UNIVERSITÉ DU BURUNDI
GRENIER DU SAVOIR DU BURUNDI
Dépôt institutionnel officiel
https://repository.ub.edu.bi

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; Sous la direction du : Dr-Ir Mvuyekure Jean Claude

2023-08
UB, FSI

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

Document téléchargé depuis le **Grenier du Savoir du Burundi** — https://repository.ub.edu.bi

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

Université du Burundi

Master en Génie Civil, Aménagement et Maîtrise des Projets

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 le14/08/2023 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

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 fourni 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 supposées 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 repérer 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 le débits a 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 a 91,99%, le modèle OL'DEKOP a 77,02%, et celui de TIXERONT a 91,26%, et que sur le BV de la rivière RUVYIRONZA a son exutoire sis à KIBAYA le modèle SCS est fiable a94,34%, le modèle OL'DEKOP a94,82%, et celui de TIXERONT a94,62%, et au niveau de l'embouchure de la rivière RUVYIRONZA et la rivière WAGA, le modèle SCS est fiable a95,75%, le modèle OL'DEKOP a95,31%, et celui de TIXERONT a93,42% .

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

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 ..... x i

LISTE DES FIGURES ..... x iii

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS ..... x vi

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

CHAPITREI: REVUE DE LA LITTERATTURE **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

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 BIBLIOGRAPHIQUES 93

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 riviere 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

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

LISTE DES FIGURES

FIGURE I-1:llustration du polygone de Thiessen 12

FIGURE I-2:llustration 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

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

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

a,b,ψ,λ	: 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
$Q_{i,sim}$	: Débit simulé au pas de temps i
$Q_{i,obs}$	: 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 nécessite d'usager 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 évènements 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 a celles des bassins versant du Burundi ; ajouté a 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 autre les données hydrométéorologiques (la pluviométrie de chaque station météorologique ,les températures enregistrées sur chaque station météorologique ,les débits observés des deux rivières pris au niveaux 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.

Apres 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 celui de Nash-Sut Cliff ainsi que le coefficient de corrélation entre les débits observés et ceux simulés.

Une partie des objectifs fixés a été atteint, et cela étant entre autre la mise au point de nouvelles formes de trois modèles hydrologiques existant et adaptés sur des bassins versants des rivières NTAHANGWA et RUVYIRONZA, le niveau de performance de chacun des trois modèles ayant largement dépasse 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 connaitre 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.

Apres 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 observes, 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

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.

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 diffèrent 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 :

- 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 scenarii 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 ;

- Evaluation de l'efficacité de chaque scenario 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.

CHAPITREI: REVUE DE LA LITTERATTURE

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 hydrométéorologique 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

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

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) .**

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'impériale 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 meteorologiques.

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

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) :

$$\mathbf{y_x = \overline{y_k} + a(x - \overline{x_k})} \qquad \textbf{[I-1]}$$

Avec $\mathbf{y_x}$ **:** valeurs homogénéisées de la série courte

$\overline{\mathbf{x_k}}$: Moyenne des valeurs pour x sur k valeurs expérimentales

$\overline{\mathbf{y_k}}$: Moyenne des valeurs pour y sur k valeurs expérimentales

a= coefficient de pente de la droite de régression

$$\mathbf{a = \frac{\overline{x_k y_k} - \overline{x_k}\,\overline{y_k}}{\overline{x^2}_k - \overline{x_k}^2}} \qquad \textbf{[I-2]}$$

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

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.

$$\mathbf{P_m} = \frac{\sum_i^n (\mathrm{Pi} \times \mathrm{Ai})}{\sum_i^n \mathrm{Ai}} \qquad \textbf{[I-3]}$$

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 superficie allouées à chaque station du bassin.



FIGURE I-1:llustration du polygone de Thiessen

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

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 m²) ;

A : surface totale du bassin (∑ Ai).

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 :

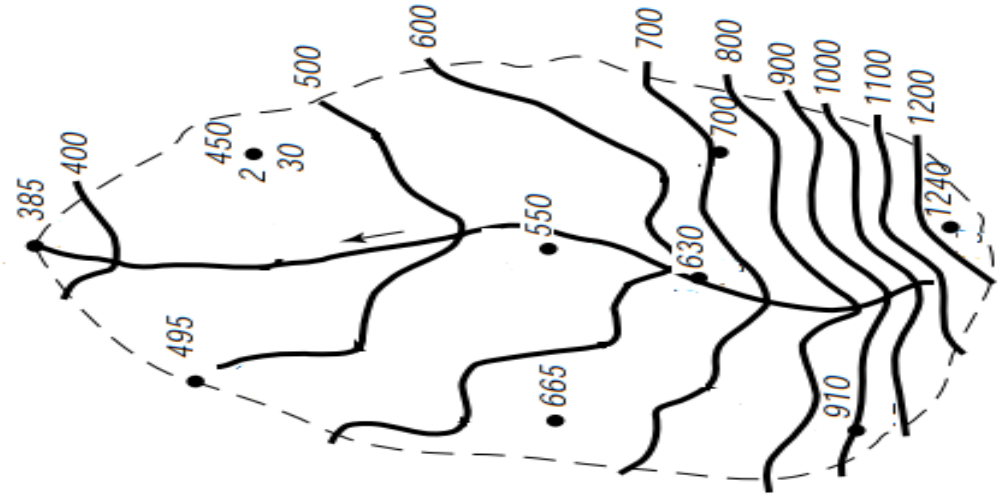


FIGURE I-2:llustration d'une carte des isohyètes

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

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

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

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 (∑ Ai).

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

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

Les modèles pluie-débits sont des fonctions permettent de déterminer le débit qui transiteraient 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'entrer(les précipitations moyennes annuelles, et l'évapotranspiration moyenne annuelle). Testés lors de sa thèse (intitulée : "**Vers une chaine 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 a l'évapotranspiration qu'en l'affectant aux précipitations ou en affectant à la fois les paramètres d'amélioration a l'évapotranspiration et aux précipitations.

Les trois modèles hydrologiques existants sont :

- Modèle OL'DEKOP

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

- Modèle SCS

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

- Modèle TIXERONT

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

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

définis par le concepteur du modèle. Ainsi, d'après **(Najiba CHKIR, 1994)**, un modèle performent 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** : II 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 :

$$\text{NSHE} = 1 - \frac{\sum_i^n (Qobs - Qsim)^2}{\sum_i^n (Qobs - Qmoy\ obs)^2} \qquad \textbf{[I-9]}$$

$$\text{CR} = \frac{\left[\frac{\sum_i^n (Qobs - Qobs\ moy)(Qsim - Qmoy\ sim)}{n}\right]}{\sigma(Qobs) * \sigma(Qsim)} \qquad \textbf{[I-10]}$$

Avec $\sigma(Qobs)$ et $\sigma(Qsim)$ 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.

CHAPITREII: 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 contribuée 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.

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.

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.

$$\mathbf{ETP = 16\left(\frac{10t}{I}\right)^{a}.K} \qquad \textbf{[II-1]}$$

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

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 ^{0}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	

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	

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	

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	

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	

2004	1	21,55	9,13	108,40	2,39	1,23	89,28	
2004	2	21,22	8,92		2,39	1,23	87,64	1061,96
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	

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	

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	

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	

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	

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	

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 ^{0}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	

1993	2	19,30	7,73		2,03	0,98	66,90	
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	802,78
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	799,27
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	
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	826,51
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	

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	
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	813,20
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	
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	756,82
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	
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	841,97

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	

2001	4	20,08	8,20		2,09	1,03	71,86	
2001	5	19,48	7,84		2,09	1,03	69,67	
2001	6	18,71	7,37		2,09	1,03	66,81	845,02
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	924,11
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	
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	904,27
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	

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	

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	873,95
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	
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	855,29
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	
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	

2009	4	19,59	7,90		2,16	1,08	72,34	
2009	5	19,89	8,09		2,16	1,08	73,53	
2009	6	19,20	7,67		2,16	1,08	70,80	892,01
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	932,13
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	
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	879,47
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	

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	

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	954,63
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	
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	1008,61
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	
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	

2017	4	20,39	8,40		2,23	1,13	78,23	
2017	5	20,02	8,17		2,23	1,13	76,66	
2017	6	19,91	8,10		2,23	1,13	76,15	946,19
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	922,87
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	
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	898,89
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	

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.

$$\mathbf{Pm} = \frac{\sum_{i}^{n}(\mathbf{Ai}\times\mathbf{Pi})}{\sum_{i}^{n}\mathbf{Ai}} \qquad \textbf{[II-2]}$$

Avec :

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

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

Pm : Précipitations moyennes annuelles (en mm).

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.

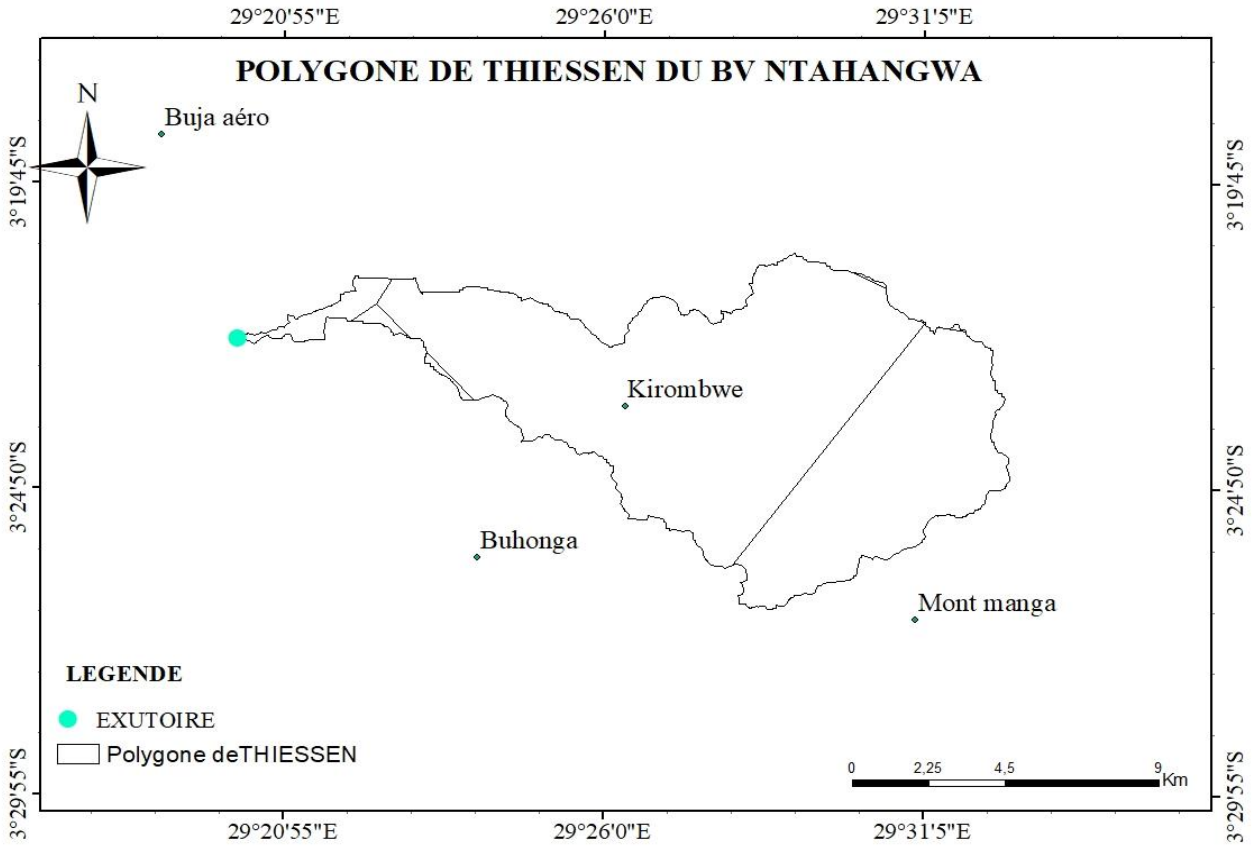


FIGURE II-1:Polygone de THIESSEN du BV de la rivière NTAHANGWA

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

Stations	**KIROMBWE**	**BUJA-AERO**	**BUHONGA**	**MONT-MANGA**	
$\frac{Ai}{\sum Ai}$ / Années	**0,46778**	**0,11023**	**0,10923**	**0,31276**	**Pm(en mm)**
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**

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 reparties 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.

