existing hydrological models are among others: the SCS model, the OL'DEKOP model, and that of TIXERONT. Before their improvement, the performances of the three models were all below the minimal threshold of validity of the model, it is after the improvement of the three models that the level of performance was above the minimal threshold of validity which is the criterion of NASH. The results obtained showed that on the BV of the NTAHANGWA river, the SCS model is reliable at 91.99%, the OL'DEKOP model at 77.02%, and that of TIXERONT at 91.26%, and that on the BV of the RUVYIRONZA river has its outlet located in KIBAYA the SCS model is reliable at 94.34%, the OL'DEKOP model at 94.82%, and that of TIXERONT at 94.62%, and at the level of the mouth of the river RUVYIRONZA and the WAGA river, the SCS model is reliable at 95.75%, the OL'DEKOP model at 95.31%, and that of TIXERONT at 93.42%. The results obtained showed that the SCS model was much more efficient compared to the other two models OL'DEKOP and TIXERONT. This work has not only focused on existing hydrological models, but also on the configuration of mixed models combining rainfall data and physiographic characteristics of the watersheds concerned by this study. For these mixed models, the degree of reliability of the results obtained is satisfactory only for the BV of the

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

RUVYIRONZA River. The degree of reliability for this case is 90.76% for RUVYIRONZA Watershed River and 57.38% for NTAHANGWA Watershed River.

TABLE DES MATIERES

| | |
|---|-------------|
| IDENTIFICATION DES MEMBRES DU JURY | i |
| DEDICACES | ii |
| REMERCIEMENTS | iii |
| RESUME | iv |
| ABSTRACT | vi |
| TABLE DES MATIERES | viii |
| LISTE DES TABLEAUX | xi |
| LISTE DES FIGURES | xiii |
| LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS | xvi |
| AVANT PROPOS | xvii |
| 0. INTRODUCTION GENERALE | 1 |
| 0.1. Généralités | 1 |
| 0.2. Problématique..... | 2 |
| 0.3. Objectifs | 2 |
| 0.3.1. Objectif global..... | 2 |
| 0.3.2. Objectifs spécifiques | 2 |
| 0.4. Délimitation du sujet et méthodologie de travail | 2 |
| 0.4.1 Délimitation du sujet | 2 |
| 0.5. Méthodologie de travail..... | 3 |
| CHAPITRE I: REVUE DE LA LITTERATURE | 6 |
| I.1. Introduction | 6 |
| I.2. Modélisation hydrologique | 6 |
| I.3. Classification des modèles hydrologiques selon le type | 7 |
| I.3.1 Les modèles empiriques..... | 7 |
| I.3.2 Les modèles conceptuels..... | 7 |

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

| | |
|---|-----------|
| I.3.3 Les modèles à base physique..... | 8 |
| I.4. Classification selon le degré de spatialisation..... | 8 |
| I.4.1 Le modèle hydrologique global | 8 |
| I.4.2 Les modèles semi-distribués | 9 |
| I.4.3 Le modèle distribué..... | 9 |
| I.5. Traitement des données hydrométéorologiques..... | 9 |
| I.5.1 Homogénéisation des données meteorologiques. | 9 |
| I.5.2 Détermination de la précipitation moyenne du bassin | 10 |
| I.6. Choix de la méthode de transformation pluie-débit..... | 13 |
| I.6.1 Les trois Modèles hydrologiques existants | 14 |
| I.7. Critères de calage d'un modèle | 14 |
| CHAPITREII: MODELISATION HYDROLOGIQUE ET ANALYSE DES RESULTATS..... | 16 |
| II.1. Généralités | 16 |
| II.2. Homogénéisation des données hydrométéorologiques..... | 16 |
| II.3. Calcul et détermination des données météorologiques pour chaque BV..... | 18 |
| II.3.1 Calcul de l'évapotranspiration potentielle | 18 |
| II.3.2 Calcul des précipitations moyennes annuelles | 41 |
| II.3.3 Cas du bassin versant de la rivière NTAHANGWA | 42 |
| II.4. Amélioration des trois modèles hydrologiques existants par simulation. | 46 |
| II.4.1 Synthèse des résultats obtenus des scenarii étudiés..... | 47 |
| II.4.2 Scenarii plus performants des modèles hydrologiques améliorés | 56 |
| II.4.3 Commentaire sur les résultats des trois modèles hydrologiques améliorés..... | 78 |
| II.5. Configuration des modèles hydrologiques mixtes..... | 79 |
| II.5.1 Introduction | 79 |
| II.5.2 Architecture du modèle hydrologique proposé..... | 79 |
| II.5.3 Calcul des paramètres d'entrée du modèle hydrologique mixte..... | 79 |
| II.6. Discussion, comparaison et choix du modèle adapté pour chaque BV | 89 |
| CHAPITREIII: CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS..... | 91 |
| III.1. Conclusion générale | 91 |
| III.2. Recommandations | 91 |

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES93

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|---|----|
| Tableau II-1 : Périodes observées et celles non observées des stations météorologiques correspondantes à chaque bassin versant :..... | 17 |
| Tableau II-2 : Synthèse de l'évapotranspiration potentielle moyenne annuelle du BV NTAHANGWA (de 1991 à 2020)..... | 19 |
| Tableau II-3: Synthèse de l'évapotranspiration moyenne annuelle du BV de la rivière RUVYIRONZA (de 1991 à 2020)..... | 30 |
| Tableau II-4: Synthèse des précipitations moyennes annuelles du BV de la rivière NTAHANGWA | 43 |
| Tableau II-5: Synthèse des précipitations moyennes annuelles du BV de la rivière RUVYIRONZA | 45 |
| Tableau II-6: Modèle OL'DEKOP | 47 |
| Tableau II-7:Modèle TIXERONT | 47 |
| Tableau II-8 : Modèle SCS | 49 |
| Tableau II-9:Modèle TIXERONT | 50 |
| Tableau II-10 : Modèle SCS | 51 |
| Tableau II-11 : Modèle OL'DEKOP | 52 |
| Tableau II-12:Modèle TIXERONT | 53 |
| Tableau II-13: modèle SCS..... | 54 |
| Tableau II-14 : modèle OL'DEKOP | 55 |
| Tableau II-15: Synthèse des principaux paramètres physiographiques des bassins versants..... | 80 |
| Tableau II-16: Synthèse des paramètres physiographiques du BV de la rivière RUVYIRONZA. | 84 |
| Tableau II-17: synthèse des valeurs de principales caractéristiques physiques du bassin versant de la rivière NTAHANGWA..... | 86 |
| Tableau II-18: Synthèse des résultats obtenus par la simulation des modèles hydrologiques mixtes | 89 |

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

Tableau II-19: Synthèse comparative des modèles hydrologiques améliorés et les modèles mixtes..... 90

LISTE DES FIGURES

| | |
|---|----|
| FIGURE I-1:illustration du polygone de Thiessen..... | 12 |
| FIGURE I-2:illustration d'une carte des isohyètes | 13 |
| FIGURE II-1:Polygone de THIESSEN du BV de la rivière NTAHANGWA | 42 |
| FIGURE II-2: Polygone de THIESSEN du bassin versant de la rivière RUVYIRONZA | 45 |
| FIGURE II-3:Représentation graphique des allures des débits simulés et celles des débits observés par le modèle amélioré d'OL'DEKOP. | 57 |
| FIGURE II-4:Ajustement des débits simulés et les débits observés par la méthode des moindres carrées ainsi que le coefficient de corrélation pour le modèle OL'DEKOP | 58 |
| FIGURE II-5:Représentation graphique des allures des débits simulés et celles des débits observés par le modèle amélioré de TIXERONT | 59 |
| FIGURE II-6:Ajustement des débits simulés et les débits observés par la méthode des moindres carrées ainsi que le coefficient de corrélation pour le modèle TIXERONT | 60 |
| FIGURE II-7:Représentation graphique des allures des débits simulés et celle des débits observés pour le modèle SCS. | 62 |
| FIGURE II-8: Ajustement des débits simulés et les débits observés par la méthode des moindres carrées ainsi que le coefficient de corrélation pour le modèle SCS | 63 |
| FIGURE II-9: Représentation graphique des allures des débits simulés et celles des débits observés par le modèle amélioré de OL'DEKOP | 65 |
| FIGURE II-10:Ajustement des débits simulés et les débits observés par la méthode des moindres carrées ainsi que le coefficient de corrélation pour le modèle OL'DEKOP | 65 |
| FIGURE II-11: Représentation graphique des allures des débits simulés et celles des débits observés par le modèle amélioré de TIXERONT | 67 |

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

FIGURE II-12: Ajustement des débits simulés et les débits observés par la méthode des moindres carrées ainsi que le coefficient de corrélation pour le modèle TIXERONT 68

FIGURE II-13: Représentation graphique des allures des débits simulés et celles des débits observés par le modèle amélioré de SCS 70

FIGURE II-14: Ajustement des débits simulés et les débits observés par la méthode des moindres carrées ainsi que le coefficient de corrélation pour le modèle SCS 70

FIGURE II-15: Représentation graphique des allures des débits simulés et celles des débits observés par le modèle amélioré de OL'DEKOP 72

FIGURE II-16: Ajustement des débits simulés et les débits observés par la méthode des moindres carrées ainsi que le coefficient de corrélation pour le modèle OL'DEKOP 73

FIGURE II-17: Représentation graphique des allures des débits simulés et celles des débits observés par le modèle amélioré de TIXERONT 75

FIGURE II-18: Ajustement des débits simulés et les débits observés par la méthode des moindres carrées ainsi que le coefficient de corrélation pour le modèle TIXERONT 75

FIGURE II-19: Représentation graphique des allures des débits simulés et celles de débits observés par le modèle amélioré de SCS..... 77

FIGURE II-20: Ajustement des débits simulés et les débits observés par la méthode des moindres carrées ainsi que le coefficient de corrélation pour le modèle SCS 78

FIGURE II-21: Carte des pentes du bassin versant de la rivière RUVYIRONZA..... 81

FIGURE II-22: Carte hypsométrique du bassin versant de la rivière RUVYIRONZA. 81

FIGURE II-23: Courbe hypsométrique du bassin versant de la rivière RUVYIRONZA. 82

FIGURE II-24: Carte du réseau hydrographique du bassin versant de la RUVYIRONZA 83

FIGURE II-25: La carte des pentes du bassin versant de la riviere NTAHANGWA 85

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

FIGURE II-26:La courbe hypsometrique et l'hypsogramme du BV de la riviere NTAHANGWA. 86

FIGURE II-27:Carte du réseau hydrographique du bassin versant de la NTAHANGWA 86

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

Abréviations Grecques

$\alpha, \beta, \psi, \lambda$: Paramètres d'amélioration pour les modèles hydrologiques existants et les modèles mixtes

Sigles et abréviations romaines

A : Surface totale du bassin
 A_i : Superficie du polygone associée à la station i.
BV : Bassin Versant
 D_d : Densité de drainage (km/km²)
E : Evapotranspiration moyenne annuelle (mm)
ETP : Evapotranspiration potentielle du mois considéré
IGEBU : Institut Géographique du Burundi
 i_m : Pente moyenne du bassin (m/m)
K : Coefficient d'ajustement mensuel
 K_G : Indice de compacité de Gravélius
L : Longueur du rectangle équivalent (km)
l : Largeur du rectangle équivalent (km)
MNT : Modèle Numérique du Terrain
NSE : Nash Sutcliffe Evaluation (Critère de Nash)
OMM : Organisation Mondiale de la Météorologie
P : Précipitation
 P_i : Moyenne des isohyètes consécutives i et i+1
 P_m : Précipitations moyennes du bassin versant
 P_m : Précipitations moyennes annuelles (mm)
Q : Débit
 $Q_{i, \text{sim}}$: Débit simulé au pas de temps i
 $Q_{i, \text{obs}}$: Débit observé au pas de temps i,
 Q_{moy} : Moyenne des débits observés sur la période considérée.
SCS : Soil Conservation System
MGR : Modèle du Genie Rural
T : Température moyenne mensuelle du mois considéré

AVANT PROPOS

Dans l'exercice de son métier, l'ingénieur se trouve dans la nécessité d'utiliser la modélisation en observant virtuellement certains phénomènes afin de lui permettre d'anticiper en place des mesures de prévention, ou de contenance des dégâts pouvant émaner de ces phénomènes et événements rares.

Afin de contribuer à la modélisation hydrologique au Burundi, cet ouvrage a mis au point des nouvelles formes de trois modèles hydrologiques existants qui ont été calés sur des bassins versants ayant les conditions météorologiques ainsi que les caractéristiques physiographiques différentes à celles des bassins versants du Burundi ; ajouté à cela ce travail a mis au point un autre modèle hydrologique mixte conçu sur base de la prise en compte de la météorologie ainsi que la physiographie des bassins versants des rivières RUVYIRONZA et NTAHANGWA.

Les données de base nous ayant servi d'aboutir aux objectifs que nous nous sommes fixés sont entre autres les données hydrométéorologiques (la pluviométrie de chaque station météorologique, les températures enregistrées sur chaque station météorologique, les débits observés des deux rivières pris au niveau des exutoires ciblés) récoltées auprès de l'Institut Géographique du Burundi (IGEBU), ainsi que les données physiographiques des deux bassins versants (l'étendue, le relief, l'hydrographie et la forme) qui ont été obtenues à partir des cartes produites avec le logiciel ArcGis10.3.

Après le traitement des données obtenues a suivi l'évaluation du niveau de performance des trois modèles hydrologiques par une simulation réalisée avec le logiciel Excel, les critères nous ayant servi de définir le niveau de performance d'un modèle sont entre autres celui de Nash-Sutcliffe ainsi que le coefficient de corrélation entre les débits observés et ceux simulés.

Une partie des objectifs fixés a été atteinte, et cela étant entre autres la mise au point de nouvelles formes de trois modèles hydrologiques existants et adaptés sur des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA, le niveau de performance de chacun des trois modèles ayant largement dépassé le seuil d'acceptation d'un modèle qui est de 70%.

Cependant, concernant les modèles hydrologiques conçus sur base des conditions météorologiques ainsi que la physiographie de chaque bassin versant, seul le modèle mixte conçu pour le bassin versant de la rivière RUVYIRONZA a pu avoir un niveau de performance atteignant le seuil d'acceptation d'un modèle.

0. INTRODUCTION GENERALE

0.1. Généralités

L'évaluation de la quantité de ressource en eau disponible ; le dimensionnement d'ouvrages hydrotechniques comme les digues, les barrages ou les ponts ; la prévision des événements pluviométriques extrêmes (les crues et les étiages) sont des études, au cours desquelles l'ingénieur devra nécessairement connaître les débits transitant dans les cours d'eau faisant objet de ses études. Car ces études permettront à l'ingénieur d'optimiser les couts des ouvrages hydrauliques qui devront franchir les cours d'eau, garantir la sécurité et la rentabilité des ouvrages, alerter la population et réduire les pertes humaines et matérielles, contribuer au maintien du bon état écologique ou assurer la satisfaction des usagers, comme l'alimentation en eau potable, l'assainissement et l'irrigation.

Le présent travail s'est focalisé sur l'analyse des contraintes liées à l'acquisition et à la transformation des données hydrologiques, la mise au point des modèles hydrologiques existants améliorés par des paramètres ainsi que la configuration des modèles mixtes, afin de proposer des solutions pouvant aider l'ingénieur à contourner les contraintes ci haut cités.

Pour réaliser des études hydrologiques, il est indispensable d'avoir des données relevées sur des stations hydrométriques (débits observés des rivières) et celles des stations météorologiques (précipitations, humidité, ensoleillement, température...) périodiquement et spatialement bien représentatives.

Après l'acquisition des données utiles pour la réalisation de ce travail auprès de l'IGEBU, a suivi un traitement statistique approprié car ces données présentaient des irrégularités (discontinuités, interruption, périodes inégales d'observation). A travers la littérature hydrologique, parmi beaucoup de modèles hydrologiques existants, nous y avons repéré 3 modèles empiriques différents au niveau du fond et de la forme la forme, a suivi une évaluation des performances de chaque modèle par sa capacité à reproduire le plus fidèlement possible les débits observe, suivant des critères connus afin d'envisager une éventuelle amélioration les amenant à être les plus performants possible. Cela étant pour les modèles hydrologiques existants et les modèles mixtes configurés pour chaque bassin versant.

Afin de bien mener notre étude, nous nous sommes servis du logiciel ARCGIS 10.3 pour la production des cartes nécessaires, ainsi que le logiciel EXCEL à travers son programme automatique nous ayant servi lors de la simulation.

Ce sont les résultats obtenus qui nous ont conduits à comparer, puis de choisir entre les

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

formes améliorés des modèles hydrologiques existants ainsi que les modèles mixtes configurées par combinaison de la pluviométrie ainsi qu'aux caractéristiques physiographiques des BV des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA.

0.2. Problématique

L'insuffisance, l'absence et la répartition inégale des stations hydrométéorologiques sur le territoire nationale, sont des causes majeures qui font qu'il y ait le manque de données hydrologiques indispensables pour un ingénieur lors de ses études de conception et de dimensionnement de certains ouvrages hydrauliques.

0.3. Objectifs

0.3.1. Objectif global

L'objectif du présent travail est d'améliorer les modèles hydrologiques existants par modélisation hydrologique en les adaptant aux conditions locales des bassins versants : cas des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA.

0.3.2. Objectifs spécifiques

Pour notre étude, les objectifs spécifiques sont :

- Analyser et homogénéiser les données hydrologiques des BV concernés;
- Evaluer l'efficacité des 3 modèles hydrologiques par optimisation ;
- Tester la fiabilité des 3 méthodes hydrologiques améliorés ;
- Configurer un modèle mixte sur bases des caractéristiques du bassin versant
- Discuter les résultats obtenus et recommander les modèles fiables.

0.4. Délimitation du sujet et méthodologie de travail

0.4.1 Délimitation du sujet

Notre recherche est orientée en premier lieu vers l'amélioration des modèles hydrologiques existants par des paramètres afin de rendre ces derniers exploitables en permettant l'acquisition des données nécessaires pour les études hydrauliques dès la conception jusqu'à l'exploitation des ouvrages hydrauliques dans les bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA. En second lieu, notre recherche s'orientera vers la configuration d'un modèle mixte à base des caractéristiques des bassins versants et des données météorologiques.

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

Le choix des bassins versants des rivières RUVYIRONZA et NTAHANGWA comme zones d'études a été fait en tenant compte :

- ✓ **Pour le cas du BV de la rivière RUVYIRONZA :**
 - De la grandeur de sa superficie qui est de 1898,7 km² qui représente plus de 15% de celle de tout le Burundi ; **(IGEBU, 2010)**
 - La disponibilité des données hydrométéorologiques, bien qu'elles soient insuffisantes, a fait pencher la balance en faveur du bassin de la RUVYIRONZA ;
 - La rivière RUVYIRONZA est le principal affluent de la rivière RUVUBU, et cette dernière collectant 95% des eaux superficielles qui se jettent dans le NIL **(IGEBU, 2010) ;**
 - De sa forme allongée, le bassin versant de la RUVYIRONZA s'étend sur plusieurs régions ayant des climats et des reliefs variables, ce qui permettra aux modèles améliorés de pouvoir être transposés ailleurs sur des bassins versants ayant des caractéristiques plus ou moins semblables à celles du BV de la rivière RUVYIRONZA.

- ✓ **Pour le cas du BV de la rivière NTAHANGWA**
 - La rivière NTAHANGWA traverse la mairie de Bujumbura et elle est l'une des rivières qui causent l'effondrement de ses berges ;
 - La rivière NTAHANGWA est l'une qui fait souvent objet d'études de stabilisation de son niveau du lit ainsi que la stabilisation des berges ;
 - De sa superficie de 111,21Km², avec un climat différent de celui du BV de la RUVYIRONZA, avec un relief différent à celui du BV de la RUVYIRONZA, cela permet de mener une étude comparative avec le bassin versant de la rivière RUVYIRONZA de l'efficacité des 3 modèles hydrologiques vis-à-vis de la taille, le climat et le relief changeant d'un BV à l'autre.

0.5. Méthodologie de travail

Le but principal de ce travail étant d'améliorer 3 modèles hydrologiques existants à l'aide des paramètres d'amélioration, ainsi que de configurer un modèle mixte à base des caractéristiques physiques et météorologiques du même bassin versant. Pour ce faire, la méthodologie suivie a été la suivante :

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

- La délimitation de la zone d'étude, à l'aide du modèle numérique de terrain (MNT) obtenu auprès du Bureau de Normalisation Géomatique et du logiciel (ARCGIS10.3) ;
- Localisation des stations météorologiques se trouvant dans les limites du BV considéré et ayant contribué pour déterminer les précipitations moyennes annuelles et la température moyenne annuelle. (Réalisé par le logiciel ARCGIS 10.3) ;
- Traitement des données brutes obtenues auprès de l'IGEBU. (Homogénéisation par extension des séries discontinues et cela fait par la méthode des moindres carrées).

❖ Pour les modèles hydrologiques existants :

- Utiliser les données de notre zone d'étude dans les modèles existants tel que conçus, et évaluer l'efficacité de chaque modèle par le critère de NASH ;
- Calcul du paramètre d'amélioration du modèle pour tous les scénarii ci bas cités, par une minimisation de l'écart entre les débits observés et les débits simulés grâce à un programme de calcul avec le logiciel EXCEL ;
- Adapter au modèle un paramètre moyen obtenu, et réévaluer son efficacité par le critère de NASH ;
- Choix du modèle amélioré le plus efficace pour chaque bassin versant sur base du critère de NASH.

❖ Pour les modèles mixtes :

- Production de la carte des pentes de chaque BV (à l'aide du logiciel ARCGIS10.3) ;
- Calcul de la courbe hypsométrique pour chaque BV (réalisé avec EXCEL) ;
- Production d'une carte illustrant le réseau hydrographique pour chaque BV (réalisé à l'aide du logiciel ARCGIS10.3) ;
- Calcul des caractéristiques du BV intervenant dans le modèle mixte (Indice de pente global, Longueur du rectangle équivalent, largeur du rectangle équivalent, la densité de drainage) ;
- Configuration des modèles mixtes (qui tiennent compte de la pluviométrie, le relief, la superficie, et l'hydrographie) pour chaque bassin versant ;

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

- Evaluation de l'efficacité de chaque scénario proposé, et amélioration par adaptation des paramètres d'amélioration (coefficients ou exposants) afin de minimiser les écarts entre les débits observés et les débits simulés ;
- Choix du modèle mixte ayant été le plus performant sur chaque bassin versant.

CHAPITRE I: REVUE DE LA LITTÉRATURE

I.1. Introduction

Pour bien mener les études hydrologiques, il est indispensable de savoir les données hydrométéorologiques ainsi que les caractéristiques du bassin versant. Au Burundi, le réseau des stations hydrométéorologiques ne couvre pas l'ensemble des cours d'eau et sa répartition est inégale sur le territoire national, ce qui limite les chercheurs voulant mener des études de prévision hydrologiques.

Dans certains endroits du Burundi, les installations actuellement en place, notamment les stations météorologiques et les stations hydrométriques, sont soit défectueuses, soit inactives ou simplement non disponibles (**IGEBU, 2010**). Il devient donc essentiel d'utiliser d'autres techniques pour être en mesure de bien comprendre le cycle hydrologique sur l'ensemble du territoire ; cette technique est appelée modélisation.

I.2. Modélisation hydrologique

Le terme "modèle" désigne un ensemble de relations mathématiques destiné à trouver une représentation schématique d'un processus donné. En hydrologie, un modèle de transformation Pluie-Débit tente de traduire par des expressions mathématiques des relations qui existent entre les différents processus physiques qui forment le cycle terrestre de l'eau. Une théorie exhaustive et déterministe de tous ces phénomènes est très complexe à mettre sur pied et l'on s'efforce de trouver des simplifications qui permettent de faciliter cette tâche tout en restant le plus proche de la réalité. (**Najiba CHKIR, 1994**).

La modélisation hydrologique consiste en l'utilisation des outils informatiques qui permettent de représenter les processus complexes et aléatoires du cycle hydrologique dont la précipitation, le ruissellement, l'évapotranspiration, l'infiltration, la recharge et le drainage de la nappe (**Sing V.P., 1995**).

La modélisation hydrologique, ayant pour but la simulation de débits, est primordiale dans les prévisions des quantités d'eau pouvant être disponibles sur certaines régions. Les connaissances liées à la modélisation hydrologique font partie des moyens permettant de réduire la vulnérabilité de la population face aux aléas liés à l'eau. Plusieurs types de modèles hydrologiques ont été conçus pour reproduire ces processus, ayant majoritairement comme objectif de pouvoir simuler efficacement les débits d'un bassin versant en se basant sur des informations de natures climatologique et physiographique. Les techniques analytiques de base qui sont utilisées sont principalement : l'analyse cartographique, les méthodes de

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

régression et de corrélation, la modélisation déterministe, la modélisation probabiliste et les techniques de régionalisation.

I.3. Classification des modèles hydrologiques selon le type

Selon **BESSIERE Hélène, (2008)**, il existe plusieurs classifications dont les plus courantes sont groupées dans 3 classes :

- Les modèles empiriques,
- Les modèles conceptuels,
- Et les modèles à base physique.

I.3.1 Les modèles empiriques

Les modèles empiriques ne font pas référence aux processus internes du système mais ils utilisent les séries de données chronologiques disponibles pour en déduire la structure du modèle ainsi que les valeurs des paramètres correspondants. Ils tentent d'établir une relation directe entre les données d'entrée et de sortie, de façon à reconstituer une série la plus proche possible de celle observée (**Najiba CHKIR, 1994**).

Ces modèles considèrent généralement le bassin versant comme une entité unique et portent le nom de boîtes noires. Des exemples de ce type de modèles sont les modèles GR (**Edijatno C. et Michel C., 1989**), le modèle SCS, etc... Les modèles GR et SCS ont une structure simple et le rôle de leurs paramètres est bien identifié.

I.3.2 Les modèles conceptuels.

Les modèles conceptuels utilisent des éléments de stockage ou réservoirs comme composants principaux. Ces réservoirs se remplissent par des flux : précipitation, infiltration ou percolation et se vident par évapotranspiration, ruissellement, drainage etc. Contrairement aux modèles empiriques, la structure des modèles conceptuels est déterminée avant leur utilisation. Elle est définie par la compréhension du système hydrologique du modélisateur. Cependant, ces modèles reposent également sur des séries temporelles de données de la sortie du système pour la détermination des valeurs des paramètres dans un processus de calibration. Les paramètres décrivent la taille des réservoirs ou la répartition des écoulements entre eux. Un seul paramètre peut décrire plusieurs processus et ne peut alors pas être directement déduit des mesures de terrain.

Ils ne sont pas directement applicables à des bassins non jaugés du fait de leur dépendance

aux mesures de l'écoulement. Cependant, des méthodes de régionalisation utilisant des relations statistiques entre les paramètres du modèle et des caractéristiques du bassin versant

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

ont été développées pour leur utilisation sur des bassins non jaugés (**BESSIERE Hélène, 2008**).

I.3.3 Les modèles à base physique.

Les modèles à base physique appelés mécanistes tentent de décrire le plus fidèlement possible les mécanismes internes du système en se basant sur la meilleure connaissance possible de la structure physique et en ayant recours à toutes les lois physiques existantes telles que les lois de conservation de masse, d'énergie ou de quantité de mouvement. En théorie, ces modèles sont indépendants du calage des paramètres car ceux-ci sont censés être mesurables sur le terrain. Concrètement, les équations qui génèrent ces modèles sont issues des lois de la mécanique des fluides ou de la physique des écoulements d'eau dans les sols (loi de Richards en milieu non saturé, loi de Darcy en milieu saturé et loi de Barré Saint-Venant pour le ruissellement de surface). Ils ont été développés dans l'espoir que la représentation physique de leurs processus était suffisamment réelle pour que leurs paramètres soient directement reliés aux caractéristiques physiques du bassin versant Sans processus de calibration (l'humidité du sol, la conductivité hydraulique dans la zone non saturée, des coefficients de frottement).

Cependant, les modèles à base physique souffrent d'une extrême demande de données, des problèmes d'échelles (les échelles de mesures diffèrent de celles des processus et des paramètres). Une conséquence directe est alors que les paramètres ne peuvent être directement déduits des mesures et que les modèles à base physique nécessitent également une étape de calibration, généralement des paramètres les plus sensibles. (**Abbott M.B. et al., 1986**), (**Grayson R et al., 1992**)

I.4. Classification selon le degré de spatialisation

Selon le degré de spatialisation, les modèles peuvent être regroupés en trois types :

I.4.1 Le modèle hydrologique global

C'est un modèle qui considère l'ensemble du bassin versant comme une unité spatiale. Les caractéristiques du bassin versant ainsi que les paramètres du modèle sont considérées comme non variables et sont représentés par les moyennes du bassin versant (**Beven and Keith, 2011**).

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

I.4.2 Les modèles semi-distribués

Ce sont des modèles intermédiaires entre les modèles globaux et les modèles distribués. Ces modèles ont l'avantage de bien représenter les caractéristiques du bassin Sans toutefois demander autant de données et de temps de calcul que les modèles distribués.

I.4.3 Le modèle distribué

C'est un modèle qui subdivise le bassin en carreaux dont les caractéristiques locales sont similaires et chaque unité est vue comme un sous bassin. Ce modèle permet d'incorporer la variabilité spatiale du bassin versant en ce qui a trait notamment à l'utilisation du sol et aux caractéristiques du sol.

I.5. Traitement des données hydrométéorologiques

L'établissement d'un modèle fréquentiel évaluant la pluviométrie et sa variabilité spatio-temporelle nécessite l'existence d'une base des données pluviométriques assez longue et avec un nombre de séries importantes réparties sur tout le bassin. Malheureusement, d'une part, nous ne disposons jamais de séries de données longues ni parfaitement continues. Les longueurs des séries pluviométriques sont dépendantes des dates d'ouverture des stations qui varient d'un poste à l'autre. Toute acquisition de données par échantillonnage est souvent soumise à des erreurs de toutes natures, d'où l'importance de leur homogénéisation avant toute manipulation

D'autre part, un bassin versant a une superficie très étendue et qui couvre plusieurs stations de mesures ; d'où l'impérieuse nécessité de déterminer la moyenne du paramètre mesuré. Cette partie est consacrée au mécanisme de traitement de données par homogénéisation et le calcul des moyennes des paramètres climatiques d'un bassin.

I.5.1 Homogénéisation des données météorologiques.

L'homogénéisation est un procédé qui consiste à détecter puis à corriger les variations des données dans le temps et dans l'espace. Elle répond au problème de traitement de données lorsqu'on possède sur un bassin les pluies annuelles relevées à N stations, mais pour des périodes différentes. On dégage une période commune, la plus longue possible, en comblant avec le moins de risque possible d'erreur les relevés manquants pour les stations comportant les périodes d'observation les plus courtes.

Diverses techniques ont été développées pour accommoder différents types de facteurs tels que la variable à homogénéiser, la variabilité spatiale et temporelle des données selon

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

l'endroit où les stations sont situées, la longueur des séries et le nombre de données manquantes, les métadonnées disponibles et la densité du réseau d'observations (**Aguilar E. et al., 2003**)

L'homogénéisation porte sur les périodes d'observations des séries homogènes, ou rendues homogènes, de relevés aux postes pluviométriques. Ces périodes sont disparates : certains postes sont observés plus longtemps que d'autres, certains présentent des lacunes de plusieurs années. L'homogénéisation doit s'efforcer de combler les lacunes ou l'insuffisance d'observations de certaines stations en prenant en considération les observations Sans lacune et de longue durée effectuées en d'autres stations. (**Dubreuil, 1974**).

En homogénéisant, on compare souvent les données d'une certaine station avec celles des stations voisines pour éviter qu'un changement climatique soit interprété comme une inhomogénéité. La série dont on veut vérifier l'homogénéité est appelée série de base et les séries voisines à la série de base sont supposées être climatiquement similaires.

I.5.1.1 Extension des séries des données météorologiques discontinues.

On suppose qu'il s'agit d'étendre une série courte Y de hauteurs annuelles de précipitations à l'aide d'une série longue X, toutes deux suivant une loi normale et ayant entre elles une liaison linéaire.

Les estimations des valeurs annuelles et des paramètres statistiques d'une série Y de K valeurs observées au poste B, à partir d'une série X de n valeurs observées en A, sont fournies par les formules suivantes (les k années d'observation de Y étant incluses dans les n de X) :

$$y_x = \bar{y}_k + a(x - \bar{x}_k) \quad [I-1]$$

Avec y_x : valeurs homogénéisées de la série courte

\bar{x}_k : Moyenne des valeurs pour x sur k valeurs expérimentales

\bar{y}_k : Moyenne des valeurs pour y sur k valeurs expérimentales

a= coefficient de pente de la droite de régression

$$a = \frac{\overline{x_k y_k} - \bar{x}_k \bar{y}_k}{\overline{x_k^2} - \bar{x}_k^2} \quad [I-2]$$

I.5.2 Détermination de la précipitation moyenne du bassin

Il existe plusieurs méthodes de calcul de la précipitation moyenne d'un bassin donné ; les plus

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

couramment utilisés sont principalement : la moyenne arithmétique, la méthode du polygone de Thiessen et la méthode des isohyètes.

I.5.2.1 Moyenne arithmétique

La méthode consiste à calculer la moyenne arithmétique des valeurs obtenues aux stations étudiées et s'applique uniquement si les stations sont bien réparties et si le relief du bassin est homogène.

$$P_m = \frac{\sum_i^n (P_i \times A_i)}{\sum_i^n A_i} \quad [I-3]$$

Avec : P_m = précipitation moyenne du bassin

N = nombre de station

P_i = Précipitation à la station i

I.5.2.2 Méthode de Thiessen

Elle consiste à pondérer les données des stations en tenant compte de la distance qui les sépare. Sur une carte, on relie par des lignes chaque station avec les stations les plus proches. Sur ces lignes, on trace les médiatrices qui forment ainsi un polygone autour de chaque station. La superficie que chaque station est censée représenter, est la superficie du polygone qui l'entoure, et cette superficie est prise comme facteur de pondération des précipitations à la station. La somme des produits de la superficie correspondant à chaque station et des précipitations qui y sont recueillies est divisée par la superficie totale du bassin pour obtenir les précipitations moyennes.

A la périphérie du bassin, où les polygones s'étendent en partie à l'extérieur des limites du bassin, il n'est tenu compte que des parties des polygones qui se trouvent à l'intérieur du bassin versant. Ainsi les stations proches du bassin, mais à l'extérieur de celui-ci, peuvent fort bien avoir des polygones qui empiètent sur le bassin, et il est tenu compte des données qu'elles recueillent.

On a recours à la méthode des polygones de Thiessen dans les cas où les stations pluviométriques ne sont pas uniformément réparties. (OMM-N°168, 2014)

Cette figure I.1 montre le principe de la construction du polygone de Thiessen ; les lignes en pointillés représentent les lignes de construction tandis les traits continus délimitent les superficies allouées à chaque station du bassin.

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."



FIGURE I-1:illustration du polygone de Thiessen

$$P_m = \frac{\sum_i^n (P_i \times A_i)}{\sum_i^n A_i} \quad [I-4]$$

Avec : P_m : précipitation moyenne du bassin (en mm) ;

P_i : Précipitation à la station i (en mm) ;

A_i : Superficie du polygone associée à la station i (en m^2) ;

A : surface totale du bassin ($\sum A_i$).

La figure suivante est le résultat de la subdivision de la zone d'étude en polygone par la méthode de Thiessen qui permet d'affecter une superficie d'influence à chaque station c'est le cas du BV de la rivière NTAHANGWA.

I.5.2.3 Méthode des isohyètes

Les isohyètes sont des courbes qui joignent des points de mêmes précipitations. Grâce aux valeurs pluviométriques acquises aux stations du bassin et aux stations avoisinantes, on peut tracer le réseau d'isohyètes comme montré sur la figure suivante :

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

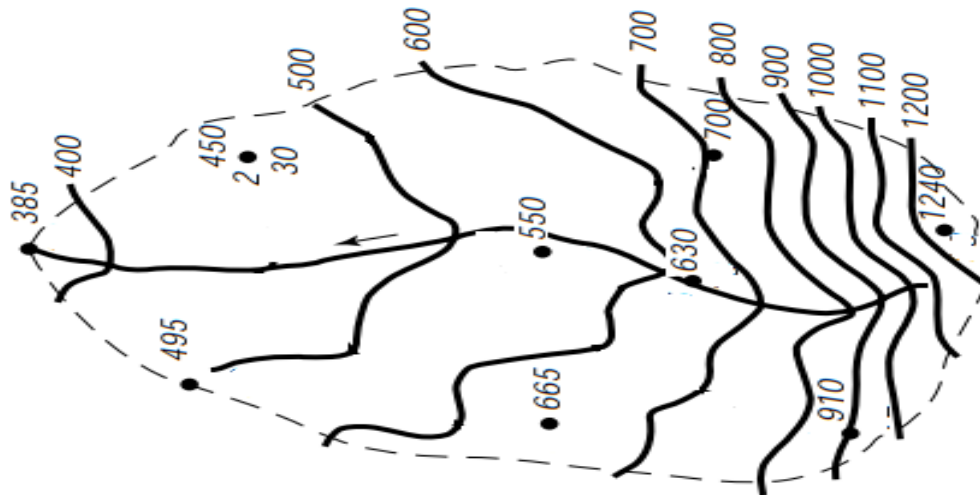


FIGURE I-2: Illustration d'une carte des isohyètes

Lorsque les courbes isohyètes sont tracées, la pluie moyenne peut être calculée de la manière suivante :

$$P_m = \frac{\sum_i^n (P_i \times A_i)}{\sum_i^n A_i} \quad [I-5]$$

$$P_i = \frac{h_i + h_{i+1}}{2}$$

Avec : P_m : Précipitation moyenne du bassin

P_i : La moyenne des isohyètes consécutives i et $i+1$

A_i : Superficie du polygone associée à la station i .