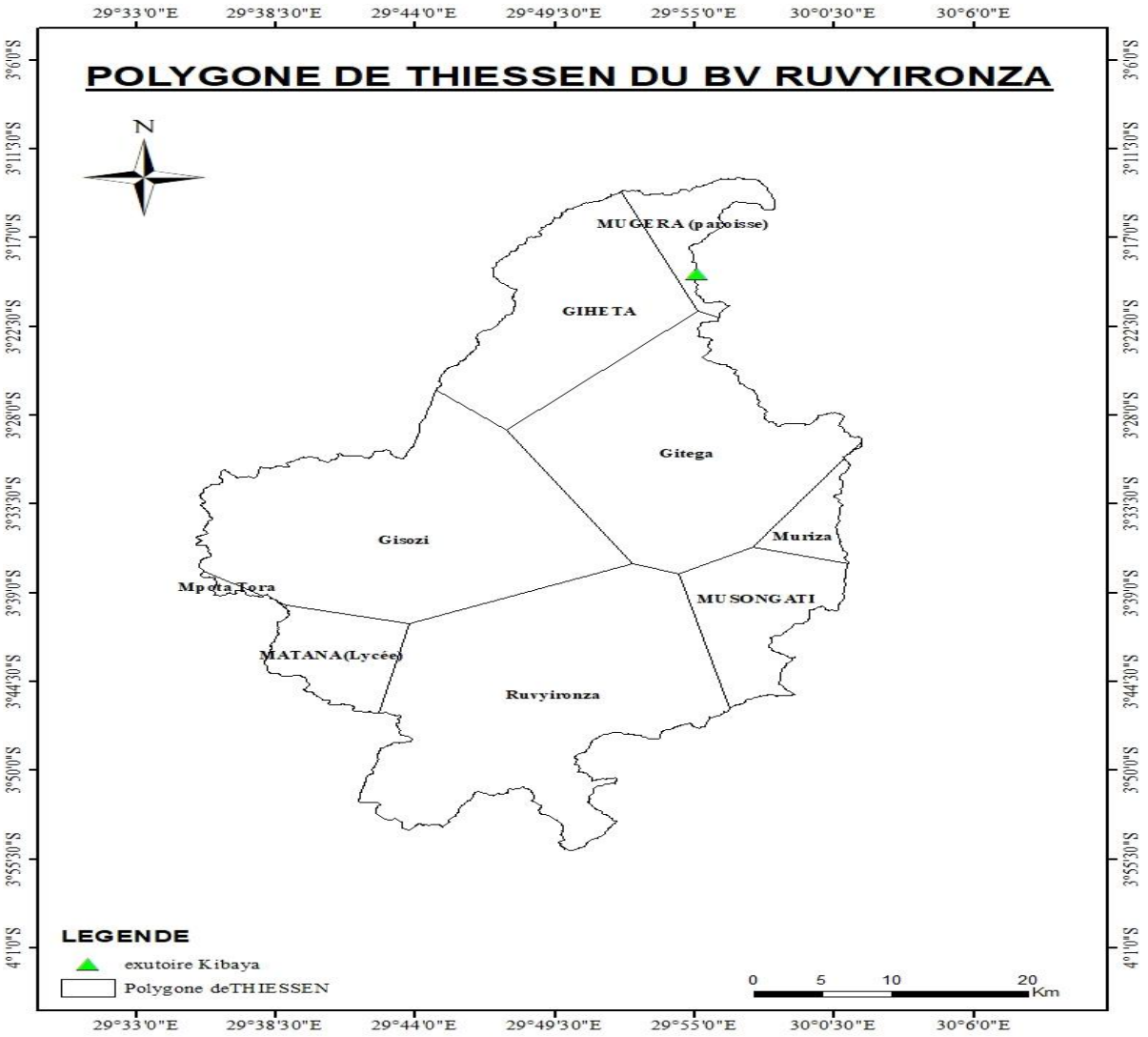


FIGURE II-2: Polygone de THIESSEN du bassin versant de la rivière RUVYIRONZA

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

Stations	GITEGA	GISOZI	RUVYI RONZA	GIHETA	MUSO NGATI	
$\frac{Ai}{\sum Ai}$ / Années	**0,3003291**	**0,3971098**	**0,2187452**	**0,0209613**	**0,0199875**	**Pm**
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**

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 scenarii 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 :

II.4.1 Synthèse des résultats obtenus des scenarii 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

$Q = \sqrt{(P^{2\alpha} + E^{2\beta})} - E^{\beta}$	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

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

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

Tableau II-9:Modèle TIXERONT

Déscription 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

2. Modèle SCS

Tableau II-10 : Modèle SCS

Déscription 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

Tableau II-11 : Modèle OL'DEKOP

Déscription 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

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

Tableau II-12:Modèle TIXERONT

Déscription du modèle	**Paramètres d'amélioration**		**Critère de NASH en (%)**
	α	β	
$Q = \sqrt{(P^2 + E^2)} - E$	Sans	Sans	-5244,71
$Q = \sqrt{(P^{2\alpha} + E^{2\beta})} - E^{\beta}$	0,999953333	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
$Q = \sqrt{(P^{2\alpha} + E^2)} - E$	0,930303333	Sans	88,36
$Q = \sqrt{(P^{2\alpha} + (\beta E)^2)} - (\beta E)$	1,000043333	3,0252	93,39
$Q = \sqrt{(P^2 + E^{2\beta})} - E^{\beta}$	Sans	1,16324	93,25

Tableau II-13: modèle SCS

Déscription 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

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 applique un paramètre α comme coefficient aux précipitations ainsi que le paramètre β comme puissance a l'évapotranspiration.

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

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	

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	

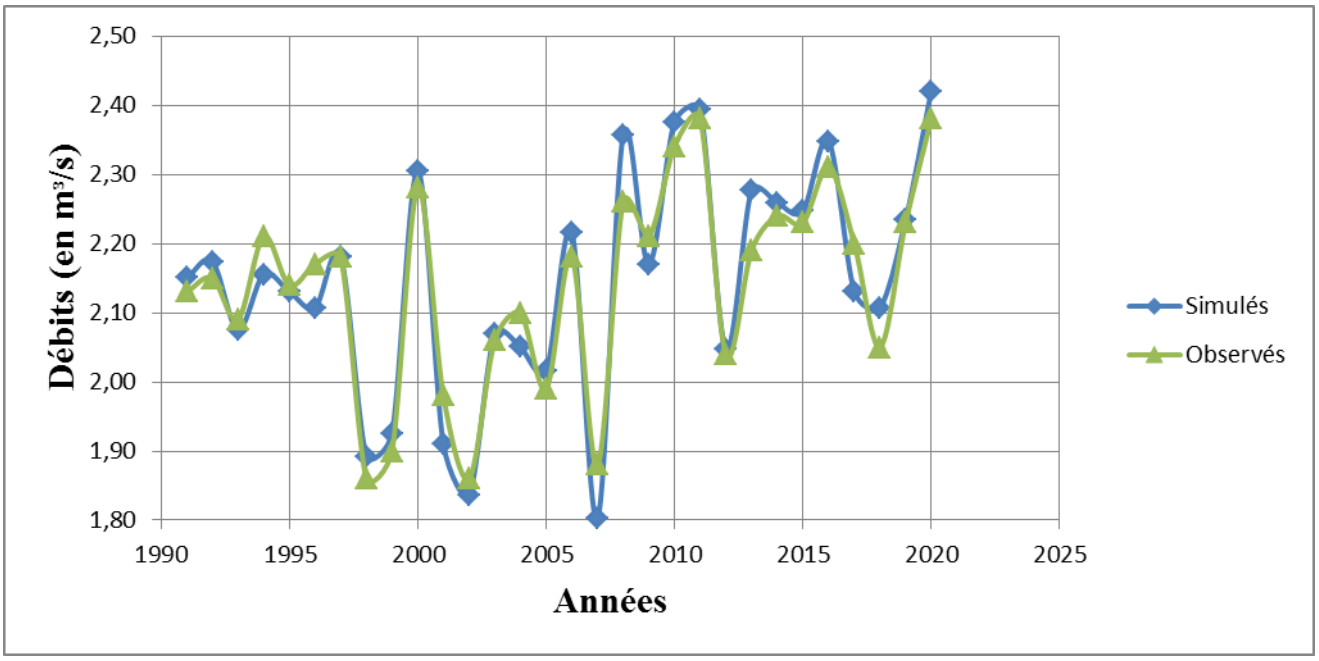


FIGURE II-3:Représentation graphique des allures des débits simulés et celles des débits observés par le modèle amélioré d'OL'DEKOP.

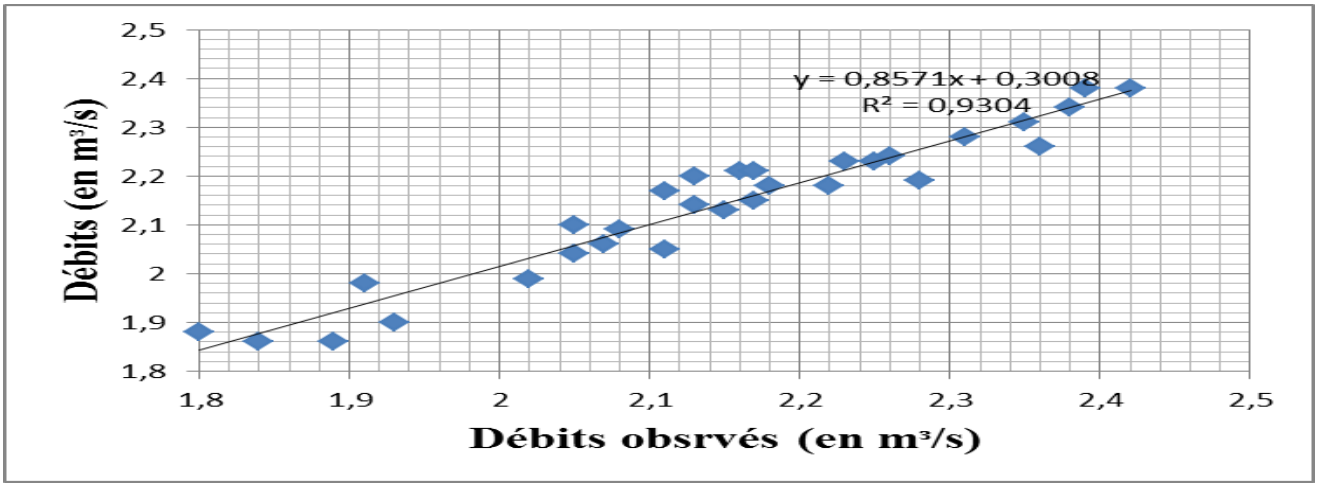


FIGURE II-4:Ajustement des débits simulés et les débits observés par la méthode des moindres carrées ainsi que le coefficient de corrélation pour le modèle OL'DEKOP

b. Modèle TIXERONT

Le scenario le 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.