A : Surface totale du bassin ($\sum A_i$).

La méthode des isohyètes ainsi que celle du polygone de Thiessen sont des méthodes de calcul de la moyenne pondérée et donnent des bons résultats par rapport à la méthode arithmétique lorsque les stations ne sont pas régulièrement réparties sur tout le bassin. C'est pour cette raison que la moyenne du bassin versant de la rivière NTAHANGWA qui fait l'objet de notre étude a été calculée avec la méthode du polygone de Thiessen.

I.6. Choix de la méthode de transformation pluie-débit

La mesure directe du débit de la rivière est parfois impossible lors d'événements extraordinaires, cependant celle de la mesure de la hauteur des précipitations est facile à faire. La solution qui s'offre dès lors, est l'estimation du débit en fonction des précipitations mesurées, tout en prenant en compte de l'évapotranspiration. Ainsi, la modélisation de la

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

transformation de la pluie en débit est essentielle pour la prévision des débits qui ruissellent après la précipitation.

Les modèles pluie-débits sont des fonctions permettent de déterminer le débit qui transiterait dans une rivière lors de la précipitation dans le bassin de cette rivière.

I.6.1 Les trois Modèles hydrologiques existants

Le présent travail s'intéresse sur 3 modèles hydrologiques ayant une formulation mathématique différente tant sur la forme et pour le fond. Ces 3 modèles ont comme variables d'entrées (les précipitations moyennes annuelles, et l'évapotranspiration moyenne annuelle). Testés lors de sa thèse (intitulée : **"Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier."**), Safouane Mouelhi a conclu que les modèles hydrologiques calés sur un pas de temps annuel ont été performants en affectant un paramètre d'amélioration à l'évapotranspiration qu'en l'affectant aux précipitations ou en affectant à la fois les paramètres d'amélioration à l'évapotranspiration et aux précipitations.

Les trois modèles hydrologiques existants sont :

- Modèle OL'DEKOP

$$Q = P - E \times \tanh\left(\frac{P}{E}\right) \quad [I-6]$$

- Modèle SCS

$$Q = \frac{\left(P - \frac{E}{6}\right)^2}{\left(P + \frac{2E}{3}\right)} \quad [I-7]$$

- Modèle TIXERONT

$$Q = \sqrt{(P^2 + E^2)} - E \quad [I-8]$$

I.7. Critères de calage d'un modèle

L'objectif principal lors de l'élaboration d'un modèle, est de le rendre plus préformant aussi que faire se peut. On peut apprécier la qualité d'un modèle et ses aptitudes selon des critères

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

définis par le concepteur du modèle. Ainsi, d'après (Najiba CHKIR, 1994), un modèle performant doit remplir ces 4 critères:

- ✓ **La précision** : Il se doit de reconstituer au mieux les débits observés.
- ✓ **La généralité** : Il doit pouvoir simuler aussi bien les crues que les étiages.
- ✓ **L'universalité** : Il doit pouvoir être utilisé pour des bassins versants très différents.
- ✓ **La richesse** : Il doit pouvoir intégrer un grand nombre de caractéristiques permettant de différencier le comportement d'un bassin à un autre.
- ✓ **L'adaptabilité** : Il doit pouvoir être corrigé pour tenir compte de nouvelles données sur le bassin modélisé.

Comme il est en réalité difficile de satisfaire concomitamment les 5 critères suite aux contraintes des données requises, le présent travail s'est contenté à atteindre la précision, la généralité, l'universalité et la richesse.

L'évaluation des performances des modèles hydrologiques et les modèles mixtes configurées a été réalisée se basant des critères de NASH SUTCLIFF (indicateur de performance construit à partir de la normalisation dont les valeurs sont comprises dans l'intervalle de]-∞,1], et permettant d'estimer la capacité d'un modèle à reproduire quantitativement un phénomène ou comportement observé) et la corrélation linéaire(ce qui est un indicateur de performance permettant d'estimer la capacité d'un modèle à reproduire qualitativement un phénomène ou comportement observé).

Les formules mathématiques exprimant les différents critères sont entre autre :

$$NSHE = 1 - \frac{\sum_i^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum_i^n (Q_{obs} - Q_{moy\ obs})^2} \quad [I-9]$$

$$CR = \frac{\left[\frac{\sum_i^n (Q_{obs} - Q_{moy\ obs})(Q_{sim} - Q_{moy\ sim})}{n} \right]}{\sigma(Q_{obs}) * \sigma(Q_{sim})} \quad [I-10]$$

Avec $\sigma(Q_{obs})$ et $\sigma(Q_{sim})$ respectivement l'écart type entre les débits observés et l'écart type entre les débits simulés.

Le choix du modèle le plus performant pour chaque bassin versant devra donc se faire en tenant compte de celui ayant les valeurs de NASH SUTCLIFF ainsi qu'une corrélation élevée. A défaut du double vérification, le critère de NASH SUTCLIFF prime sur la corrélation.

CHAPITRE II: MODELISATION HYDROLOGIQUE ET ANALYSE DES RESULTATS

II.1. Généralités

La modélisation hydrologique consiste à un établissement d'une équation mettant en relations entre elles les différentes composantes de l'équation pour définir un ou plusieurs éléments du bilan hydrologique. Généralement les modèles sont utilisés pour la prévision, la prédétermination (évaluation des données d'un projet), la reconstitution ou l'extrapolation des données. Pour le présent projet, l'élément à définir est le débit d'eau qui ruisselle vers les exutoires des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA. Les données recueillies auprès de l'IGEBU, pour les différentes stations météorologiques et hydrologiques de cette zone d'étude ne sont pas observées pour les mêmes périodes en conséquence ne sont pas de même durée d'observation ; ce qui nécessite une homogénéisation de ces dernières.

II.2. Homogénéisation des données hydrométéorologiques

La modélisation hydrologique n'est possible que lorsque les périodes pour différentes données d'entrée des modèles sont égales aux données de sorties ; d'où on a procédé à une homogénéisation pour avoir des données réparties sur des périodes communes.

Les données brutes recueillies auprès de L'Institut Géographique du Burundi(IGEBU) nécessitaient un traitement statistique approprié afin de s'assurer de la qualité et dans la mesure du possible de la quantité de ces dernières.

L'extension des séries observées discontinues a été faite à l'aide de la régression entre la série observée ayant une longue période d'observation continue.

Cependant, les données pluviométriques de certaines stations n'ont pas été homogénéisées, et par conséquent, elles n'ont pas contribué dans la détermination des précipitations moyennes annuelles des BV de peur de propager des erreurs de la modélisation car elles présentaient des discontinuités exagérées ainsi qu'une qualité douteuse.

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

Tableau II-1 : Périodes observées et celles non observées des stations météorologiques correspondantes à chaque bassin versant :

| Bassin Versant | Stations existantes | Période observée | Période d'interruption |
|-----------------------|----------------------------|------------------------------------|-------------------------------|
| NTAHANGWA | BUJA- AERO | 1991-2020 | - |
| | KIROMBWE | 1991-1994/ 1998-2008 /2012-2020 | 8ans |
| | BUHONGA | 1991-1999/2002-2020 | 3ans |
| | MONT-MANGA | 1991-1998/2003-2020 | 5ans |
| RUVYIRONZA | MUGERA | 1996-1998 | 27ans |
| | GIHETA | 1991-1996/2000-2020 | 4ans |
| | GITEGA | 1992-1998/2000-2010 /2013-2020 | 6ans |
| | MURIZA | - | 30ans |
| | MUSONGATI | 1991-2000/2005-2018 | 7ans |
| | RUVYIRONZA | 1991-1993/1999-2018 | 8ans |
| | MATANA | 1991-1991/2005-2008 | 16ans |
| | GISOZI | 1991-2020 | - |
| | MPOTA-TORA | 1991-1999 | 21ans |

Comme cela se voit dans le tableau de synthèse, il fut une période plus ou moins commune a toutes les stations météorologiques ou elles ont eu une interruption, et cela pouvant avoir été causée par les périodes de crise qu'a connu le Burundi. Certaines stations ont longtemps après pu reprendre les observations, mais les autres ne l'ont pas pu. Afin d'éviter de partir des données erronées, ce qui aurait propagé des erreurs dans les résultats, lors de la détermination des précipitations moyennes pour chaque bassin versant, notre étude n'a pas pris en compte les stations ayant une période d'interruption allant au-delà de 10ans.

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

II.3. Calcul et détermination des données météorologiques pour chaque BV

Concernant les 3 modèles hydrologiques existants qui devront être améliorés afin de les rendre exploitables ici au Burundi, les variables d'entrée de ces modèles sont les précipitations moyennes annuelles ainsi que l'évapotranspiration moyenne annuelle. L'évaluation de ces variables a été faite par des méthodes ci hautes citées. Toutefois, il n'y a pas que ces formules utilisées, la littérature en détient exhaustivement. Certaines d'entre elles nécessitant des données indisponibles localement, nous avons employé celles nécessitant des données disponibles localement.

II.3.1 Calcul de l'évapotranspiration potentielle

Le calcul de l'évapotranspiration potentielle a été réalisé à l'aide de la formule de **Thornthwaite**, le choix de cette dernière parmi tant d'autres formules existantes est qu'elle nécessite les données d'entrées pouvant être obtenues localement alors que les autres formules nécessitent des données non disponibles localement.

$$ETP = 16 \left(\frac{10t}{I} \right)^a \cdot K \quad [II-1]$$

Où :

$$I = \sum_1^n i$$

$$i = \left(\frac{T}{5} \right)^{1.514}$$

$$a = \frac{1.6}{100} I - 0.5$$

$$K = 0.49 + 1.8 \left(\frac{I}{100} \right) - 0.77 \left(\frac{I}{100} \right)^2 + 0.67 \left(\frac{I}{100} \right)^3$$

T=Température moyenne mensuelle du mois considéré en (°C)

ETP= Evapotranspiration potentielle du mois considéré en (mm)

K= coefficient d'ajustement mensuelle

I= indice thermique annuel

n = 12 : nombre de mois d'une année

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

II.3.1.1 Cas du bassin versant de la rivière NTAHANGWA

Tableau II-2 : Synthèse de l'évapotranspiration potentielle moyenne annuelle du BV NTAHANGWA (de 1991 à 2020).

| Ann-ées | Mois | T° (en°C) | i | I | K | a | ETP mens (en mm) | ETP ann (en mm) |
|---------|------|-----------|------|--------|------|------|------------------|-----------------|
| 1991 | 1 | 20,75 | 8,62 | 104,53 | 2,30 | 1,17 | 82,06 | 992,25 |
| 1991 | 2 | 21,09 | 8,84 | | 2,30 | 1,17 | 83,63 | |
| 1991 | 3 | 21,15 | 8,88 | | 2,30 | 1,17 | 83,92 | |
| 1991 | 4 | 21,63 | 9,18 | | 2,30 | 1,17 | 86,15 | |
| 1991 | 5 | 21,30 | 8,97 | | 2,30 | 1,17 | 84,61 | |
| 1991 | 6 | 20,43 | 8,42 | | 2,30 | 1,17 | 80,58 | |
| 1991 | 7 | 19,70 | 7,97 | | 2,30 | 1,17 | 77,20 | |
| 1991 | 8 | 20,73 | 8,61 | | 2,30 | 1,17 | 81,95 | |
| 1991 | 9 | 20,60 | 8,53 | | 2,30 | 1,17 | 81,38 | |
| 1991 | 10 | 21,41 | 9,04 | | 2,30 | 1,17 | 85,13 | |
| 1991 | 11 | 21,14 | 8,87 | | 2,30 | 1,17 | 83,88 | |
| 1991 | 12 | 20,69 | 8,58 | | 2,30 | 1,17 | 81,77 | |
| 1992 | 1 | 20,95 | 8,75 | 104,64 | 2,30 | 1,17 | 83,08 | 994,03 |
| 1992 | 2 | 21,07 | 8,82 | | 2,30 | 1,17 | 83,62 | |
| 1992 | 3 | 21,28 | 8,96 | | 2,30 | 1,17 | 84,60 | |
| 1992 | 4 | 21,30 | 8,97 | | 2,30 | 1,17 | 84,70 | |
| 1992 | 5 | 20,98 | 8,77 | | 2,30 | 1,17 | 83,23 | |
| 1992 | 6 | 20,20 | 8,28 | | 2,30 | 1,17 | 79,61 | |
| 1992 | 7 | 19,38 | 7,78 | | 2,30 | 1,17 | 75,82 | |
| 1992 | 8 | 20,38 | 8,39 | | 2,30 | 1,17 | 80,42 | |
| 1992 | 9 | 22,14 | 9,51 | | 2,30 | 1,17 | 88,62 | |
| 1992 | 10 | 21,08 | 8,83 | | 2,30 | 1,17 | 83,66 | |
| 1992 | 11 | 20,56 | 8,51 | | 2,30 | 1,17 | 81,28 | |
| 1992 | 12 | 21,44 | 9,06 | | 2,30 | 1,17 | 85,38 | |
| 1993 | 1 | 21,55 | 9,13 | 107,08 | 2,36 | 1,21 | 88,11 | 1037,83 |
| 1993 | 2 | 22,03 | 9,44 | | 2,36 | 1,21 | 90,50 | |

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

| | | | | | | | | |
|------|----|-------|------|--------|------|------|-------|--------|
| 1993 | 3 | 21,74 | 9,25 | | 2,36 | 1,21 | 89,03 | |
| 1993 | 4 | 21,58 | 9,15 | | 2,36 | 1,21 | 88,25 | |
| 1993 | 5 | 21,72 | 9,24 | | 2,36 | 1,21 | 88,96 | |
| 1993 | 6 | 20,90 | 8,72 | | 2,36 | 1,21 | 84,92 | |
| 1993 | 7 | 20,50 | 8,47 | | 2,36 | 1,21 | 82,95 | |
| 1993 | 8 | 20,82 | 8,67 | | 2,36 | 1,21 | 84,50 | |
| 1993 | 9 | 21,26 | 8,95 | | 2,36 | 1,21 | 86,69 | |
| 1993 | 10 | 21,16 | 8,88 | | 2,36 | 1,21 | 86,16 | |
| 1993 | 11 | 20,73 | 8,61 | | 2,36 | 1,21 | 84,06 | |
| 1993 | 12 | 20,65 | 8,56 | | 2,36 | 1,21 | 83,68 | |
| 1994 | 1 | 20,49 | 8,46 | 103,16 | 2,26 | 1,15 | 79,74 | 968,34 |
| 1994 | 2 | 20,71 | 8,60 | | 2,26 | 1,15 | 80,71 | |
| 1994 | 3 | 20,71 | 8,60 | | 2,26 | 1,15 | 80,72 | |
| 1994 | 4 | 21,22 | 8,92 | | 2,26 | 1,15 | 83,00 | |
| 1994 | 5 | 20,62 | 8,54 | | 2,26 | 1,15 | 80,31 | |
| 1994 | 6 | 19,79 | 8,03 | | 2,26 | 1,15 | 76,63 | |
| 1994 | 7 | 19,77 | 8,01 | | 2,26 | 1,15 | 76,52 | |
| 1994 | 8 | 20,37 | 8,38 | | 2,26 | 1,15 | 79,19 | |
| 1994 | 9 | 21,72 | 9,24 | | 2,26 | 1,15 | 85,28 | |
| 1994 | 10 | 21,90 | 9,36 | | 2,26 | 1,15 | 86,07 | |
| 1994 | 11 | 20,47 | 8,45 | | 2,26 | 1,15 | 79,65 | |
| 1994 | 12 | 20,66 | 8,57 | | 2,26 | 1,15 | 80,52 | |
| 1995 | 1 | 21,15 | 8,88 | 104,77 | 2,30 | 1,18 | 84,11 | 996,33 |
| 1995 | 2 | 20,73 | 8,61 | | 2,30 | 1,18 | 82,15 | |
| 1995 | 3 | 21,25 | 8,94 | | 2,30 | 1,18 | 84,60 | |
| 1995 | 4 | 21,09 | 8,84 | | 2,30 | 1,18 | 83,84 | |
| 1995 | 5 | 21,19 | 8,90 | | 2,30 | 1,18 | 84,33 | |
| 1995 | 6 | 20,15 | 8,25 | | 2,30 | 1,18 | 79,48 | |
| 1995 | 7 | 19,22 | 7,68 | | 2,30 | 1,18 | 75,16 | |
| 1995 | 8 | 20,21 | 8,29 | | 2,30 | 1,18 | 79,77 | |
| 1995 | 9 | 21,44 | 9,06 | | 2,30 | 1,18 | 85,49 | |
| 1995 | 10 | 22,43 | 9,70 | | 2,30 | 1,18 | 90,13 | |

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

| | | | | | | | | |
|------|----|-------|------|--------|------|------|-------|---------|
| 1995 | 11 | 21,23 | 8,92 | | 2,30 | 1,18 | 84,48 | |
| 1995 | 12 | 20,86 | 8,70 | | 2,30 | 1,18 | 82,79 | |
| 1996 | 1 | 20,88 | 8,71 | 102,48 | 2,25 | 1,14 | 80,93 | 877,03 |
| 1996 | 2 | 20,99 | 8,77 | | 2,25 | 1,14 | 81,39 | |
| 1996 | 3 | 20,54 | 8,49 | | 2,25 | 1,14 | 79,43 | |
| 1996 | 4 | 21,22 | 8,92 | | 2,25 | 1,14 | 82,41 | |
| 1996 | 5 | 21,19 | 8,91 | | 2,25 | 1,14 | 82,30 | |
| 1996 | 6 | 19,79 | 8,03 | | 2,25 | 1,14 | 76,12 | |
| 1996 | 7 | 18,94 | 7,51 | | 2,25 | 1,14 | 72,38 | |
| 1996 | 8 | 20,17 | 8,26 | | 2,25 | 1,14 | 77,77 | |
| 1996 | 9 | 21,27 | 8,95 | | 2,25 | 1,14 | 82,61 | |
| 1996 | 10 | 21,57 | 9,15 | | 2,25 | 1,14 | 83,98 | |
| 1996 | 12 | 20,15 | 8,25 | | 2,25 | 1,14 | 77,70 | |
| 1997 | 1 | 20,60 | 8,53 | 106,88 | 2,35 | 1,21 | 83,28 | 946,91 |
| 1997 | 2 | 20,77 | 8,64 | | 2,35 | 1,21 | 84,11 | |
| 1997 | 3 | 21,29 | 8,97 | | 2,35 | 1,21 | 86,66 | |
| 1997 | 4 | 21,69 | 9,22 | | 2,35 | 1,21 | 88,61 | |
| 1997 | 5 | 21,76 | 9,27 | | 2,35 | 1,21 | 88,96 | |
| 1997 | 6 | 21,38 | 9,02 | | 2,35 | 1,21 | 87,09 | |
| 1997 | 7 | 20,83 | 8,67 | | 2,35 | 1,21 | 84,37 | |
| 1997 | 8 | 20,19 | 8,28 | | 2,35 | 1,21 | 81,28 | |
| 1997 | 9 | 20,91 | 8,72 | | 2,35 | 1,21 | 84,77 | |
| 1997 | 11 | 21,81 | 9,30 | | 2,35 | 1,21 | 89,20 | |
| 1997 | 12 | 21,68 | 9,22 | | 2,35 | 1,21 | 88,59 | |
| 1998 | 1 | 21,41 | 9,04 | 107,67 | 2,37 | 1,22 | 87,92 | 1048,59 |
| 1998 | 2 | 21,85 | 9,33 | | 2,37 | 1,22 | 90,16 | |
| 1998 | 3 | 21,11 | 8,85 | | 2,37 | 1,22 | 86,44 | |
| 1998 | 4 | 21,74 | 9,26 | | 2,37 | 1,22 | 89,62 | |
| 1998 | 5 | 21,57 | 9,15 | | 2,37 | 1,22 | 88,76 | |
| 1998 | 6 | 21,65 | 9,20 | | 2,37 | 1,22 | 89,17 | |
| 1998 | 7 | 21,58 | 9,15 | | 2,37 | 1,22 | 88,79 | |
| 1998 | 8 | 20,95 | 8,75 | | 2,37 | 1,22 | 85,65 | |

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

| | | | | | | | | |
|------|----|-------|------|--------|------|------|-------|---------|
| 1998 | 9 | 20,35 | 8,37 | | 2,37 | 1,22 | 82,64 | |
| 1998 | 10 | 20,91 | 8,72 | | 2,37 | 1,22 | 85,43 | |
| 1998 | 11 | 21,26 | 8,95 | | 2,37 | 1,22 | 87,20 | |
| 1998 | 12 | 21,19 | 8,90 | | 2,37 | 1,22 | 86,82 | |
| 1999 | 1 | 20,82 | 8,67 | 102,06 | 2,24 | 1,13 | 80,26 | 949,64 |
| 1999 | 2 | 20,20 | 8,28 | | 2,24 | 1,13 | 77,56 | |
| 1999 | 3 | 20,59 | 8,52 | | 2,24 | 1,13 | 79,26 | |
| 1999 | 4 | 20,48 | 8,46 | | 2,24 | 1,13 | 78,82 | |
| 1999 | 5 | 20,88 | 8,71 | | 2,24 | 1,13 | 80,55 | |
| 1999 | 6 | 21,04 | 8,81 | | 2,24 | 1,13 | 81,24 | |
| 1999 | 7 | 20,62 | 8,54 | | 2,24 | 1,13 | 79,41 | |
| 1999 | 8 | 19,83 | 8,05 | | 2,24 | 1,13 | 75,96 | |
| 1999 | 9 | 19,52 | 7,86 | | 2,24 | 1,13 | 74,64 | |
| 1999 | 10 | 20,42 | 8,41 | | 2,24 | 1,13 | 78,52 | |
| 1999 | 11 | 21,42 | 9,05 | | 2,24 | 1,13 | 82,92 | |
| 1999 | 12 | 20,87 | 8,70 | | 2,24 | 1,13 | 80,50 | |
| 2000 | 1 | 21,17 | 8,89 | 105,88 | 2,33 | 1,19 | 85,20 | 1016,11 |
| 2000 | 2 | 20,74 | 8,61 | | 2,33 | 1,19 | 83,11 | |
| 2000 | 3 | 21,03 | 8,80 | | 2,33 | 1,19 | 84,52 | |
| 2000 | 4 | 21,43 | 9,05 | | 2,33 | 1,19 | 86,43 | |
| 2000 | 5 | 21,27 | 8,95 | | 2,33 | 1,19 | 85,66 | |
| 2000 | 6 | 22,22 | 9,57 | | 2,33 | 1,19 | 90,27 | |
| 2000 | 7 | 21,17 | 8,89 | | 2,33 | 1,19 | 85,20 | |
| 2000 | 8 | 20,50 | 8,47 | | 2,33 | 1,19 | 82,00 | |
| 2000 | 9 | 19,64 | 7,93 | | 2,33 | 1,19 | 77,87 | |
| 2000 | 10 | 20,82 | 8,67 | | 2,33 | 1,19 | 83,52 | |
| 2000 | 11 | 21,28 | 8,96 | | 2,33 | 1,19 | 85,70 | |
| 2000 | 12 | 21,47 | 9,08 | | 2,33 | 1,19 | 86,65 | |
| 2001 | 1 | 21,30 | 8,97 | 105,65 | 2,32 | 1,19 | 85,59 | 1011,99 |
| 2001 | 2 | 20,84 | 8,68 | | 2,32 | 1,19 | 83,40 | |
| 2001 | 3 | 21,58 | 9,15 | | 2,32 | 1,19 | 86,96 | |
| 2001 | 4 | 21,89 | 9,35 | | 2,32 | 1,19 | 88,43 | |

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

| | | | | | | | | |
|------|----|-------|------|--------|------|------|-------|---------|
| 2001 | 5 | 21,41 | 9,04 | | 2,32 | 1,19 | 86,14 | |
| 2001 | 6 | 21,25 | 8,94 | | 2,32 | 1,19 | 85,35 | |
| 2001 | 7 | 21,37 | 9,02 | | 2,32 | 1,19 | 85,97 | |
| 2001 | 8 | 21,09 | 8,84 | | 2,32 | 1,19 | 84,59 | |
| 2001 | 9 | 19,56 | 7,89 | | 2,32 | 1,19 | 77,36 | |
| 2001 | 10 | 20,44 | 8,43 | | 2,32 | 1,19 | 81,49 | |
| 2001 | 11 | 21,33 | 8,99 | | 2,32 | 1,19 | 85,73 | |
| 2001 | 12 | 20,32 | 8,36 | | 2,32 | 1,19 | 80,96 | |
| 2002 | 1 | 20,34 | 8,37 | 104,17 | 2,29 | 1,17 | 79,88 | 985,83 |
| 2002 | 2 | 20,57 | 8,51 | | 2,29 | 1,17 | 80,92 | |
| 2002 | 3 | 19,69 | 7,97 | | 2,29 | 1,17 | 76,91 | |
| 2002 | 4 | 21,19 | 8,90 | | 2,29 | 1,17 | 83,77 | |
| 2002 | 5 | 21,31 | 8,98 | | 2,29 | 1,17 | 84,33 | |
| 2002 | 6 | 21,54 | 9,13 | | 2,29 | 1,17 | 85,40 | |
| 2002 | 7 | 21,12 | 8,86 | | 2,29 | 1,17 | 83,46 | |
| 2002 | 8 | 21,02 | 8,79 | | 2,29 | 1,17 | 82,98 | |
| 2002 | 9 | 19,49 | 7,85 | | 2,29 | 1,17 | 76,01 | |
| 2002 | 10 | 19,99 | 8,15 | | 2,29 | 1,17 | 78,26 | |
| 2002 | 11 | 21,94 | 9,39 | | 2,29 | 1,17 | 87,27 | |
| 2002 | 12 | 21,80 | 9,30 | | 2,29 | 1,17 | 86,63 | |
| 2003 | 1 | 21,07 | 8,83 | 106,46 | 2,34 | 1,20 | 85,20 | 1026,42 |
| 2003 | 2 | 21,01 | 8,79 | | 2,34 | 1,20 | 84,92 | |
| 2003 | 3 | 21,54 | 9,13 | | 2,34 | 1,20 | 87,50 | |
| 2003 | 4 | 21,43 | 9,06 | | 2,34 | 1,20 | 86,96 | |
| 2003 | 5 | 20,80 | 8,66 | | 2,34 | 1,20 | 83,91 | |
| 2003 | 6 | 21,16 | 8,89 | | 2,34 | 1,20 | 85,66 | |
| 2003 | 7 | 21,42 | 9,05 | | 2,34 | 1,20 | 86,89 | |
| 2003 | 8 | 20,84 | 8,68 | | 2,34 | 1,20 | 84,09 | |
| 2003 | 9 | 19,65 | 7,94 | | 2,34 | 1,20 | 78,36 | |
| 2003 | 10 | 20,96 | 8,76 | | 2,34 | 1,20 | 84,69 | |
| 2003 | 11 | 21,68 | 9,21 | | 2,34 | 1,20 | 88,16 | |
| 2003 | 12 | 22,07 | 9,47 | | 2,34 | 1,20 | 90,07 | |

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

| | | | | | | | | |
|------|----|-------|-------|--------|------|------|-------|---------|
| 2004 | 1 | 21,55 | 9,13 | 108,40 | 2,39 | 1,23 | 89,28 | 1061,96 |
| 2004 | 2 | 21,22 | 8,92 | | 2,39 | 1,23 | 87,64 | |
| 2004 | 3 | 21,06 | 8,82 | | 2,39 | 1,23 | 86,80 | |
| 2004 | 4 | 21,54 | 9,13 | | 2,39 | 1,23 | 89,27 | |
| 2004 | 5 | 21,68 | 9,22 | | 2,39 | 1,23 | 89,98 | |
| 2004 | 6 | 21,74 | 9,26 | | 2,39 | 1,23 | 90,28 | |
| 2004 | 7 | 21,20 | 8,91 | | 2,39 | 1,23 | 87,51 | |
| 2004 | 8 | 20,23 | 8,30 | | 2,39 | 1,23 | 82,60 | |
| 2004 | 9 | 20,81 | 8,66 | | 2,39 | 1,23 | 85,54 | |
| 2004 | 10 | 22,89 | 10,01 | | 2,39 | 1,23 | 96,21 | |
| 2004 | 11 | 21,32 | 8,99 | | 2,39 | 1,23 | 88,13 | |
| 2004 | 12 | 21,44 | 9,06 | | 2,39 | 1,23 | 88,72 | |
| 2005 | 1 | 21,52 | 9,11 | 101,26 | 2,22 | 1,12 | 82,58 | 935,10 |
| 2005 | 2 | 22,04 | 9,45 | | 2,22 | 1,12 | 84,86 | |
| 2005 | 3 | 22,29 | 9,61 | | 2,22 | 1,12 | 85,94 | |
| 2005 | 4 | 21,26 | 8,95 | | 2,22 | 1,12 | 81,50 | |
| 2005 | 5 | 22,14 | 9,51 | | 2,22 | 1,12 | 85,26 | |
| 2005 | 6 | 20,54 | 8,49 | | 2,22 | 1,12 | 78,40 | |
| 2005 | 7 | 19,48 | 7,84 | | 2,22 | 1,12 | 73,89 | |
| 2005 | 8 | 18,06 | 6,99 | | 2,22 | 1,12 | 67,86 | |
| 2005 | 9 | 17,44 | 6,63 | | 2,22 | 1,12 | 65,29 | |
| 2005 | 10 | 18,45 | 7,22 | | 2,22 | 1,12 | 69,52 | |
| 2005 | 11 | 20,20 | 8,28 | | 2,22 | 1,12 | 76,96 | |
| 2005 | 12 | 21,62 | 9,18 | | 2,22 | 1,12 | 83,03 | |
| 2006 | 1 | 22,29 | 9,61 | 110,92 | 2,45 | 1,27 | 95,55 | 1108,97 |
| 2006 | 2 | 22,10 | 9,49 | | 2,45 | 1,27 | 94,53 | |
| 2006 | 3 | 20,66 | 8,57 | | 2,45 | 1,27 | 86,76 | |
| 2006 | 4 | 20,61 | 8,54 | | 2,45 | 1,27 | 86,47 | |
| 2006 | 5 | 20,62 | 8,54 | | 2,45 | 1,27 | 86,51 | |
| 2006 | 6 | 21,68 | 9,21 | | 2,45 | 1,27 | 92,23 | |
| 2006 | 7 | 21,51 | 9,11 | | 2,45 | 1,27 | 91,35 | |
| 2006 | 8 | 19,89 | 8,09 | | 2,45 | 1,27 | 82,63 | |

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

| | | | | | | | | |
|------|----|-------|-------|--------|------|------|--------|---------|
| 2006 | 9 | 21,39 | 9,03 | | 2,45 | 1,27 | 90,66 | |
| 2006 | 10 | 22,21 | 9,56 | | 2,45 | 1,27 | 95,14 | |
| 2006 | 11 | 21,63 | 9,18 | | 2,45 | 1,27 | 91,97 | |
| 2006 | 12 | 25,81 | 12,00 | | 2,45 | 1,27 | 115,18 | |
| 2007 | 1 | 21,40 | 9,04 | 107,74 | 2,37 | 1,22 | 87,95 | 1049,10 |
| 2007 | 2 | 21,03 | 8,80 | | 2,37 | 1,22 | 86,09 | |
| 2007 | 3 | 20,47 | 8,45 | | 2,37 | 1,22 | 83,27 | |
| 2007 | 4 | 21,17 | 8,89 | | 2,37 | 1,22 | 86,77 | |
| 2007 | 5 | 22,57 | 9,80 | | 2,37 | 1,22 | 93,89 | |
| 2007 | 6 | 22,20 | 9,55 | | 2,37 | 1,22 | 91,99 | |
| 2007 | 7 | 17,56 | 6,70 | | 2,37 | 1,22 | 69,04 | |
| 2007 | 8 | 20,29 | 8,34 | | 2,37 | 1,22 | 82,40 | |
| 2007 | 9 | 21,59 | 9,16 | | 2,37 | 1,22 | 88,93 | |
| 2007 | 10 | 22,11 | 9,49 | | 2,37 | 1,22 | 91,52 | |
| 2007 | 11 | 22,31 | 9,63 | | 2,37 | 1,22 | 92,56 | |
| 2007 | 12 | 22,73 | 9,90 | | 2,37 | 1,22 | 94,69 | |
| 2008 | 1 | 22,43 | 9,70 | 108,24 | 2,39 | 1,23 | 93,65 | 1058,66 |
| 2008 | 2 | 20,74 | 8,62 | | 2,39 | 1,23 | 85,05 | |
| 2008 | 3 | 21,95 | 9,39 | | 2,39 | 1,23 | 91,22 | |
| 2008 | 4 | 22,21 | 9,56 | | 2,39 | 1,23 | 92,54 | |
| 2008 | 5 | 22,30 | 9,62 | | 2,39 | 1,23 | 93,01 | |
| 2008 | 6 | 22,81 | 9,95 | | 2,39 | 1,23 | 95,61 | |
| 2008 | 7 | 22,30 | 9,62 | | 2,39 | 1,23 | 93,00 | |
| 2008 | 8 | 20,69 | 8,59 | | 2,39 | 1,23 | 84,80 | |
| 2008 | 9 | 19,92 | 8,10 | | 2,39 | 1,23 | 80,90 | |
| 2008 | 10 | 19,58 | 7,90 | | 2,39 | 1,23 | 79,23 | |
| 2008 | 11 | 19,71 | 7,98 | | 2,39 | 1,23 | 79,89 | |
| 2008 | 12 | 21,67 | 9,21 | | 2,39 | 1,23 | 89,76 | |
| 2009 | 1 | 21,61 | 9,17 | 107,06 | 2,36 | 1,21 | 88,41 | 1037,37 |
| 2009 | 2 | 21,43 | 9,06 | | 2,36 | 1,21 | 87,50 | |
| 2009 | 3 | 21,37 | 9,02 | | 2,36 | 1,21 | 87,21 | |
| 2009 | 4 | 22,12 | 9,50 | | 2,36 | 1,21 | 90,92 | |

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

| | | | | | | | | |
|------|----|-------|------|--------|------|------|-------|---------|
| 2009 | 5 | 21,15 | 8,88 | | 2,36 | 1,21 | 86,09 | |
| 2009 | 6 | 21,17 | 8,89 | | 2,36 | 1,21 | 86,19 | |
| 2009 | 7 | 21,51 | 9,11 | | 2,36 | 1,21 | 87,89 | |
| 2009 | 8 | 20,60 | 8,53 | | 2,36 | 1,21 | 83,38 | |
| 2009 | 9 | 20,07 | 8,20 | | 2,36 | 1,21 | 80,80 | |
| 2009 | 10 | 20,92 | 8,73 | | 2,36 | 1,21 | 84,99 | |
| 2009 | 11 | 21,29 | 8,97 | | 2,36 | 1,21 | 86,82 | |
| 2009 | 12 | 21,37 | 9,01 | | 2,36 | 1,21 | 87,18 | |
| 2010 | 1 | 20,71 | 8,60 | 106,72 | 2,35 | 1,21 | 83,64 | 1031,11 |
| 2010 | 2 | 21,30 | 8,97 | | 2,35 | 1,21 | 86,54 | |
| 2010 | 3 | 21,33 | 8,99 | | 2,35 | 1,21 | 86,72 | |
| 2010 | 4 | 21,16 | 8,88 | | 2,35 | 1,21 | 85,87 | |
| 2010 | 5 | 20,65 | 8,56 | | 2,35 | 1,21 | 83,40 | |
| 2010 | 6 | 21,40 | 9,04 | | 2,35 | 1,21 | 87,05 | |
| 2010 | 7 | 21,46 | 9,07 | | 2,35 | 1,21 | 87,34 | |
| 2010 | 8 | 19,84 | 8,06 | | 2,35 | 1,21 | 79,42 | |
| 2010 | 9 | 20,48 | 8,45 | | 2,35 | 1,21 | 82,53 | |
| 2010 | 10 | 21,35 | 9,00 | | 2,35 | 1,21 | 86,78 | |
| 2010 | 11 | 22,49 | 9,74 | | 2,35 | 1,21 | 92,43 | |
| 2010 | 12 | 21,87 | 9,34 | | 2,35 | 1,21 | 89,38 | |
| 2011 | 1 | 21,07 | 8,83 | 106,34 | 2,34 | 1,20 | 85,11 | 1024,27 |
| 2011 | 2 | 21,55 | 9,13 | | 2,34 | 1,20 | 87,44 | |
| 2011 | 3 | 20,80 | 8,66 | | 2,34 | 1,20 | 83,79 | |
| 2011 | 4 | 20,98 | 8,77 | | 2,34 | 1,20 | 84,67 | |
| 2011 | 5 | 21,49 | 9,10 | | 2,34 | 1,20 | 87,15 | |
| 2011 | 6 | 21,84 | 9,32 | | 2,34 | 1,20 | 88,84 | |
| 2011 | 7 | 21,36 | 9,01 | | 2,34 | 1,20 | 86,49 | |
| 2011 | 8 | 19,51 | 7,86 | | 2,34 | 1,20 | 77,61 | |
| 2011 | 9 | 20,54 | 8,49 | | 2,34 | 1,20 | 82,53 | |
| 2011 | 10 | 21,50 | 9,10 | | 2,34 | 1,20 | 87,21 | |
| 2011 | 11 | 21,52 | 9,11 | | 2,34 | 1,20 | 87,27 | |
| 2011 | 12 | 21,29 | 8,96 | | 2,34 | 1,20 | 86,15 | |

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

| | | | | | | | | |
|------|----|-------|------|--------|------|------|-------|---------|
| 2012 | 1 | 21,79 | 9,29 | 109,00 | 2,40 | 1,24 | 91,08 | 1073,17 |
| 2012 | 2 | 21,36 | 9,01 | | 2,40 | 1,24 | 88,87 | |
| 2012 | 3 | 21,23 | 8,93 | | 2,40 | 1,24 | 88,20 | |
| 2012 | 4 | 22,14 | 9,51 | | 2,40 | 1,24 | 92,90 | |
| 2012 | 5 | 21,68 | 9,21 | | 2,40 | 1,24 | 90,50 | |
| 2012 | 6 | 21,52 | 9,11 | | 2,40 | 1,24 | 89,68 | |
| 2012 | 7 | 21,81 | 9,30 | | 2,40 | 1,24 | 91,18 | |
| 2012 | 8 | 20,70 | 8,59 | | 2,40 | 1,24 | 85,42 | |
| 2012 | 9 | 20,72 | 8,61 | | 2,40 | 1,24 | 85,57 | |
| 2012 | 10 | 21,18 | 8,89 | | 2,40 | 1,24 | 87,91 | |
| 2012 | 11 | 21,90 | 9,36 | | 2,40 | 1,24 | 91,64 | |
| 2012 | 12 | 21,63 | 9,18 | | 2,40 | 1,24 | 90,24 | |
| 2013 | 1 | 21,63 | 9,19 | 110,48 | 2,44 | 1,27 | 91,59 | 1101,12 |
| 2013 | 2 | 21,64 | 9,19 | | 2,44 | 1,27 | 91,62 | |
| 2013 | 3 | 21,64 | 9,19 | | 2,44 | 1,27 | 91,65 | |
| 2013 | 4 | 21,65 | 9,20 | | 2,44 | 1,27 | 91,68 | |
| 2013 | 5 | 21,66 | 9,20 | | 2,44 | 1,27 | 91,71 | |
| 2013 | 6 | 21,66 | 9,20 | | 2,44 | 1,27 | 91,74 | |
| 2013 | 7 | 21,67 | 9,21 | | 2,44 | 1,27 | 91,77 | |
| 2013 | 8 | 21,67 | 9,21 | | 2,44 | 1,27 | 91,81 | |
| 2013 | 9 | 21,68 | 9,22 | | 2,44 | 1,27 | 91,84 | |
| 2013 | 10 | 21,68 | 9,22 | | 2,44 | 1,27 | 91,87 | |
| 2013 | 11 | 21,69 | 9,22 | | 2,44 | 1,27 | 91,90 | |
| 2013 | 12 | 21,70 | 9,23 | | 2,44 | 1,27 | 91,93 | |
| 2014 | 1 | 22,14 | 9,51 | 109,34 | 2,41 | 1,25 | 93,22 | 1079,53 |
| 2014 | 2 | 21,68 | 9,21 | | 2,41 | 1,25 | 90,80 | |
| 2014 | 3 | 21,52 | 9,11 | | 2,41 | 1,25 | 89,98 | |
| 2014 | 4 | 21,81 | 9,30 | | 2,41 | 1,25 | 91,49 | |
| 2014 | 5 | 20,69 | 8,59 | | 2,41 | 1,25 | 85,69 | |
| 2014 | 6 | 20,72 | 8,61 | | 2,41 | 1,25 | 85,84 | |
| 2014 | 7 | 21,18 | 8,89 | | 2,41 | 1,25 | 88,19 | |
| 2014 | 8 | 21,90 | 9,36 | | 2,41 | 1,25 | 91,95 | |

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

| | | | | | | | | |
|------|----|-------|------|--------|------|------|-------|---------|
| 2014 | 9 | 21,63 | 9,18 | | 2,41 | 1,25 | 90,54 | |
| 2014 | 10 | 21,63 | 9,19 | | 2,41 | 1,25 | 90,57 | |
| 2014 | 11 | 21,64 | 9,19 | | 2,41 | 1,25 | 90,60 | |
| 2014 | 12 | 21,64 | 9,19 | | 2,41 | 1,25 | 90,63 | |
| 2015 | 1 | 21,65 | 9,20 | 110,75 | 2,45 | 1,27 | 91,93 | 1106,29 |
| 2015 | 2 | 21,66 | 9,20 | | 2,45 | 1,27 | 91,96 | |
| 2015 | 3 | 21,66 | 9,20 | | 2,45 | 1,27 | 91,99 | |
| 2015 | 4 | 21,67 | 9,21 | | 2,45 | 1,27 | 92,02 | |
| 2015 | 5 | 21,67 | 9,21 | | 2,45 | 1,27 | 92,05 | |
| 2015 | 6 | 21,68 | 9,22 | | 2,45 | 1,27 | 92,08 | |
| 2015 | 7 | 21,68 | 9,22 | | 2,45 | 1,27 | 92,11 | |
| 2015 | 8 | 21,69 | 9,22 | | 2,45 | 1,27 | 92,14 | |
| 2015 | 9 | 21,70 | 9,23 | | 2,45 | 1,27 | 92,17 | |
| 2015 | 10 | 22,14 | 9,51 | | 2,45 | 1,27 | 94,57 | |
| 2015 | 11 | 21,68 | 9,21 | | 2,45 | 1,27 | 92,07 | |
| 2015 | 12 | 21,52 | 9,11 | | 2,45 | 1,27 | 91,22 | |
| 2016 | 1 | 21,81 | 9,30 | 109,10 | 2,41 | 1,25 | 91,27 | 1075,08 |
| 2016 | 2 | 20,69 | 8,59 | | 2,41 | 1,25 | 85,50 | |
| 2016 | 3 | 20,72 | 8,61 | | 2,41 | 1,25 | 85,65 | |
| 2016 | 4 | 21,18 | 8,89 | | 2,41 | 1,25 | 87,99 | |
| 2016 | 5 | 21,90 | 9,36 | | 2,41 | 1,25 | 91,73 | |
| 2016 | 6 | 21,63 | 9,18 | | 2,41 | 1,25 | 90,33 | |
| 2016 | 7 | 21,63 | 9,19 | | 2,41 | 1,25 | 90,36 | |
| 2016 | 8 | 21,64 | 9,19 | | 2,41 | 1,25 | 90,39 | |
| 2016 | 9 | 21,64 | 9,19 | | 2,41 | 1,25 | 90,42 | |
| 2016 | 10 | 21,65 | 9,20 | | 2,41 | 1,25 | 90,45 | |
| 2016 | 11 | 21,66 | 9,20 | | 2,41 | 1,25 | 90,48 | |
| 2016 | 12 | 21,66 | 9,20 | | 2,41 | 1,25 | 90,51 | |
| 2017 | 1 | 21,67 | 9,21 | 109,64 | 2,42 | 1,25 | 91,02 | 1085,21 |
| 2017 | 2 | 21,67 | 9,21 | | 2,42 | 1,25 | 91,05 | |
| 2017 | 3 | 21,68 | 9,22 | | 2,42 | 1,25 | 91,08 | |
| 2017 | 4 | 21,68 | 9,22 | | 2,42 | 1,25 | 91,11 | |

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

| | | | | | | | | |
|------|----|-------|------|--------|------|------|-------|---------|
| 2017 | 5 | 21,69 | 9,22 | | 2,42 | 1,25 | 91,14 | |
| 2017 | 6 | 21,70 | 9,23 | | 2,42 | 1,25 | 91,17 | |
| 2017 | 7 | 22,14 | 9,51 | | 2,42 | 1,25 | 93,51 | |
| 2017 | 8 | 21,68 | 9,21 | | 2,42 | 1,25 | 91,08 | |
| 2017 | 9 | 21,52 | 9,11 | | 2,42 | 1,25 | 90,25 | |
| 2017 | 10 | 21,81 | 9,30 | | 2,42 | 1,25 | 91,76 | |
| 2017 | 11 | 20,69 | 8,59 | | 2,42 | 1,25 | 85,93 | |
| 2017 | 12 | 20,72 | 8,61 | | 2,42 | 1,25 | 86,08 | |
| 2018 | 1 | 21,18 | 8,89 | 110,24 | 2,44 | 1,26 | 88,95 | 1096,62 |
| 2018 | 2 | 21,90 | 9,36 | | 2,44 | 1,26 | 92,79 | |
| 2018 | 3 | 21,63 | 9,18 | | 2,44 | 1,26 | 91,35 | |
| 2018 | 4 | 21,63 | 9,19 | | 2,44 | 1,26 | 91,38 | |
| 2018 | 5 | 21,64 | 9,19 | | 2,44 | 1,26 | 91,41 | |
| 2018 | 6 | 21,64 | 9,19 | | 2,44 | 1,26 | 91,44 | |
| 2018 | 7 | 21,65 | 9,20 | | 2,44 | 1,26 | 91,47 | |
| 2018 | 8 | 21,66 | 9,20 | | 2,44 | 1,26 | 91,50 | |
| 2018 | 9 | 21,66 | 9,20 | | 2,44 | 1,26 | 91,53 | |
| 2018 | 10 | 21,67 | 9,21 | | 2,44 | 1,26 | 91,56 | |
| 2018 | 11 | 21,67 | 9,21 | | 2,44 | 1,26 | 91,59 | |
| 2018 | 12 | 21,68 | 9,22 | | 2,44 | 1,26 | 91,62 | |
| 2019 | 1 | 21,68 | 9,22 | 109,44 | 2,42 | 1,25 | 90,93 | 1081,38 |
| 2019 | 2 | 21,69 | 9,22 | | 2,42 | 1,25 | 90,96 | |
| 2019 | 3 | 21,70 | 9,23 | | 2,42 | 1,25 | 90,99 | |
| 2019 | 4 | 22,14 | 9,51 | | 2,42 | 1,25 | 93,32 | |
| 2019 | 5 | 21,68 | 9,21 | | 2,42 | 1,25 | 90,89 | |
| 2019 | 6 | 21,52 | 9,11 | | 2,42 | 1,25 | 90,07 | |
| 2019 | 7 | 21,81 | 9,30 | | 2,42 | 1,25 | 91,58 | |
| 2019 | 8 | 20,69 | 8,59 | | 2,42 | 1,25 | 85,77 | |
| 2019 | 9 | 20,72 | 8,61 | | 2,42 | 1,25 | 85,92 | |
| 2019 | 10 | 21,18 | 8,89 | | 2,42 | 1,25 | 88,28 | |
| 2019 | 11 | 21,90 | 9,36 | | 2,42 | 1,25 | 92,05 | |
| 2019 | 12 | 21,63 | 9,18 | | 2,42 | 1,25 | 90,63 | |

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

| | | | | | | | | |
|------|----|-------|------|--------|------|------|-------|---------|
| 2020 | 1 | 21,63 | 9,19 | 110,48 | 2,44 | 1,27 | 91,59 | 1101,11 |
| 2020 | 2 | 21,64 | 9,19 | | 2,44 | 1,27 | 91,62 | |
| 2020 | 3 | 21,64 | 9,19 | | 2,44 | 1,27 | 91,65 | |
| 2020 | 4 | 21,65 | 9,20 | | 2,44 | 1,27 | 91,68 | |
| 2020 | 5 | 21,66 | 9,20 | | 2,44 | 1,27 | 91,71 | |
| 2020 | 6 | 21,66 | 9,20 | | 2,44 | 1,27 | 91,74 | |
| 2020 | 7 | 21,67 | 9,21 | | 2,44 | 1,27 | 91,77 | |
| 2020 | 8 | 21,67 | 9,21 | | 2,44 | 1,27 | 91,81 | |
| 2020 | 9 | 21,68 | 9,22 | | 2,44 | 1,27 | 91,84 | |
| 2020 | 10 | 21,68 | 9,22 | | 2,44 | 1,27 | 91,87 | |
| 2020 | 11 | 21,69 | 9,22 | | 2,44 | 1,27 | 91,90 | |
| 2020 | 12 | 21,70 | 9,23 | | 2,44 | 1,27 | 91,93 | |

II.3.1.2 Cas du bassin versant de la rivière RUVYIRONZA

Tableau II-3: Synthèse de l'évapotranspiration moyenne annuelle du BV de la rivière RUVYIRONZA (de 1991 à 2020)

| Années | Mois | T°(en °C) | i | I | K | a | ETP mens(en mm) | ETP ann(en mm) |
|--------|------|-----------|------|-------|------|------|-----------------|----------------|
| 1992 | 1 | 19,31 | 7,73 | 91,80 | 2,01 | 0,97 | 66,15 | 788,13 |
| 1992 | 2 | 19,65 | 7,94 | | 2,01 | 0,97 | 67,30 | |
| 1992 | 3 | 19,89 | 8,09 | | 2,01 | 0,97 | 68,09 | |
| 1992 | 4 | 19,76 | 8,01 | | 2,01 | 0,97 | 67,66 | |
| 1992 | 5 | 18,84 | 7,45 | | 2,01 | 0,97 | 64,59 | |
| 1992 | 6 | 18,71 | 7,37 | | 2,01 | 0,97 | 64,16 | |
| 1992 | 7 | 17,70 | 6,78 | | 2,01 | 0,97 | 60,82 | |
| 1992 | 8 | 18,71 | 7,37 | | 2,01 | 0,97 | 64,17 | |
| 1992 | 9 | 19,95 | 8,12 | | 2,01 | 0,97 | 68,27 | |
| 1992 | 10 | 19,67 | 7,96 | | 2,01 | 0,97 | 67,37 | |
| 1992 | 11 | 19,02 | 7,56 | | 2,01 | 0,97 | 65,19 | |
| 1992 | 12 | 18,77 | 7,41 | | 2,01 | 0,97 | 64,36 | |
| 1993 | 1 | 19,46 | 7,82 | 92,81 | 2,03 | 0,98 | 67,44 | |

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

| | | | | | | | | |
|------|----|-------|------|-------|------|------|-------|--------|
| 1993 | 2 | 19,30 | 7,73 | | 2,03 | 0,98 | 66,90 | 802,78 |
| 1993 | 3 | 18,93 | 7,51 | | 2,03 | 0,98 | 65,64 | |
| 1993 | 4 | 19,23 | 7,68 | | 2,03 | 0,98 | 66,65 | |
| 1993 | 5 | 19,03 | 7,57 | | 2,03 | 0,98 | 65,98 | |
| 1993 | 6 | 18,06 | 6,99 | | 2,03 | 0,98 | 62,65 | |
| 1993 | 7 | 17,78 | 6,82 | | 2,03 | 0,98 | 61,70 | |
| 1993 | 8 | 19,09 | 7,60 | | 2,03 | 0,98 | 66,20 | |
| 1993 | 9 | 20,14 | 8,24 | | 2,03 | 0,98 | 69,75 | |
| 1993 | 10 | 20,98 | 8,77 | | 2,03 | 0,98 | 72,63 | |
| 1993 | 11 | 20,48 | 8,46 | | 2,03 | 0,98 | 70,93 | |
| 1993 | 12 | 19,13 | 7,62 | | 2,03 | 0,98 | 66,31 | |
| 1994 | 1 | 19,50 | 7,85 | 92,57 | 2,03 | 0,98 | 67,39 | |
| 1994 | 2 | 19,94 | 8,12 | | 2,03 | 0,98 | 68,89 | |
| 1994 | 3 | 19,36 | 7,77 | | 2,03 | 0,98 | 66,92 | |
| 1994 | 4 | 19,21 | 7,68 | | 2,03 | 0,98 | 66,42 | |
| 1994 | 5 | 19,28 | 7,71 | | 2,03 | 0,98 | 66,63 | |
| 1994 | 6 | 18,29 | 7,12 | | 2,03 | 0,98 | 63,27 | |
| 1994 | 7 | 18,07 | 6,99 | | 2,03 | 0,98 | 62,53 | |
| 1994 | 8 | 18,98 | 7,53 | | 2,03 | 0,98 | 65,61 | |
| 1994 | 9 | 21,04 | 8,81 | | 2,03 | 0,98 | 72,62 | |
| 1994 | 10 | 19,39 | 7,78 | | 2,03 | 0,98 | 67,02 | |
| 1994 | 11 | 18,89 | 7,48 | | 2,03 | 0,98 | 65,33 | |
| 1994 | 12 | 19,28 | 7,71 | | 2,03 | 0,98 | 66,63 | |
| 1995 | 1 | 19,94 | 8,12 | 94,38 | 2,07 | 1,01 | 70,39 | 826,51 |
| 1995 | 2 | 19,55 | 7,88 | | 2,07 | 1,01 | 68,99 | |
| 1995 | 3 | 19,75 | 8,00 | | 2,07 | 1,01 | 69,70 | |
| 1995 | 4 | 19,61 | 7,92 | | 2,07 | 1,01 | 69,18 | |
| 1995 | 5 | 19,19 | 7,66 | | 2,07 | 1,01 | 67,71 | |
| 1995 | 6 | 18,69 | 7,36 | | 2,07 | 1,01 | 65,92 | |
| 1995 | 7 | 18,53 | 7,27 | | 2,07 | 1,01 | 65,34 | |
| 1995 | 8 | 19,31 | 7,74 | | 2,07 | 1,01 | 68,14 | |
| 1995 | 9 | 20,74 | 8,62 | | 2,07 | 1,01 | 73,23 | |

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

| | | | | | | | | | |
|------|----|-------|------|--------|------|------|-------|--------|--|
| 1995 | 10 | 19,97 | 8,14 | | 2,07 | 1,01 | 70,47 | | |
| 1995 | 11 | 19,75 | 8,00 | | 2,07 | 1,01 | 69,71 | | |
| 1995 | 12 | 19,20 | 7,67 | | 2,07 | 1,01 | 67,73 | | |
| 1996 | 1 | 19,32 | 7,74 | 93,49 | 2,05 | 1,00 | 67,50 | 813,20 | |
| 1996 | 2 | 19,58 | 7,90 | | 2,05 | 1,00 | 68,41 | | |
| 1996 | 3 | 19,94 | 8,12 | | 2,05 | 1,00 | 69,64 | | |
| 1996 | 4 | 19,80 | 8,03 | | 2,05 | 1,00 | 69,15 | | |
| 1996 | 5 | 19,59 | 7,90 | | 2,05 | 1,00 | 68,41 | | |
| 1996 | 6 | 18,53 | 7,27 | | 2,05 | 1,00 | 64,73 | | |
| 1996 | 7 | 18,69 | 7,36 | | 2,05 | 1,00 | 65,30 | | |
| 1996 | 8 | 19,20 | 7,67 | | 2,05 | 1,00 | 67,09 | | |
| 1996 | 9 | 19,94 | 8,12 | | 2,05 | 1,00 | 69,63 | | |
| 1996 | 10 | 19,97 | 8,14 | | 2,05 | 1,00 | 69,75 | | |
| 1996 | 11 | 19,06 | 7,58 | | 2,05 | 1,00 | 66,58 | | |
| 1996 | 12 | 19,18 | 7,66 | | 2,05 | 1,00 | 67,02 | | |
| 1997 | 1 | 19,56 | 7,89 | 94,47 | 2,07 | 1,01 | 69,08 | 756,82 | |
| 1997 | 2 | 19,48 | 7,84 | | 2,07 | 1,01 | 68,81 | | |
| 1997 | 3 | 20,11 | 8,23 | | 2,07 | 1,01 | 71,06 | | |
| 1997 | 4 | 19,04 | 7,57 | | 2,07 | 1,01 | 67,23 | | |
| 1997 | 5 | 18,96 | 7,52 | | 2,07 | 1,01 | 66,93 | | |
| 1997 | 6 | 18,22 | 7,08 | | 2,07 | 1,01 | 64,30 | | |
| 1997 | 7 | 18,22 | 7,09 | | 2,07 | 1,01 | 64,32 | | |
| 1997 | 8 | 19,60 | 7,91 | | 2,07 | 1,01 | 69,23 | | |
| 1997 | 9 | 21,18 | 8,90 | | 2,07 | 1,01 | 74,90 | | |
| 1997 | 10 | 20,48 | 8,45 | | 2,07 | 1,01 | 72,37 | | |
| 1997 | 12 | 19,42 | 7,80 | | 2,07 | 1,01 | 68,59 | | |
| 1998 | 1 | 20,06 | 8,19 | 100,18 | 2,19 | 1,10 | 75,49 | 841,97 | |
| 1998 | 2 | 21,44 | 9,07 | | 2,19 | 1,10 | 81,27 | | |
| 1998 | 3 | 20,98 | 8,77 | | 2,19 | 1,10 | 79,31 | | |
| 1998 | 4 | 21,10 | 8,84 | | 2,19 | 1,10 | 79,82 | | |
| 1998 | 5 | 20,56 | 8,51 | | 2,19 | 1,10 | 77,59 | | |
| 1998 | 6 | 19,09 | 7,60 | | 2,19 | 1,10 | 71,49 | | |

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

| | | | | | | | | |
|------|----|-------|------|-------|------|------|-------|--------|
| 1998 | 7 | 18,95 | 7,52 | | 2,19 | 1,10 | 70,91 | |
| 1998 | 8 | 19,92 | 8,11 | | 2,19 | 1,10 | 74,91 | |
| 1998 | 9 | 20,89 | 8,71 | | 2,19 | 1,10 | 78,93 | |
| 1998 | 11 | 20,32 | 8,35 | | 2,19 | 1,10 | 76,58 | |
| 1998 | 12 | 20,10 | 8,22 | | 2,19 | 1,10 | 75,67 | |
| 1999 | 1 | 20,23 | 8,30 | 95,27 | 2,09 | 1,02 | 72,17 | |
| 1999 | 2 | 20,54 | 8,50 | | 2,09 | 1,02 | 73,31 | |
| 1999 | 3 | 19,53 | 7,87 | | 2,09 | 1,02 | 69,59 | |
| 1999 | 4 | 19,70 | 7,97 | | 2,09 | 1,02 | 70,23 | |
| 1999 | 5 | 19,31 | 7,73 | | 2,09 | 1,02 | 68,79 | |
| 1999 | 6 | 18,77 | 7,41 | | 2,09 | 1,02 | 66,82 | 840,11 |
| 1999 | 7 | 18,57 | 7,29 | | 2,09 | 1,02 | 66,11 | |
| 1999 | 8 | 19,89 | 8,09 | | 2,09 | 1,02 | 70,92 | |
| 1999 | 9 | 20,00 | 8,15 | | 2,09 | 1,02 | 71,31 | |
| 1999 | 10 | 20,24 | 8,30 | | 2,09 | 1,02 | 72,19 | |
| 1999 | 11 | 19,24 | 7,69 | | 2,09 | 1,02 | 68,54 | |
| 1999 | 12 | 19,67 | 7,96 | | 2,09 | 1,02 | 70,13 | |
| 2000 | 1 | 19,99 | 8,15 | 98,44 | 2,15 | 1,08 | 73,82 | |
| 2000 | 2 | 19,48 | 7,84 | | 2,15 | 1,08 | 71,83 | |
| 2000 | 3 | 19,66 | 7,95 | | 2,15 | 1,08 | 72,51 | |
| 2000 | 4 | 20,07 | 8,20 | | 2,15 | 1,08 | 74,14 | |
| 2000 | 5 | 20,21 | 8,29 | | 2,15 | 1,08 | 74,73 | |
| 2000 | 6 | 19,20 | 7,67 | | 2,15 | 1,08 | 70,71 | 889,89 |
| 2000 | 7 | 19,21 | 7,67 | | 2,15 | 1,08 | 70,74 | |
| 2000 | 8 | 20,23 | 8,30 | | 2,15 | 1,08 | 74,77 | |
| 2000 | 9 | 21,41 | 9,05 | | 2,15 | 1,08 | 79,51 | |
| 2000 | 10 | 21,16 | 8,89 | | 2,15 | 1,08 | 78,50 | |
| 2000 | 11 | 20,16 | 8,26 | | 2,15 | 1,08 | 74,51 | |
| 2000 | 12 | 20,06 | 8,19 | | 2,15 | 1,08 | 74,11 | |
| 2001 | 1 | 19,77 | 8,01 | 95,59 | 2,09 | 1,03 | 70,73 | |
| 2001 | 2 | 20,12 | 8,23 | | 2,09 | 1,03 | 72,01 | |
| 2001 | 3 | 19,99 | 8,15 | | 2,09 | 1,03 | 71,55 | |

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

| | | | | | | | | |
|------|----|-------|------|--------|------|------|-------|--------|
| 2001 | 4 | 20,08 | 8,20 | | 2,09 | 1,03 | 71,86 | 845,02 |
| 2001 | 5 | 19,48 | 7,84 | | 2,09 | 1,03 | 69,67 | |
| 2001 | 6 | 18,71 | 7,37 | | 2,09 | 1,03 | 66,81 | |
| 2001 | 7 | 18,59 | 7,30 | | 2,09 | 1,03 | 66,40 | |
| 2001 | 8 | 19,36 | 7,76 | | 2,09 | 1,03 | 69,21 | |
| 2001 | 9 | 20,07 | 8,20 | | 2,09 | 1,03 | 71,83 | |
| 2001 | 10 | 20,25 | 8,31 | | 2,09 | 1,03 | 72,52 | |
| 2001 | 11 | 19,76 | 8,01 | | 2,09 | 1,03 | 70,70 | |
| 2001 | 12 | 20,04 | 8,18 | | 2,09 | 1,03 | 71,73 | |
| 2002 | 1 | 19,90 | 8,10 | 100,54 | 2,20 | 1,11 | 75,13 | |
| 2002 | 2 | 20,45 | 8,43 | | 2,20 | 1,11 | 77,40 | |
| 2002 | 3 | 20,45 | 8,43 | | 2,20 | 1,11 | 77,40 | |
| 2002 | 4 | 20,20 | 8,28 | | 2,20 | 1,11 | 76,36 | |
| 2002 | 5 | 20,37 | 8,38 | | 2,20 | 1,11 | 77,07 | |
| 2002 | 6 | 19,49 | 7,85 | | 2,20 | 1,11 | 73,41 | |
| 2002 | 7 | 19,90 | 8,10 | | 2,20 | 1,11 | 75,12 | |
| 2002 | 8 | 20,26 | 8,32 | | 2,20 | 1,11 | 76,64 | |
| 2002 | 9 | 21,62 | 9,18 | | 2,20 | 1,11 | 82,33 | |
| 2002 | 10 | 21,40 | 9,03 | | 2,20 | 1,11 | 81,40 | |
| 2002 | 11 | 19,91 | 8,10 | | 2,20 | 1,11 | 75,17 | |
| 2002 | 12 | 20,28 | 8,33 | | 2,20 | 1,11 | 76,68 | |
| 2003 | 1 | 20,69 | 8,58 | 99,33 | 2,17 | 1,09 | 77,38 | 904,27 |
| 2003 | 2 | 20,86 | 8,69 | | 2,17 | 1,09 | 78,08 | |
| 2003 | 3 | 20,18 | 8,27 | | 2,17 | 1,09 | 75,30 | |
| 2003 | 4 | 20,30 | 8,34 | | 2,17 | 1,09 | 75,82 | |
| 2003 | 5 | 20,07 | 8,20 | | 2,17 | 1,09 | 74,86 | |
| 2003 | 6 | 18,97 | 7,53 | | 2,17 | 1,09 | 70,40 | |
| 2003 | 7 | 18,86 | 7,46 | | 2,17 | 1,09 | 69,96 | |
| 2003 | 8 | 20,17 | 8,26 | | 2,17 | 1,09 | 75,28 | |
| 2003 | 9 | 21,14 | 8,87 | | 2,17 | 1,09 | 79,23 | |
| 2003 | 10 | 20,97 | 8,76 | | 2,17 | 1,09 | 78,52 | |
| 2003 | 11 | 20,26 | 8,32 | | 2,17 | 1,09 | 75,63 | |

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

| | | | | | | | | |
|------|----|-------|------|--------|------|------|-------|--------|
| 2003 | 12 | 19,81 | 8,04 | | 2,17 | 1,09 | 73,80 | |
| 2004 | 1 | 20,35 | 8,37 | 97,38 | 2,13 | 1,06 | 74,38 | 873,03 |
| 2004 | 2 | 20,19 | 8,28 | | 2,13 | 1,06 | 73,78 | |
| 2004 | 3 | 20,61 | 8,54 | | 2,13 | 1,06 | 75,40 | |
| 2004 | 4 | 19,49 | 7,84 | | 2,13 | 1,06 | 71,05 | |
| 2004 | 5 | 19,55 | 7,88 | | 2,13 | 1,06 | 71,28 | |
| 2004 | 6 | 18,68 | 7,36 | | 2,13 | 1,06 | 67,95 | |
| 2004 | 7 | 18,90 | 7,48 | | 2,13 | 1,06 | 68,77 | |
| 2004 | 8 | 20,35 | 8,38 | | 2,13 | 1,06 | 74,40 | |
| 2004 | 9 | 20,48 | 8,46 | | 2,13 | 1,06 | 74,91 | |
| 2004 | 10 | 20,80 | 8,66 | | 2,13 | 1,06 | 76,14 | |
| 2004 | 11 | 19,54 | 7,87 | | 2,13 | 1,06 | 71,25 | |
| 2004 | 12 | 20,18 | 8,27 | | 2,13 | 1,06 | 73,72 | |
| 2005 | 1 | 20,39 | 8,40 | 101,02 | 2,21 | 1,12 | 77,55 | 932,07 |
| 2005 | 2 | 21,43 | 9,06 | | 2,21 | 1,12 | 81,99 | |
| 2005 | 3 | 20,64 | 8,56 | | 2,21 | 1,12 | 78,62 | |
| 2005 | 4 | 20,88 | 8,71 | | 2,21 | 1,12 | 79,65 | |
| 2005 | 5 | 20,04 | 8,18 | | 2,21 | 1,12 | 76,06 | |
| 2005 | 6 | 19,17 | 7,65 | | 2,21 | 1,12 | 72,39 | |
| 2005 | 7 | 18,96 | 7,52 | | 2,21 | 1,12 | 71,50 | |
| 2005 | 8 | 20,22 | 8,29 | | 2,21 | 1,12 | 76,84 | |
| 2005 | 9 | 21,13 | 8,86 | | 2,21 | 1,12 | 80,70 | |
| 2005 | 10 | 21,19 | 8,90 | | 2,21 | 1,12 | 80,95 | |
| 2005 | 11 | 20,58 | 8,51 | | 2,21 | 1,12 | 78,35 | |
| 2005 | 12 | 20,36 | 8,38 | | 2,21 | 1,12 | 77,45 | |
| 2006 | 1 | 20,64 | 8,55 | 97,85 | 2,14 | 1,07 | 75,90 | 880,33 |
| 2006 | 2 | 20,97 | 8,76 | | 2,14 | 1,07 | 77,19 | |
| 2006 | 3 | 20,13 | 8,24 | | 2,14 | 1,07 | 73,90 | |
| 2006 | 4 | 19,77 | 8,02 | | 2,14 | 1,07 | 72,51 | |
| 2006 | 5 | 19,66 | 7,95 | | 2,14 | 1,07 | 72,08 | |
| 2006 | 6 | 18,63 | 7,32 | | 2,14 | 1,07 | 68,04 | |
| 2006 | 7 | 19,25 | 7,70 | | 2,14 | 1,07 | 70,46 | |

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

| | | | | | | | | |
|------|----|-------|------|-------|------|------|-------|--------|
| 2006 | 8 | 19,78 | 8,02 | | 2,14 | 1,07 | 72,54 | |
| 2006 | 9 | 20,69 | 8,59 | | 2,14 | 1,07 | 76,13 | |
| 2006 | 10 | 21,53 | 9,12 | | 2,14 | 1,07 | 79,42 | |
| 2006 | 11 | 19,26 | 7,71 | | 2,14 | 1,07 | 70,52 | |
| 2006 | 12 | 19,55 | 7,88 | | 2,14 | 1,07 | 71,65 | |
| 2007 | 1 | 20,54 | 8,49 | 97,44 | 2,13 | 1,06 | 75,17 | |
| 2007 | 2 | 20,47 | 8,45 | | 2,13 | 1,06 | 74,90 | |
| 2007 | 3 | 20,15 | 8,25 | | 2,13 | 1,06 | 73,67 | |
| 2007 | 4 | 20,33 | 8,36 | | 2,13 | 1,06 | 74,33 | |
| 2007 | 5 | 19,83 | 8,05 | | 2,13 | 1,06 | 72,41 | |
| 2007 | 6 | 18,90 | 7,49 | | 2,13 | 1,06 | 68,82 | 873,95 |
| 2007 | 7 | 19,16 | 7,64 | | 2,13 | 1,06 | 69,82 | |
| 2007 | 8 | 19,38 | 7,78 | | 2,13 | 1,06 | 70,69 | |
| 2007 | 9 | 20,75 | 8,62 | | 2,13 | 1,06 | 75,96 | |
| 2007 | 10 | 20,52 | 8,48 | | 2,13 | 1,06 | 75,09 | |
| 2007 | 11 | 19,81 | 8,04 | | 2,13 | 1,06 | 72,35 | |
| 2007 | 12 | 19,39 | 7,78 | | 2,13 | 1,06 | 70,72 | |
| 2008 | 1 | 19,71 | 7,98 | 96,25 | 2,11 | 1,04 | 71,03 | |
| 2008 | 2 | 20,10 | 8,22 | | 2,11 | 1,04 | 72,50 | |
| 2008 | 3 | 19,32 | 7,74 | | 2,11 | 1,04 | 69,57 | |
| 2008 | 4 | 19,77 | 8,02 | | 2,11 | 1,04 | 71,27 | |
| 2008 | 5 | 19,57 | 7,89 | | 2,11 | 1,04 | 70,49 | |
| 2008 | 6 | 19,01 | 7,55 | | 2,11 | 1,04 | 68,39 | 855,29 |
| 2008 | 7 | 18,89 | 7,48 | | 2,11 | 1,04 | 67,96 | |
| 2008 | 8 | 20,06 | 8,19 | | 2,11 | 1,04 | 72,33 | |
| 2008 | 9 | 20,84 | 8,68 | | 2,11 | 1,04 | 75,25 | |
| 2008 | 10 | 20,20 | 8,28 | | 2,11 | 1,04 | 72,85 | |
| 2008 | 11 | 19,76 | 8,01 | | 2,11 | 1,04 | 71,20 | |
| 2008 | 12 | 20,09 | 8,21 | | 2,11 | 1,04 | 72,46 | |
| 2009 | 1 | 19,79 | 8,03 | 98,57 | 2,16 | 1,08 | 73,16 | |
| 2009 | 2 | 20,08 | 8,21 | | 2,16 | 1,08 | 74,32 | |
| 2009 | 3 | 20,35 | 8,37 | | 2,16 | 1,08 | 75,39 | |