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

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	

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	

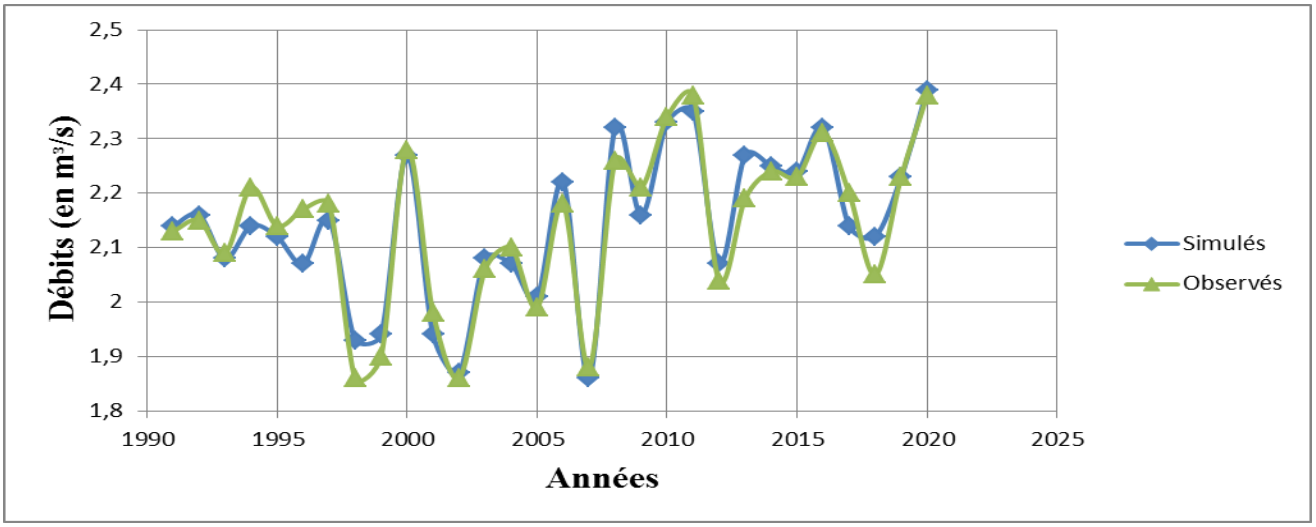


FIGURE II-5:Représentation graphique des allures des débits simulés et celles des débits observés par le modèle amélioré de TIXERONT

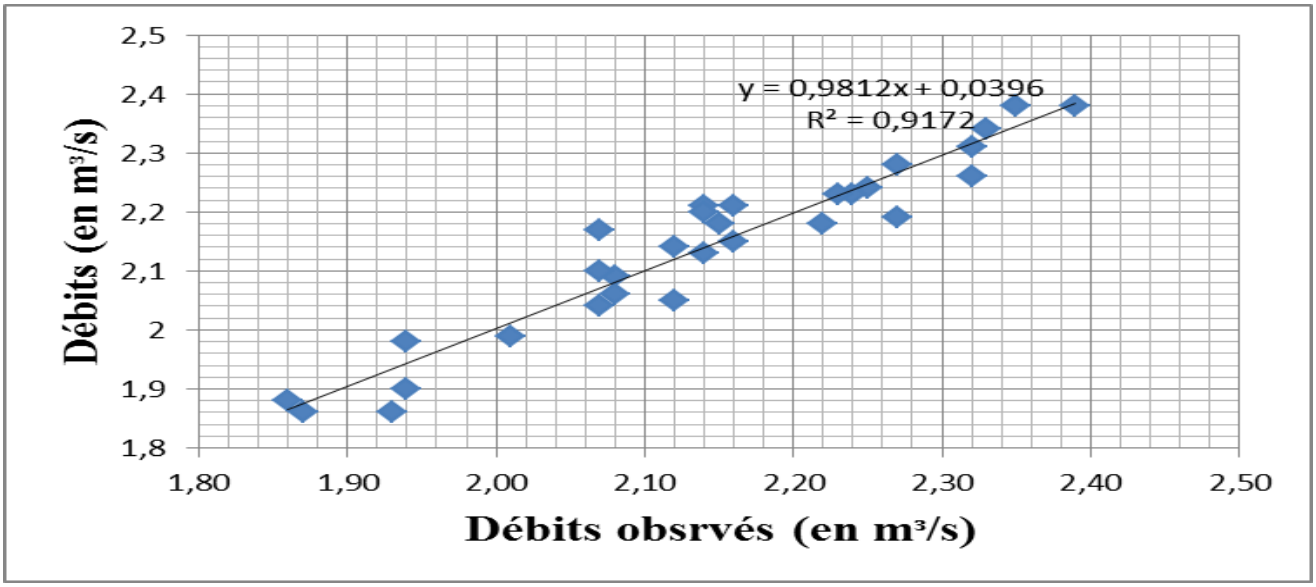


FIGURE II-6:Ajustement des débits simulés et les débits observés par la méthode des moindres carrées ainsi que le coefficient de corrélation pour le modèle TIXERONT

c. Modèle SCS

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

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

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	

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	

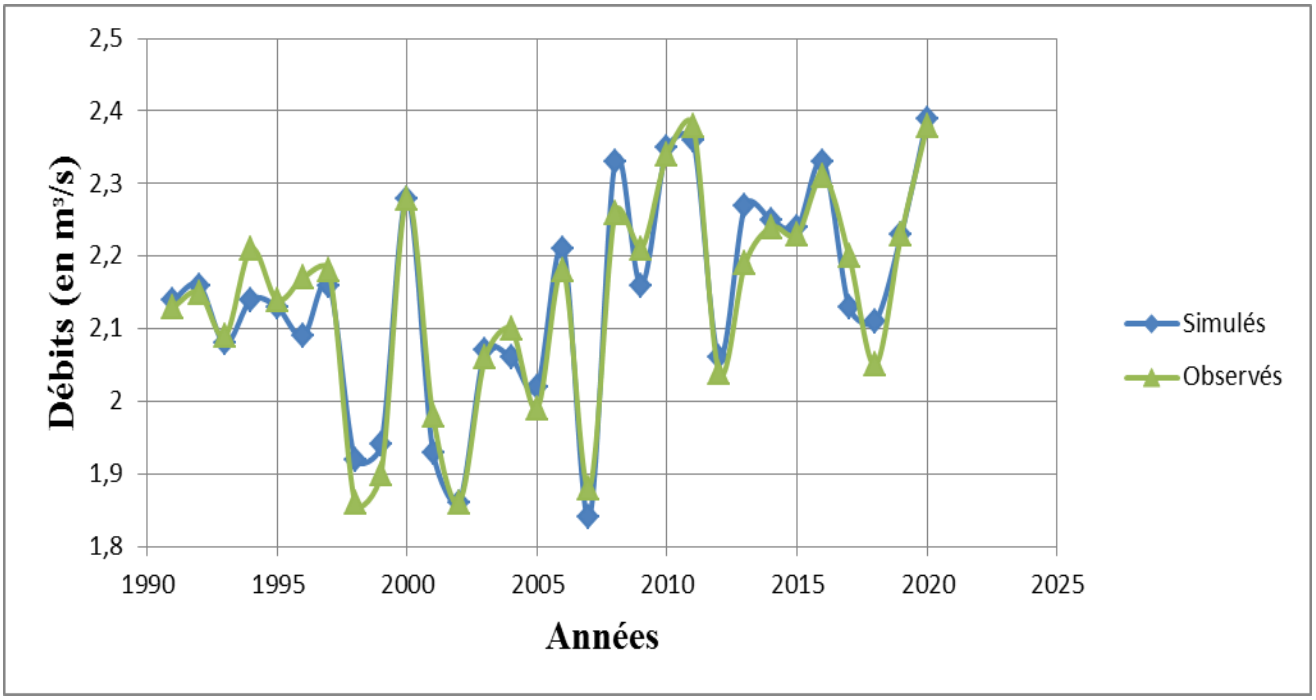


FIGURE II-7:Représentation graphique des allures des débits simulés et celle des débits observés pour le modèle SCS.

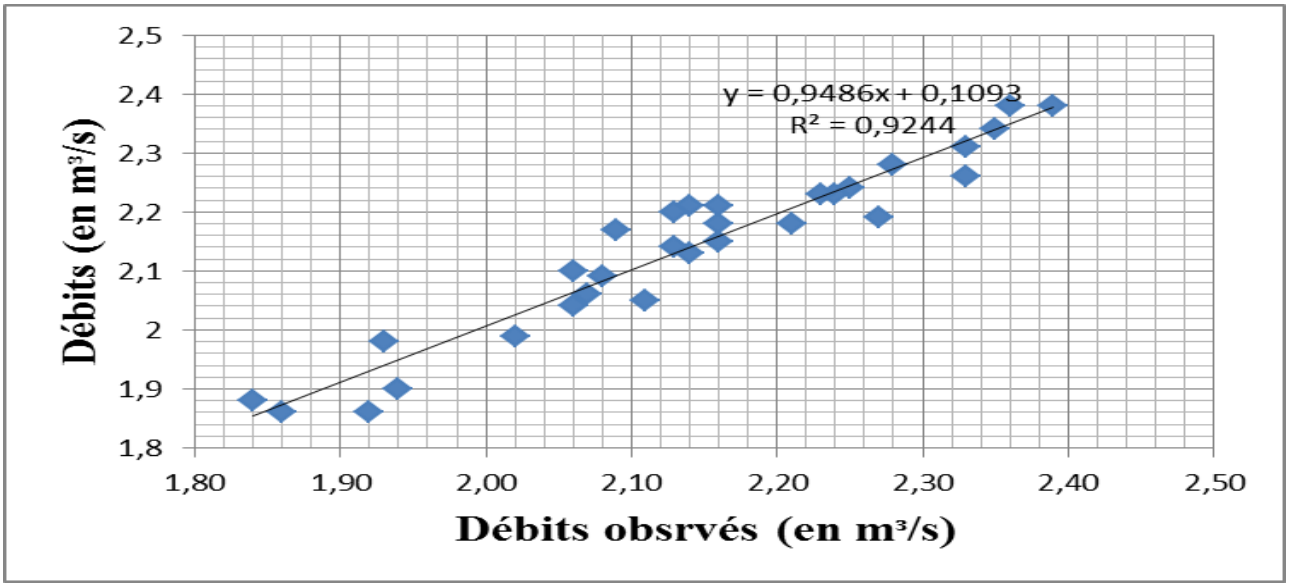


FIGURE II-8: Ajustement des débits simulés et les débits observés par la méthode des moindres carrées ainsi que le coefficient de corrélation pour le modèle SCS

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 applique un paramètre β comme puissance de l'évapotranspiration.

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

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	

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	

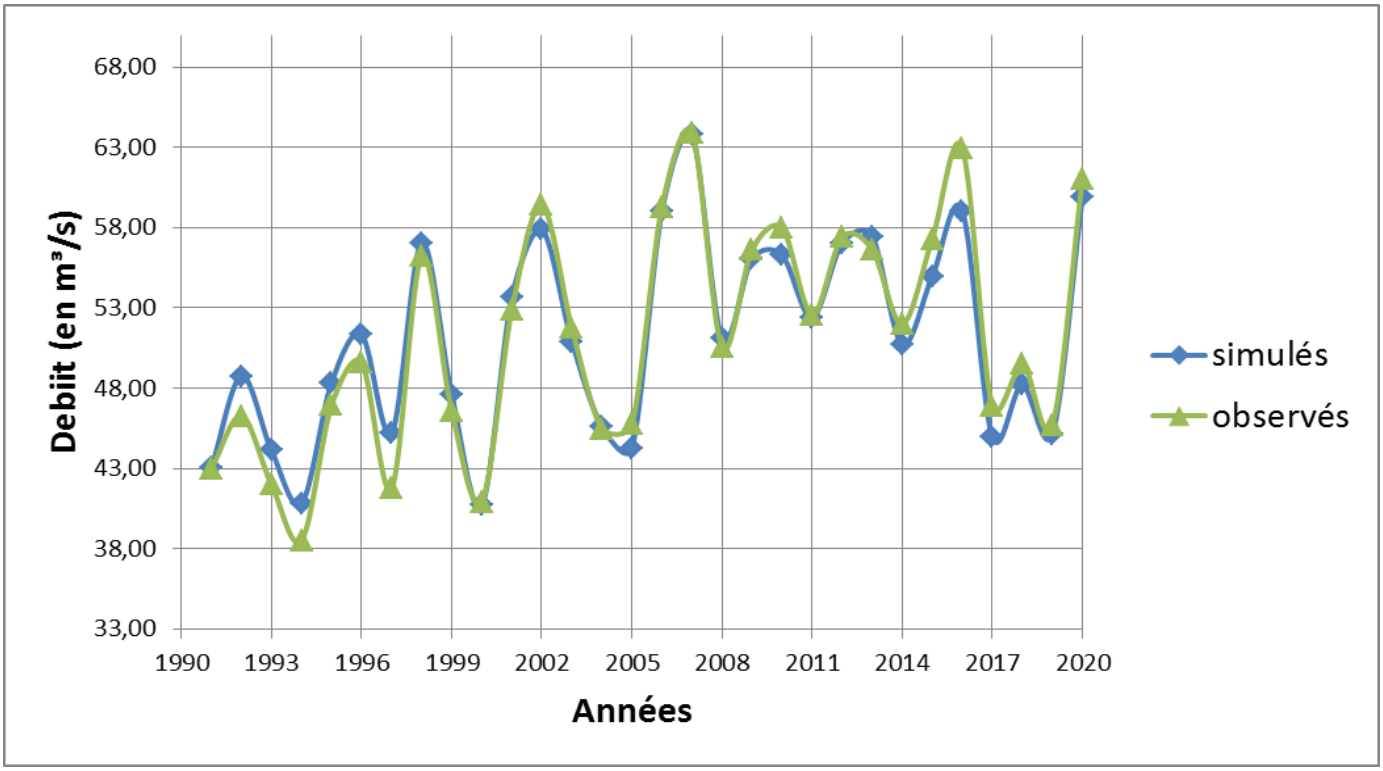


FIGURE II-9: Représentation graphique des allures des débits simulés et celles des débits observés par le modèle amélioré de OL'DEKOP