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

| | | | | | | | | |
|------|----|-------|------|--------|------|------|-------|--------|
| 2009 | 4 | 19,59 | 7,90 | | 2,16 | 1,08 | 72,34 | 892,01 |
| 2009 | 5 | 19,89 | 8,09 | | 2,16 | 1,08 | 73,53 | |
| 2009 | 6 | 19,20 | 7,67 | | 2,16 | 1,08 | 70,80 | |
| 2009 | 7 | 18,69 | 7,36 | | 2,16 | 1,08 | 68,77 | |
| 2009 | 8 | 20,55 | 8,50 | | 2,16 | 1,08 | 76,20 | |
| 2009 | 9 | 21,23 | 8,93 | | 2,16 | 1,08 | 78,91 | |
| 2009 | 10 | 21,20 | 8,91 | | 2,16 | 1,08 | 78,77 | |
| 2009 | 11 | 20,43 | 8,43 | | 2,16 | 1,08 | 75,72 | |
| 2009 | 12 | 20,03 | 8,18 | | 2,16 | 1,08 | 74,11 | |
| 2010 | 1 | 20,65 | 8,56 | 101,02 | 2,21 | 1,12 | 78,68 | |
| 2010 | 2 | 21,21 | 8,92 | | 2,21 | 1,12 | 81,06 | |
| 2010 | 3 | 20,37 | 8,39 | | 2,21 | 1,12 | 77,48 | |
| 2010 | 4 | 20,84 | 8,68 | | 2,21 | 1,12 | 79,48 | |
| 2010 | 5 | 20,55 | 8,50 | | 2,21 | 1,12 | 78,24 | |
| 2010 | 6 | 19,74 | 8,00 | | 2,21 | 1,12 | 74,82 | |
| 2010 | 7 | 19,47 | 7,83 | | 2,21 | 1,12 | 73,67 | |
| 2010 | 8 | 20,13 | 8,24 | | 2,21 | 1,12 | 76,44 | |
| 2010 | 9 | 20,71 | 8,60 | | 2,21 | 1,12 | 78,92 | |
| 2010 | 10 | 20,95 | 8,75 | | 2,21 | 1,12 | 79,95 | |
| 2010 | 11 | 20,51 | 8,47 | | 2,21 | 1,12 | 78,07 | |
| 2010 | 12 | 19,86 | 8,07 | | 2,21 | 1,12 | 75,33 | |
| 2011 | 1 | 20,14 | 8,24 | 97,79 | 2,14 | 1,06 | 73,91 | 879,47 |
| 2011 | 2 | 19,69 | 7,97 | | 2,14 | 1,06 | 72,17 | |
| 2011 | 3 | 20,11 | 8,23 | | 2,14 | 1,06 | 73,80 | |
| 2011 | 4 | 19,67 | 7,95 | | 2,14 | 1,06 | 72,05 | |
| 2011 | 5 | 19,49 | 7,84 | | 2,14 | 1,06 | 71,37 | |
| 2011 | 6 | 19,02 | 7,56 | | 2,14 | 1,06 | 69,53 | |
| 2011 | 7 | 18,80 | 7,43 | | 2,14 | 1,06 | 68,67 | |
| 2011 | 8 | 20,43 | 8,42 | | 2,14 | 1,06 | 75,04 | |
| 2011 | 9 | 21,49 | 9,10 | | 2,14 | 1,06 | 79,20 | |
| 2011 | 10 | 20,37 | 8,38 | | 2,14 | 1,06 | 74,79 | |
| 2011 | 11 | 20,34 | 8,36 | | 2,14 | 1,06 | 74,67 | |

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

| | | | | | | | | |
|------|----|-------|------|--------|------|------|-------|--------|
| 2011 | 12 | 20,23 | 8,30 | | 2,14 | 1,06 | 74,26 | |
| 2012 | 1 | 20,66 | 8,57 | 98,14 | 2,15 | 1,07 | 76,23 | 885,05 |
| 2012 | 2 | 20,24 | 8,30 | | 2,15 | 1,07 | 74,57 | |
| 2012 | 3 | 20,40 | 8,41 | | 2,15 | 1,07 | 75,22 | |
| 2012 | 4 | 20,41 | 8,41 | | 2,15 | 1,07 | 75,24 | |
| 2012 | 5 | 19,73 | 7,99 | | 2,15 | 1,07 | 72,55 | |
| 2012 | 6 | 19,06 | 7,59 | | 2,15 | 1,07 | 69,95 | |
| 2012 | 7 | 19,05 | 7,58 | | 2,15 | 1,07 | 69,92 | |
| 2012 | 8 | 20,13 | 8,24 | | 2,15 | 1,07 | 74,16 | |
| 2012 | 9 | 20,87 | 8,70 | | 2,15 | 1,07 | 77,07 | |
| 2012 | 10 | 20,67 | 8,57 | | 2,15 | 1,07 | 76,26 | |
| 2012 | 11 | 19,50 | 7,85 | | 2,15 | 1,07 | 71,66 | |
| 2012 | 12 | 19,64 | 7,94 | | 2,15 | 1,07 | 72,22 | |
| 2013 | 1 | 21,09 | 8,84 | 95,72 | 2,10 | 1,03 | 75,74 | 843,48 |
| 2013 | 2 | 20,63 | 8,55 | | 2,10 | 1,03 | 74,01 | |
| 2013 | 3 | 20,69 | 8,58 | | 2,10 | 1,03 | 74,23 | |
| 2013 | 4 | 20,47 | 8,45 | | 2,10 | 1,03 | 73,42 | |
| 2013 | 5 | 19,75 | 8,00 | | 2,10 | 1,03 | 70,77 | |
| 2013 | 6 | 19,04 | 7,57 | | 2,10 | 1,03 | 68,13 | |
| 2013 | 7 | 11,30 | 3,44 | | 2,10 | 1,03 | 39,77 | |
| 2013 | 8 | 20,67 | 8,57 | | 2,10 | 1,03 | 74,17 | |
| 2013 | 9 | 21,01 | 8,79 | | 2,10 | 1,03 | 75,43 | |
| 2013 | 10 | 20,29 | 8,34 | | 2,10 | 1,03 | 72,76 | |
| 2013 | 11 | 19,93 | 8,11 | | 2,10 | 1,03 | 71,42 | |
| 2013 | 12 | 20,53 | 8,48 | | 2,10 | 1,03 | 73,64 | |
| 2014 | 1 | 20,81 | 8,66 | 100,19 | 2,19 | 1,10 | 78,62 | 918,53 |
| 2014 | 2 | 20,60 | 8,53 | | 2,19 | 1,10 | 77,74 | |
| 2014 | 3 | 20,82 | 8,67 | | 2,19 | 1,10 | 78,68 | |
| 2014 | 4 | 20,17 | 8,26 | | 2,19 | 1,10 | 75,95 | |
| 2014 | 5 | 20,20 | 8,28 | | 2,19 | 1,10 | 76,10 | |
| 2014 | 6 | 19,98 | 8,14 | | 2,19 | 1,10 | 75,18 | |
| 2014 | 7 | 19,75 | 8,01 | | 2,19 | 1,10 | 74,24 | |

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

| | | | | | | | | |
|------|----|-------|------|--------|------|------|-------|---------|
| 2014 | 8 | 20,67 | 8,57 | | 2,19 | 1,10 | 78,04 | |
| 2014 | 9 | 20,27 | 8,32 | | 2,19 | 1,10 | 76,37 | |
| 2014 | 10 | 20,42 | 8,42 | | 2,19 | 1,10 | 77,00 | |
| 2014 | 11 | 19,95 | 8,13 | | 2,19 | 1,10 | 75,06 | |
| 2014 | 12 | 20,07 | 8,20 | | 2,19 | 1,10 | 75,55 | |
| 2015 | 1 | 20,72 | 8,61 | 102,35 | 2,24 | 1,14 | 80,10 | |
| 2015 | 2 | 20,55 | 8,50 | | 2,24 | 1,14 | 79,35 | |
| 2015 | 3 | 21,15 | 8,88 | | 2,24 | 1,14 | 82,00 | |
| 2015 | 4 | 20,05 | 8,19 | | 2,24 | 1,14 | 77,14 | |
| 2015 | 5 | 20,60 | 8,53 | | 2,24 | 1,14 | 79,55 | |
| 2015 | 6 | 20,05 | 8,18 | | 2,24 | 1,14 | 77,13 | 954,63 |
| 2015 | 7 | 19,87 | 8,08 | | 2,24 | 1,14 | 76,38 | |
| 2015 | 8 | 20,76 | 8,63 | | 2,24 | 1,14 | 80,27 | |
| 2015 | 9 | 21,91 | 9,37 | | 2,24 | 1,14 | 85,36 | |
| 2015 | 10 | 20,84 | 8,68 | | 2,24 | 1,14 | 80,61 | |
| 2015 | 11 | 20,21 | 8,29 | | 2,24 | 1,14 | 77,86 | |
| 2015 | 12 | 20,44 | 8,43 | | 2,24 | 1,14 | 78,88 | |
| 2016 | 1 | 21,36 | 9,01 | 105,47 | 2,32 | 1,19 | 85,74 | |
| 2016 | 2 | 21,48 | 9,09 | | 2,32 | 1,19 | 86,32 | |
| 2016 | 3 | 21,60 | 9,17 | | 2,32 | 1,19 | 86,89 | |
| 2016 | 4 | 22,76 | 9,92 | | 2,32 | 1,19 | 92,45 | |
| 2016 | 5 | 20,44 | 8,43 | | 2,32 | 1,19 | 81,35 | |
| 2016 | 6 | 19,22 | 7,68 | | 2,32 | 1,19 | 75,63 | 1008,61 |
| 2016 | 7 | 20,53 | 8,49 | | 2,32 | 1,19 | 81,81 | |
| 2016 | 8 | 20,61 | 8,54 | | 2,32 | 1,19 | 82,18 | |
| 2016 | 9 | 21,81 | 9,30 | | 2,32 | 1,19 | 87,87 | |
| 2016 | 10 | 21,61 | 9,17 | | 2,32 | 1,19 | 86,94 | |
| 2016 | 11 | 20,62 | 8,54 | | 2,32 | 1,19 | 82,21 | |
| 2016 | 12 | 19,98 | 8,15 | | 2,32 | 1,19 | 79,22 | |
| 2017 | 1 | 20,60 | 8,53 | 101,85 | 2,23 | 1,13 | 79,14 | |
| 2017 | 2 | 20,44 | 8,43 | | 2,23 | 1,13 | 78,44 | |
| 2017 | 3 | 20,30 | 8,34 | | 2,23 | 1,13 | 77,86 | |

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

| | | | | | | | | |
|------|----|-------|------|--------|------|------|-------|--------|
| 2017 | 4 | 20,39 | 8,40 | | 2,23 | 1,13 | 78,23 | 946,19 |
| 2017 | 5 | 20,02 | 8,17 | | 2,23 | 1,13 | 76,66 | |
| 2017 | 6 | 19,91 | 8,10 | | 2,23 | 1,13 | 76,15 | |
| 2017 | 7 | 20,37 | 8,39 | | 2,23 | 1,13 | 78,17 | |
| 2017 | 8 | 20,60 | 8,53 | | 2,23 | 1,13 | 79,13 | |
| 2017 | 9 | 21,34 | 9,00 | | 2,23 | 1,13 | 82,38 | |
| 2017 | 10 | 21,38 | 9,03 | | 2,23 | 1,13 | 82,55 | |
| 2017 | 11 | 20,63 | 8,55 | | 2,23 | 1,13 | 79,27 | |
| 2017 | 12 | 20,39 | 8,40 | | 2,23 | 1,13 | 78,22 | |
| 2018 | 1 | 20,37 | 8,39 | 100,47 | 2,20 | 1,11 | 77,03 | |
| 2018 | 2 | 21,31 | 8,98 | | 2,20 | 1,11 | 80,98 | |
| 2018 | 3 | 20,53 | 8,49 | | 2,20 | 1,11 | 77,70 | |
| 2018 | 4 | 20,06 | 8,19 | | 2,20 | 1,11 | 75,71 | |
| 2018 | 5 | 19,98 | 8,14 | | 2,20 | 1,11 | 75,38 | |
| 2018 | 6 | 19,23 | 7,68 | | 2,20 | 1,11 | 72,25 | |
| 2018 | 7 | 18,86 | 7,46 | | 2,20 | 1,11 | 70,71 | |
| 2018 | 8 | 20,30 | 8,35 | | 2,20 | 1,11 | 76,75 | |
| 2018 | 9 | 21,64 | 9,19 | | 2,20 | 1,11 | 82,34 | |
| 2018 | 10 | 21,21 | 8,92 | | 2,20 | 1,11 | 80,56 | |
| 2018 | 11 | 20,57 | 8,51 | | 2,20 | 1,11 | 77,84 | |
| 2018 | 12 | 20,03 | 8,17 | | 2,20 | 1,11 | 75,60 | |
| 2019 | 1 | 21,18 | 8,89 | 99,01 | 2,17 | 1,08 | 79,09 | 898,89 |
| 2019 | 2 | 20,96 | 8,75 | | 2,17 | 1,08 | 78,19 | |
| 2019 | 3 | 20,71 | 8,60 | | 2,17 | 1,08 | 77,19 | |
| 2019 | 4 | 20,69 | 8,59 | | 2,17 | 1,08 | 77,13 | |
| 2019 | 5 | 20,82 | 8,67 | | 2,17 | 1,08 | 77,65 | |
| 2019 | 6 | 20,20 | 8,28 | | 2,17 | 1,08 | 75,14 | |
| 2019 | 7 | 20,13 | 8,24 | | 2,17 | 1,08 | 74,87 | |
| 2019 | 8 | 17,92 | 6,91 | | 2,17 | 1,08 | 65,97 | |
| 2019 | 9 | 18,41 | 7,20 | | 2,17 | 1,08 | 67,96 | |
| 2019 | 10 | 20,04 | 8,18 | | 2,17 | 1,08 | 74,47 | |
| 2019 | 11 | 20,15 | 8,25 | | 2,17 | 1,08 | 74,94 | |

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

| | | | | | | | | |
|------|----|-------|------|-------|------|------|-------|--------|
| 2019 | 12 | 20,48 | 8,46 | | 2,17 | 1,08 | 76,28 | |
| 2020 | 1 | 21,12 | 8,86 | 99,71 | 2,18 | 1,10 | 79,49 | 910,20 |
| 2020 | 2 | 21,09 | 8,84 | | 2,18 | 1,10 | 79,39 | |
| 2020 | 3 | 21,33 | 8,99 | | 2,18 | 1,10 | 80,36 | |
| 2020 | 4 | 20,86 | 8,69 | | 2,18 | 1,10 | 78,43 | |
| 2020 | 5 | 20,60 | 8,53 | | 2,18 | 1,10 | 77,35 | |
| 2020 | 6 | 19,88 | 8,08 | | 2,18 | 1,10 | 74,38 | |
| 2020 | 7 | 19,83 | 8,05 | | 2,18 | 1,10 | 74,19 | |
| 2020 | 8 | 21,25 | 8,94 | | 2,18 | 1,10 | 80,01 | |
| 2020 | 9 | 20,91 | 8,73 | | 2,18 | 1,10 | 78,63 | |
| 2020 | 10 | 18,63 | 7,33 | | 2,18 | 1,10 | 69,29 | |
| 2020 | 11 | 18,64 | 7,33 | | 2,18 | 1,10 | 69,32 | |
| 2020 | 12 | 18,65 | 7,34 | | 2,18 | 1,10 | 69,36 | |

II.3.2 Calcul des précipitations moyennes annuelles

Les précipitations moyennes annuelles ont été obtenues à l'aide de la formule qui se sert du polygone de THIESSEN. Cette formule tient en compte la surface d'influence de chaque station météorologique ainsi que la hauteur des précipitations correspondante à chaque station météorologique. Les polygones de THIESSEN correspondant à chaque bassin versant ci bas illustres ont tous été réalisés à l'aide du logiciel ARCGIS, ainsi que la surface d'influence de chaque station météorologique.

$$P_m = \frac{\sum_i^n (A_i \times P_i)}{\sum_i^n A_i} \quad [\text{II-2}]$$

Avec :

A_i : Surface d'influence de chaque station météorologique (en km²);

P_i : Hauteurs annuelles des précipitations pour chaque station météorologique (en mm) ;

P_m : Précipitations moyennes annuelles (en mm).

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

II.3.3 Cas du bassin versant de la rivière NTAHANGWA

Comme l'illustre le polygone de THIESSEN, le bassin versant de la rivière NTAHANGWA est couvert par 5 stations météorologiques. La disponibilité des données ainsi que les périodes d'interruption enregistrées(possibilité d'extension des séries discontinues Sans risque de propagation d'erreurs), la surface d'influence de chaque station météorologiques, sont les trois critères a bases desquelles nous nous sommes référés afin de choisir les stations qui devront déterminer les précipitations moyennes annuelles du bassin versant de la rivière NTAHANGWA.

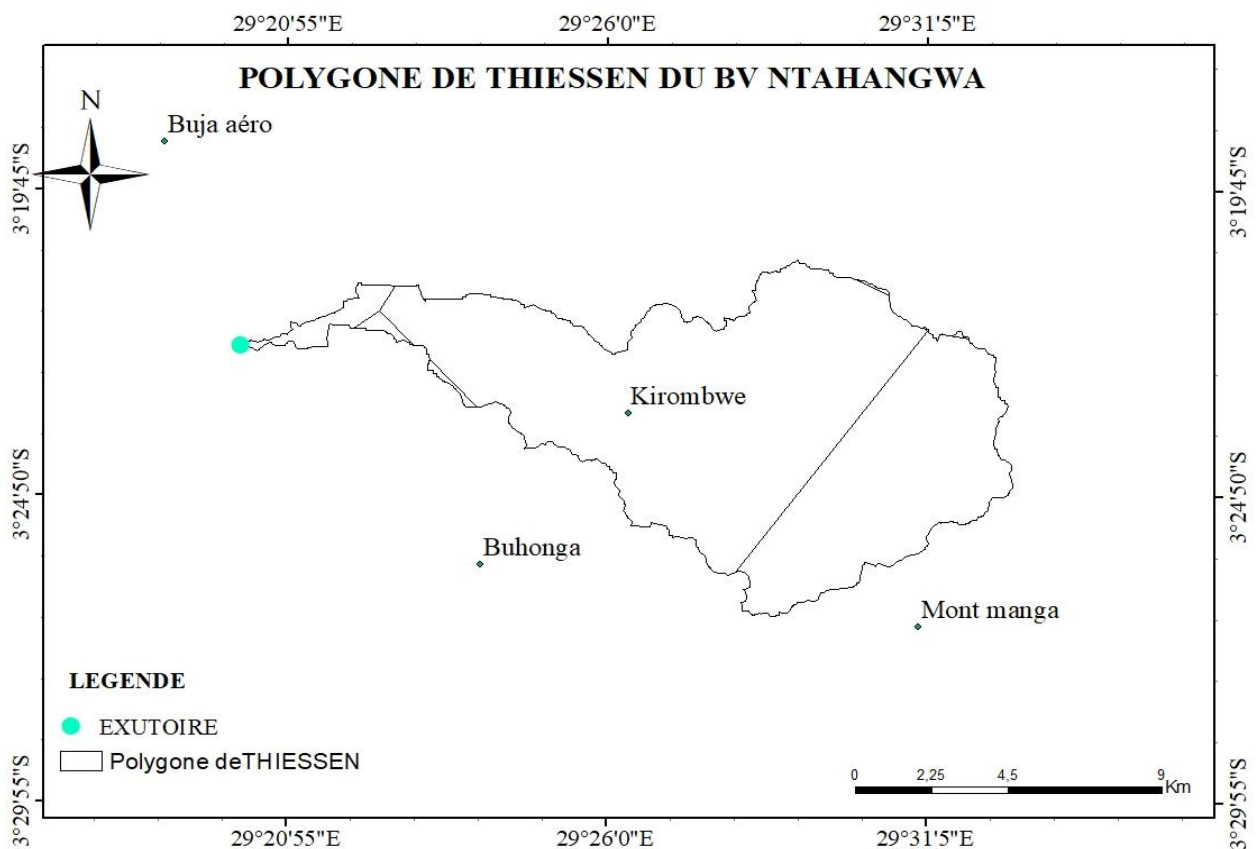


FIGURE II-1:Polygone de THIESSEN du BV de la rivière NTAHANGWA

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

Tableau II-4: Synthèse des précipitations moyennes annuelles du BV de la rivière NTAHANGWA

| Stations | KIROMBWE | BUJA-AERO | BUHONGA | MONT-MANGA | |
|------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------------|
| $\frac{A_i}{\sum A_i}$ | 0,46778 | 0,11023 | 0,10923 | 0,31276 | Pm(en mm) |
| Années | | | | | |
| 1991 | 1400,10 | 847,60 | 1729,41 | 1739,28 | 1481,25 |
| 1992 | 1558,48 | 778,71 | 2056,09 | 1442,64 | 1490,65 |
| 1993 | 1467,44 | 975,80 | 1742,27 | 1615,68 | 1489,63 |
| 1994 | 1405,91 | 771,61 | 1799,60 | 1680,55 | 1464,89 |
| 1995 | 1421,68 | 937,75 | 1694,04 | 1676,04 | 1477,64 |
| 1996 | 1406,19 | 757,70 | 1811,22 | 1405,30 | 1378,67 |
| 1997 | 1479,21 | 849,85 | 1863,11 | 1494,88 | 1456,67 |
| 1998 | 1314,73 | 1075,97 | 1399,85 | 1747,94 | 1433,20 |
| 1999 | 1114,50 | 2004,99 | 314,09 | 1905,46 | 1372,61 |
| 2000 | 1507,86 | 874,69 | 1892,60 | 1736,53 | 1551,61 |
| 2001 | 1378,23 | 790,23 | 1737,18 | 1570,86 | 1412,87 |
| 2002 | 1681,06 | 635,62 | 2380,92 | 804,07 | 1367,98 |
| 2003 | 1544,63 | 733,75 | 2068,22 | 1438,74 | 1479,32 |
| 2004 | 1554,06 | 631,31 | 2166,24 | 1488,28 | 1498,64 |
| 2005 | 1335,65 | 721,22 | 1719,14 | 1600,87 | 1392,76 |
| 2006 | 1692,81 | 756,30 | 2304,85 | 1482,77 | 1590,74 |
| 2007 | 1512,67 | 784,92 | 1972,41 | 1251,52 | 1400,99 |
| 2008 | 1235,20 | 1296,18 | 1087,43 | 2434,49 | 1600,87 |
| 2009 | 1515,65 | 933,65 | 1858,79 | 1620,82 | 1521,87 |
| 2010 | 1613,02 | 815,14 | 2120,71 | 1632,35 | 1586,57 |
| 2011 | 1645,47 | 894,99 | 2112,73 | 1559,77 | 1586,98 |
| 2012 | 1503,83 | 897,26 | 1867,55 | 1597,17 | 1505,89 |
| 2013 | 1591,41 | 1181,42 | 1783,70 | 1712,49 | 1605,09 |

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

| | | | | | |
|-------------|---------|---------|---------|---------|----------------|
| 2014 | 1536,41 | 1487,38 | 1452,31 | 1734,52 | 1583,78 |
| 2015 | 1399,47 | 1326,22 | 1345,66 | 2084,54 | 1599,78 |
| 2016 | 1629,79 | 1377,08 | 1700,80 | 1632,89 | 1610,66 |
| 2017 | 1442,11 | 1567,30 | 1226,39 | 1798,40 | 1543,78 |
| 2018 | 1680,83 | 896,18 | 2172,56 | 1347,73 | 1543,87 |
| 2019 | 1594,29 | 1506,98 | 1536,08 | 1588,99 | 1576,65 |
| 2020 | 1534,60 | 1162,30 | 1708,73 | 1989,45 | 1654,84 |

II.3.3.1 Cas du bassin versant de la rivière RUVYIRONZA

Les précipitations moyennes annuelles du BV de la rivière RUVYIRONZA ont également été calculées par la méthode se servant le polygone de THIESSEN. Le BV de la rivière RUVYIRONZA fait partie de ceux qui ont plus de stations météorologiques qui le couvrent, car elle possède 9 stations qui sont plus ou moins uniformément réparties sur toute sa superficie ce qui nous apporterait des valeurs plus proches de celles réelles. Cependant, lors du calcul des précipitations moyennes annuelles, seules 5 stations nous ont servi car les contraintes liées à l'indisponibilité des données des 4 autres stations, les interruptions très longues des séries des 4 stations, nous ont amenés à utiliser les données des 5 stations représentées dans le tableau synthétisant les résultats des précipitations moyennes annuelles.

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

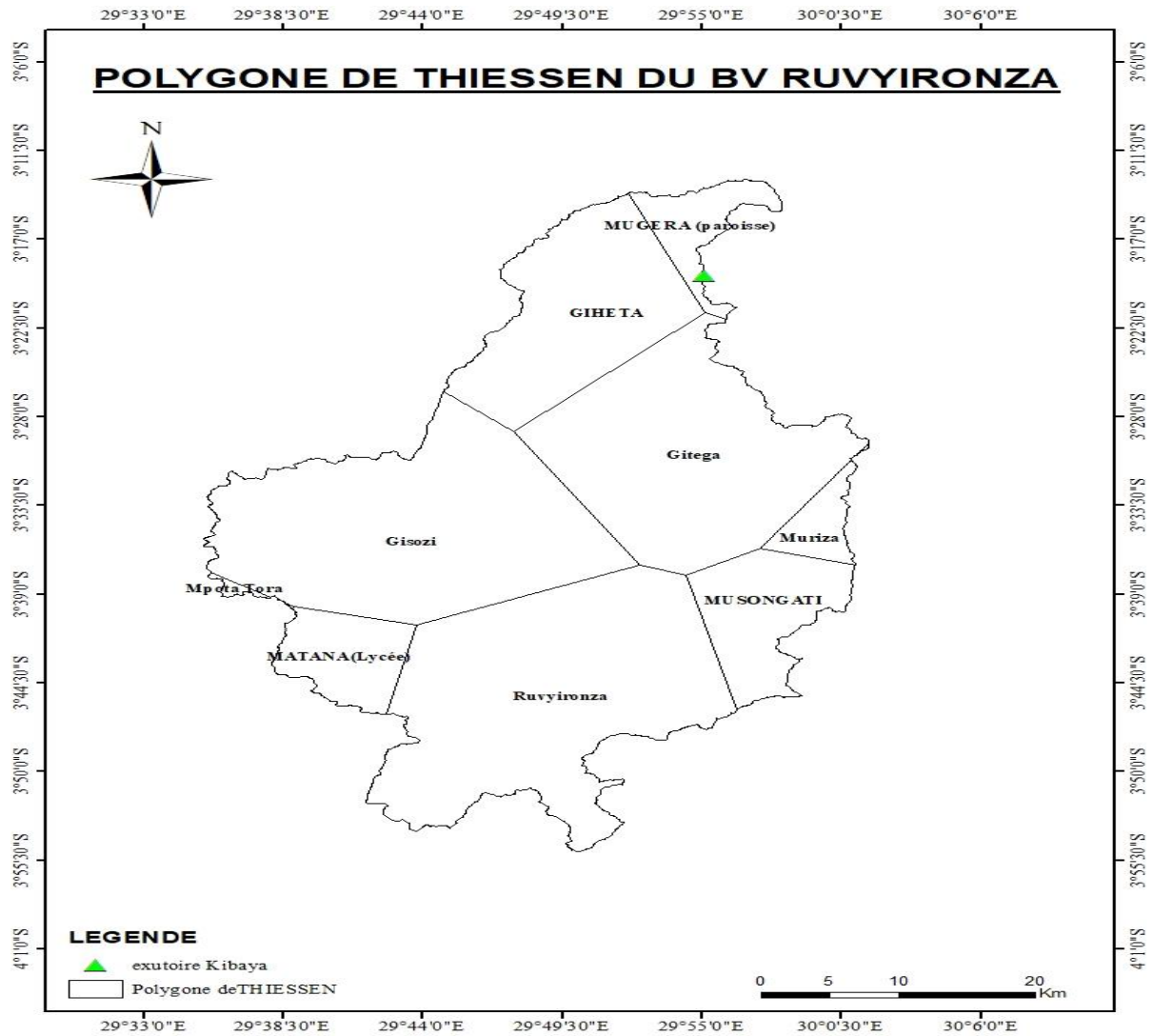


FIGURE II-2: Polygone de THIESSEN du bassin versant de la rivière RUVYIRONZA

Tableau II-5: Synthèse des précipitations moyennes annuelles du BV de la rivière RUVYIRONZA

| Stations | GITEGA | GISOZI | RUVYI RONZA | GIHETA | MUSO NGATI | |
|------------------------|-----------|-----------|----------------|-----------|---------------|----------------|
| $\frac{A_i}{\sum A_i}$ | 0,3003291 | 0,3971098 | 0,2187452 | 0,0209613 | 0,0199875 | Pm |
| Années | | | | | | |
| 1991 | 1079,70 | 1269,1 | 1342,60 | 1466,53 | 1383,61 | 1180,32 |
| 1992 | 1200,20 | 1368,7 | 1255,40 | 1265,08 | 1473,44 | 1234,56 |
| 1993 | 1263,40 | 1148,5 | 1266,80 | 1107,12 | 1386,39 | 1163,54 |
| 1994 | 1011,50 | 1223,65 | 1209,65 | 1239,32 | 1274,34 | 1105,76 |
| 1995 | 1097,60 | 1304,1 | 1580,50 | 1315,12 | 1248,01 | 1245,75 |

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

| | | | | | | |
|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|----------------|
| 1996 | 1532,20 | 1410,3 | 1037,90 | 1011,02 | 1078,36 | 1289,99 |
| 1997 | 1179,70 | 1195,8 | 1282,20 | 1142,91 | 1306,11 | 1159,7 |
| 1998 | 1250,30 | 1726,8 | 1291,10 | 1287,37 | 1446,03 | 1399,54 |
| 1999 | 1293,20 | 1331,8 | 1239,60 | 1078,14 | 1439,29 | 1239,78 |
| 2000 | 1205,90 | 1294 | 1002,54 | 1247,98 | 1215,41 | 1145,78 |
| 2001 | 1383,10 | 1428,1 | 1394,98 | 1283,62 | 1458,50 | 1343,7 |
| 2002 | 1141,26 | 1982,4 | 1265,90 | 1114,83 | 1120,11 | 1452,65 |
| 2003 | 1390,60 | 1391,89 | 1369,20 | 1393,17 | 1335,86 | 1325,78 |
| 2004 | 1394,80 | 1235,3 | 1196,90 | 1162,12 | 1292,08 | 1221,45 |
| 2005 | 1444,50 | 1232,08 | 1102,76 | 1368,00 | 1636,27 | 1225,7 |
| 2006 | 1676,10 | 1409,7 | 1476,60 | 1488,33 | 1681,36 | 1450,99 |
| 2007 | 1631,98 | 1598,9 | 1572,09 | 1597,72 | 1268,42 | 1527,8 |
| 2008 | 1281,50 | 1457,3 | 1352,80 | 1202,06 | 1085,93 | 1306,4 |
| 2009 | 1391,50 | 1665,2 | 1252,70 | 1107,43 | 1502,92 | 1406,45 |
| 2010 | 1317,60 | 1496,3 | 1744,50 | 1395,51 | 1437,81 | 1429,5 |
| 2011 | 1453,70 | 1334,1 | 1460,05 | 1220,78 | 1411,84 | 1339,56 |
| 2012 | 1440,90 | 1493,8 | 1501,75 | 1524,31 | 1664,60 | 1419,67 |
| 2013 | 1482,60 | 1510,66 | 1382,88 | 1230,53 | 1667,15 | 1406,78 |
| 2014 | 1264,16 | 1382,3 | 1630,10 | 1095,02 | 1078,25 | 1329,67 |
| 2015 | 1291,60 | 1736,3 | 1288,30 | 1222,63 | 1635,81 | 1417,54 |
| 2016 | 1590,40 | 1594,75 | 1569,30 | 1579,06 | 1217,75 | 1511,65 |
| 2017 | 1305,40 | 1396,3 | 1175,60 | 1082,68 | 913,81 | 1244,65 |
| 2018 | 1299,52 | 1396,3 | 1348,06 | 1211,15 | 1181,39 | 1288,65 |
| 2019 | 1226,40 | 1411,6 | 1101,40 | 1348,17 | 1372,90 | 1225,51 |
| 2020 | 1597,30 | 1444,8 | 1671,70 | 1526,30 | 1426,91 | 1479,65 |

II.4. Amélioration des trois modèles hydrologiques existants par simulation.

Le but principal du présent travail étant d'améliorer 3 modèles hydrologiques existants afin de les rendre exploitables sur les rivières des bassins versants ayant fait l'objet de notre étude. Plusieurs scénarii d'amélioration des modèles hydrologiques ont été effectués avec ou sans combinaison des paramètres d'amélioration aux variables de chaque modèle hydrologique et parmi lesquels ont été choisi le plu performant pour chaque cas de modèle étudié.

Les résultats correspondant à ces différents cas étudiés ont été synthétisés dans les tableaux ci-dessous :

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

II.4.1 Synthèse des résultats obtenus des scénarii étudiés.

a. Cas du bassin versant de la rivière NTAHANGWA

Tableau II-6: Modèle OL'DEKOP

| Description du modèle | Paramètres d'amélioration | | Critère de NASH en (%) |
|--|---------------------------|-------------|------------------------|
| | α | β | |
| $Q = P - E \times \tanh\left(\frac{P}{E}\right)$ | Sans | Sans | 46,84 |
| $Q = P - \alpha E \times \tanh\left(\frac{P}{\alpha E}\right)$ | 0,98128 | Sans | 70,80 |
| $Q = P^\alpha - \beta E \times \tanh\left(\frac{P^\alpha}{\beta E}\right)$ | 1,002506667 | 0,999883333 | 76,67 |
| $Q = P^\alpha - E^\beta \times \tanh\left(\frac{P^\alpha}{E^\beta}\right)$ | 1,002506667 | 0,999933333 | 76,65 |
| $Q = \alpha P - E \times \tanh\left(\frac{\alpha P}{E}\right)$ | 1,018636667 | Sans | 76,85 |
| $Q = P^\alpha - E \times \tanh\left(\frac{P^\alpha}{E}\right)$ | 1,002506667 | Sans | 76,68 |
| $Q = P - E^\beta \times \tanh\left(\frac{P}{E^\beta}\right)$ | Sans | 0,994331 | 75,74 |
| $Q = \alpha P - E^\beta \times \tanh\left(\frac{\alpha P}{E^\beta}\right)$ | 0,997166667 | 0,994331 | 77,02 |

Tableau II-7:Modèle TIXERONT

| Description du modèle | Paramètres d'amélioration | | Critère de NASH en (%) |
|------------------------------|---------------------------|---------|------------------------|
| | α | β | |
| $Q = \sqrt{(P^2 + E^2)} - E$ | Sans | Sans | -2093,08 |

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

| | | | |
|---|-------------|-------------|-------|
| $Q = \sqrt{(P^{2\alpha} + E^{2\beta})} - E^\beta$ | 0,976796187 | 1,00006 | 89,31 |
| $Q = \sqrt{((\alpha P)^2 + (\beta E)^2)} - (\beta E)$ | 1,000158333 | 1,523796667 | 90,11 |
| $Q = \sqrt{(P^2 + (\beta E)^2)} - (\beta E)^2$ | 1,51477711 | Sans | 89,69 |
| $Q = \sqrt{((\alpha P)^2 + E^2)} - E$ | 0,843877203 | Sans | 88,83 |
| $Q = \sqrt{(P^{2\alpha} + E^2)} - E$ | 0,976796187 | Sans | 89,34 |
| $Q = \sqrt{(P^{2\alpha} + (\beta E)^2)} - (\beta E)$ | 0,976796187 | 1,000084667 | 89,34 |
| $Q = \sqrt{(P^2 + E^{2\beta})} - E^\beta$ | Sans | 1,060631867 | 91,28 |

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

Tableau II-8 : Modèle SCS

| Description du modèle | Paramètres d'amélioration | | Critère de NASH en (%) |
|--|---------------------------|-------------|------------------------|
| | α | β | |
| $Q = \frac{\left(P - \frac{E}{6}\right)^2}{\left(P + \frac{2E}{3}\right)}$ | Sans | Sans | -2523 |
| $Q = \frac{\left(\alpha P - \frac{E\beta}{6}\right)^2}{\left(\alpha P + \frac{2E\beta}{3}\right)}$ | 1,001743667 | 1,061466667 | 92,20 |
| $Q = \frac{\left(P - \frac{E\beta}{6}\right)^2}{\left(P + \frac{2E\beta}{3}\right)}$ | Sans | 1,060895133 | 92,18 |
| $Q = \frac{\left(P^\alpha - \frac{E\beta}{6}\right)^2}{\left(P^\alpha + \frac{2E\beta}{3}\right)}$ | 0,999982633 | 1,060895133 | 92,19 |
| $Q = \frac{\left(P - \frac{\beta E}{6}\right)^2}{\left(P + \frac{2\beta E}{3}\right)}$ | Sans | 1,526286657 | 91,12 |
| $Q = \frac{\left(\alpha P - \frac{\beta E}{6}\right)^2}{\left(\alpha P + \frac{2\beta E}{3}\right)}$ | 1,000043333 | 1,526286657 | 91,12 |
| $Q = \frac{\left(P^\alpha - \frac{\beta E}{6}\right)^2}{\left(P^\alpha + \frac{2\beta E}{3}\right)}$ | 1,000003667 | 1,526286657 | 89,98 |
| $Q = \frac{\left(P^\alpha - \frac{E}{6}\right)^2}{\left(P^\alpha + \frac{2E}{3}\right)}$ | 0,975282667 | Sans | 90,24 |

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

b. Cas du bassin versant de la rivière RUVYIRONZA (exutoire Kibaya)

Tableau II-9:Modèle TIXERONT

| Description du modèle | Paramètres d'amélioration | | Critère de NASH en (%) |
|---|---------------------------|-------------|------------------------|
| | α | β | |
| $Q = \sqrt{(P^2 + E^2)} - E$ | Sans | Sans | -62,63 |
| $Q = \sqrt{(P^{2\alpha} + E^{2\beta})} - E^\beta$ | 0,999921333 | 0,943248667 | 94,62 |
| $Q = \sqrt{((\alpha P)^2 + (\beta E)^2)} - (\beta E)$ | 1,12877 | 1,003638 | 94,08 |
| $Q = \sqrt{(P^2 + (\beta E)^2)} - (\beta E)^2$ | Sans | 0,689598 | 93,82 |
| $Q = \sqrt{((\alpha P)^2 + E^2)} - E$ | 1,12877 | Sans | 94,16 |
| $Q = \sqrt{(P^{2\alpha} + E^2)} - E$ | 1,016813333 | Sans | 94,58 |
| $Q = \sqrt{(P^{2\alpha} + (\beta E)^2)} - (\beta E)$ | 1,016813333 | 0,999895667 | 94,59 |
| $Q = \sqrt{(P^2 + E^{2\beta})} - E^\beta$ | Sans | 0,943248667 | 94,66 |
| $Q = \sqrt{((\alpha P)^2 + E^{2\beta})} - E^{2\beta}$ | 1,12877 | 1,00011 | 94,14 |

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

2. Modèle SCS

Tableau II-10 : Modèle SCS

| Description du modèle | Paramètres d'amélioration | | Critère de NASH en (%) |
|--|---------------------------|-------------|------------------------|
| | α | β | |
| $Q = \frac{\left(P - \frac{E}{6}\right)^2}{\left(P + \frac{2E}{3}\right)}$ | Sans | Sans | -38,23 |
| $Q = \frac{\left(\alpha P - \frac{E^\beta}{6}\right)^2}{\left(\alpha P + \frac{2E^\beta}{3}\right)}$ | 0,999564 | 0,949599667 | 94,31 |
| $Q = \frac{\left(P - \frac{E^\beta}{6}\right)^2}{\left(P + \frac{2E^\beta}{3}\right)}$ | Sans | 0,949599667 | 94,34 |
| $Q = \frac{\left(P^\alpha - \frac{E^\beta}{6}\right)^2}{\left(P^\alpha + \frac{2E^\beta}{3}\right)}$ | 0,999875 | 0,949599667 | 94,28 |
| $Q = \frac{\left(P - \frac{\beta E}{6}\right)^2}{\left(P + \frac{2\beta E}{3}\right)}$ | Sans | 0,715299333 | 93,76 |
| $Q = \frac{\left(\alpha P - \frac{\beta E}{6}\right)^2}{\left(\alpha P + \frac{2\beta E}{3}\right)}$ | 1,112889 | 1,001736667 | 93,82 |
| $Q = \frac{\left(P^\alpha - \frac{\beta E}{6}\right)^2}{\left(P^\alpha + \frac{2\beta E}{3}\right)}$ | 1,014839444 | 1,000566667 | 94,23 |
| $Q = \frac{\left(P^\alpha - \frac{E}{6}\right)^2}{\left(P^\alpha + \frac{2E}{3}\right)}$ | 1,014839444 | Sans | 94,23 |
| $Q = \frac{\left(\alpha P - \frac{E}{6}\right)^2}{\left(\alpha P + \frac{2E}{3}\right)}$ | 1,112889 | Sans | 93,85 |

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

Tableau II-11 : Modèle OL'DEKOP

| Description du modèle | Paramètres d'amélioration | | Critère de NASH en (%) |
|--|---------------------------|-------------|------------------------|
| | α | β | |
| $Q = P - E \times \tanh\left(\frac{P}{E}\right)$ | Sans | Sans | -729,66 |
| $Q = P - \alpha E \times \tanh\left(\frac{P}{\alpha E}\right)$ | Sans | 0,537468 | 94,25 |
| $Q = P^\alpha - \beta E \times \tanh\left(\frac{P^\alpha}{\beta E}\right)$ | 1,000008 | 0,537468 | 94,25 |
| $Q = P^\alpha - E^\beta \times \tanh\left(\frac{P^\alpha}{E^\beta}\right)$ | 1,000216667 | 0,908121 | 90,25 |
| $Q = \alpha P - E \times \tanh\left(\frac{\alpha P}{E}\right)$ | 1,283943333 | Sans | 78,07 |
| $Q = P^\alpha - E \times \tanh\left(\frac{P^\alpha}{E}\right)$ | 1,034774 | Sans | 90,25 |
| $Q = P - E^\beta \times \tanh\left(\frac{P}{E^\beta}\right)$ | Sans | 0,908121 | 94,82 |
| $Q = \alpha P - E^\beta \times \tanh\left(\frac{\alpha P}{E^\beta}\right)$ | 1,283943333 | 1,000224667 | 90,28 |

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

c. Cas du bassin versant de la rivière RUVYIRONZA (Embouchure avec WAGA)

Tableau II-12:Modèle TIXERONT

| Description du modèle | Paramètres d'amélioration | | Critère de NASH en (%) |
|---|---------------------------|---------|------------------------|
| | α | β | |
| $Q = \sqrt{(P^2 + E^2)} - E$ | Sans | Sans | -5244,71 |
| $Q = \sqrt{(P^{2\alpha} + E^{2\beta})} - E^\beta$ | 0,9999533333 | 1,1632 | 93,23 |
| $Q = \sqrt{((\alpha P)^2 + (\beta E)^2)} - (\beta E)$ | 1,000686667 | 3,0252 | 93,42 |
| $Q = \sqrt{(P^2 + (\beta E)^2)} - (\beta E)^2$ | Sans | 3,0252 | 93,36 |
| $Q = \sqrt{((\alpha P)^2 + E^2)} - E$ | 0,606906667 | Sans | 90,96 |
| $Q = \sqrt{(P^{2\alpha} + E^2)} - E$ | 0,9303033333 | Sans | 88,36 |
| $Q = \sqrt{(P^{2\alpha} + (\beta E)^2)} - (\beta E)$ | 1,0000433333 | 3,0252 | 93,39 |
| $Q = \sqrt{(P^2 + E^{2\beta})} - E^\beta$ | Sans | 1,16324 | 93,25 |

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

Tableau II-13: modèle SCS

| Description du modèle | Paramètres d'amélioration | | Critère de NASH en (%) |
|--|---------------------------|-------------|------------------------|
| | α | β | |
| $Q = \frac{\left(P - \frac{E}{6}\right)^2}{\left(P + \frac{2E}{3}\right)}$ | Sans | Sans | -5865,75 |
| $Q = \frac{\left(\alpha P - \frac{E^\beta}{6}\right)^2}{\left(\alpha P + \frac{2E^\beta}{3}\right)}$ | 0,786736667 | 1,140709 | 94,18 |
| $Q = \frac{\left(P - \frac{E^\beta}{6}\right)^2}{\left(P + \frac{2E^\beta}{3}\right)}$ | Sans | 1,140709 | 94,18 |
| $Q = \frac{\left(P^\alpha - \frac{E^\beta}{6}\right)^2}{\left(P^\alpha + \frac{2E^\beta}{3}\right)}$ | 1,000011333 | 1,140709 | 94,18 |
| $Q = \frac{\left(P - \frac{\beta E}{6}\right)^2}{\left(P + \frac{2\beta E}{3}\right)}$ | Sans | 2,594954433 | 95,05 |
| $Q = \frac{\left(\alpha P - \frac{\beta E}{6}\right)^2}{\left(\alpha P + \frac{2\beta E}{3}\right)}$ | 1,000343333 | 2,594954433 | 95,04 |
| $Q = \frac{\left(P^\alpha - \frac{\beta E}{6}\right)^2}{\left(P^\alpha + \frac{2\beta E}{3}\right)}$ | 0,999986667 | 2,594954433 | 95,05 |
| $Q = \frac{\left(P^\alpha - \frac{E}{6}\right)^2}{\left(P^\alpha + \frac{2E}{3}\right)}$ | 0,931131777 | Sans | 91,16 |
| $Q = \frac{\left(\alpha P - \frac{E}{6}\right)^2}{\left(\alpha P + \frac{2E}{3}\right)}$ | 0,608914443 | Sans | 93,09 |

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

Tableau II-14 : modèle OL'DEKOP

| Désignation du modèle | Paramètres d'amélioration | | Critère de NASH en (%) |
|--|---------------------------|-------------|------------------------|
| | α | β | |
| $Q = P - E \times \tanh\left(\frac{P}{E}\right)$ | Sans | Sans | -1532,63 |
| $Q = P - \alpha E \times \tanh\left(\frac{P}{\alpha E}\right)$ | 1,51619 | Sans | 94,38 |
| $Q = P^\alpha - \beta E \times \tanh\left(\frac{P^\alpha}{\beta E}\right)$ | 0,9665717 | 1,000160333 | 95,27 |
| $Q = P^\alpha - E^\beta \times \tanh\left(\frac{P^\alpha}{E^\beta}\right)$ | 0,9665717 | 0,999961667 | 95,27 |
| $Q = \alpha P - E \times \tanh\left(\frac{\alpha P}{E}\right)$ | 0,786736667 | Sans | 95,31 |
| $Q = P^\alpha - E \times \tanh\left(\frac{P^\alpha}{E}\right)$ | 0,9665717 | Sans | 95,27 |
| $Q = P - E^\beta \times \tanh\left(\frac{P}{E^\beta}\right)$ | Sans | 1,061373667 | 94,04 |
| $Q = \alpha P - E^\beta \times \tanh\left(\frac{\alpha P}{E^\beta}\right)$ | 1,000383333 | 1,000216667 | 94,01 |

II.4.2 Scenarii plus performants des modèles hydrologiques améliorés

II.4.2.1 Cas du BV de la rivière NTAHANGWA

a. Modèle OL'DEKOP

Le scenario de ce modèle ayant été le plus préformant lors de son amélioration, est celui où l'on a appliqué un paramètre α comme coefficient aux précipitations ainsi que le paramètre β comme puissance à l'évapotranspiration.

$$Q = \alpha P - E^\beta \times \tanh\left(\frac{\alpha P}{E^\beta}\right) \quad [\text{II-3}]$$

| Années | Pm (en mm) | ETP(en mm) | A | β | Q ca(en mm) | Qobs(en mm) | NSHE |
|--------|------------|------------|-------------|----------|-------------|-------------|-------|
| 1991 | 1481,20 | 992,25 | 0,997166667 | 0,994331 | 2,15 | 2,13 | 77,02 |
| 1992 | 1490,65 | 994,03 | 0,997166667 | 0,994331 | 2,17 | 2,15 | |
| 1993 | 1489,63 | 1037,83 | 0,997166667 | 0,994331 | 2,08 | 2,09 | |
| 1994 | 1464,89 | 968,34 | 0,997166667 | 0,994331 | 2,16 | 2,21 | |
| 1995 | 1477,64 | 996,33 | 0,997166667 | 0,994331 | 2,13 | 2,14 | |
| 1996 | 1378,67 | 877,03 | 0,997166667 | 0,994331 | 2,11 | 2,17 | |
| 1997 | 1456,67 | 946,91 | 0,997166667 | 0,994331 | 2,18 | 2,18 | |
| 1998 | 1433,21 | 1048,59 | 0,997166667 | 0,994331 | 1,89 | 1,86 | |
| 1999 | 1372,60 | 949,64 | 0,997166667 | 0,994331 | 1,93 | 1,90 | |
| 2000 | 1551,60 | 1016,11 | 0,997166667 | 0,994331 | 2,31 | 2,28 | |
| 2001 | 1412,87 | 1011,99 | 0,997166667 | 0,994331 | 1,91 | 1,98 | |
| 2002 | 1367,99 | 985,83 | 0,997166667 | 0,994331 | 1,84 | 1,86 | |
| 2003 | 1479,32 | 1026,42 | 0,997166667 | 0,994331 | 2,07 | 2,06 | |
| 2004 | 1498,64 | 1061,96 | 0,997166667 | 0,994331 | 2,05 | 2,10 | |
| 2005 | 1392,76 | 935,10 | 0,997166667 | 0,994331 | 2,02 | 1,99 | |
| 2006 | 1590,74 | 1108,97 | 0,997166667 | 0,994331 | 2,22 | 2,18 | |

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

| | | | | | | |
|------|---------|---------|-------------|----------|------|------|
| 2007 | 1400,99 | 1049,10 | 0,997166667 | 0,994331 | 1,80 | 1,88 |
| 2008 | 1600,87 | 1058,66 | 0,997166667 | 0,994331 | 2,36 | 2,26 |
| 2009 | 1521,87 | 1037,37 | 0,997166667 | 0,994331 | 2,17 | 2,21 |
| 2010 | 1586,57 | 1031,11 | 0,997166667 | 0,994331 | 2,38 | 2,34 |
| 2011 | 1586,98 | 1024,27 | 0,997166667 | 0,994331 | 2,39 | 2,38 |
| 2012 | 1505,89 | 1073,17 | 0,997166667 | 0,994331 | 2,05 | 2,04 |
| 2013 | 1605,90 | 1101,12 | 0,997166667 | 0,994331 | 2,28 | 2,19 |
| 2014 | 1583,78 | 1079,53 | 0,997166667 | 0,994331 | 2,26 | 2,24 |
| 2015 | 1599,78 | 1106,29 | 0,997166667 | 0,994331 | 2,25 | 2,23 |
| 2016 | 1610,66 | 1075,08 | 0,997166667 | 0,994331 | 2,35 | 2,31 |
| 2017 | 1543,78 | 1085,21 | 0,997166667 | 0,994331 | 2,13 | 2,20 |
| 2018 | 1543,87 | 1096,62 | 0,997166667 | 0,994331 | 2,11 | 2,05 |
| 2019 | 1576,65 | 1081,38 | 0,997166667 | 0,994331 | 2,23 | 2,23 |
| 2020 | 1654,84 | 1101,11 | 0,997166667 | 0,994331 | 2,42 | 2,38 |

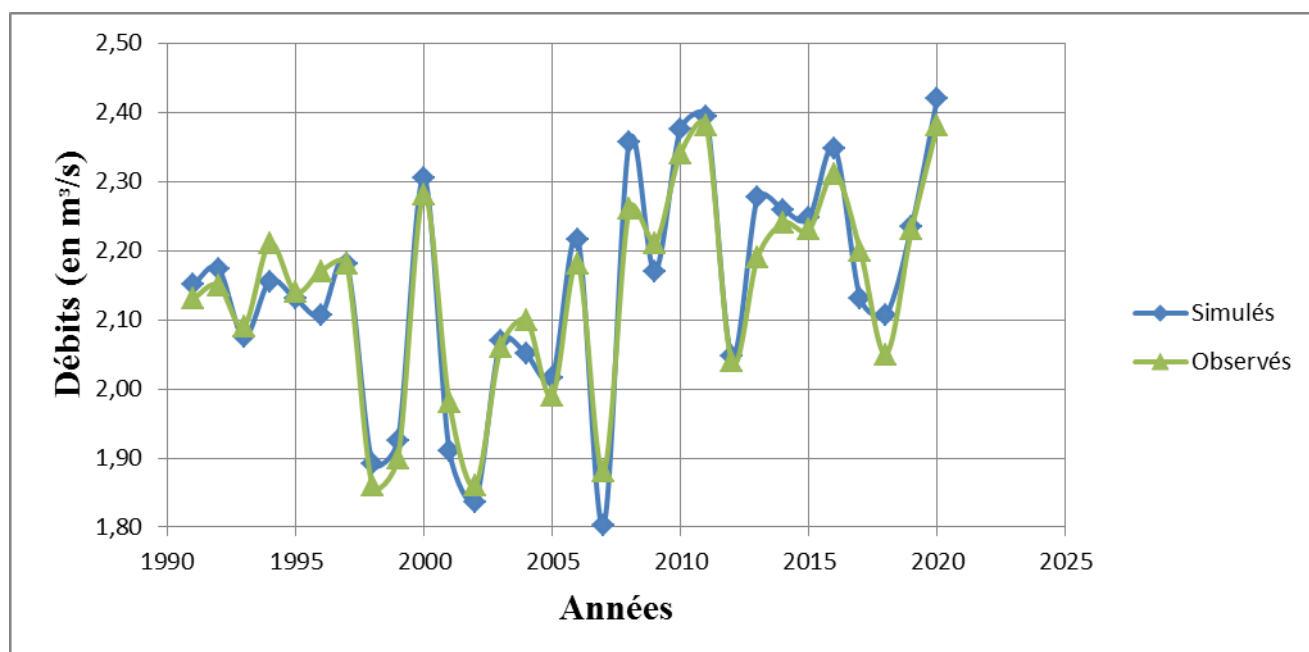


FIGURE II-3: Représentation graphique des allures des débits simulés et celles des débits observés par le modèle amélioré d'OL'DEKOP.

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

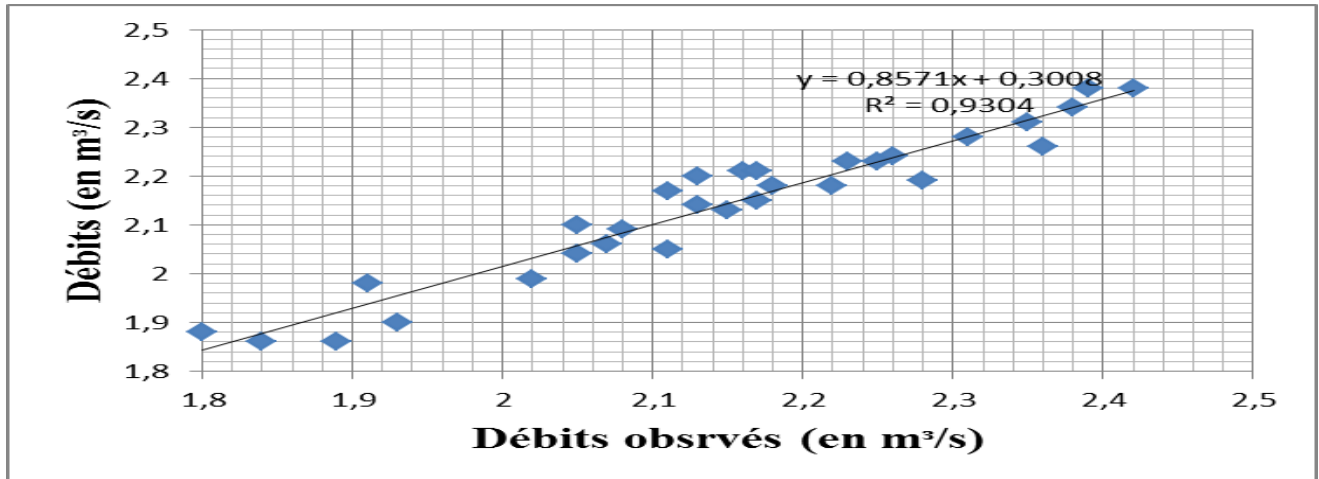


FIGURE II-4: Ajustement des débits simulés et les débits observés par la méthode des moindres carrés ainsi que le coefficient de corrélation pour le modèle OL'DEKOP

b. Modèle TIXERONT

Le scénario de ce modèle ayant été le plus performant lors de son amélioration est celui où l'on a affecté le paramètre β comme une puissance de l'évapotranspiration.

$$Q = \sqrt{(P^2 + E^{2\beta})} - E^\beta \quad [II-4]$$

| Années | Pm (en mm) | ETP(en mm) | β | Q Sim(en m³/s) | Qobs(en m³/s) | NSHE |
|--------|------------|------------|------------|-----------------|----------------|-------|
| 1991 | 1481,20 | 992,25 | 1,06063187 | 2,14 | 2,13 | 91,26 |
| 1992 | 1490,65 | 994,03 | 1,06063187 | 2,16 | 2,15 | |
| 1993 | 1489,63 | 1037,83 | 1,06063187 | 2,08 | 2,09 | |
| 1994 | 1464,89 | 968,34 | 1,06063187 | 2,14 | 2,21 | |
| 1995 | 1477,64 | 996,33 | 1,06063187 | 2,12 | 2,14 | |
| 1996 | 1378,67 | 877,03 | 1,06063187 | 2,07 | 2,17 | |
| 1997 | 1456,67 | 946,91 | 1,06063187 | 2,15 | 2,18 | |
| 1998 | 1433,21 | 1048,59 | 1,06063187 | 1,93 | 1,86 | |
| 1999 | 1372,60 | 949,64 | 1,06063187 | 1,94 | 1,90 | |
| 2000 | 1551,60 | 1016,11 | 1,06063187 | 2,27 | 2,28 | |
| 2001 | 1412,87 | 1011,99 | 1,06063187 | 1,94 | 1,98 | |
| 2002 | 1367,99 | 985,83 | 1,06063187 | 1,87 | 1,86 | |
| 2003 | 1479,32 | 1026,42 | 1,06063187 | 2,08 | 2,06 | |
| 2004 | 1498,64 | 1061,96 | 1,06063187 | 2,07 | 2,10 | |

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

| | | | | | |
|------|---------|---------|------------|------|------|
| 2005 | 1392,76 | 935,10 | 1,06063187 | 2,01 | 1,99 |
| 2006 | 1590,74 | 1108,97 | 1,06063187 | 2,22 | 2,18 |
| 2007 | 1400,99 | 1049,10 | 1,06063187 | 1,86 | 1,88 |
| 2008 | 1600,87 | 1058,66 | 1,06063187 | 2,32 | 2,26 |
| 2009 | 1521,87 | 1037,37 | 1,06063187 | 2,16 | 2,21 |
| 2010 | 1586,57 | 1031,11 | 1,06063187 | 2,33 | 2,34 |
| 2011 | 1586,98 | 1024,27 | 1,06063187 | 2,35 | 2,38 |
| 2012 | 1505,89 | 1073,17 | 1,06063187 | 2,07 | 2,04 |
| 2013 | 1605,90 | 1101,12 | 1,06063187 | 2,27 | 2,19 |
| 2014 | 1583,78 | 1079,53 | 1,06063187 | 2,25 | 2,24 |
| 2015 | 1599,78 | 1106,29 | 1,06063187 | 2,24 | 2,23 |
| 2016 | 1610,66 | 1075,08 | 1,06063187 | 2,32 | 2,31 |
| 2017 | 1543,78 | 1085,21 | 1,06063187 | 2,14 | 2,20 |
| 2018 | 1543,87 | 1096,62 | 1,06063187 | 2,12 | 2,05 |
| 2019 | 1576,65 | 1081,38 | 1,06063187 | 2,23 | 2,23 |
| 2020 | 1654,84 | 1101,11 | 1,06063187 | 2,39 | 2,38 |

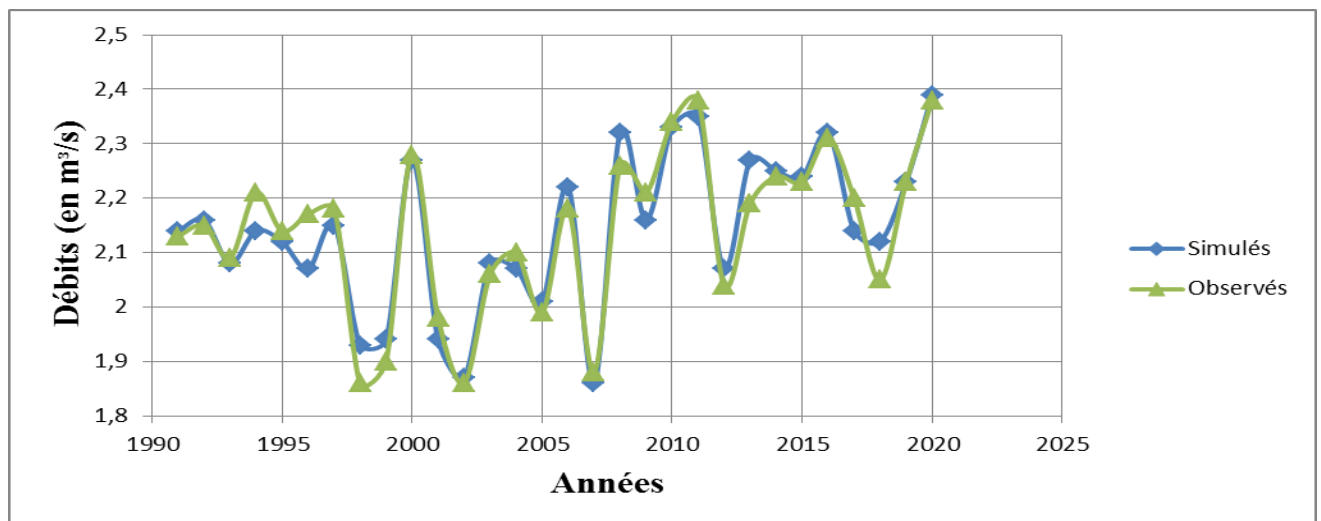


FIGURE II-5: Représentation graphique des allures des débits simulés et celles des débits observés par le modèle amélioré de TIXERONT

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

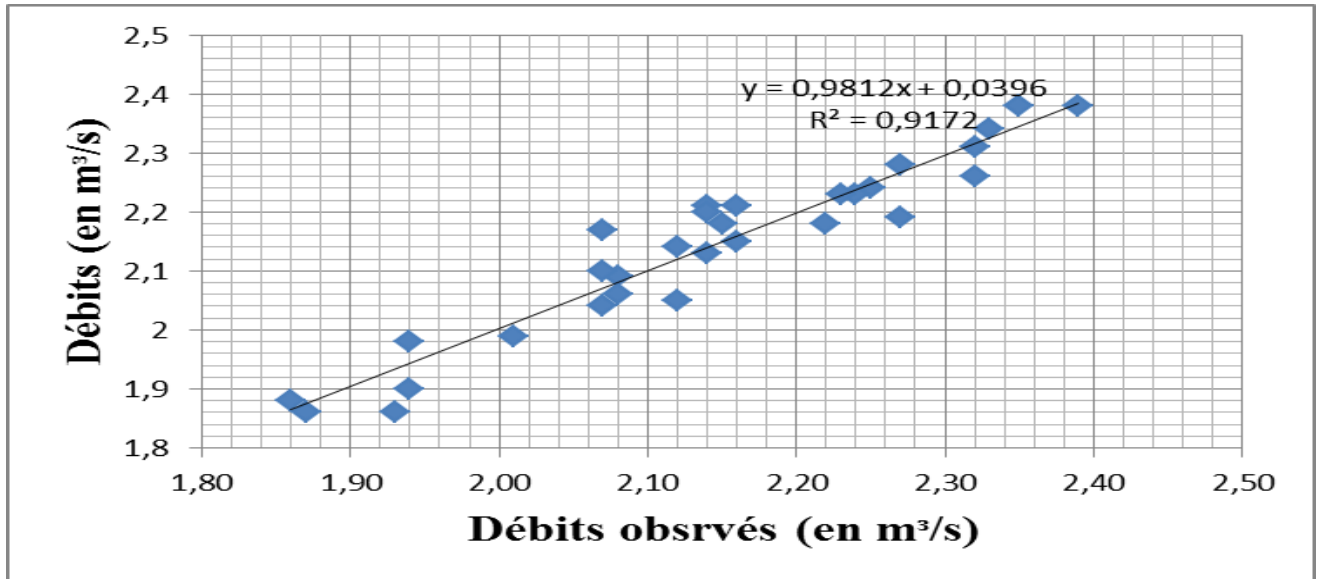


FIGURE II-6: Ajustement des débits simulés et les débits observés par la méthode des moindres carrés ainsi que le coefficient de corrélation pour le modèle TIXERONT

c. Modèle SCS

Ce modèle a plus été amélioré par un scénario où on a affecté le paramètre α comme coefficient aux précipitations et le paramètre β comme puissance sur l'évapotranspiration.

$$Q = \frac{\left(P^\alpha - \frac{E^\beta}{6}\right)^2}{\left(P^\alpha + \frac{2E^\beta}{3}\right)} \quad [II-5]$$

| Années | Pm (en mm) | ETP(en mm) | α | β | QCalc (en m³/s) | QObs (en m³/s) | NSHE |
|--------|------------|------------|------------|------------|-----------------|----------------|-------|
| 1991 | 1481,20 | 992,25 | 1,00174367 | 1,06146667 | 2,14 | 2,13 | 91,99 |
| 1992 | 1490,65 | 994,03 | 1,00174367 | 1,06146667 | 2,16 | 2,15 | |
| 1993 | 1489,63 | 1037,83 | 1,00174367 | 1,06146667 | 2,08 | 2,09 | |
| 1994 | 1464,89 | 968,34 | 1,00174367 | 1,06146667 | 2,14 | 2,21 | |
| 1995 | 1477,64 | 996,33 | 1,00174367 | 1,06146667 | 2,13 | 2,14 | |
| 1996 | 1378,67 | 877,03 | 1,00174367 | 1,06146667 | 2,09 | 2,17 | |
| 1997 | 1456,67 | 946,91 | 1,00174367 | 1,06146667 | 2,16 | 2,18 | |
| 1998 | 1433,21 | 1048,59 | 1,00174367 | 1,06146667 | 1,92 | 1,86 | |
| 1999 | 1372,60 | 949,64 | 1,00174367 | 1,06146667 | 1,94 | 1,90 | |
| 2000 | 1551,60 | 1016,11 | 1,00174367 | 1,06146667 | 2,28 | 2,28 | |

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

| | | | | | | |
|------|---------|---------|------------|------------|------|------|
| 2001 | 1412,87 | 1011,99 | 1,00174367 | 1,06146667 | 1,93 | 1,98 |
| 2002 | 1367,99 | 985,83 | 1,00174367 | 1,06146667 | 1,86 | 1,86 |
| 2003 | 1479,32 | 1026,42 | 1,00174367 | 1,06146667 | 2,07 | 2,06 |
| 2004 | 1498,64 | 1061,96 | 1,00174367 | 1,06146667 | 2,06 | 2,10 |
| 2005 | 1392,76 | 935,10 | 1,00174367 | 1,06146667 | 2,02 | 1,99 |
| 2006 | 1590,74 | 1108,97 | 1,00174367 | 1,06146667 | 2,21 | 2,18 |
| 2007 | 1400,99 | 1049,10 | 1,00174367 | 1,06146667 | 1,84 | 1,88 |
| 2008 | 1600,87 | 1058,66 | 1,00174367 | 1,06146667 | 2,33 | 2,26 |
| 2009 | 1521,87 | 1037,37 | 1,00174367 | 1,06146667 | 2,16 | 2,21 |
| 2010 | 1586,57 | 1031,11 | 1,00174367 | 1,06146667 | 2,35 | 2,34 |
| 2011 | 1586,98 | 1024,27 | 1,00174367 | 1,06146667 | 2,36 | 2,38 |
| 2012 | 1505,89 | 1073,17 | 1,00174367 | 1,06146667 | 2,06 | 2,04 |
| 2013 | 1605,90 | 1101,12 | 1,00174367 | 1,06146667 | 2,27 | 2,19 |
| 2014 | 1583,78 | 1079,53 | 1,00174367 | 1,06146667 | 2,25 | 2,24 |
| 2015 | 1599,78 | 1106,29 | 1,00174367 | 1,06146667 | 2,24 | 2,23 |
| 2016 | 1610,66 | 1075,08 | 1,00174367 | 1,06146667 | 2,33 | 2,31 |
| 2017 | 1543,78 | 1085,21 | 1,00174367 | 1,06146667 | 2,13 | 2,20 |
| 2018 | 1543,87 | 1096,62 | 1,00174367 | 1,06146667 | 2,11 | 2,05 |
| 2019 | 1576,65 | 1081,38 | 1,00174367 | 1,06146667 | 2,23 | 2,23 |
| 2020 | 1654,84 | 1101,11 | 1,00174367 | 1,06146667 | 2,39 | 2,38 |

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

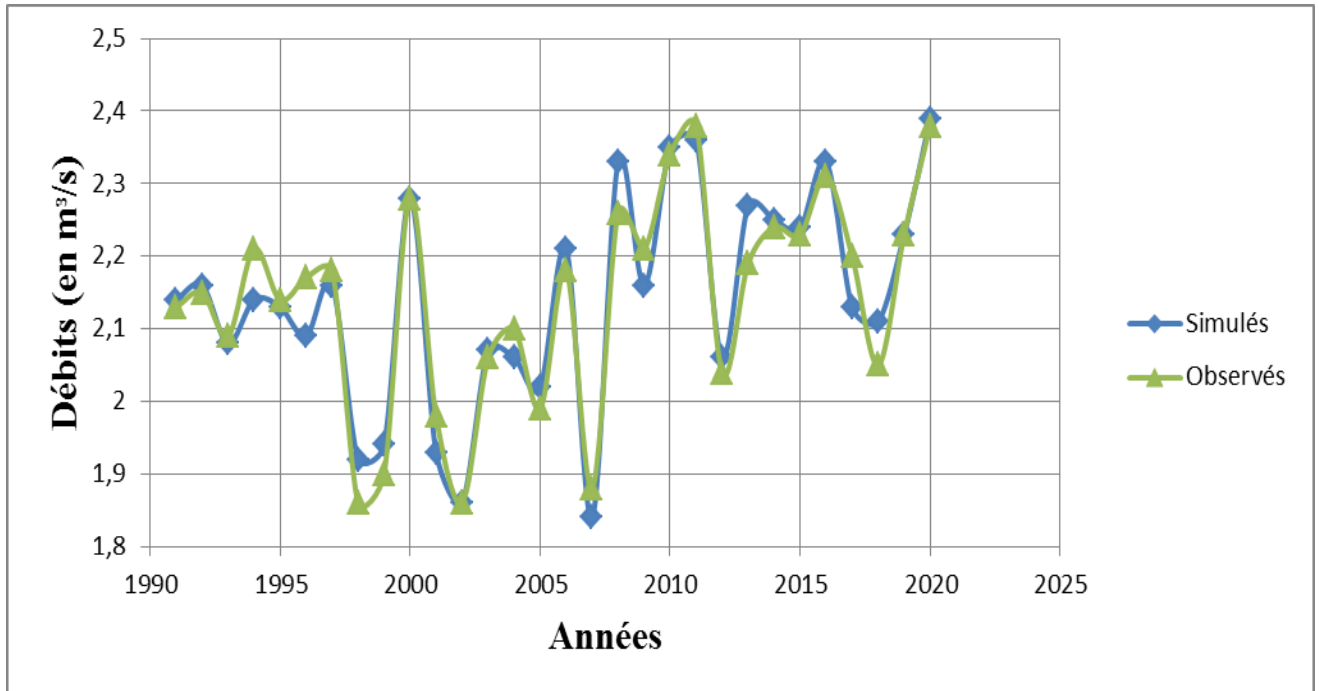


FIGURE II-7: Représentation graphique des allures des débits simulés et celle des débits observés pour le modèle SCS.