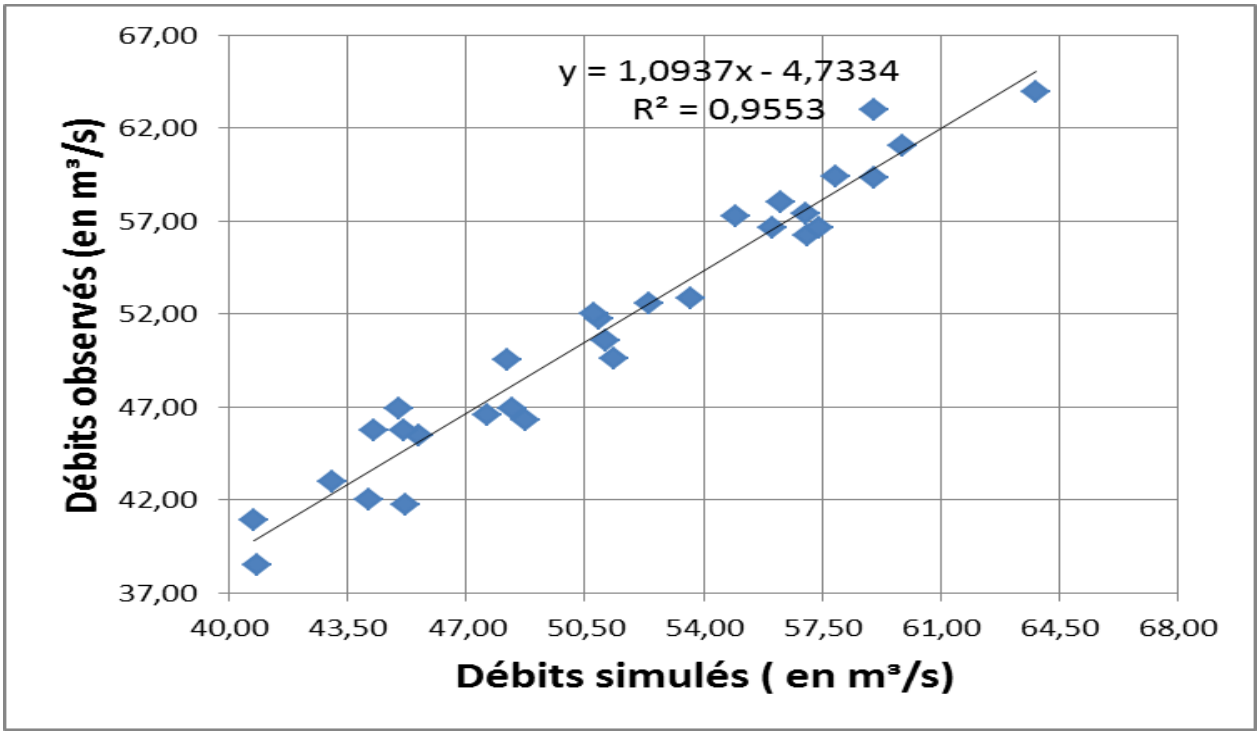


FIGURE II-10:Ajustement des débits simulés et les débits observés par la méthode des moindres carrées ainsi que le coefficient de corrélation pour le modèle OL'DEKOP

b. Modèle TIXERONT

Le scenario le 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.

$$\mathbf{Q} = \sqrt{(\mathbf{P^{2\alpha}} + \mathbf{E^{2\beta}})} - \mathbf{E^{\beta}} \qquad \textbf{[II-7]}$$

Années	Pm (en mm)	ETP(en mm)	α	β	QCalc (en m³/s)	QObs (en m³/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	

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	

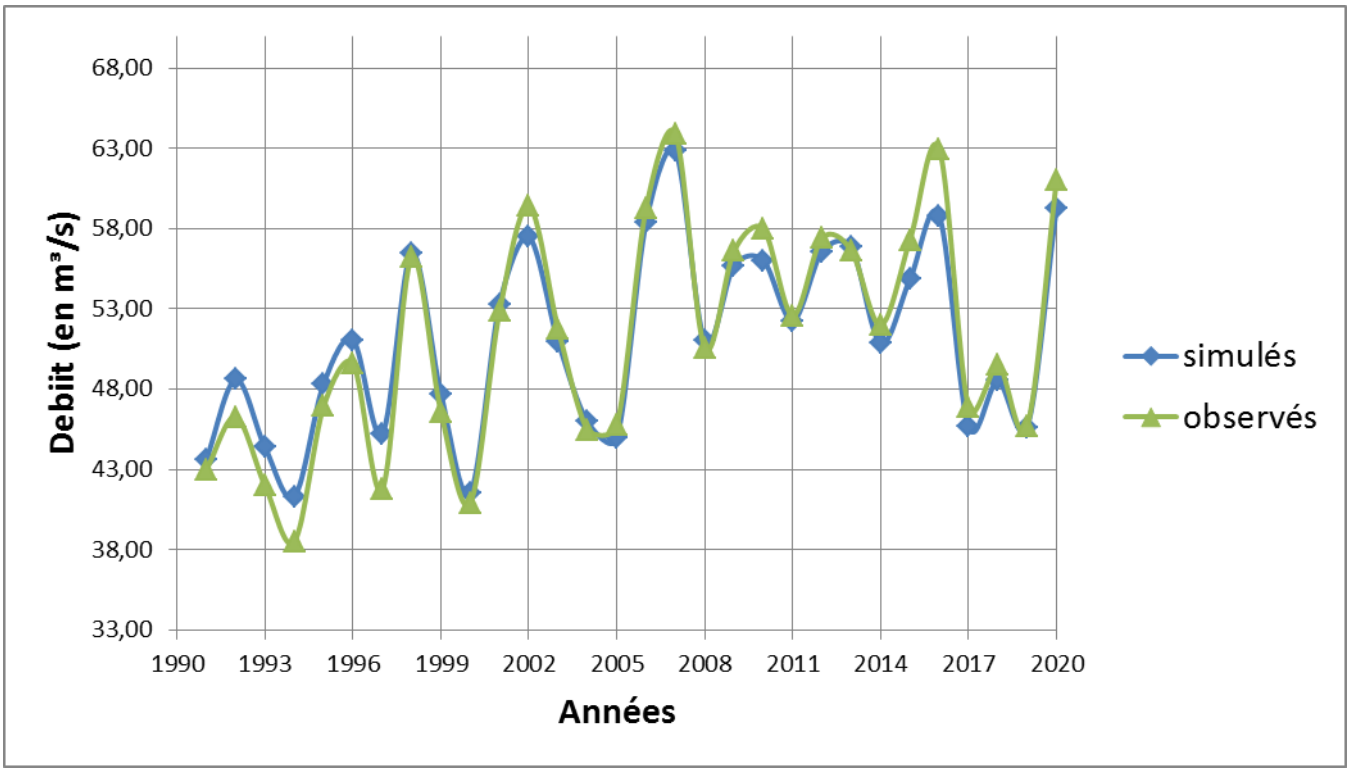


FIGURE II-11: Représentation graphique des allures des débits simulés et celles des débits observés par le modèle amélioré de TIXERONT

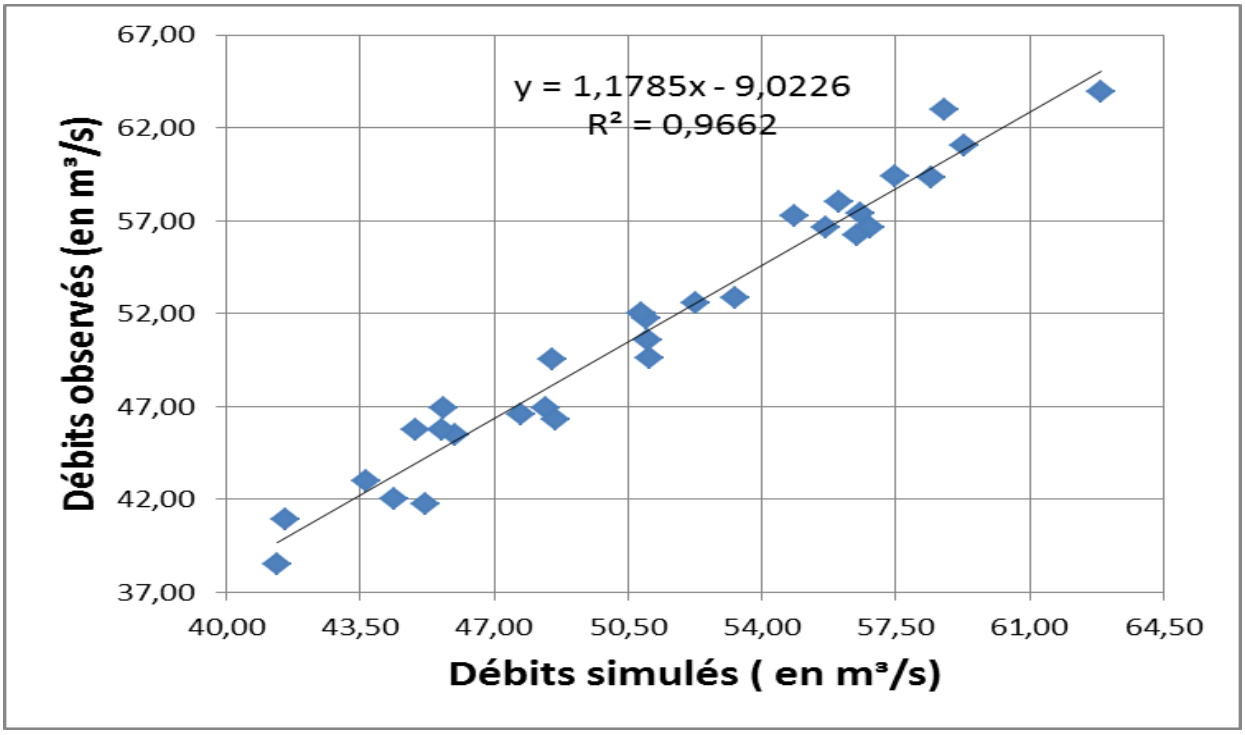


FIGURE II-12: Ajustement des débits simulés et les débits observés par la méthode des moindres carrées ainsi que le coefficient de corrélation pour le modèle TIXERONT

c. Modèle SCS

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

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

Années	[2]Pm (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	

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	

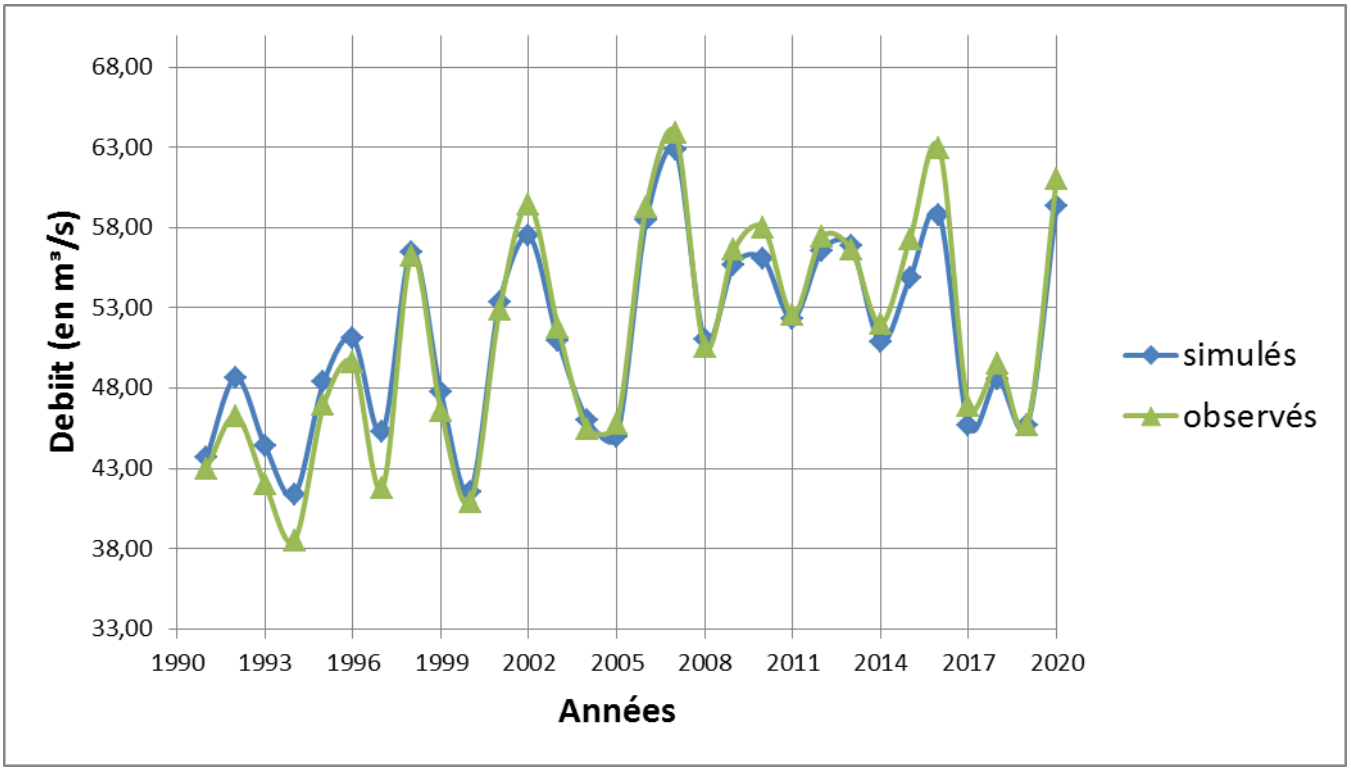


FIGURE II-13: Représentation graphique des allures des débits simulés et celles des débits observés par le modèle amélioré de SCS