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

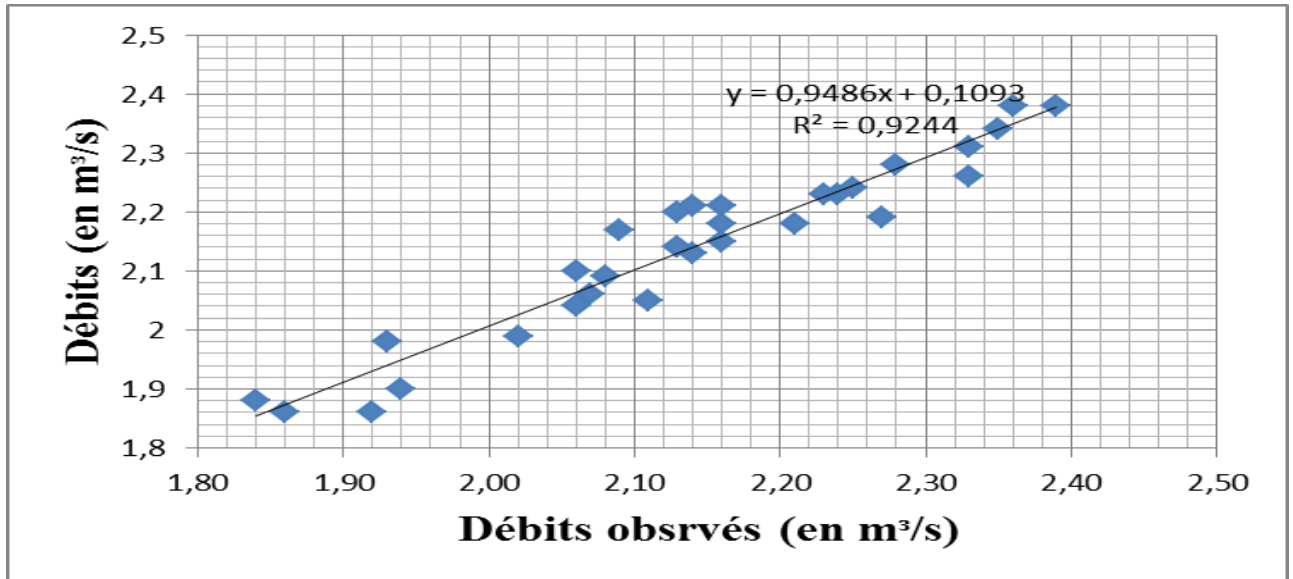


FIGURE II-8: Ajustement des débits simulés et les débits observés par la méthode des moindres carrés ainsi que le coefficient de corrélation pour le modèle SCS

II.4.2.2. Cas du bassin versant de la rivière RUVYIRONZA (Exutoire Kibaya)

Le profil en long du lit de la rivière RUVYIRONZA étant jaugé en deux endroits différents, cela nous a permis d'évaluer l'efficacité des 3 modèles hydrologiques en premier lieu vis-à-vis de l'exutoire situé à Kibaya, et au point situé à l'embouchure avec la rivière WAGA.

a. Modèle OL'DEKOP

Le scenario de ce modèle ayant été le plus préformant lors de son amélioration, est celui où l'on a appliqué un paramètre β comme puissance de l'évapotranspiration.

$$Q = P - E^\beta \times \tanh\left(\frac{P}{E^\beta}\right) \quad [II-6]$$

| Années | Pm (en mm) | ETP(en mm) | β | QCalc (en m³/s) | QObs (en m³/s) | NSHE |
|--------|------------|------------|----------|------------------|-----------------|-------|
| 1991 | 1180,32 | 878,22 | 0,908121 | 43,06 | 43,01 | 94,82 |
| 1992 | 1234,56 | 788,13 | 0,908121 | 48,76 | 46,27 | |
| 1993 | 1163,54 | 802,78 | 0,908121 | 44,14 | 42,00 | |
| 1994 | 1105,76 | 799,27 | 0,908121 | 40,83 | 38,52 | |
| 1995 | 1245,75 | 826,51 | 0,908121 | 48,34 | 46,95 | |

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

| | | | | | |
|------|---------|---------|----------|-------|-------|
| 1996 | 1289,99 | 813,20 | 0,908121 | 51,34 | 49,61 |
| 1997 | 1159,70 | 756,82 | 0,908121 | 45,20 | 41,77 |
| 1998 | 1399,54 | 841,97 | 0,908121 | 57,05 | 56,20 |
| 1999 | 1239,78 | 840,11 | 0,908121 | 47,61 | 46,59 |
| 2000 | 1145,78 | 889,89 | 0,908121 | 40,73 | 40,93 |
| 2001 | 1343,70 | 845,02 | 0,908121 | 53,64 | 52,84 |
| 2002 | 1452,65 | 924,11 | 0,908121 | 57,89 | 59,40 |
| 2003 | 1325,78 | 904,27 | 0,908121 | 50,92 | 51,76 |
| 2004 | 1221,45 | 873,03 | 0,908121 | 45,62 | 45,48 |
| 2005 | 1225,70 | 932,07 | 0,908121 | 44,27 | 45,74 |
| 2006 | 1450,99 | 880,33 | 0,908121 | 59,03 | 59,30 |
| 2007 | 1527,80 | 873,95 | 0,908121 | 63,80 | 63,92 |
| 2008 | 1306,40 | 855,29 | 0,908121 | 51,13 | 50,60 |
| 2009 | 1406,45 | 892,01 | 0,908121 | 56,05 | 56,62 |
| 2010 | 1429,50 | 932,13 | 0,908121 | 56,29 | 58,01 |
| 2011 | 1339,56 | 879,47 | 0,908121 | 52,42 | 52,59 |
| 2012 | 1419,67 | 885,05 | 0,908121 | 57,03 | 57,41 |
| 2013 | 1406,78 | 843,48 | 0,908121 | 57,44 | 56,64 |
| 2014 | 1329,67 | 918,53 | 0,908121 | 50,75 | 52,00 |
| 2015 | 1417,54 | 954,63 | 0,908121 | 54,96 | 57,29 |
| 2016 | 1511,65 | 1008,61 | 0,908121 | 59,05 | 62,95 |
| 2017 | 1244,65 | 946,19 | 0,908121 | 45,00 | 46,88 |
| 2018 | 1288,65 | 922,87 | 0,908121 | 48,21 | 49,53 |
| 2019 | 1225,51 | 898,89 | 0,908121 | 45,15 | 45,73 |
| 2020 | 1479,65 | 910,20 | 0,908121 | 59,90 | 61,02 |

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

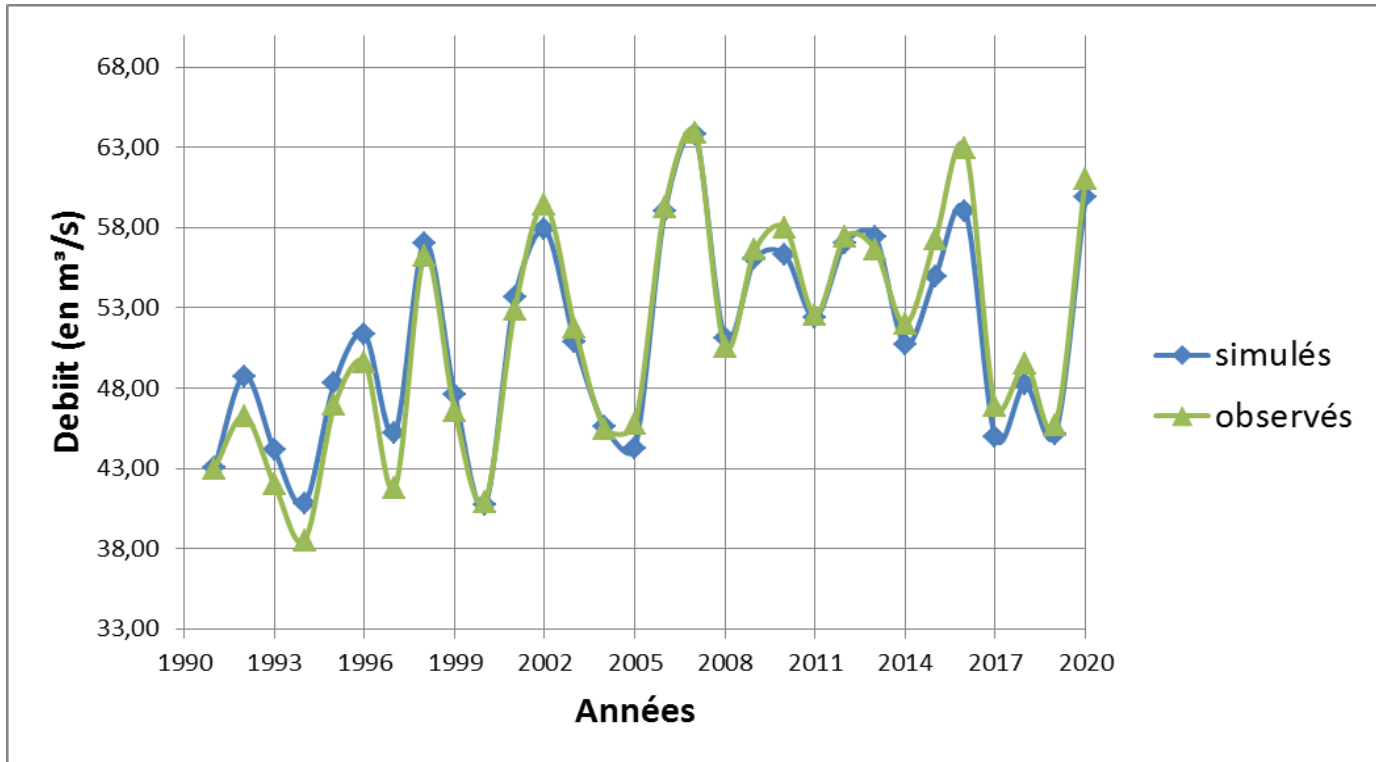


FIGURE II-9: Représentation graphique des allures des débits simulés et celles des débits observés par le modèle amélioré de OL'DEKOP

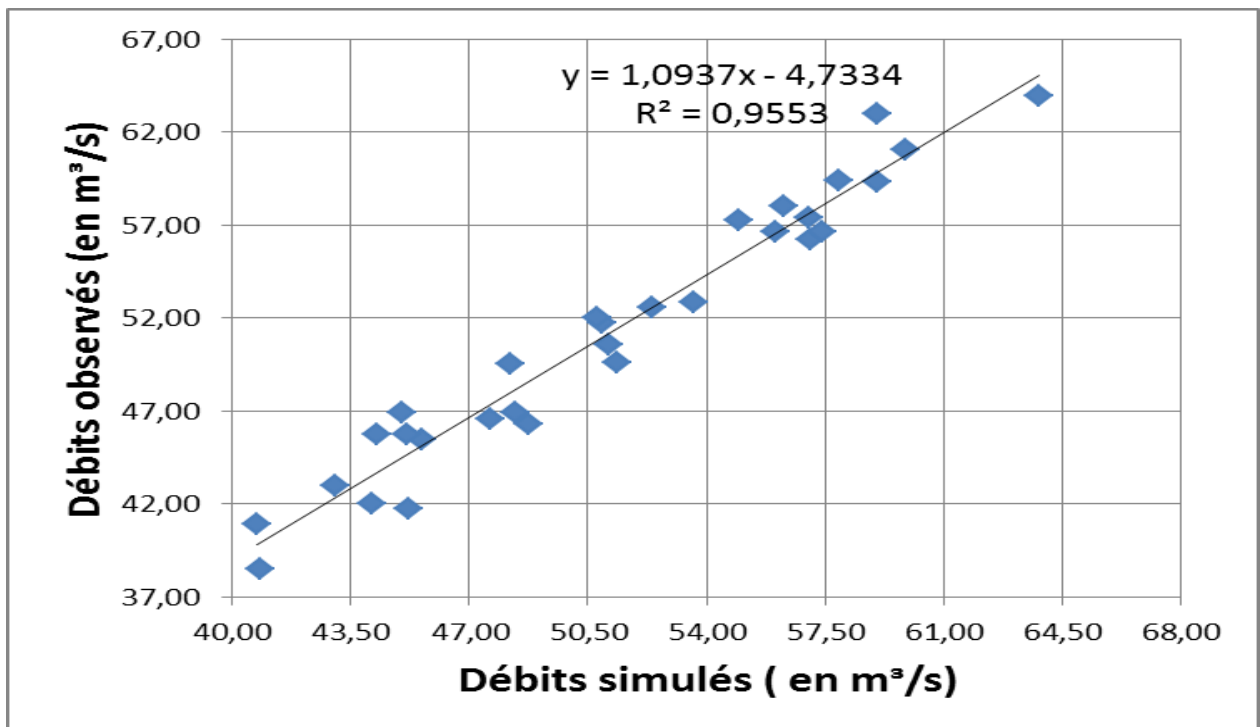


FIGURE II-10: Ajustement des débits simulés et les débits observés par la méthode des moindres carrés ainsi que le coefficient de corrélation pour le modèle OL'DEKOP

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

b. Modèle TIXERONT

Le scénario de ce modèle ayant été le plus performant lors de son amélioration est celui où l'on a affecté le paramètre β comme une puissance de l'évapotranspiration.

$$Q = \sqrt{(P^{2\alpha} + E^{2\beta})} - E^{\beta} \quad [11-7]$$

| Années | Pm (en mm) | ETP(en mm) | α | β | QCalc (en m ³ /s) | QObs (en m ³ /s) | NSHE |
|--------|------------|------------|------------|------------|-------------------------------|------------------------------|-------|
| 1991 | 1180,32 | 878,22 | 0,99992847 | 0,94324867 | 43,65 | 43,01 | 94,62 |
| 1992 | 1234,56 | 788,13 | 0,99992847 | 0,94324867 | 48,61 | 46,27 | |
| 1993 | 1163,54 | 802,78 | 0,99992847 | 0,94324867 | 44,38 | 42,00 | |
| 1994 | 1105,76 | 799,27 | 0,99992847 | 0,94324867 | 41,33 | 38,52 | |
| 1995 | 1245,75 | 826,51 | 0,99992847 | 0,94324867 | 48,34 | 46,95 | |
| 1996 | 1289,99 | 813,20 | 0,99992847 | 0,94324867 | 51,08 | 49,61 | |
| 1997 | 1159,70 | 756,82 | 0,99992847 | 0,94324867 | 45,21 | 41,77 | |
| 1998 | 1399,54 | 841,97 | 0,99992847 | 0,94324867 | 56,48 | 56,20 | |
| 1999 | 1239,78 | 840,11 | 0,99992847 | 0,94324867 | 47,70 | 46,59 | |
| 2000 | 1145,78 | 889,89 | 0,99992847 | 0,94324867 | 41,56 | 40,93 | |
| 2001 | 1343,70 | 845,02 | 0,99992847 | 0,94324867 | 53,30 | 52,84 | |
| 2002 | 1452,65 | 924,11 | 0,99992847 | 0,94324867 | 57,48 | 59,40 | |
| 2003 | 1325,78 | 904,27 | 0,99992847 | 0,94324867 | 50,96 | 51,76 | |
| 2004 | 1221,45 | 873,03 | 0,99992847 | 0,94324867 | 45,98 | 45,48 | |
| 2005 | 1225,70 | 932,07 | 0,99992847 | 0,94324867 | 44,95 | 45,74 | |
| 2006 | 1450,99 | 880,33 | 0,99992847 | 0,94324867 | 58,42 | 59,30 | |
| 2007 | 1527,80 | 873,95 | 0,99992847 | 0,94324867 | 62,87 | 63,92 | |
| 2008 | 1306,40 | 855,29 | 0,99992847 | 0,94324867 | 51,01 | 50,60 | |
| 2009 | 1406,45 | 892,01 | 0,99992847 | 0,94324867 | 55,67 | 56,62 | |
| 2010 | 1429,50 | 932,13 | 0,99992847 | 0,94324867 | 56,02 | 58,01 | |

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

| | | | | | | |
|------|---------|---------|------------|------------|-------|-------|
| 2011 | 1339,56 | 879,47 | 0,99992847 | 0,94324867 | 52,28 | 52,59 |
| 2012 | 1419,67 | 885,05 | 0,99992847 | 0,94324867 | 56,57 | 57,41 |
| 2013 | 1406,78 | 843,48 | 0,99992847 | 0,94324867 | 56,84 | 56,64 |
| 2014 | 1329,67 | 918,53 | 0,99992847 | 0,94324867 | 50,86 | 52,00 |
| 2015 | 1417,54 | 954,63 | 0,99992847 | 0,94324867 | 54,85 | 57,29 |
| 2016 | 1511,65 | 1008,61 | 0,99992847 | 0,94324867 | 58,79 | 62,95 |
| 2017 | 1244,65 | 946,19 | 0,99992847 | 0,94324867 | 45,67 | 46,88 |
| 2018 | 1288,65 | 922,87 | 0,99992847 | 0,94324867 | 48,53 | 49,53 |
| 2019 | 1225,51 | 898,89 | 0,99992847 | 0,94324867 | 45,64 | 45,73 |
| 2020 | 1479,65 | 910,20 | 0,99992847 | 0,94324867 | 59,30 | 61,02 |

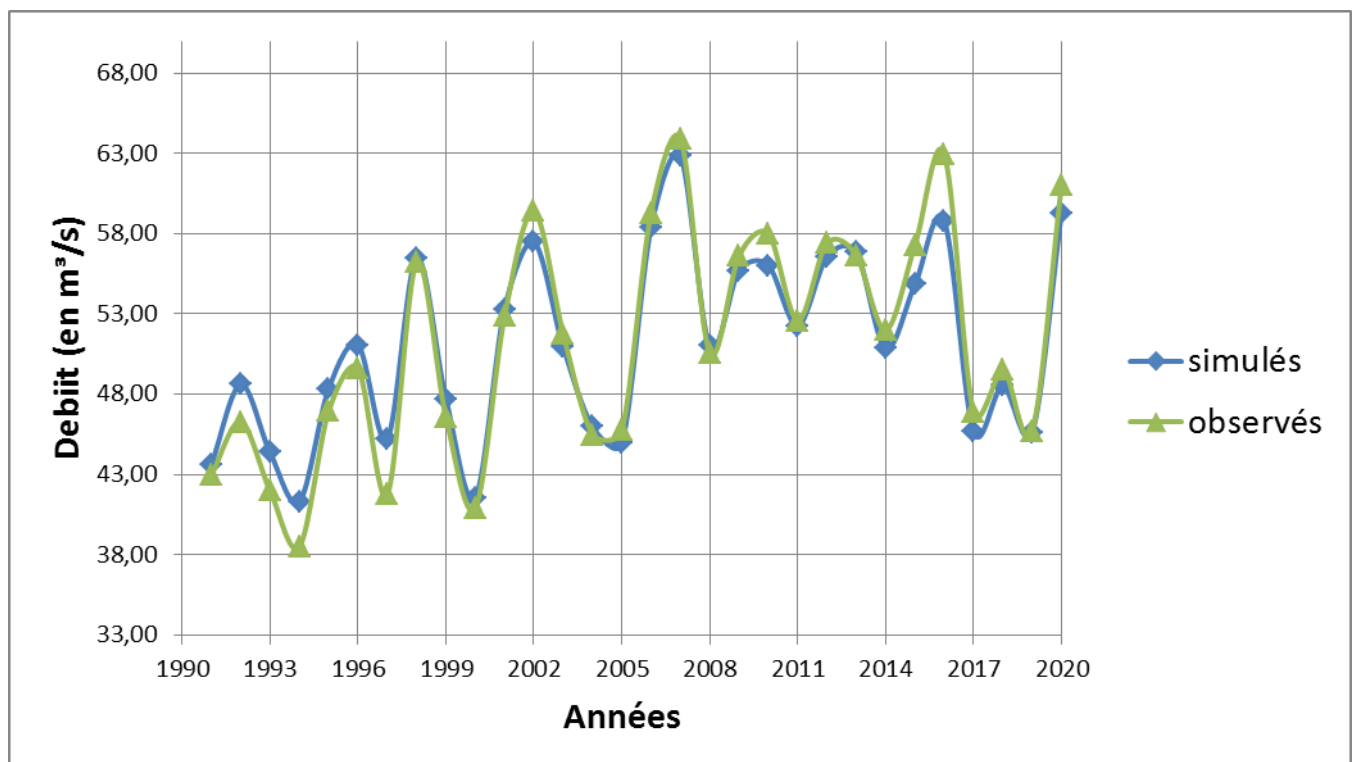


FIGURE II-11: Représentation graphique des allures des débits simulés et celles des débits observés par le modèle amélioré de TIXERONT

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

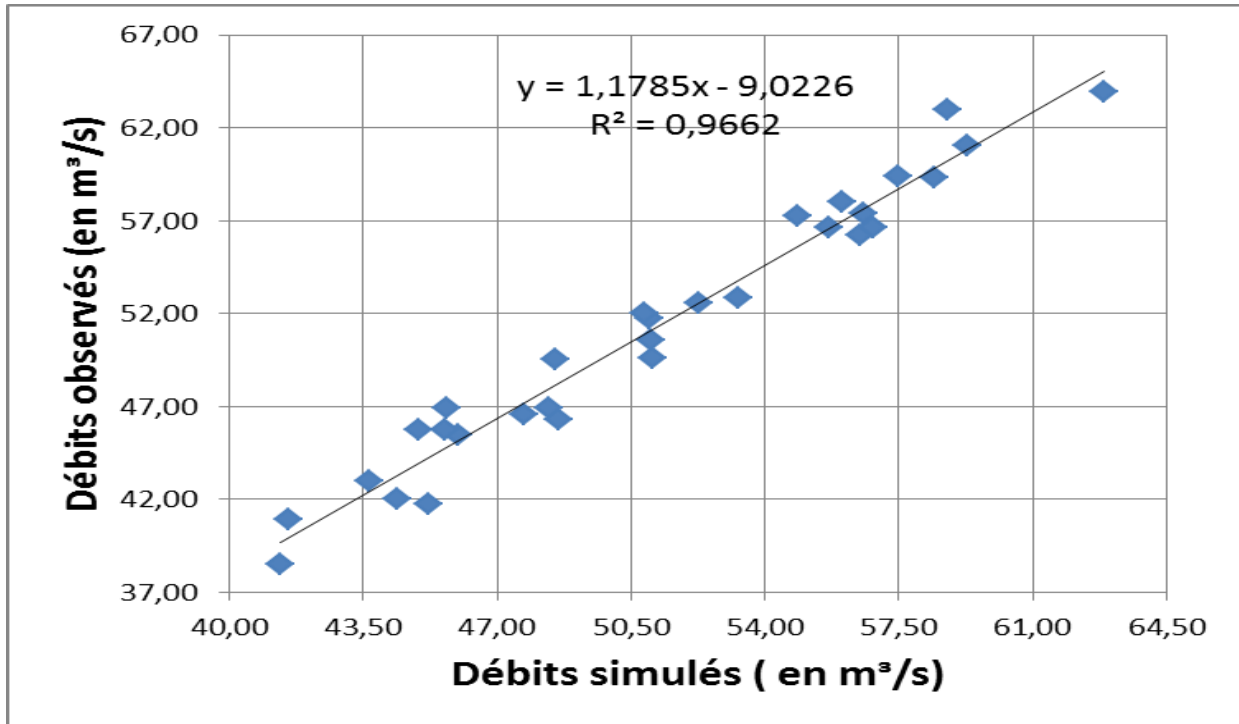


FIGURE II-12: Ajustement des débits simulés et les débits observés par la méthode des moindres carrés ainsi que le coefficient de corrélation pour le modèle TIXERONT

c. Modèle SCS

Ce modèle a plus été amélioré par le scenario ou on a affecté le paramètre β comme puissance sur l'évapotranspiration.

$$Q = \frac{\left(P - \frac{E^\beta}{6}\right)^2}{\left(P + \frac{2E^\beta}{3}\right)} \quad [II-8]$$

| Années | 2P_m (en mm) | ETP(en mm) | β | Q ca(en mm) | Qobs | NSHE |
|--------|-----------------|------------|------------|-------------|--------|-------|
| 1991 | 1180,32 | 878,22 | 0,94959967 | 725,66 | 714,61 | 94,34 |
| 1992 | 1234,56 | 788,13 | 0,94959967 | 808,21 | 768,85 | |
| 1993 | 1163,54 | 802,78 | 0,94959967 | 738,03 | 697,83 | |
| 1994 | 1105,76 | 799,27 | 0,94959967 | 687,25 | 640,05 | |
| 1995 | 1245,75 | 826,51 | 0,94959967 | 803,72 | 780,04 | |
| 1996 | 1289,99 | 813,20 | 0,94959967 | 849,25 | 824,28 | |
| 1997 | 1159,70 | 756,82 | 0,94959967 | 751,90 | 693,99 | |
| 1998 | 1399,54 | 841,97 | 0,94959967 | 938,70 | 933,83 | |

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

| | | | | | |
|------|---------|---------|------------|---------|---------|
| 1999 | 1239,78 | 840,11 | 0,94959967 | 793,16 | 774,07 |
| 2000 | 1145,78 | 889,89 | 0,94959967 | 690,80 | 680,07 |
| 2001 | 1343,70 | 845,02 | 0,94959967 | 886,11 | 877,99 |
| 2002 | 1452,65 | 924,11 | 0,94959967 | 955,33 | 986,94 |
| 2003 | 1325,78 | 904,27 | 0,94959967 | 847,18 | 860,07 |
| 2004 | 1221,45 | 873,03 | 0,94959967 | 764,42 | 755,74 |
| 2005 | 1225,70 | 932,07 | 0,94959967 | 747,11 | 759,99 |
| 2006 | 1450,99 | 880,33 | 0,94959967 | 970,93 | 985,28 |
| 2007 | 1527,80 | 873,95 | 0,94959967 | 1044,59 | 1062,09 |
| 2008 | 1306,40 | 855,29 | 0,94959967 | 848,03 | 840,69 |
| 2009 | 1406,45 | 892,01 | 0,94959967 | 925,41 | 940,74 |
| 2010 | 1429,50 | 932,13 | 0,94959967 | 931,08 | 963,79 |
| 2011 | 1339,56 | 879,47 | 0,94959967 | 869,06 | 873,85 |
| 2012 | 1419,67 | 885,05 | 0,94959967 | 940,25 | 953,96 |
| 2013 | 1406,78 | 843,48 | 0,94959967 | 944,78 | 941,07 |
| 2014 | 1329,67 | 918,53 | 0,94959967 | 845,40 | 863,96 |
| 2015 | 1417,54 | 954,63 | 0,94959967 | 911,66 | 951,83 |
| 2016 | 1511,65 | 1008,61 | 0,94959967 | 977,02 | 1045,94 |
| 2017 | 1244,65 | 946,19 | 0,94959967 | 759,04 | 778,94 |
| 2018 | 1288,65 | 922,87 | 0,94959967 | 806,78 | 822,94 |
| 2019 | 1225,51 | 898,89 | 0,94959967 | 758,72 | 759,80 |
| 2020 | 1479,65 | 910,20 | 0,94959967 | 985,56 | 1013,94 |

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

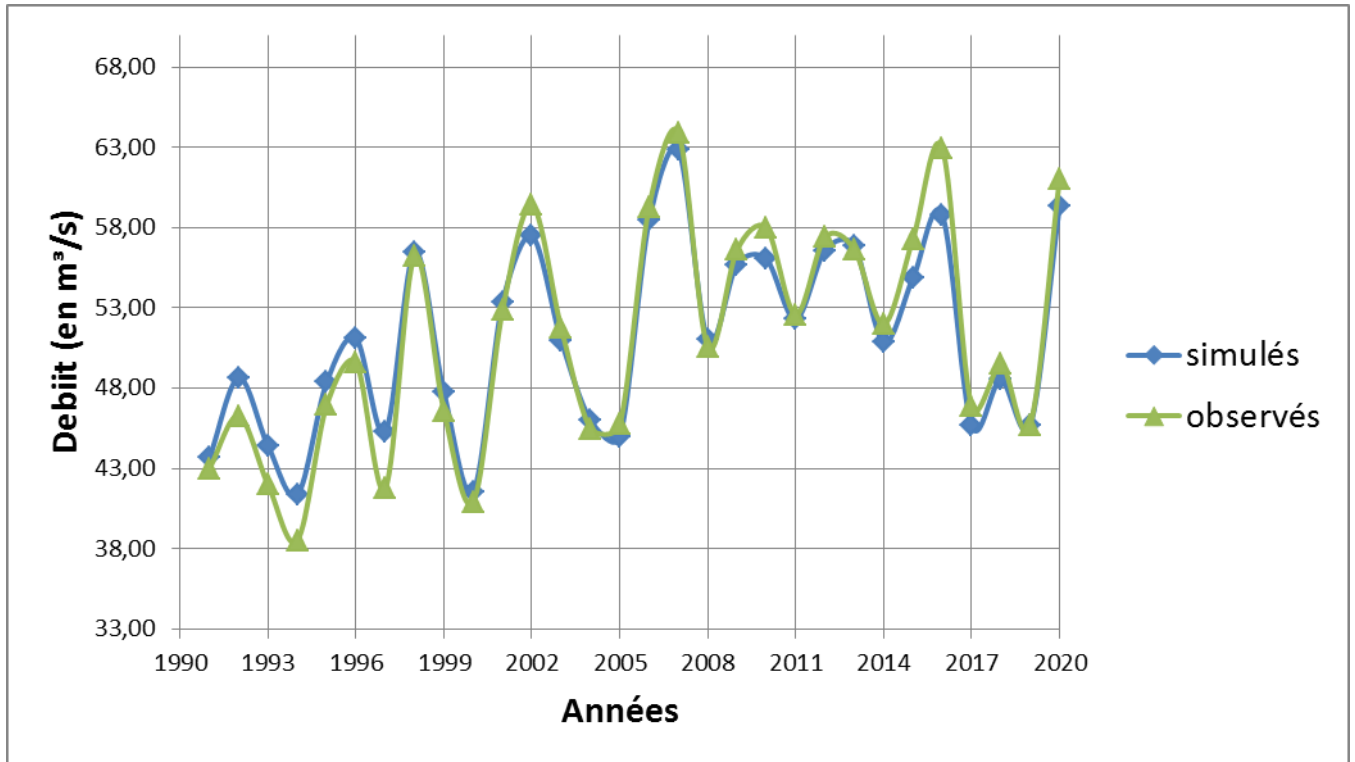


FIGURE II-13: Représentation graphique des allures des débits simulés et celles des débits observés par le modèle amélioré de SCS

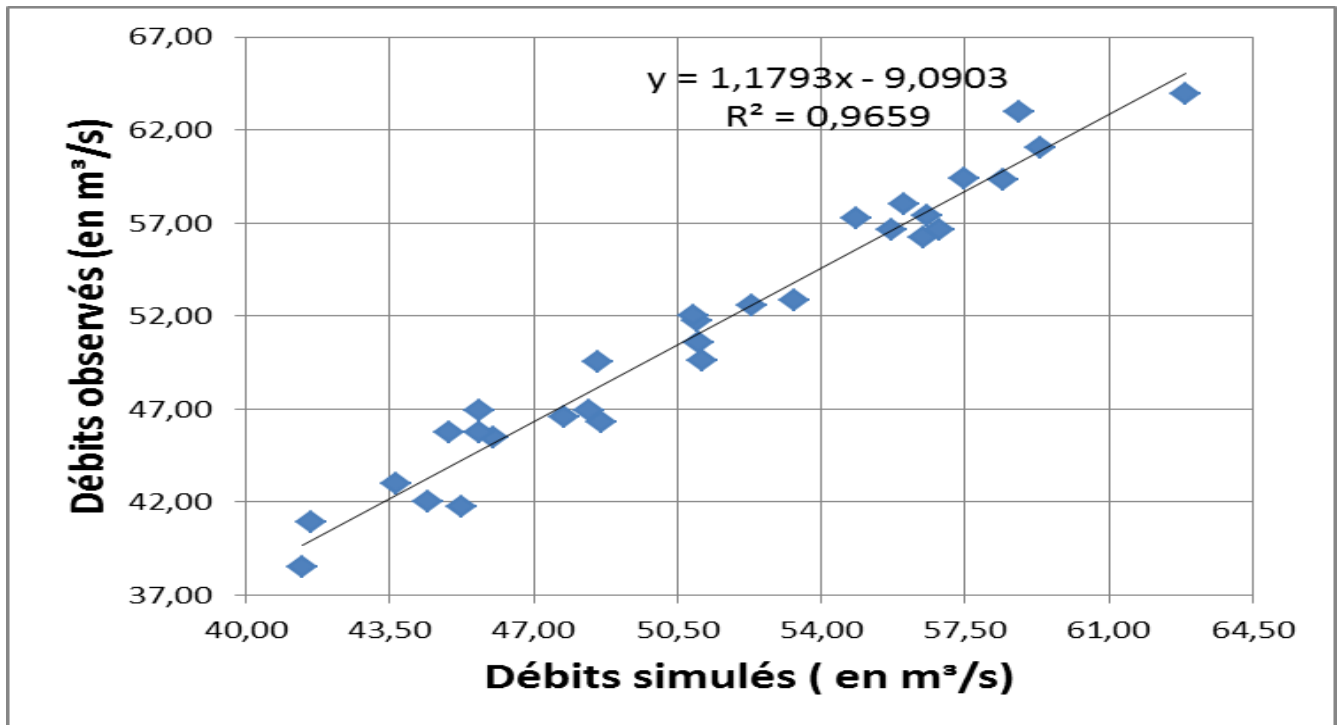


FIGURE II-14: Ajustement des débits simulés et les débits observés par la méthode des moindres carrés ainsi que le coefficient de corrélation pour le modèle SCS

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

II.4.2.3 Cas du bassin versant de la rivière RUVYIRONZA (Embouchure avec WAGA)

a. Modèle OL'DEKOP

Le scenario de ce modèle l'ayant rendu plus préformant lors de son amélioration, est celui où l'on applique un paramètre α comme coefficient des précipitations.

$$Q = \alpha P - E \times \tanh\left(\frac{\alpha P}{E}\right) \quad [II-9]$$

| Années | Pm (en mm) | ETP(en mm) | α | QCalc (en m ³ /s) | QObs (en m ³ /s) | NSHE |
|--------|------------|------------|------------|-------------------------------|------------------------------|-------|
| 1991 | 1180,32 | 878,22 | 0,78673667 | 8,28 | 8,11 | 95,31 |
| 1992 | 1234,56 | 788,13 | 0,78673667 | 10,60 | 9,97 | |
| 1993 | 1163,54 | 802,78 | 0,78673667 | 9,04 | 9,07 | |
| 1994 | 1105,76 | 799,27 | 0,78673667 | 8,07 | 7,50 | |
| 1995 | 1245,75 | 826,51 | 0,78673667 | 10,19 | 10,81 | |
| 1996 | 1289,99 | 813,20 | 0,78673667 | 11,25 | 11,38 | |
| 1997 | 1159,70 | 756,82 | 0,78673667 | 9,68 | 9,99 | |
| 1998 | 1399,54 | 841,97 | 0,78673667 | 12,92 | 12,60 | |
| 1999 | 1239,78 | 840,11 | 0,78673667 | 9,86 | 9,46 | |
| 2000 | 1145,78 | 889,89 | 0,78673667 | 7,57 | 8,17 | |
| 2001 | 1343,70 | 845,02 | 0,78673667 | 11,75 | 12,40 | |
| 2002 | 1452,65 | 924,11 | 0,78673667 | 12,53 | 12,85 | |
| 2003 | 1325,78 | 904,27 | 0,78673667 | 10,46 | 10,40 | |
| 2004 | 1221,45 | 873,03 | 0,78673667 | 9,05 | 9,47 | |
| 2005 | 1225,70 | 932,07 | 0,78673667 | 8,34 | 8,38 | |
| 2006 | 1450,99 | 880,33 | 0,78673667 | 13,26 | 13,71 | |
| 2007 | 1527,80 | 873,95 | 0,78673667 | 14,97 | 14,63 | |
| 2008 | 1306,40 | 855,29 | 0,78673667 | 10,86 | 10,06 | |
| 2009 | 1406,45 | 892,01 | 0,78673667 | 12,17 | 11,46 | |
| 2010 | 1429,50 | 932,13 | 0,78673667 | 11,95 | 11,87 | |
| 2011 | 1339,56 | 879,47 | 0,78673667 | 11,10 | 11,06 | |
| 2012 | 1419,67 | 885,05 | 0,78673667 | 12,55 | 12,18 | |
| 2013 | 1406,78 | 843,48 | 0,78673667 | 13,04 | 12,99 | |
| 2014 | 1329,67 | 918,53 | 0,78673667 | 10,31 | 10,97 | |
| 2015 | 1417,54 | 954,63 | 0,78673667 | 11,37 | 11,63 | |

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

| | | | | | |
|------|---------|---------|------------|-------|-------|
| 2016 | 1511,65 | 1008,61 | 0,78673667 | 12,27 | 12,06 |
| 2017 | 1244,65 | 946,19 | 0,78673667 | 8,47 | 8,42 |
| 2018 | 1288,65 | 922,87 | 0,78673667 | 9,52 | 9,54 |
| 2019 | 1225,51 | 898,89 | 0,78673667 | 8,77 | 8,85 |
| 2020 | 1479,65 | 910,20 | 0,78673667 | 13,30 | 13,46 |

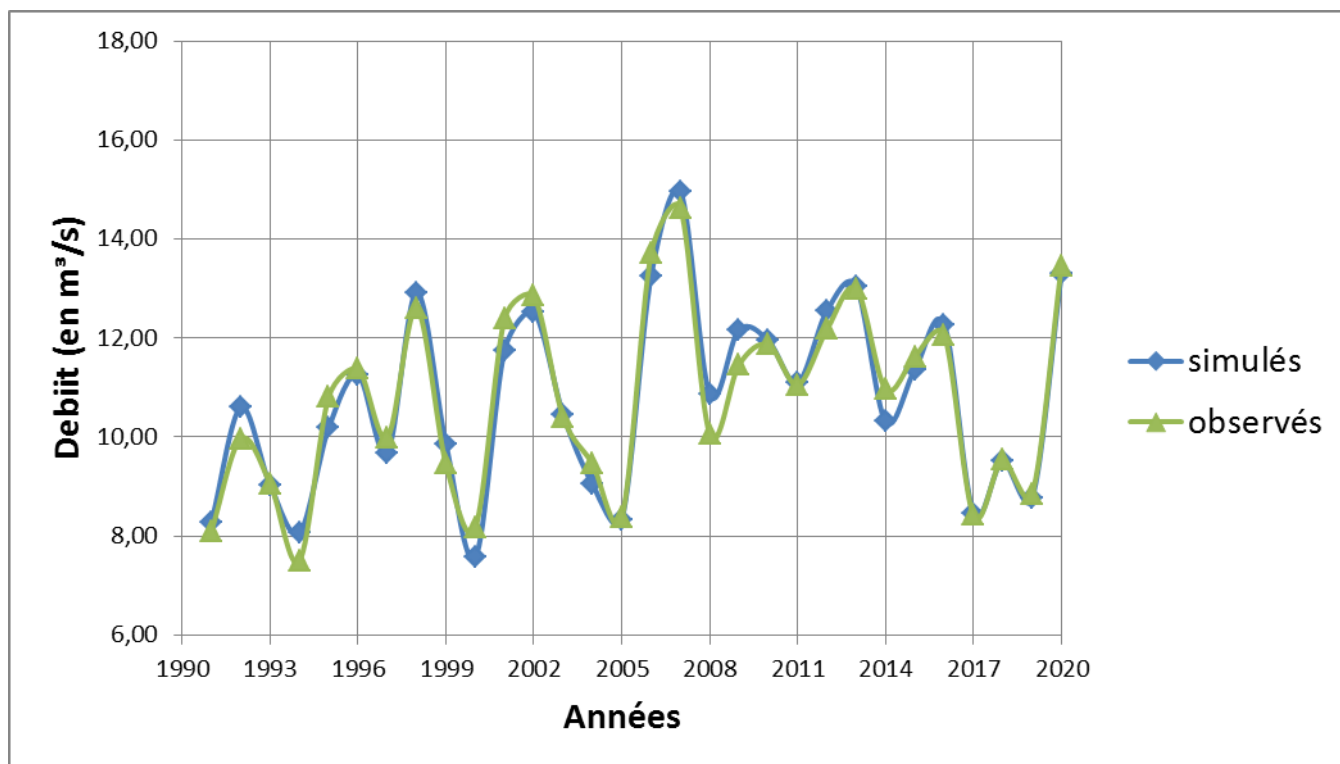


FIGURE II-15: Représentation graphique des allures des débits simulés et celles des débits observés par le modèle amélioré de OL'DEKOP