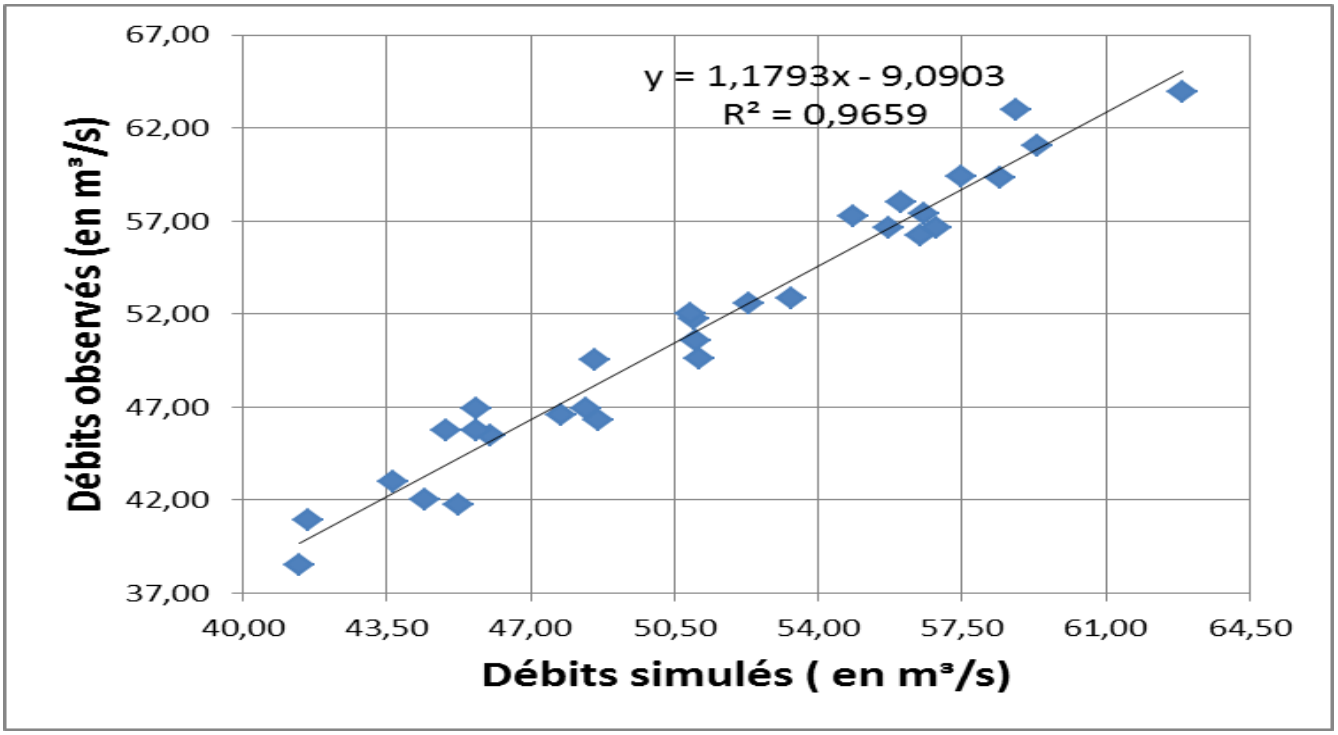


FIGURE II-14: Ajustement des débits simulés et les débits observés par la méthode des moindres carrées ainsi que le coefficient de corrélation pour le modèle SCS

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.

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

Années	Pm (en mm)	ETP(en mm)	α	QCalc (en m³/s)	QObs (en m³/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	

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	

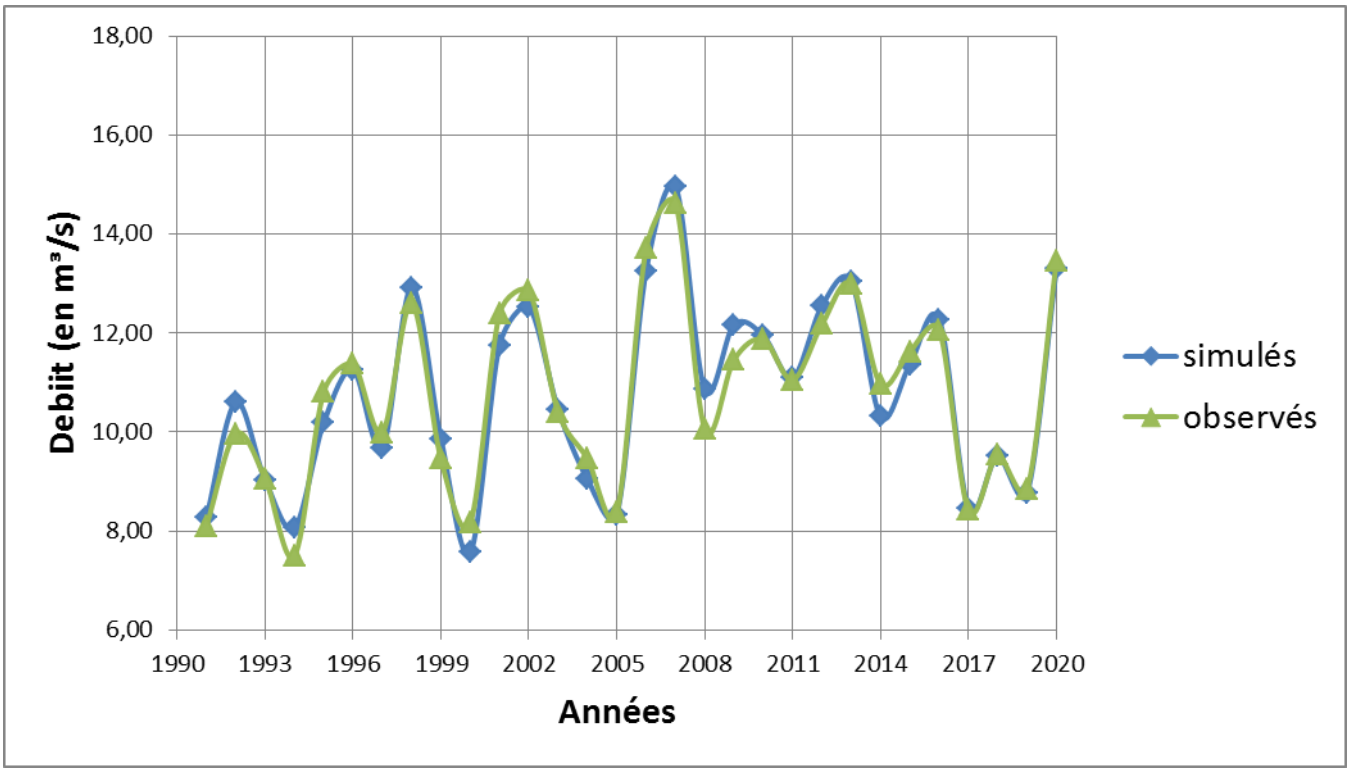


FIGURE II-15: Représentation graphique des allures des débits simulés et celles des débits observés par le modèle amélioré de OL'DEKOP

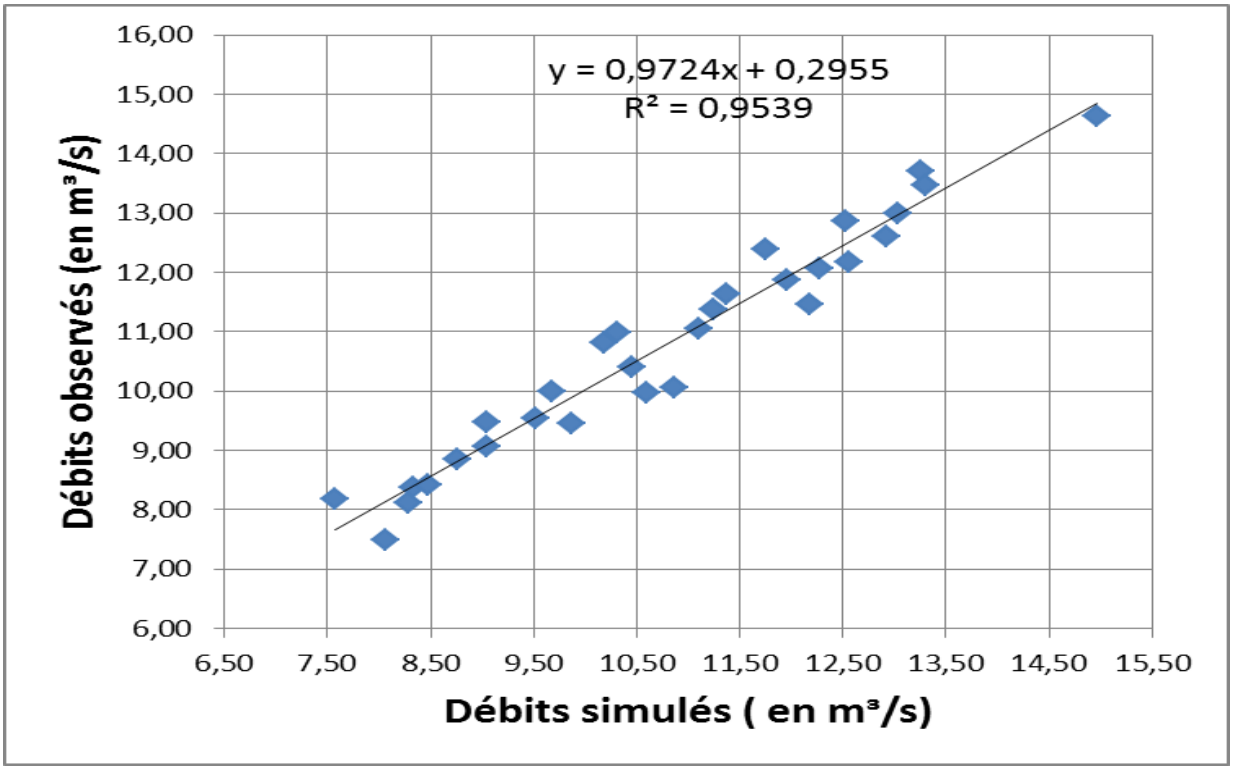


FIGURE II-16: Ajustement des débits simulés et les débits observés par la méthode des moindres carrées ainsi que le coefficient de corrélation pour le modèle OL'DEKOP

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.