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

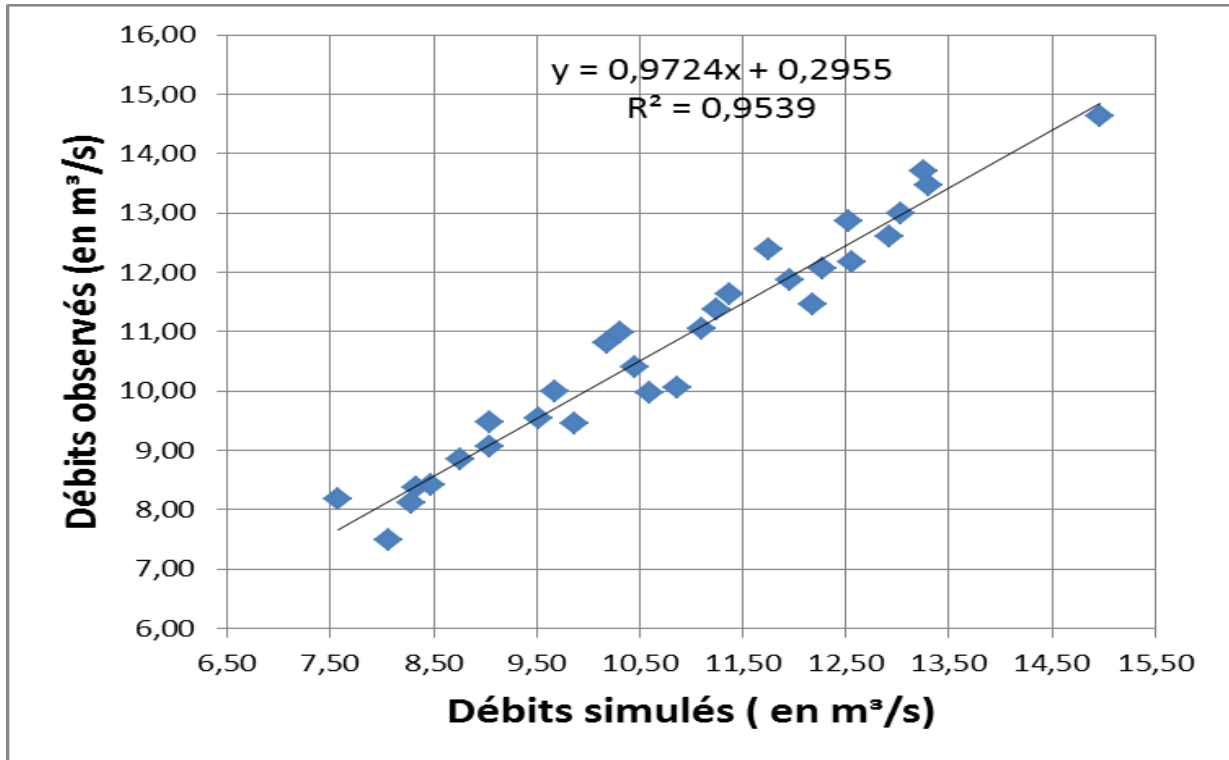


FIGURE II-16: Ajustement des débits simulés et les débits observés par la méthode des moindres carrés ainsi que le coefficient de corrélation pour le modèle OL'DEKOP

b. Modèle TIXERONT

Le scenario de ce modèle l'ayant rendu plus préformant lors de son amélioration, est celui où l'on applique un paramètre α comme coefficient des précipitations et un paramètre β comme coefficient de l'évapotranspiration.

$$Q = \sqrt{((\alpha P)^2 + (\beta E)^2)} - (\beta E) \quad [\text{II-10}]$$

| Années | Pm (en mm) | ETP(en mm) | α | β | QCalc (en m³/s) | QObs (en m³/s) | NSHE |
|--------|------------|------------|------------|---------|------------------|-----------------|-------|
| 1991 | 1180,32 | 878,22 | 1,00068667 | 3,0252 | 8,67 | 8,11 | 93,42 |
| 1992 | 1234,56 | 788,13 | 1,00068667 | 3,0252 | 10,41 | 9,97 | |
| 1993 | 1163,54 | 802,78 | 1,00068667 | 3,0252 | 9,15 | 9,07 | |
| 1994 | 1105,76 | 799,27 | 1,00068667 | 3,0252 | 8,34 | 7,50 | |
| 1995 | 1245,75 | 826,51 | 1,00068667 | 3,0252 | 10,15 | 10,81 | |
| 1996 | 1289,99 | 813,20 | 1,00068667 | 3,0252 | 11,00 | 11,38 | |
| 1997 | 1159,70 | 756,82 | 1,00068667 | 3,0252 | 9,59 | 9,99 | |

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

| | | | | | | |
|------|---------|---------|------------|--------|-------|-------|
| 1998 | 1399,54 | 841,97 | 1,00068667 | 3,0252 | 12,43 | 12,60 |
| 1999 | 1239,78 | 840,11 | 1,00068667 | 3,0252 | 9,91 | 9,46 |
| 2000 | 1145,78 | 889,89 | 1,00068667 | 3,0252 | 8,09 | 8,17 |
| 2001 | 1343,70 | 845,02 | 1,00068667 | 3,0252 | 11,48 | 12,40 |
| 2002 | 1452,65 | 924,11 | 1,00068667 | 3,0252 | 12,28 | 12,85 |
| 2003 | 1325,78 | 904,27 | 1,00068667 | 3,0252 | 10,53 | 10,40 |
| 2004 | 1221,45 | 873,03 | 1,00068667 | 3,0252 | 9,30 | 9,47 |
| 2005 | 1225,70 | 932,07 | 1,00068667 | 3,0252 | 8,82 | 8,38 |
| 2006 | 1450,99 | 880,33 | 1,00068667 | 3,0252 | 12,79 | 13,71 |
| 2007 | 1527,80 | 873,95 | 1,00068667 | 3,0252 | 14,18 | 14,63 |
| 2008 | 1306,40 | 855,29 | 1,00068667 | 3,0252 | 10,77 | 10,06 |
| 2009 | 1406,45 | 892,01 | 1,00068667 | 3,0252 | 11,92 | 11,46 |
| 2010 | 1429,50 | 932,13 | 1,00068667 | 3,0252 | 11,82 | 11,87 |
| 2011 | 1339,56 | 879,47 | 1,00068667 | 3,0252 | 11,01 | 11,06 |
| 2012 | 1419,67 | 885,05 | 1,00068667 | 3,0252 | 12,22 | 12,18 |
| 2013 | 1406,78 | 843,48 | 1,00068667 | 3,0252 | 12,53 | 12,99 |
| 2014 | 1329,67 | 918,53 | 1,00068667 | 3,0252 | 10,44 | 10,97 |
| 2015 | 1417,54 | 954,63 | 1,00068667 | 3,0252 | 11,39 | 11,63 |
| 2016 | 1511,65 | 1008,61 | 1,00068667 | 3,0252 | 12,25 | 12,06 |
| 2017 | 1244,65 | 946,19 | 1,00068667 | 3,0252 | 8,96 | 8,42 |
| 2018 | 1288,65 | 922,87 | 1,00068667 | 3,0252 | 9,80 | 9,54 |
| 2019 | 1225,51 | 898,89 | 1,00068667 | 3,0252 | 9,12 | 8,85 |
| 2020 | 1479,65 | 910,20 | 1,00068667 | 3,0252 | 12,89 | 13,46 |

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

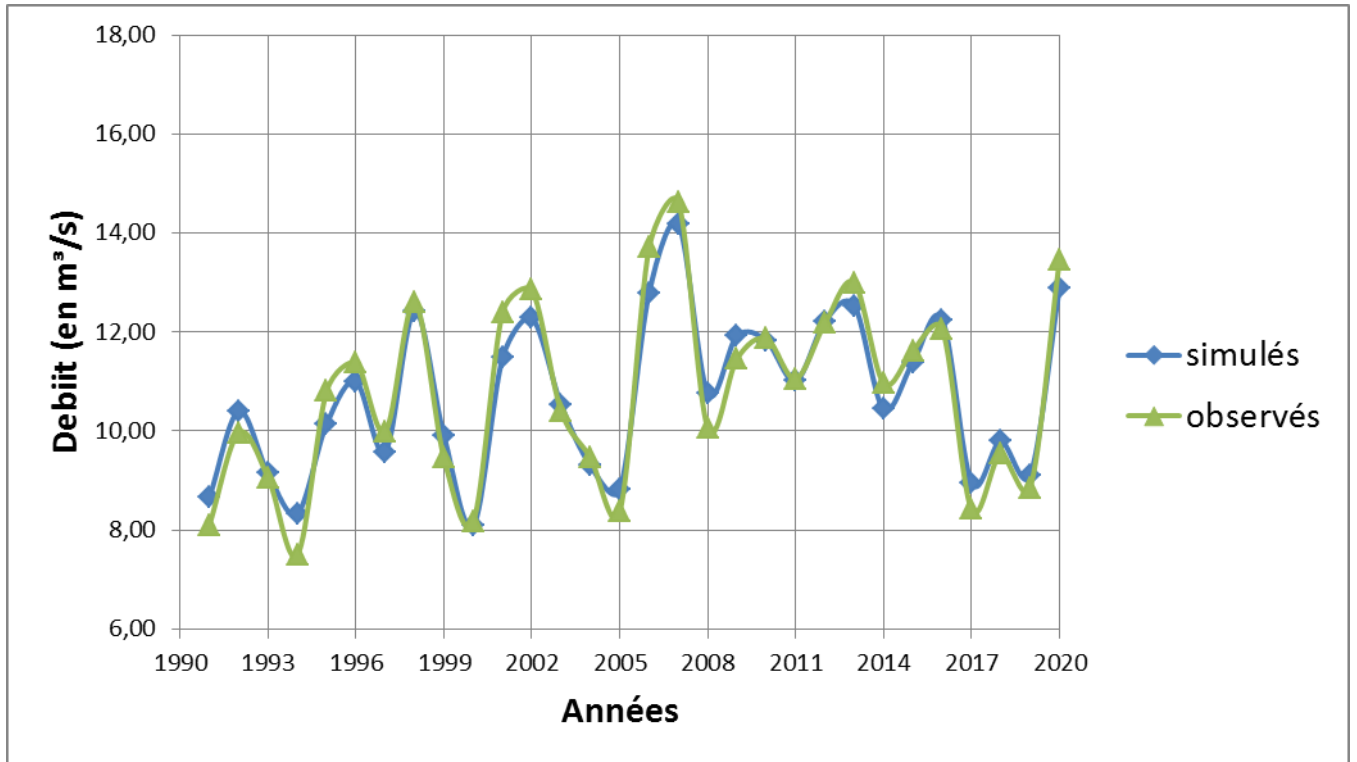


FIGURE II-17: Représentation graphique des allures des débits simulés et celles des débits observés par le modèle amélioré de TIXERONT

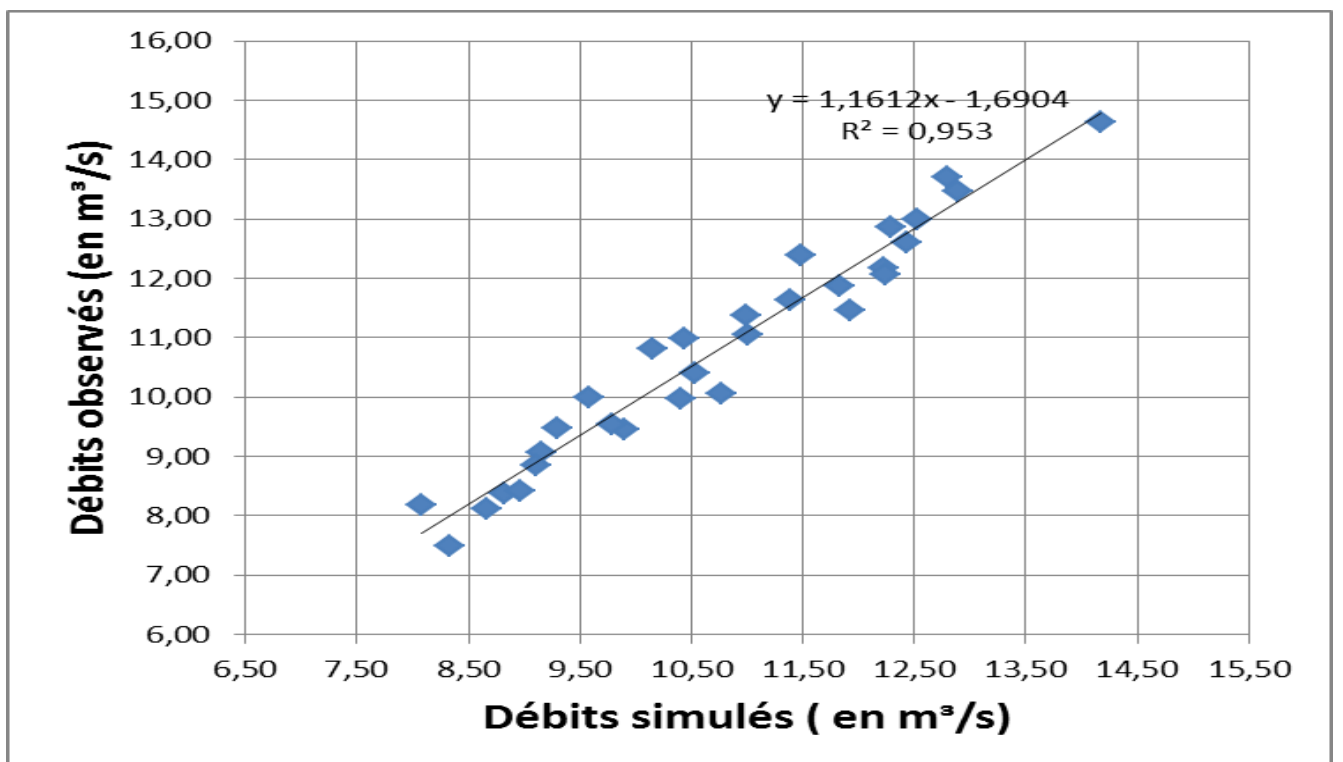


FIGURE II-18: Ajustement des débits simulés et les débits observés par la méthode des moindres carrés ainsi que le coefficient de corrélation pour le modèle TIXERONT

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

c. Modèle SCS

Le scenario de ce modèle l'ayant rendu plus préformant lors de son amélioration, est celui où l'on applique un paramètre α comme puissances des précipitations et un paramètre β comme coefficient de l'évapotranspiration.

$$Q = \frac{\left(P\alpha + \frac{\beta E}{6}\right)^2}{\left(P\alpha + \frac{2\beta E}{3}\right)} \quad [II-11]$$

| Années | Pm (en mm) | ETP(en mm) | α | β | QCalc (en m ³ /s) | QObs (en m ³ /s) | NSHE |
|--------|------------|------------|------------|------------|-------------------------------|------------------------------|-------|
| 1991 | 1180,32 | 878,22 | 0,99998667 | 2,59495443 | 8,20 | 8,11 | 95,75 |
| 1992 | 1234,56 | 788,13 | 0,99998667 | 2,59495443 | 10,62 | 9,97 | |
| 1993 | 1163,54 | 802,78 | 0,99998667 | 2,59495443 | 9,02 | 9,07 | |
| 1994 | 1105,76 | 799,27 | 0,99998667 | 2,59495443 | 8,02 | 7,50 | |
| 1995 | 1245,75 | 826,51 | 0,99998667 | 2,59495443 | 10,19 | 10,81 | |
| 1996 | 1289,99 | 813,20 | 0,99998667 | 2,59495443 | 11,28 | 11,38 | |
| 1997 | 1159,70 | 756,82 | 0,99998667 | 2,59495443 | 9,70 | 9,99 | |
| 1998 | 1399,54 | 841,97 | 0,99998667 | 2,59495443 | 12,97 | 12,60 | |
| 1999 | 1239,78 | 840,11 | 0,99998667 | 2,59495443 | 9,86 | 9,46 | |
| 2000 | 1145,78 | 889,89 | 0,99998667 | 2,59495443 | 7,45 | 8,17 | |
| 2001 | 1343,70 | 845,02 | 0,99998667 | 2,59495443 | 11,79 | 12,40 | |
| 2002 | 1452,65 | 924,11 | 0,99998667 | 2,59495443 | 12,56 | 12,85 | |
| 2003 | 1325,78 | 904,27 | 0,99998667 | 2,59495443 | 10,45 | 10,40 | |
| 2004 | 1221,45 | 873,03 | 0,99998667 | 2,59495443 | 9,01 | 9,47 | |
| 2005 | 1225,70 | 932,07 | 0,99998667 | 2,59495443 | 8,24 | 8,38 | |
| 2006 | 1450,99 | 880,33 | 0,99998667 | 2,59495443 | 13,31 | 13,71 | |
| 2007 | 1527,80 | 873,95 | 0,99998667 | 2,59495443 | 15,03 | 14,63 | |
| 2008 | 1306,40 | 855,29 | 0,99998667 | 2,59495443 | 10,88 | 10,06 | |
| 2009 | 1406,45 | 892,01 | 0,99998667 | 2,59495443 | 12,20 | 11,46 | |
| 2010 | 1429,50 | 932,13 | 0,99998667 | 2,59495443 | 11,97 | 11,87 | |
| 2011 | 1339,56 | 879,47 | 0,99998667 | 2,59495443 | 11,11 | 11,06 | |
| 2012 | 1419,67 | 885,05 | 0,99998667 | 2,59495443 | 12,59 | 12,18 | |
| 2013 | 1406,78 | 843,48 | 0,99998667 | 2,59495443 | 13,09 | 12,99 | |
| 2014 | 1329,67 | 918,53 | 0,99998667 | 2,59495443 | 10,29 | 10,97 | |
| 2015 | 1417,54 | 954,63 | 0,99998667 | 2,59495443 | 11,36 | 11,63 | |

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

| | | | | | | |
|------|---------|---------|------------|------------|-------|-------|
| 2016 | 1511,65 | 1008,61 | 0,99998667 | 2,59495443 | 12,27 | 12,06 |
| 2017 | 1244,65 | 946,19 | 0,99998667 | 2,59495443 | 8,37 | 8,42 |
| 2018 | 1288,65 | 922,87 | 0,99998667 | 2,59495443 | 9,48 | 9,54 |
| 2019 | 1225,51 | 898,89 | 0,99998667 | 2,59495443 | 8,70 | 8,85 |
| 2020 | 1479,65 | 910,20 | 0,99998667 | 2,59495443 | 13,34 | 13,46 |

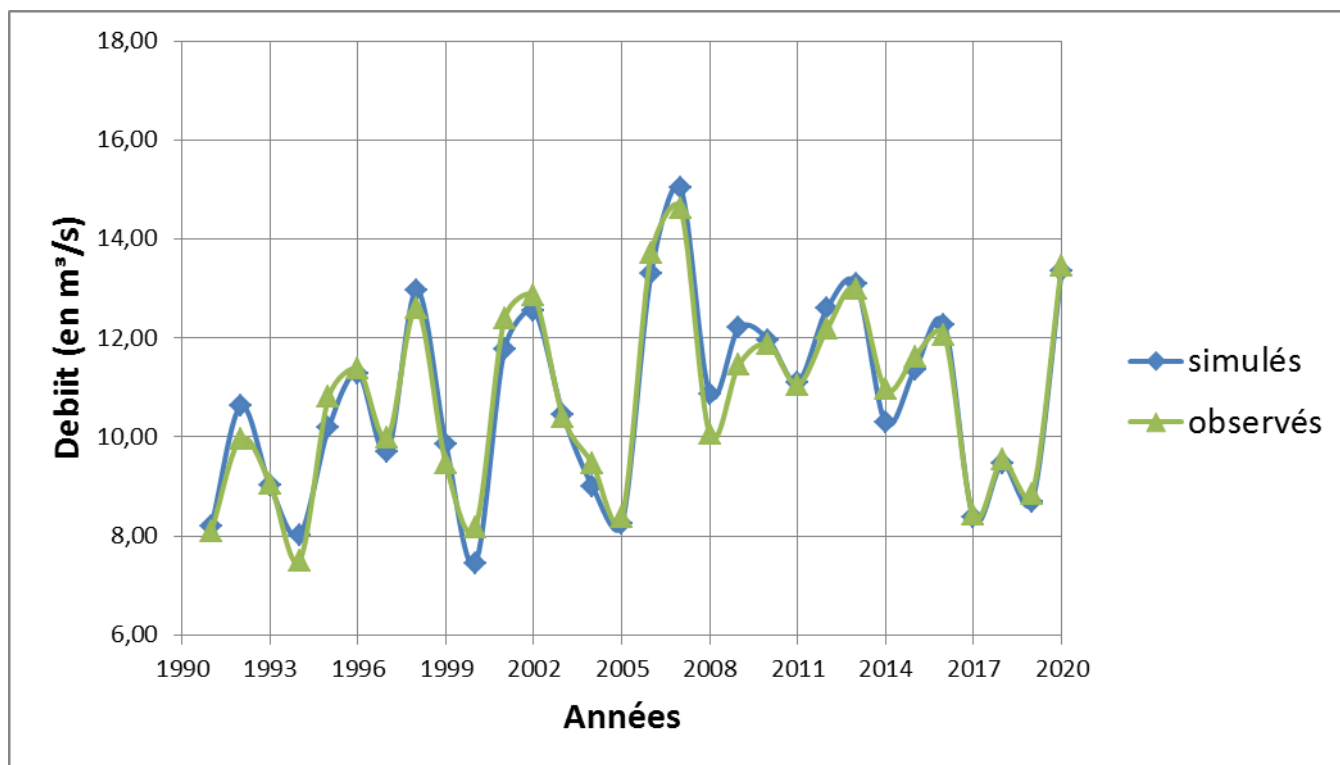


FIGURE II-19: Représentation graphique des allures des débits simulés et celles de débits observés par le modèle amélioré de SCS

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

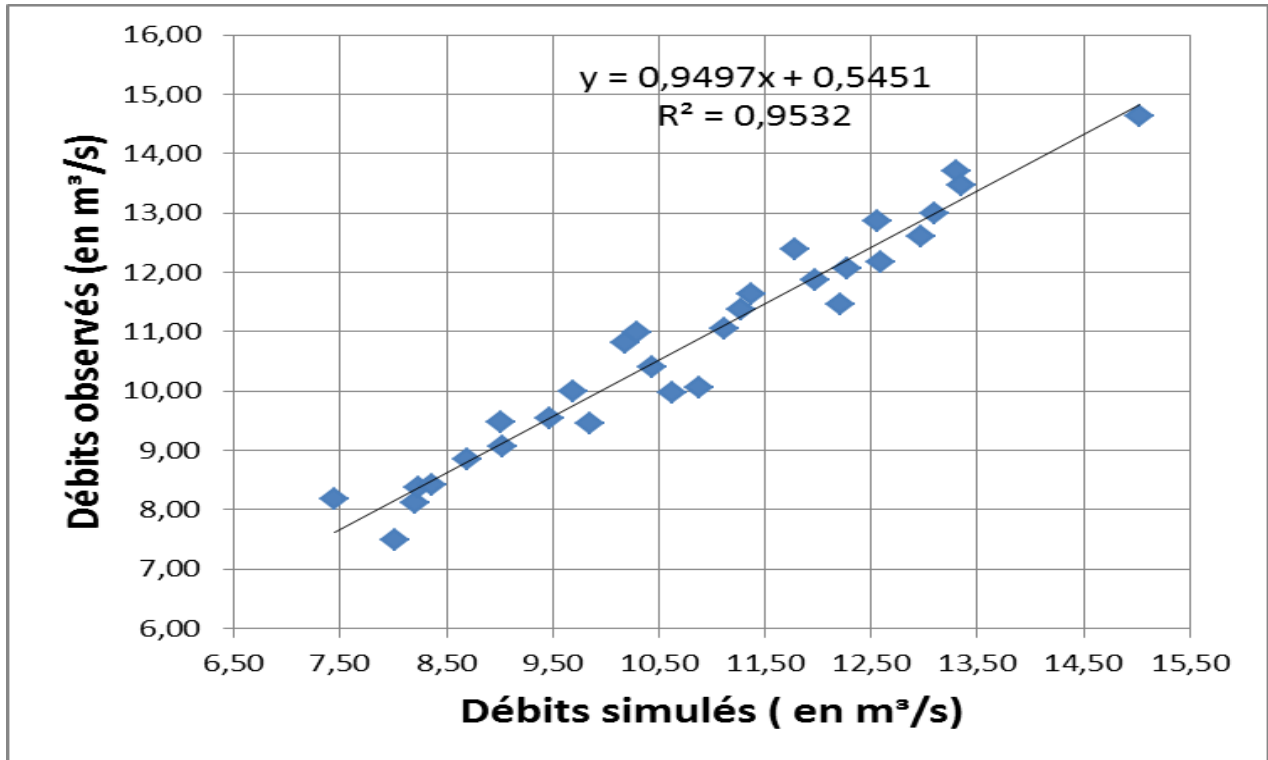


FIGURE II-20: Ajustement des débits simulés et les débits observés par la méthode des moindres carrés ainsi que le coefficient de corrélation pour le modèle SCS

II.4.3 Commentaire sur les résultats des trois modèles hydrologiques améliorés.

Les tableaux ci hauts illustrés ainsi que les figures y afférentes sont ceux correspondants à des scénarii de chaque modèle et pour chaque bassin versant, ayant été plus performants par rapport à d'autres cas de figures analysés. Toutefois, le choix d'affectation du paramètre d'amélioration a été fait arbitrairement, ce qui nous empêche de conclure en définitivement que les formes obtenus sont les plus performantes possible, car d'autres formes d'affectation des paramètres d'amélioration des 3 modèles existants peuvent présenter des performances élevées que celles obtenues.

Les résultats de tous les résultats obtenus ont montré que presque toutes les formes que nous nous étions proposés ont pu satisfaire aux conditions minimales de validation d'un modèle. Elles ont toutes une valeur de NSE largement supérieur à 70%, ce qui facilitera énormément les ingénieurs qui voudront mener des études hydrauliques et hydrologiques sur les cours d'eau non jaugés appartenant aux bassins versants présentant les conditions météorologiques semblables à celles des bassins versants qui ont fait l'objet de notre étude, d'exploiter ces modèles mises au point par ce travail.

Certes les trois modèles hydrologiques existants SCS, OL'DEKOP et TIXERONT ont pu être

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

améliorés, bien que le niveau de performance n'a pas du tout été le même. Le modèle SCS a majoritairement été plus performant par rapport aux modèles OL'DEKOP et TIXERONT.

II.5. Configuration des modèles hydrologiques mixtes.

II.5.1 Introduction

D'après (Najiba CHKIR, 1994), un modèle performant doit remplir 4 critères qui sont la précision, la généralité, l'universalité, la richesse et l'adaptabilité. C'est dans le souci de satisfaire à tous ces critères que ce travail n'a pas voulu se focaliser sur des modèles hydrologiques existants qui ont été conçus sur base deux paramètres météorologiques (les précipitations et la température) des BV. Les modèles hydrologiques mixtes configurés vont plus ou moins satisfaire aux critères (richesse, précision et adaptabilité). Ces modèles mixtes configurés vont intégrer la pluviométrie et les principales caractéristiques physiographiques de chaque bassin versant (le relief, l'étendue, l'hydrographie).

II.5.2 Architecture du modèle hydrologique proposé.

Comme le modèle hydrologique mixte dépendra des conditions météorologiques et des caractéristiques physiographiques du bassin versant, les paramètres qui représenteront chacune des spécificités sont les précipitations moyennes annuelles, la pente, la superficie ainsi que la densité de drainage.

Le modèle est formulé comme suit :

$$Q = K \times P^\alpha \times A^\beta \times I_g^\gamma \times Dd^\psi \quad [\text{II-12}]$$

Où : Q : Débit en (m³/s) ;

P : Précipitations en (m) ;

A : Superficie du bassin versant en (m²) ;

I_g : Indice de pente global du bassin versant ;

Dd : Densité de drainage n (m/ m²) ;

K : Paramètre d'amélioration du modèle (qui sera déterminé par la simulation) ;

(α, β, γ, ψ) : Paramètres obtenus à partir de l'analyse dimensionnelle.

II.5.3 Calcul des paramètres d'entrée du modèle hydrologique mixte.

II.5.3.1 Calcul des précipitations moyennes annuelles.

Les précipitations moyennes annuelles sont les mêmes que celles utilisées pour les trois modèles hydrologiques existants améliorés.

II.5.3.2 Calcul des principales caractéristiques physiographiques.

Les paramètres physiographiques qui devront apparaître dans le modèle hydrologique mixte ont été synthétisés dans le tableau ci-dessous.

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

Tableau II-15: Synthèse des principaux paramètres physiographiques des bassins versants

Tous les paramètres physiographiques des BV ont été calculés à partir des cartes produites

| | | |
|--------------------------|----------------------------------|---|
| C_G | Coefficient de GRAVELIUS | $C_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}}$ |
| L_E (km) | Longueur du rectangle équivalent | $L_E = \frac{C_G \sqrt{A}}{1,12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{C_G} \right)^2} \right]$ |
| l_E (km) | Largeur du rectangle équivalent | $l_E = \frac{A}{L}$ |
| ΔZ_{\max} (m) | Dénivelée maximale | $\Delta Z_{\max} = H_{5\%} - H_{95\%}$ |
| I_g (m/m) | Indice de pente global | $I_g = \frac{\Delta Z_{\max}}{L_E}$ |
| Dd (m/m ²) | Densité de drainage | $Dd = \frac{\sum_i^n l_i}{A}$ |

par le logiciel ARCGIS10.3. Pour chaque paramètre caractéristique, les cartes et figures ayant été utiles sont les suivantes :

- Le relief : (la carte des pentes, la carte hypsométrique et la courbe hypsométrique) ;
- L'hydrographie : (la carte du réseau hydrographique) ;

Les données obtenues de la carte hypsométrique, nous ont servi de produire la courbe hypsométrique à l'aide du logiciel EXCEL.

a. Cas du bassin versant de la rivière RUVYIRONZA (EXUT KIBAYA)

➤ **Son relief**

Le paramètre caractérisant le relief du bassin versant de la rivière RUVYIRONZA que ce travail a voulu intégrer dans le modèle mixte est l'indice global de pente, et qui sera calculé à partir des informations fournies par les trois graphiques.

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

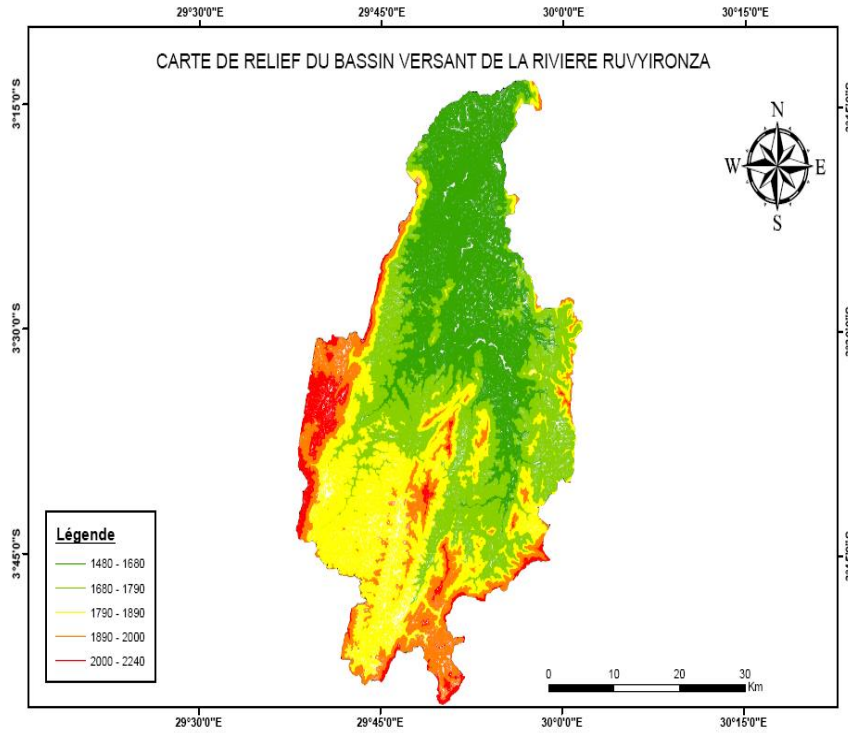


FIGURE II-21: Carte des pentes du bassin versant de la rivière RUVYIRONZA.

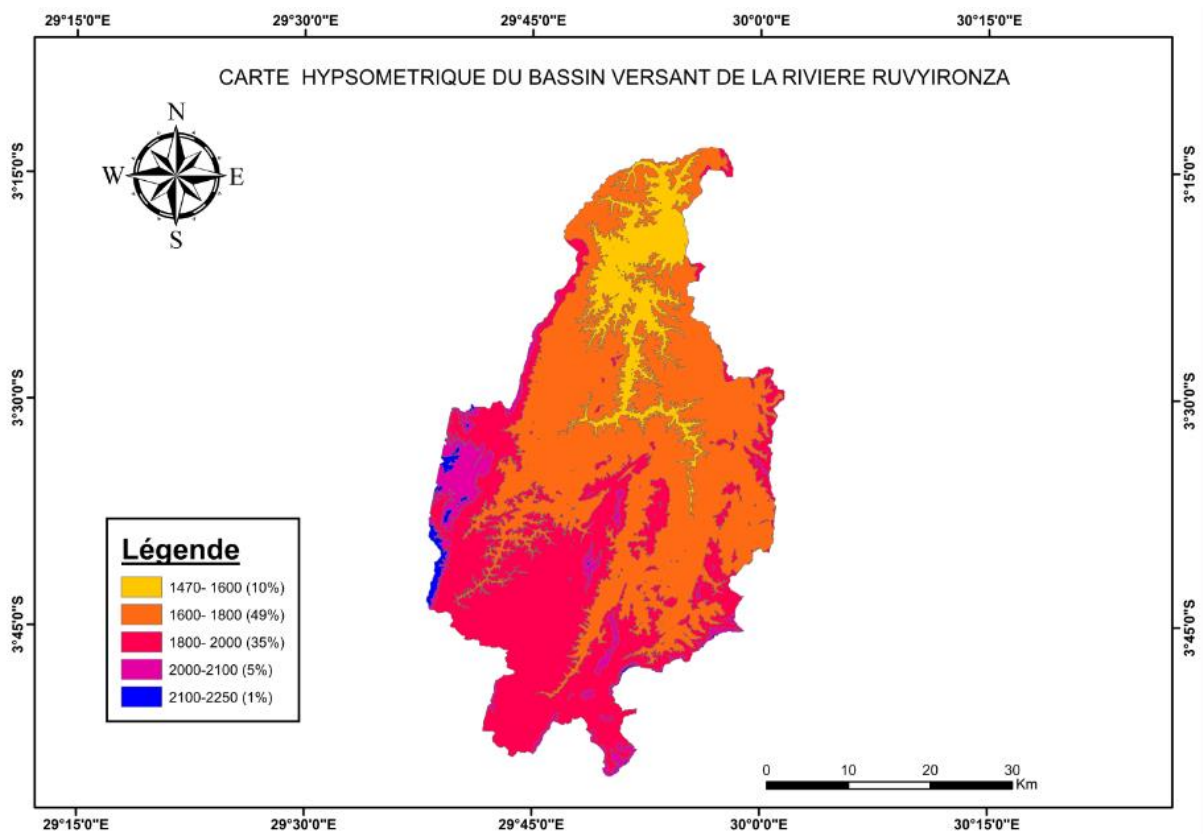


FIGURE II-22: Carte hypométrique du bassin versant de la rivière RUVYIRONZA.

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

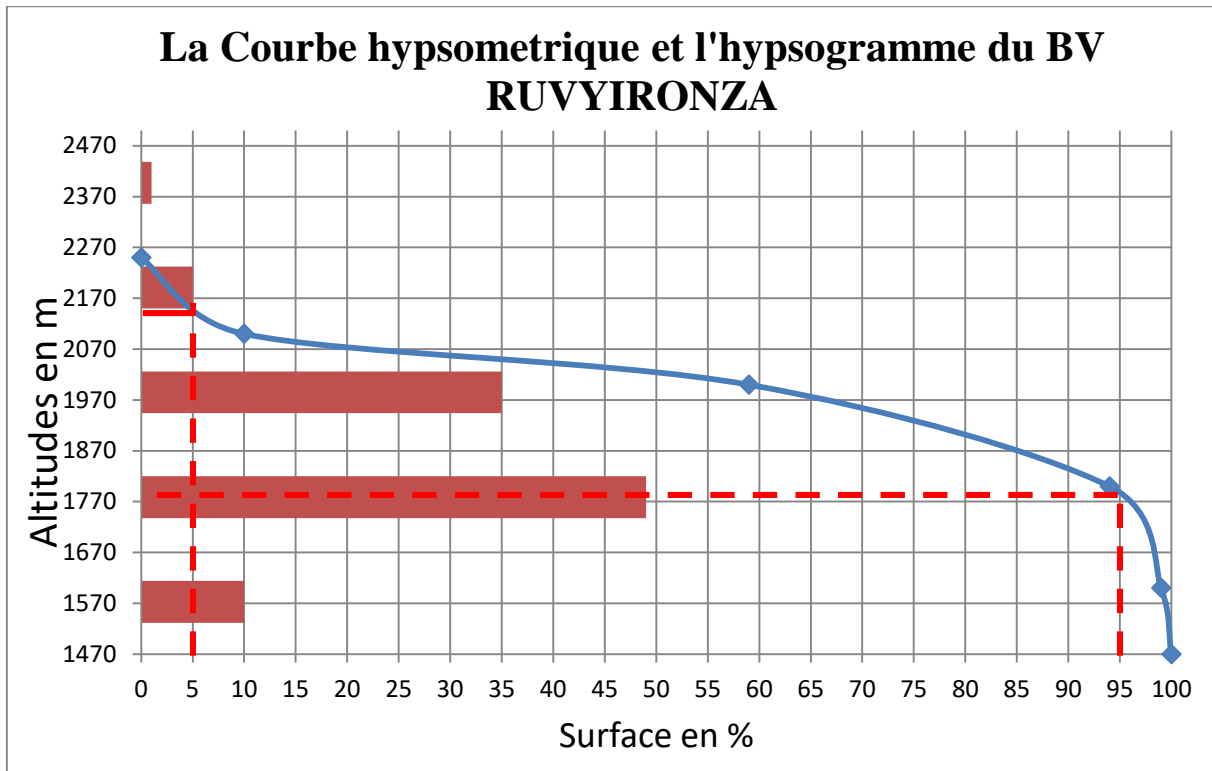


FIGURE II-23: Courbe hypsométrique du bassin versant de la rivière RUVYIRONZA.

➤ **Son hydrographie**

C'est la densité de drainage qui a été pris en compte comme paramètre caractérisant l'hydrographie du BV de la rivière RUVYIRONZA. Il a été calculé avec le logiciel ARCGIS10.3, on le calcule en faisant le rapport entre le linéaire total des cours d'eaux du bassin versant et sa superficie. Ce qui ne pouvait pas se faire autrement.

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

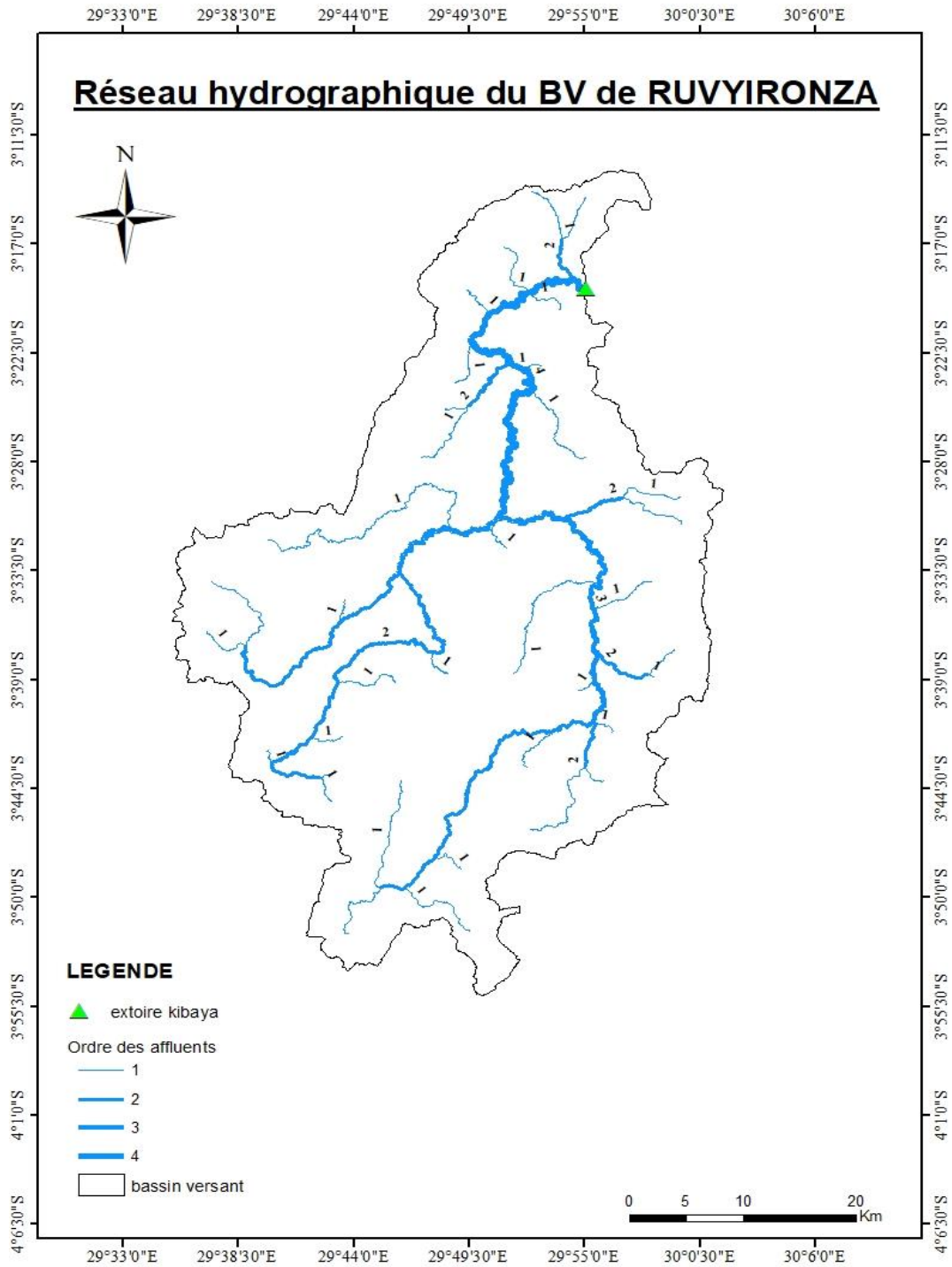


FIGURE II-24: Carte du réseau hydrographique du bassin versant de la RUVYIRONZA

Les résultats des paramètres physiographiques du BV de la rivière RUVYIRONZA ont été synthétisés dans le tableau ci-dessous.

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

Tableau II-16: Synthèse des paramètres physiographiques du BV de la rivière RUVYIRONZA.

| Paramètres | Symboles | Unités | Exutoire Kibaya |
|-----------------------------------|------------------|-----------------|-----------------|
| Superficie | A | km ² | 1898,70 |
| Périmètre | P | km | 283,78 |
| Longueur du cours d'eau principal | L _H | km | 126,93 |
| Altitude maximale | H _{max} | m | 2250 |
| Altitude minimale | H _{min} | m | 1470 |
| Coefficient de GRAVELIUS | C _G | Sans | 1,82 |
| Longueur du rectangle équivalent | L _R | km | 126,93 |
| Largeur du rectangle équivalent | l _R | km | 14,96 |
| Dénivelée maximale | ΔZ_{max} | m | 780 |
| Indice de pente global | I | m/m | 0,006 |

b. Cas du bassin versant de la rivière NTAHANGWA

➤ Son relief

Le Bassin versant de la rivière NTAHANGWA est classé selon l'OROSTOM parmi les BV ayant un relief assez fort. Cela étant constaté à partir de la valeur de la dénivelée spécifique (produit de l'indice de pente global par la racine carrée de la superficie du bassin versant) du BV de la NTAHANGWA. C'est le type de classe dans lequel le BV de la NTAHANGWA est classé qui nous a conduit à intégrer la pente parmi les paramètres caractéristiques qui devront faire partie du modèle à base mixte.

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

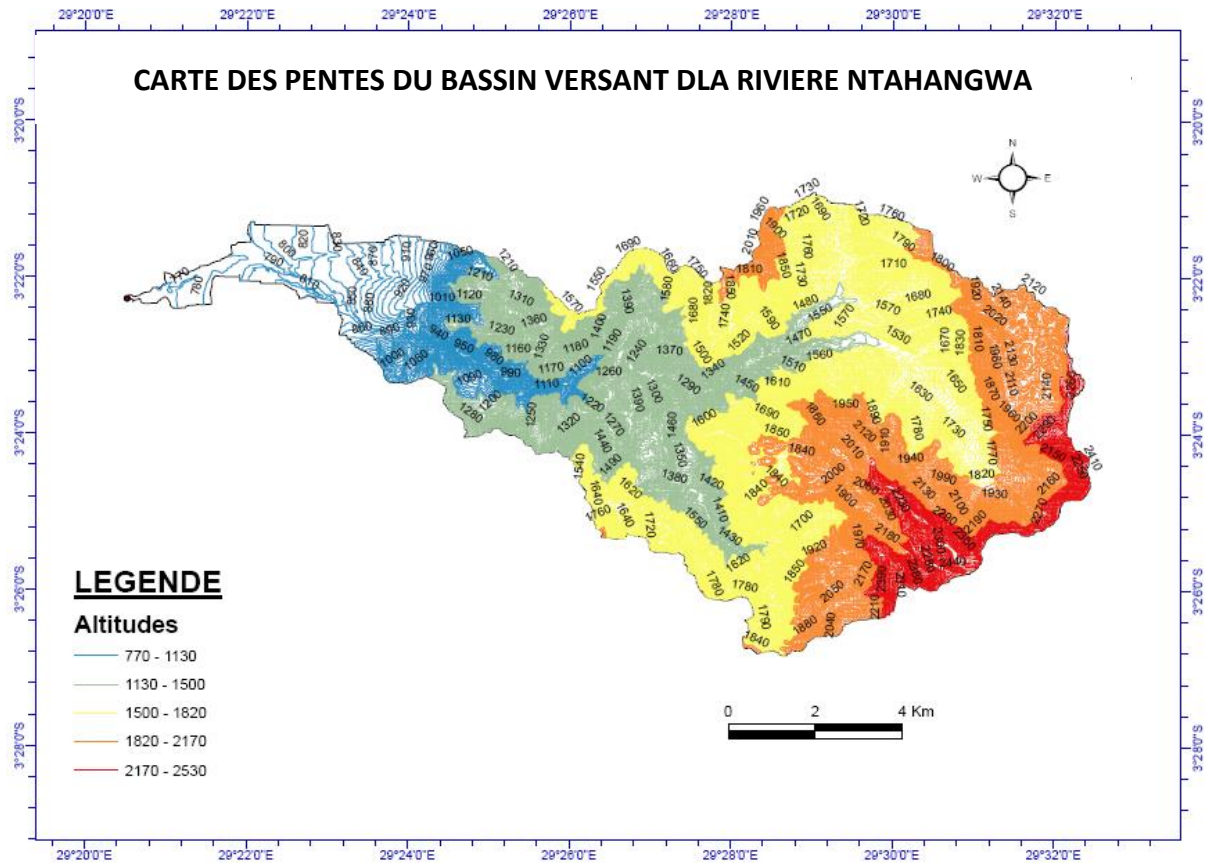
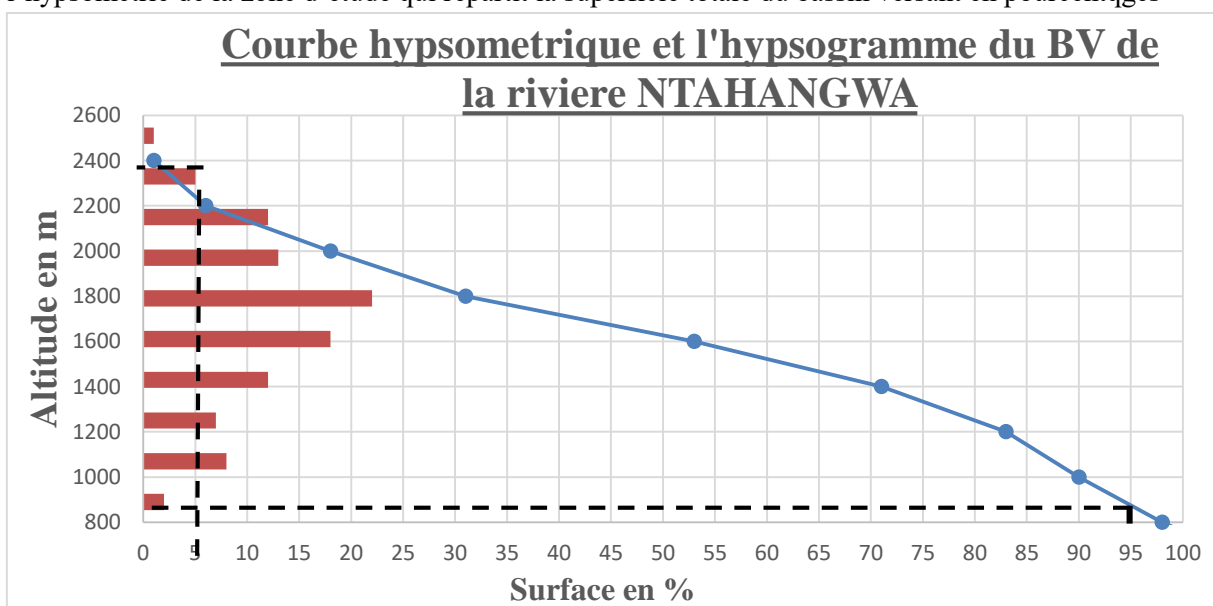


FIGURE II-25: La carte des pentes du bassin versant de la riviere NTAHANGWA

Comme la pente devra faire parti des variables physiographiques caracterisant le relief du bassin versant de la riviere NTAHANGWA, les données essentielles ne peuvent pas etre obtenues sans avoir l'hypsometrie de la zone d'étude qui repartit la superficie totale du bassin versant en pourctqges



"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

FIGURE II-26: La courbe hypsométrique et l'hypsogramme du BV de la rivière NTAHANGWA.

➤ **Son Hydrographie**

Le modèle mixte configuré pour le bassin versant de la rivière NTAHANGWA a tenu compte de son l'hydrographie , c'est donc à partir de la carte du réseau Hydrographique réalisée à l'aide du logiciel ArcGis que l'on a pu évaluer la densité de drainage, paramètre qui devra faire parti du modèle mixte.

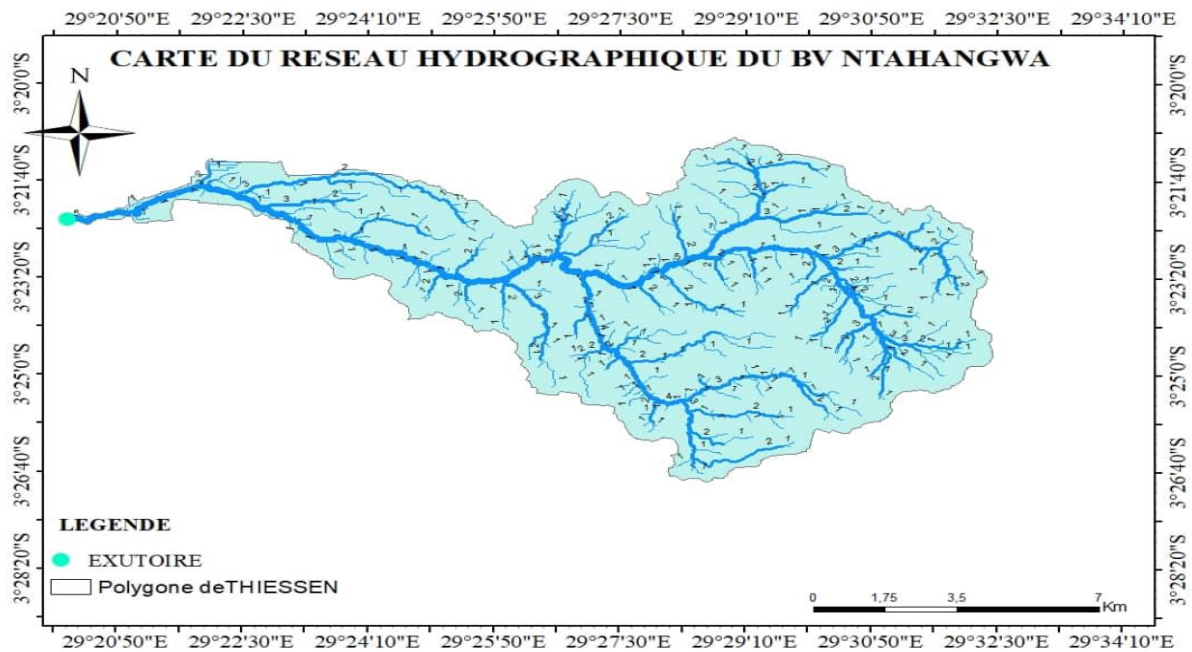


FIGURE II-27: Carte du réseau hydrographique du bassin versant de la NTAHANGWA

Partant des cartes produites à l'aide du logiciel ARCGIS 10.3, on a synthétisé les résultats des caractéristiques du bassin versant de la NTAHANGWA dans le tableau ci-dessous:

Tableau II-17: synthèse des valeurs de principales caractéristiques physiques du bassin versant de la rivière NTAHANGWA.

| Paramètres | Symboles | Unités | Exutoire Kibaya |
|-----------------------------------|------------------|-----------------|-----------------|
| Superficie | A | km ² | 111,23 |
| Périmètre | P | km | 65,03 |
| Longueur du cours d'eau principal | L _H | km | 28,70 |
| Altitude maximale | H _{max} | m | 2440 |
| Altitude minimale | H _{min} | m | 770 |

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

| | | | |
|----------------------------------|------------------|---------|-------|
| Coefficient de GRAVELIUS | C_G | Sans | 1,73 |
| Longueur du rectangle équivalent | L_R | km | 28,70 |
| Largeur du rectangle équivalent | l_R | km | 3,88 |
| Dénivelée maximale | ΔZ_{max} | m | 1470 |
| Indice de pente global | I_g | m/m | 0,051 |
| Densité de drainage | D_d | m/m^2 | 0,543 |

II.5.3.3 Calcul des paramètres (α , β , γ , ψ)

Ce sont les notions de l'analyse dimensionnelle qui nous ont permis d'obtenir différentes valeurs des paramètres (α , β , γ , ψ). Outil de grande utilité dans la mécanique des fluides, l'analyse dimensionnelle est constitué par le calcul des dimensions des grandeurs en fonction des unités des grandeurs fondamentales. Dans une équation exprimant une relation physique entre grandeurs, l'égalité absolue des nombres et des grandeurs doit avoir lieu. Avec l'analyse dimensionnelle, toute relation physique peut être réduite aux grandeurs fondamentales que sont (la masse [M], la longueur [L] et le temps [T]).

Les étapes de cette technique comprennent :

- Le passage d'un système d'unité à un autre ;
- L'établissement des équations ;
- La réduction du nombre de variables nécessaires ;
- L'établissement du modèle obtenu avec les valeurs obtenues pour chaque paramètre.

Le modèle mixte hydrologique étant de la forme suivante :

$$Q = K \times P^\alpha \times A^\beta \times I_g^\gamma \times D_d^\psi \quad [II-13]$$

Les paramètres qui doivent intervenir dans la configuration du modèle mixte sont entre autre :

- Le débit (en m^3/s) ;
- Les précipitations moyennes annuelles exprimées (en mm) ;
- La superficie du Bassin Versant (en m^2) ;
- La densité de drainage (en m^{-1}).

Les dimensions de chaque facteur en fonctions des unités des grandeurs fondamentales sont :

$$[Q] = [L^3 \times T^{-1}] \quad [II-14]$$

$$[P] = [L] \quad [II-15]$$

$$[A] = [L^2] \quad [II-16]$$

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

$$[\mathbf{I}g] = \text{grandeur adimensionnelle} \quad [\text{II-17}]$$

$$[\mathbf{D}d] = [\mathbf{L}^{-1}] \quad [\text{II-18}]$$

Après avoir exprimé chaque paramètre du modèle en fonction des unités correspondants aux grandeurs fondamentales, l'expression du modèle devient :

$$L^\alpha \times L^{2\beta} \times L^{-\psi} = L^3$$

Après avoir simplifié, on reste avec une équation à trois inconnues qui est de la forme suivante :

$$\alpha + 2\beta - \psi = 3$$

L'équation étant doublement indéterminée, sa résolution doit être paramétrique, c'est-à-dire qu'on doit exprimer une inconnue en fonction des deux autres.

La résolution doit aussi tenir compte des hypothèses suivantes :

- Comme les précipitations et la superficie d'un BV sont directement proportionnelles au débit obtenu à son exutoire, les facteurs (α , β) sont donc tous positifs ;
- La densité de drainage étant inversement proportionnelle au débit obtenu à l'exutoire d'un BV, le facteur ψ est donc négatif.

On peut donc réécrire cette triple condition qui doit être prise en considération lors de la

$$\text{résolution.} \left\{ \begin{array}{l} \beta = \frac{(3+\psi-\alpha)}{2} \\ (\alpha, \beta) > 0 \\ \psi < 0 \end{array} \right.$$

Partant des hypothèses ci haut citées, le paramètre β doit prendre ses valeurs dans l'intervalle ouverte :] 0 ; 1/2[. On s'est donc donné trois valeurs de β appartenant dans la même intervalle et ont été synthétisées dans le tableau ci-dessous :

| α | | |
|---|--|--|
| 1 | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{3}$ |
| $\beta = \left(\frac{2 + \psi}{2}\right)$ | $\beta = \left(\frac{5 + 2\psi}{4}\right)$ | $\beta = \left(\frac{8 + 3\psi}{6}\right)$ |

Et pour chaque nouvelle expression de α , et en tenant toujours compte des hypothèses ci haut citées, on a choisi les valeurs de ψ en fonction des intervalles dans lesquelles ils doivent appartenir, et ces différentes valeurs ont été synthétisées dans le tableau ci-dessus :

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

| | | | |
|--|---------------|----------------|-----------------|
| ψ | -1 | $-\frac{4}{3}$ | $-\frac{2}{3}$ |
| β | | | |
| $\beta = \left(\frac{2 + \psi}{2}\right)$ | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{3}$ | $\frac{2}{3}$ |
| $\beta = \left(\frac{5 + 2\psi}{4}\right)$ | $\frac{3}{4}$ | $\frac{7}{6}$ | $\frac{11}{12}$ |
| $\beta = \left(\frac{8 + 3\psi}{6}\right)$ | $\frac{5}{6}$ | $\frac{2}{3}$ | 1 |

II.5.3.4 Simulation et analyses des résultats des deux formes de modèles hydrologiques mixtes.

La simulation a été réalisée avec le logiciel EXCEL. Le paramètre d'amélioration du modèle hydrologique mixte K, a été obtenu par une méthode itérative automatisée en EXCEL dans l'onglet Affichage(Les macros).Le niveau de performance a été évalué avec le critère de NASH SUTCLIFF.

Les résultats obtenus ont été synthétisés dans :

Tableau II-18: Synthèse des résultats obtenus par la simulation des modèles hydrologiques mixtes

| Modèles | NTAHANGWA | | RUVYIRONZA | |
|--|------------|------------|------------|------------|
| | K | NSHE(en %) | K | NSHE(en %) |
| $Q = K \times P \times A^{\frac{1}{2}} \times I_g \times D_d^{-1}$ | 0,00143248 | 65,54 | 0,08092433 | 87,508 |
| $Q = K \times P \times A^{\frac{1}{3}} \times I_g \times D_d^{-\frac{4}{3}}$ | 0,02564135 | 65,54 | 2,45791603 | 87,510 |
| $Q = K \times P \times A^{\frac{2}{3}} \times I_g \times D_d^{-\frac{2}{3}}$ | 0,00008014 | 65,54 | 0,00266367 | 87,488 |
| $Q = K \times P^{\frac{1}{2}} \times A^{\frac{3}{4}} \times I_g \times D_d^{-1}$ | 0,00001714 | 48,89 | 0,00044504 | 56,47 |
| $Q = K \times P^{\frac{1}{2}} \times A^{\frac{7}{6}} \times I_g \times D_d^{-\frac{4}{3}}$ | 0,00000001 | 46,72 | 5,225E-08 | 56,39 |
| $Q = K \times P^{\frac{1}{2}} \times A^{\frac{11}{12}} \times I_g \times D_d^{-\frac{2}{3}}$ | 0,00000096 | 48,90 | 1,4659E-05 | 56,50 |
| $Q = K \times P^{\frac{1}{3}} \times A^{\frac{5}{6}} \times I_g \times D_d^{-1}$ | 0,00000391 | 36,09 | 7,855E-05 | 40,48 |
| $Q = K \times P^{\frac{1}{3}} \times A^{\frac{2}{3}} \times I_g \times D_d^{-\frac{4}{3}}$ | 0,00007015 | 36,22 | 0,0023868 | 40,51 |
| $Q = K \times P^{\frac{1}{3}} \times A^1 \times I_g \times D_d^{-\frac{2}{3}}$ | 0,00000021 | 24,51 | 2,583E-06 | 40,37 |

II.6. Discussion, comparaison et choix du modèle adapté pour chaque BV

Après avoir évalué séparément les performances de 3 modèles hydrologiques existants (qui ont été améliorés par des paramètres affectés comme (puissances ou coefficients) aux variables de ces modèles) et les modèles mixtes (qui ont été conçus par combinaison des conditions météorologiques (précipitations) et les principales caractéristiques physiographiques (relief, hydrographie et de la superficie) de chaque bassin versant, notre

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

étude a pu comparer les nouvelles formes des modèles hydrologiques qui ont été plus performant aux modèles mixtes pour chaque bassin versant. Le constat est que sur les deux bassins versants étudiés, les modèles hydrologiques qui ont été améliorés restent plus performants par rapport aux modèles mixtes configurés.

Après avoir amélioré les modèles hydrologiques existants, les résultats obtenus nous ont conduit à choisir les scénarii les plus performants, les critères de performance étant ci haut cités. Le modèle hydrologique ayant été le plus performant parmi les 3 modèles hydrologiques améliorés sur tous les bassins versant est SCS .Les niveaux de performance de tous les modèles hydrologiques sont largement au-dessus du seuil minimal de validation d'un modèle lui permettant d'être exploitable, ce qui permet d'utiliser sans équivoque ces 3 modèles hydrologiques lors de la prévision des débits transitant dans les cours d'eau non jaugés appartenant aux bassins versants présentant des caractéristiques physiographiques et des conditions météorologiques similaires à celles des bassins versants ayant fait l'objet de notre étude. Quant aux modèles mixtes conçus sur base de la pluviométrie, le relief, l'hydrographie, seul le modèle mixte conçu sur base pour le BV de la rivière RUVYIRONZA a pu avoir un niveau de performance supérieur au seuil minimal de validité d'un modèle. Ce qui n'a pas été le cas pour le modèle mixte conçu pour le BV de la rivière NTAHANGWA.

Les résultats de cette comparaison ont été synthétisés dans le tableau ci-dessus :

Tableau II-19: Synthèse comparative des modèles hydrologiques améliorés et les modèles mixtes.

| | Bassin versant | Description du modèle | NASH SUTCLIFF | COEF. CORRELATION |
|---------------------------------|-----------------------------------|--|---------------|-------------------|
| Modèles Hydrologiques améliorés | NTAHANGWA | $Q = \frac{\left(P^\alpha - \frac{E^\beta}{6}\right)^2}{\left(P^\alpha + \frac{2E^\beta}{3}\right)}$ | 91,99 | 0,9241 |
| | RUVYIRONZA (Exutoire Kibaya) | $Q = P - E^\beta \tanh\left(\frac{P}{E^\beta}\right)$ | 94,82 | 0,9553 |
| | RUVYIRONZA (Embouchure avec Waga) | $Q = \frac{\left(P^\alpha - \frac{\beta E}{6}\right)^2}{\left(P^\alpha + \frac{2\beta E}{3}\right)}$ | 95,75 | 0,9532 |
| Modèles mixtes | NTAHANGWA | $Q = K \times P \times A^{\frac{1}{3}} \times I_g \times D_d^{\frac{-4}{3}}$ | 65,54 | 0,723 |
| | RUVYIRONZA (Exutoire Kibaya) | $Q = K \times P \times A^{\frac{1}{3}} \times I_g \times D_d^{\frac{-4}{3}}$ | 87,51 | 0,821 |

CHAPITRE III: CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

III.1. Conclusion générale

Au terme de ce travail, je tiens à rappeler que les objectifs de ce mémoire étaient de :

- mettre au point de nouvelles formes de trois modèles hydrologiques qui étaient existant mais qui ont été améliorés par des paramètres (coefficient ou exposant) ayant été affectés aux variables de ces trois modèles afin de les amener à être exploitables efficacement sur les bassins versants locaux;
- Configurer des modèles mixtes qui ne tiennent uniquement compte des données météorologiques du bassin versant, mais qui les combine aux caractéristiques physiographiques (le relief, l'hydrographie ainsi que la superficie) de ces bassins versants.

Les trois modèles hydrologiques existants ont tous été améliorés et peuvent désormais être exploitables pour diverses nécessités sur les deux bassins versants ainsi que sur d'autres bassins versant ayant les conditions météorologiques similaires à celles de ceux ayant fait l'objet du présent travail. Les performances qu'ils ont acquiert sont toutes au-dessus du seuil minimal d'acceptation. Cependant, concernant les modèles mixtes configurés à base des données pluviométriques et les caractéristiques physiographiques de chaque bassin versant, seul sur le cas du BV de la rivière RUVYIRONZA, notre initiative a pu réussir car les performances de ce modèle vérifient les conditions minimales de validité d'un modèle, ce qui n'a pas été le cas pour le BV de la rivière NTAHANGWA.

Certes, presque tous les objectifs ont été atteints, toutefois ce travail s'est heurté à plusieurs contraintes. C'est entre autre l'acquisition des données hydrométéorologiques, l'absence des données sur plusieurs stations météorologiques, les courtes séries d'observations des données et sur des périodes variées, l'inégale répartition des stations hydrométéorologiques, et toutes ces contraintes nous ont contraint à commencer par une homogénéisation là où cela était possible et ce qui nous a limité spatialement car notre étude souhaitait au départ de traiter une grande partie des bassins versants du Burundi afin de disponibilité des modèles hydrologiques pouvant être exploitables sur une grande étendue.

Cet ouvrage contient certainement des imprécisions, des lacunes, peut-être même des erreurs. J'accueillerai avec gratitude toutes les appréciations, remarques, critiques et suggestions, que le jury voudra bien m'adresser dans un esprit que je souhaite constructif.

III.2. Recommandations

Au moment où nous nous acheminons vers la fin de notre travail qui nous a conduit à l'établissement des modèles hydrologiques exploitables sur les bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA, et la configuration d'un modèle mixte sur le bassin versant de la rivière RUVYIRONZA, les recommandations suivantes sont formulées :

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

- Dans l'optique de contribuer d'avantage à la modélisation hydrologique au Burundi, j'invite aux futurs étudiants de m'emboîter le pas en étendant ces modèles hydrologiques sur d'autres bassins versants pour finalement disponibiliser une base de données complète des modèles pouvant être exploitée lors des études hydrologiques sur des rivières peu ou pas jaugés.
- Ça serait aussi contributif comme apport scientifique si d'autres chercheurs iraient améliorer d'autres modèles hydrologiques existants dans la littérature conçus sur des pas de temps mensuels, et journalier car les modèles améliorés dans ce travail sont conçus sur un pas de temps annuel ;
- Nous recommandons aussi à l'IGEBU de densifier le réseau des stations hydrométéorologiques, et le répartir sur le territoire national d'une manière uniforme afin de faciliter de telles études leurs offrant des moyens rapides d'évaluer les débits sur des cours d'eau non jaugés ;
- Nous recommandons aussi au gouvernement de sensibiliser les chefs de services détenteurs de données utiles aux chercheurs lors de leurs études, de faciliter l'acquisition de ces données en les disponibilisant étant prétraitées sur des sites connus ce qui réduirait considérablement le temps que mettent les chercheurs pour les acquérir mais aussi pour les traiter afin de s'en servir.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. **MEDANE Kheira.** (2012). Hydrologie et modelisation pluie-debit : cas du bassin versant de l'oued boumessaoud (tafna nw- algerien). Algérie: UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID – TLEMCEM .
2. **Arsenault Richard et François Brissette, A.** (2014). Continuous streamflow prediction in ungauged basins: The effects of equifinality and parameter set selection on uncertainty in regionalization approaches. *Water Resources Research*, 6135-6135.
3. **ARTHUR Marchandise.** (2007). Modélisation hydrologique distribuée sur le Gardon d'Anduze ; étude comparative de différents modèles pluie-débit, extrapolation de la normale à l'extrême et tests d'hypothèses sur les processus hydrologiques. Montpellier: Université de Montpellier II .
4. **BESSIERE Hélène.** (2008). Assimilation de données variationnelle pour la modélisation hydrologique distribuées des crues à cinétique rapide. Toulouse: Université de Toulouse.
5. *places and scales.* Cambridge: University press.
6. **DESBORDES M.** (1984). Modélisation en hydrologie Urbaine. Recherches et applications,, LHM.
7. **Dubreuil, P.** (1974). Initiation à l'analyse hydrologique. Paris: Masson et Cie.
8. Edijatno C. et Michel C., E. (1989). Un modèle pluie-débit à trois paramètres (Vol. 2). La Houille Blanche.
9. **Environnement Canada.** (1987). Analyses de la Fréquence des Crues au Nouveau Brunswick. Publication d'Environnement Canada (Ministère des Affaires Municipales et de l'Environnement du Nouveau-Brunswick / Direction de la planification des ressources en eau.
10. observées dans le monde. , (Vol. Vol. IV ,no3 1967). Cah. O.R.S.T.O. M. sér. Hydrol.
11. **Grayson R et al.** (1992). Physically-based modelling. *Water Resources Research*.
12. **He Y., A. B.** (2011). A review of regionalisation for continuous streamflow simulation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 3539-3553.
13. **Hrachowitz M. et al., H.** (2013). A decade of Predictions in Ungauged Basins (PUB) – a review. *Hydrological Sciences Journal*, 1198-1255.
14. **IGEBU.** (2010). Rapport Hydrologique annuel du Burundi. Gitega.

"Contribution à la modélisation hydrologique au BURUNDI par adaptation de 3 modèles hydrologiques usuels et par configuration d'un modèle mixte: Cas des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA."

15. Hydrological Processes 17.
 16. **Najiba CHKIR.** (1994). Mise au point d'un modèle hydrologique conceptuel intégrant l'état hydrique du sol dans la modélisation pluie-débit. Paris: Ecole Nationale des ponts et chaussées.
 17. **Nash J. E. et J.V. Sutcliffe.** (1970). Nash, J. E. et J.V. Sutcliffe. 1970. « River flow forecasting through conceptual models part I A discussion of principles » En ligne. Vol 10 issue 3. Journal of Hydrology, 282-290.
 18. **OMM-N°168.** (2014). Guide des pratiques hydrologiques, (éd. 6ème édition, Vol. volume II).
 19. **OMM-N°169.** (1994). Guide des pratiques hydrologiques.
 20. **Oudin L. et al.** (2008). .Spatial proximity, physical similarity, regression and ungauged catchments: A comparison of regionalization approaches based on 913 French catchments. Water Resources Research .
 21. **NERIAS G., R.** (1976). Hydrologie de l'ingénieur. Paris: Eyrolles.
 22. **Safouane MOUELHI, S.** (2003). Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier. Paris: Ecole Nationale du Génie Rural des eaux et forêts.

 23. **Abbott M.B. et al.** (1986). An introduction to the European Hydrological System- Système Hydrologique Européen "SHE". Journal of Hydrology.
 24. **Abdoul Aziz Vanediemo MEITE.** (2019). Etude comparative des méthodes usuelles de calculs hydrologiques et hydrauliques cas d'un ouvrage de franchissement à Aniassue sur le fleuve Comoe . Université 2iE.
- Aguilar E. et al.** (2003). Guidelines on climate metadata and homogenization. World Meteorologica