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

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	

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	

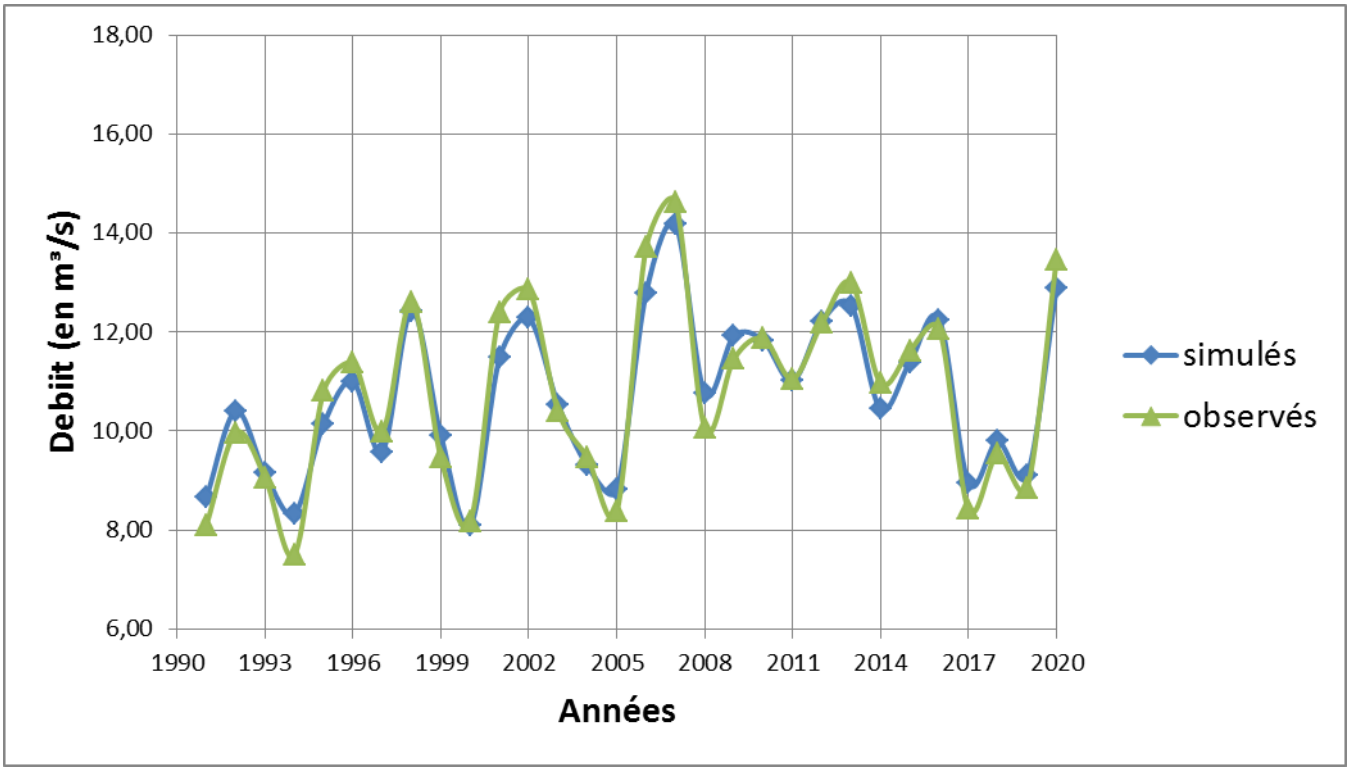


FIGURE II-17: Représentation graphique des allures des débits simulés et celles des débits observés par le modèle amélioré de TIXERONT

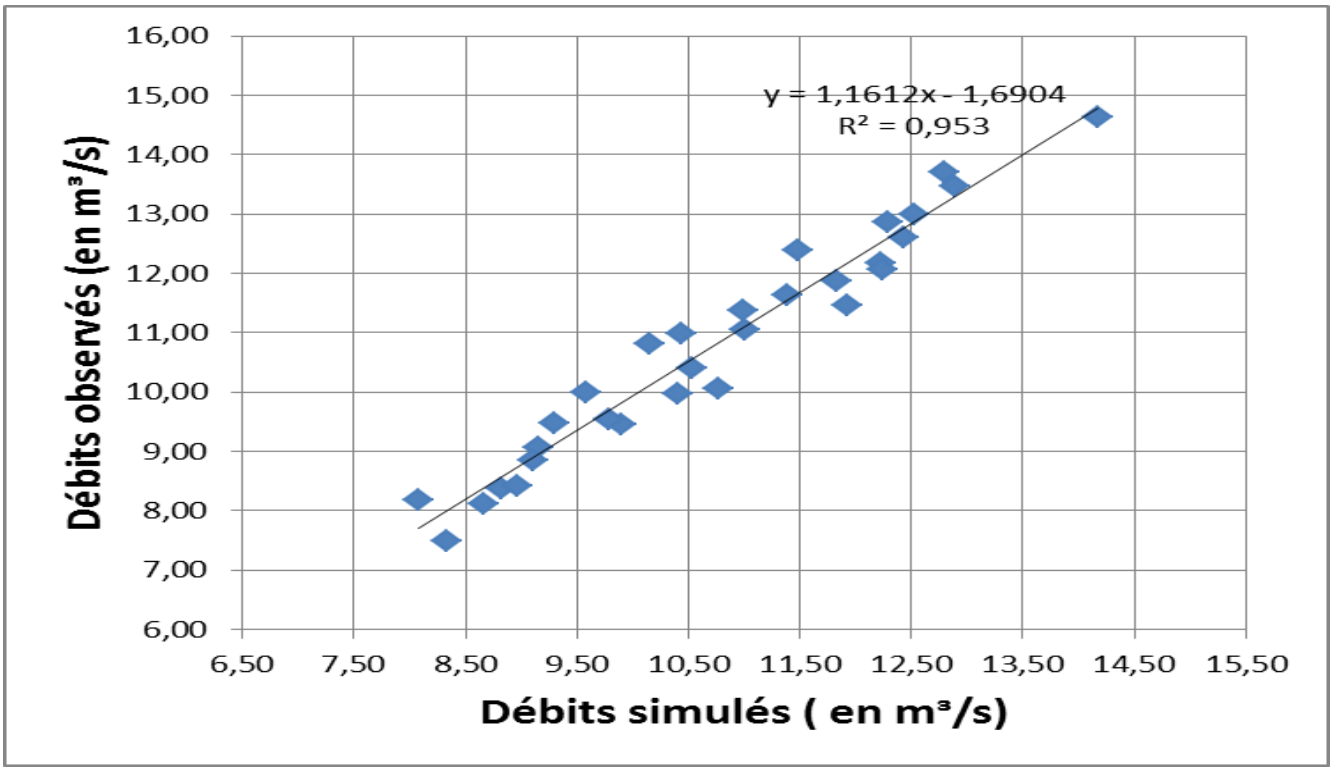


FIGURE II-18: Ajustement des débits simulés et les débits observés par la méthode des moindres carrées ainsi que le coefficient de corrélation pour le modèle TIXERONT

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.

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

Années	Pm (en mm)	ETP(en mm)	α	β	QCalc (en m³/s)	QObs (en m³/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	

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	

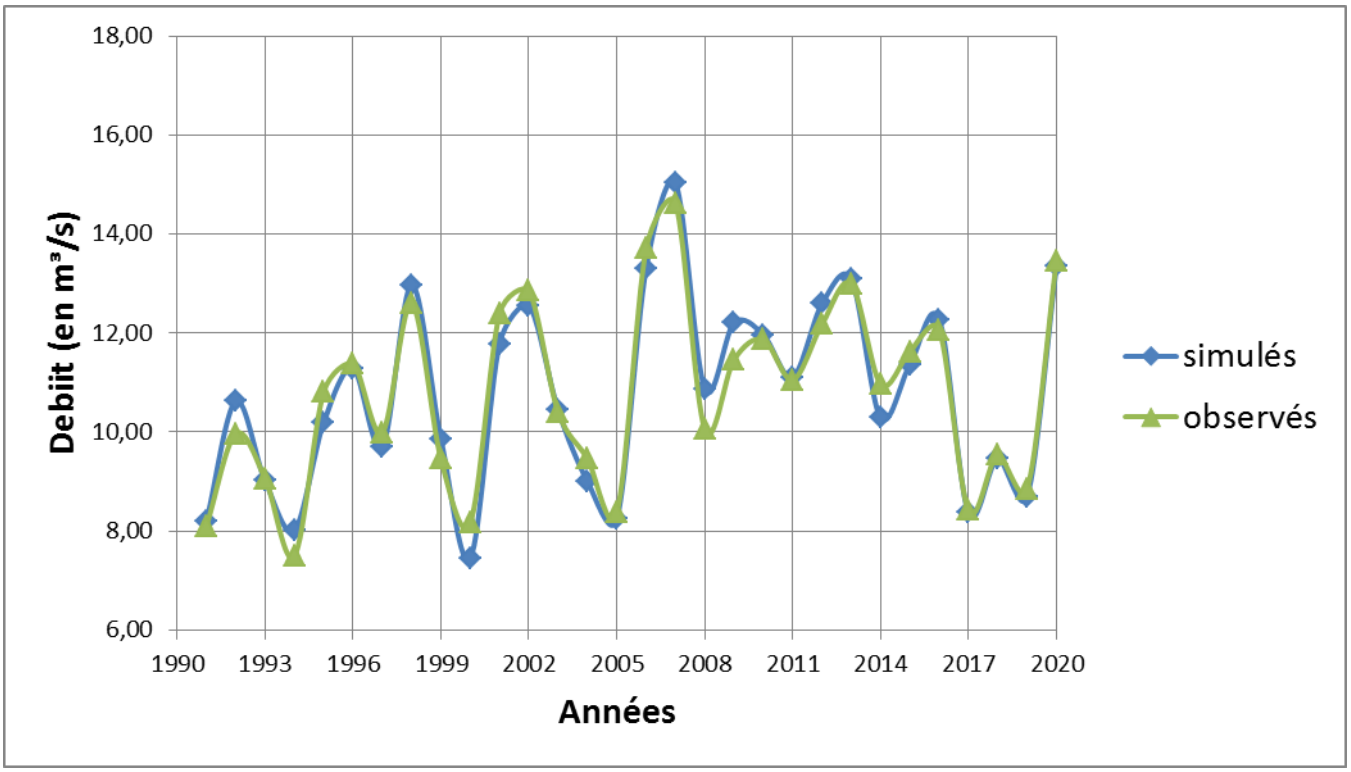


FIGURE II-19:Représentation graphique des allures des débits simulés et celles de débits observés par le modèle amélioré de SCS

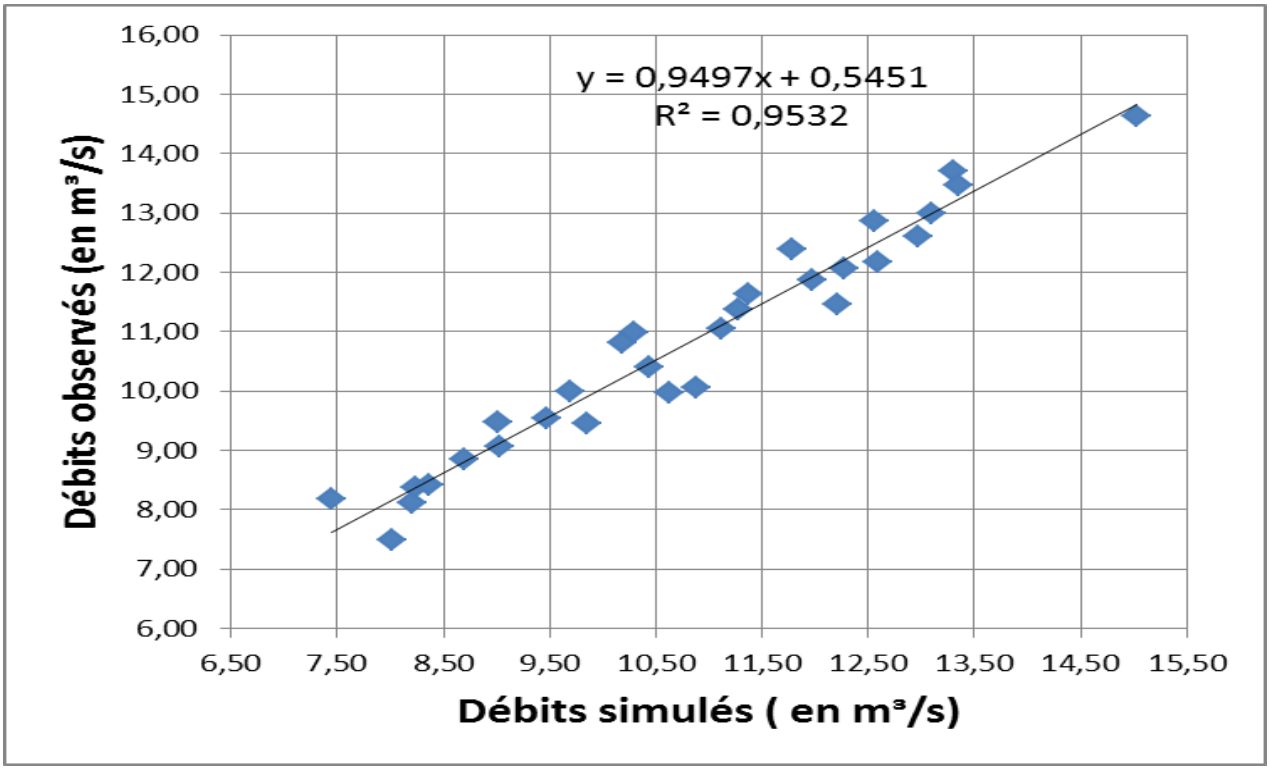


FIGURE II-20:Ajustement des débits simulés et les débits observés par la méthode des moindres carrées ainsi que le coefficient de corrélation pour le modèle SCS

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 scenarii 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

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 principaux 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 formule comme suit :

$$\mathbf{Q = K \times P^{\alpha} \times A^{\beta} \times Ig^{\gamma} \times Dd^{\psi}} \qquad \textbf{[II-12]}$$

Ou : Q : Débit en (m^3/s) ;
P : Précipitations en (m) ;
A: Superficie du bassin versant en (m^2) ;
Ig : Indice de pente global du bassin versant ;
Dd : Densité de drainage n (m/m^2) ;
K : Paramètre d'amélioration du modèle (qui sera déterminé par la simulation) ;
($\alpha, \beta, \gamma, \psi$) : 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 principaux caractéristiques physiographiques.

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

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	$\Delta Z_{max} = H_{5\%} - H_{95\%}$
Ig(m/m)	Indice de pente global	$Ig = \frac{\Delta Z_{max}}{L_E}$
Dd (m/m²)	Densité de drainage	$Dd = \frac{\sum_i^n li}{A}$

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.

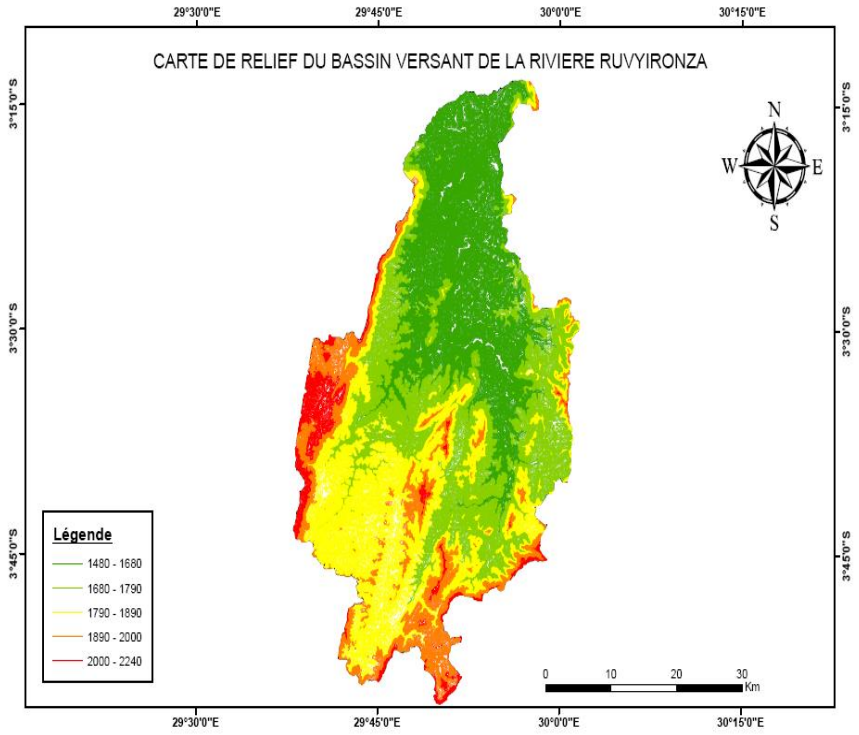


FIGURE II-21: Carte des pentes du bassin versant de la rivière RUVYIRONZA.

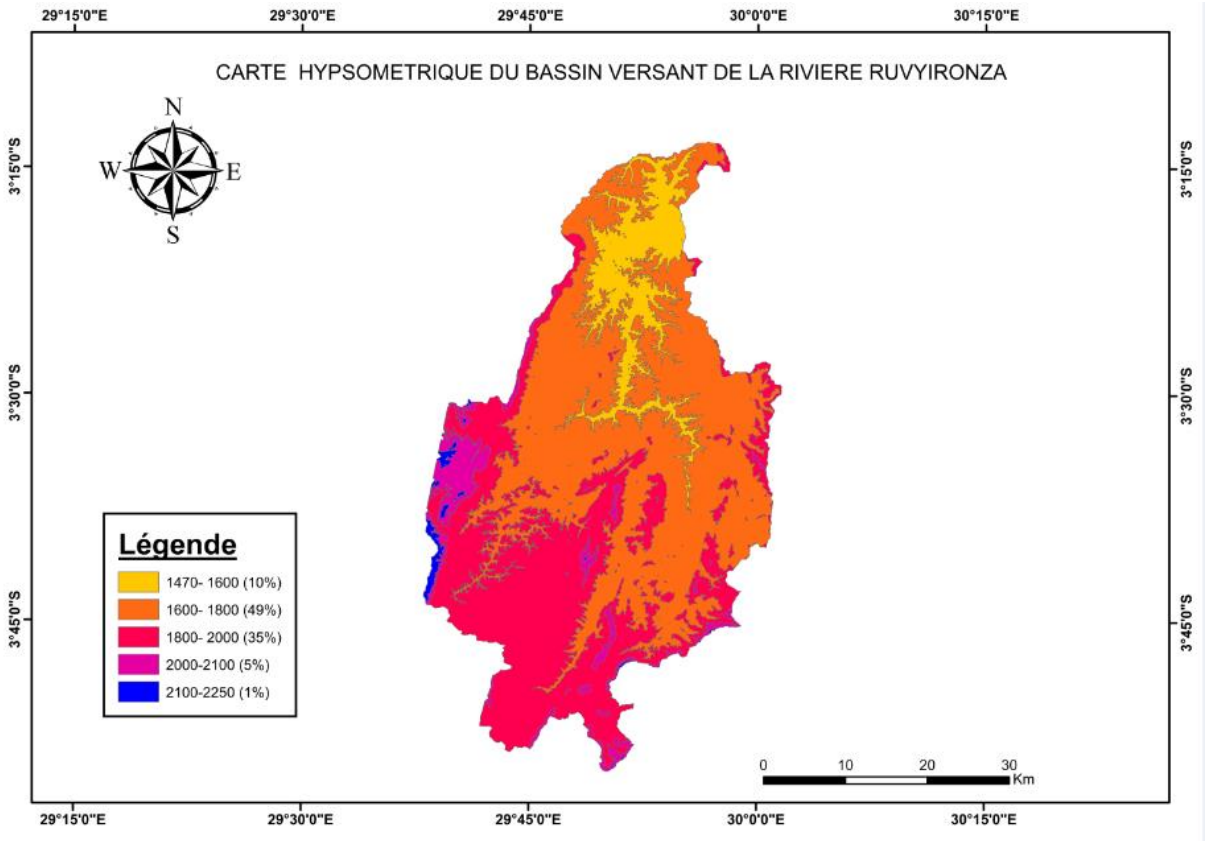


FIGURE II-22: Carte hypsométrique du bassin versant de la rivière RUVYIRONZA.

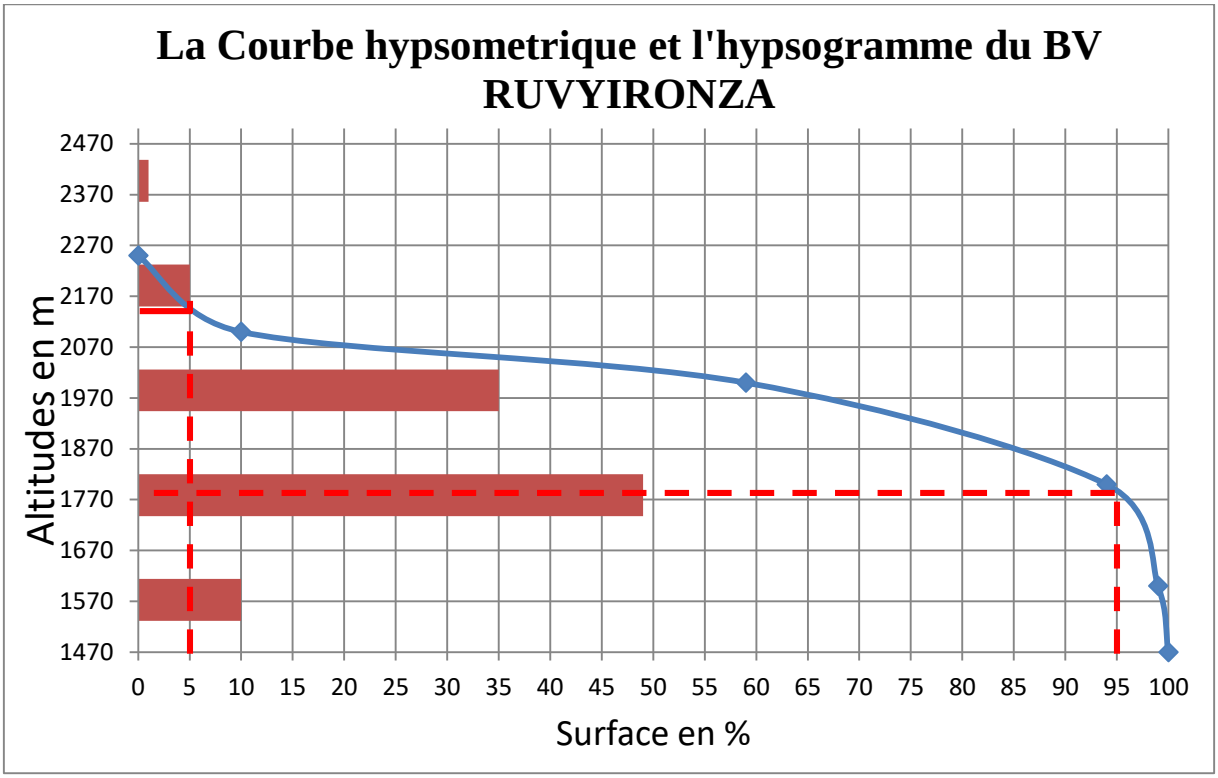


FIGURE II-23: Courbe hypsométrique du bassin versant de la rivière RUVYIRONZA.

- **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.

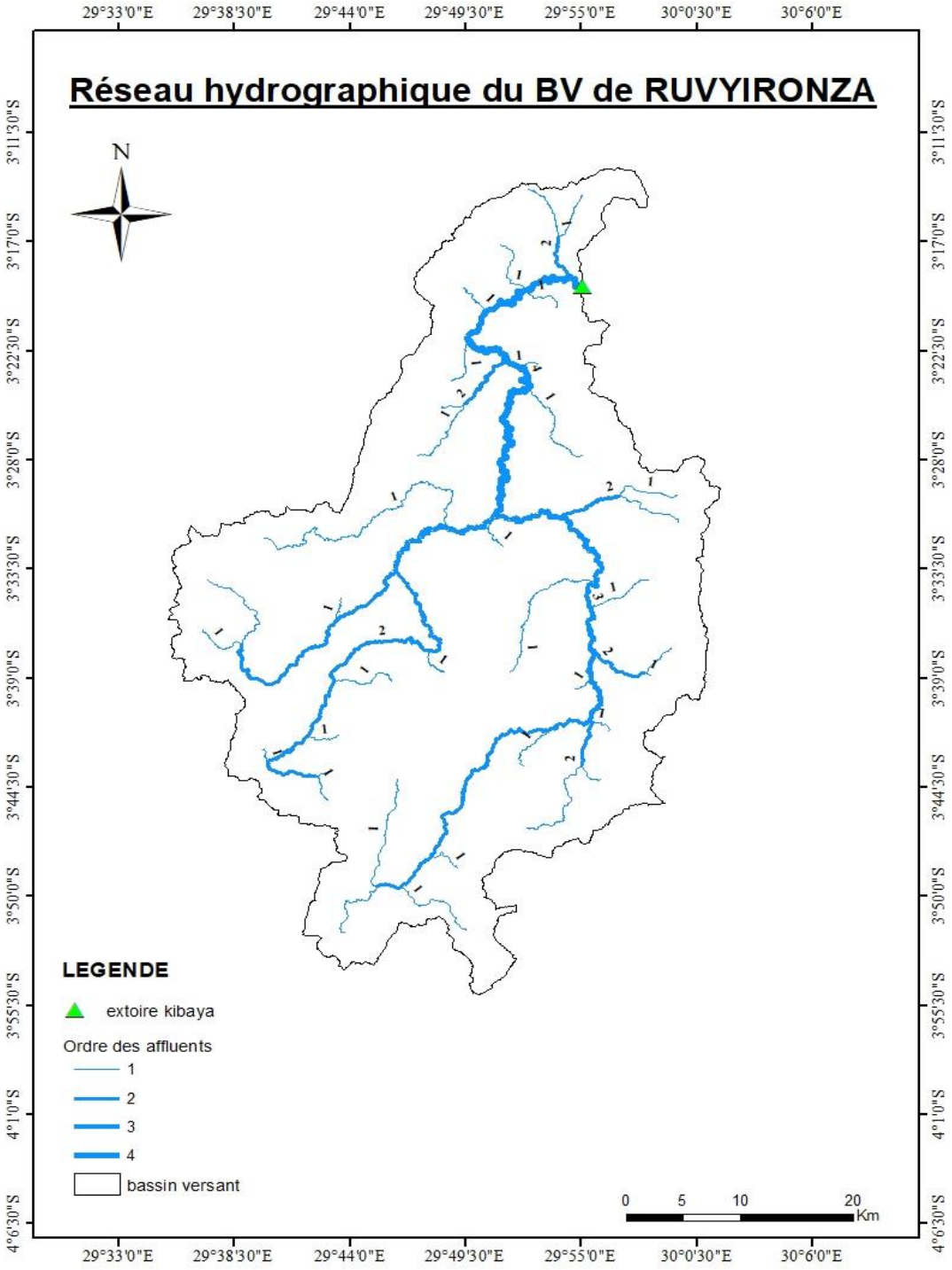


FIGURE II-24: Carte du réseau hydrographique du bassin versant de la RUVYIRONZA

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

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

Paramètres	**Symboles**	**Unités**	**Exutoire Kibaya**
Superficie	A	km²	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.

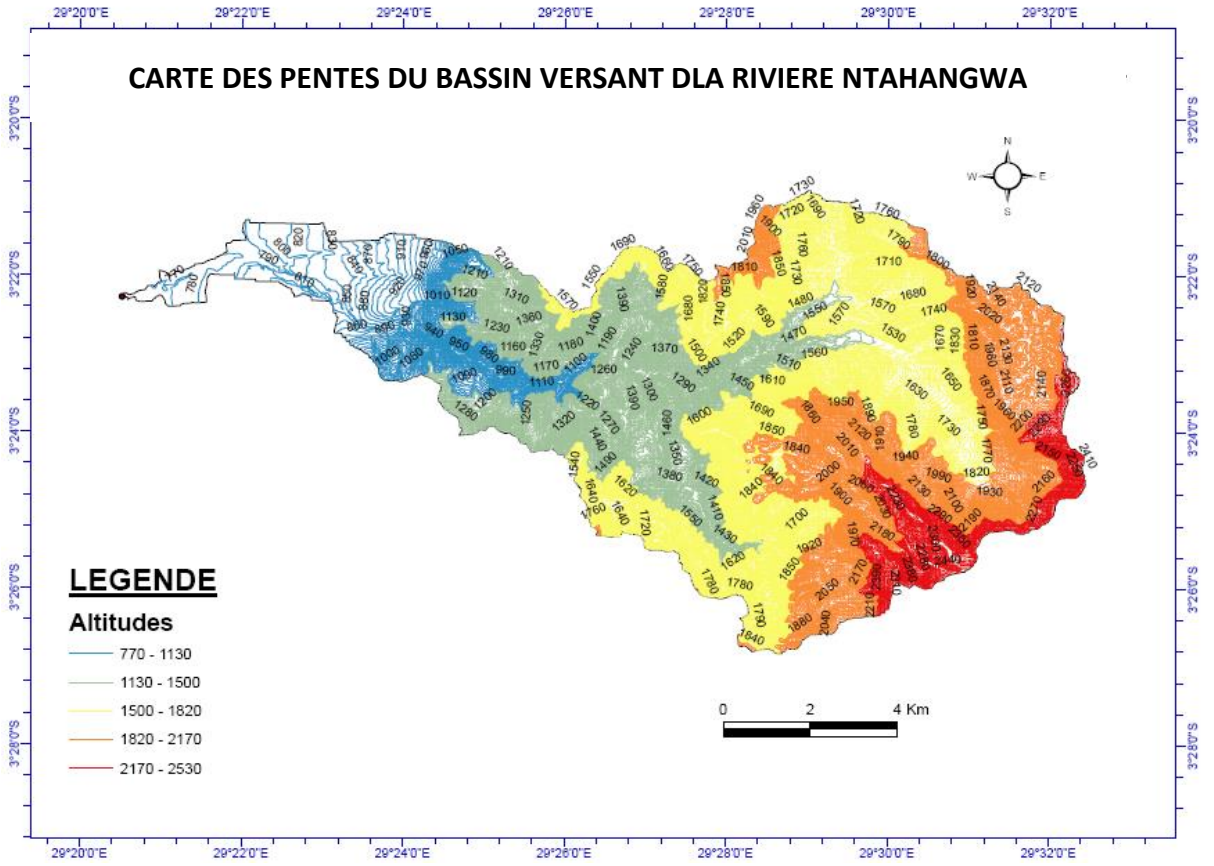


FIGURE II-25: La carte des pentes du bassin versant de la riviere NTAHANGWA

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'etude qui repartit la superficie totale du bassin versant en pourcentqges

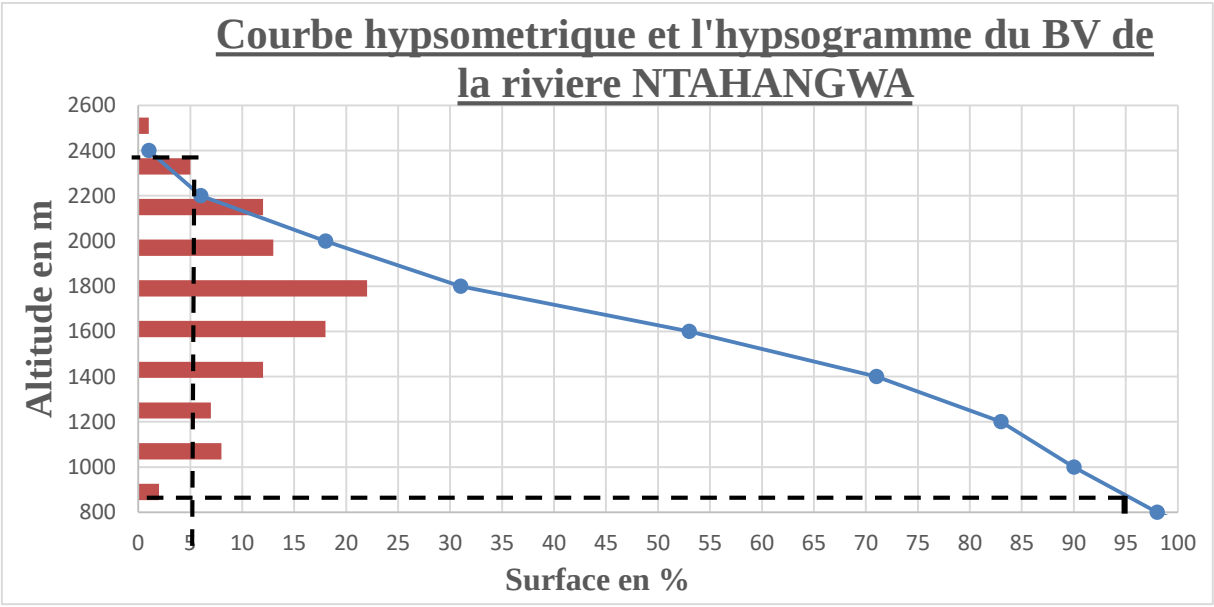


FIGURE II-26:La courbe hypsometrique et l'hypsogramme du BV de la riviere NTAHANGWA.

- **Son Hydrographie**

Le modele mixte configuré pour le bassin versant de la riviere NTAHANGWA a tenu compte de son l'hydrographie , c'est donc à partir de la carte du reseau Hydrographique realisée à l'aide du logiciel ArcGis que l'on a pu évaluer la densité de drainage,parametre qui devra fairer parti du modèle mixte.

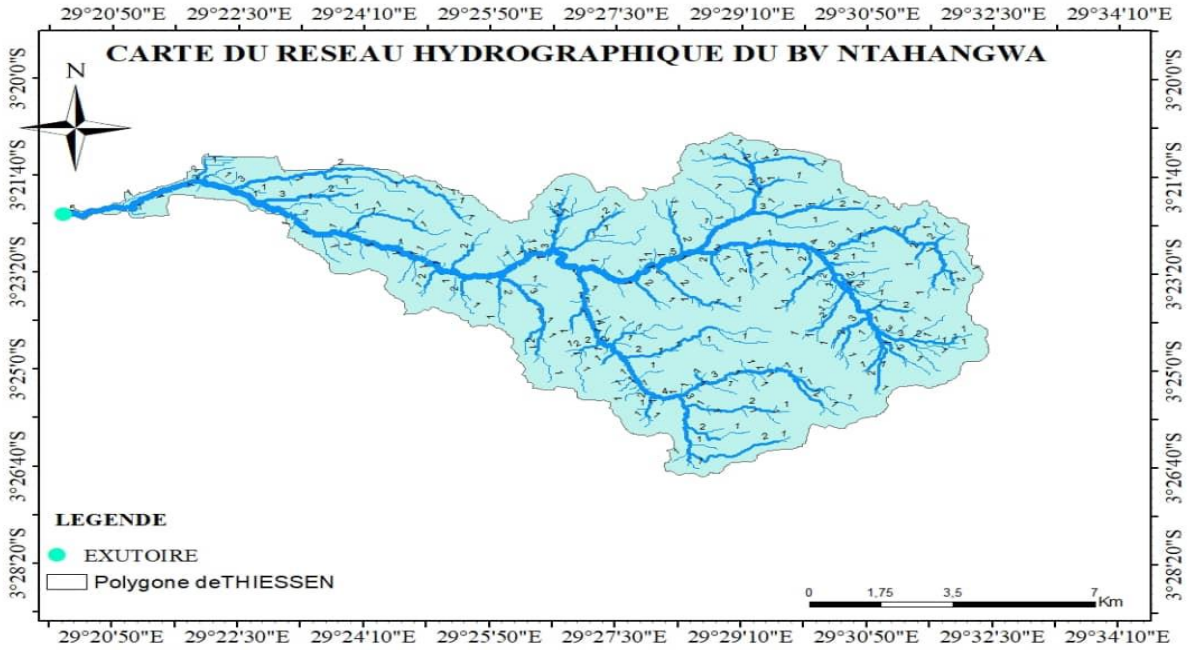


FIGURE II-27:Carte du réseau hydrographique du bassin versant de la NTAHANGWA

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	km²	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

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 gloal	Ig	m/m	0,051
Densité de drainage	Dd	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 :

$$\mathbf{Q = K \times P^{\alpha} \times A^{\beta} \times Ig^{\gamma} \times Dd^{\psi}} \qquad \textbf{[II-13]}$$

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 :

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

$$[\mathbf{P}] = [\mathbf{L}] \qquad \textbf{[II-15]}$$

$$[\mathbf{A}] = [\mathbf{L^2}] \qquad \textbf{[II-16]}$$

$$[\mathbf{Ig}] = \mathbf{grandeur\ adimensionnelle} \qquad \textbf{[II-17]}$$

$$[\mathbf{Dd}] = [\mathbf{L^{-1}}] \qquad \textbf{[II-18]}$$

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

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

Apres avoir simplifie, on reste avec une équation a 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 résolution. $\begin{cases} \beta = \frac{(3+\psi-\alpha)}{2} \\ (\alpha, \beta) > 0 \\ \psi < 0 \end{cases}$

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 :

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

BV / 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

Apres avoir évaluer 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

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.

Apres avoir amélioré les modèles hydrologiques existants, les résultats obtenus nous ont conduit à choisir les scenarii 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	$Q = \frac{\left(P^{\alpha} - \frac{E^{\beta}}{6}\right)^2}{(P^{\alpha} + \frac{2E^{\beta}}{3})}$	91,99	0,9241
	RUVYIRONZA (Exutoire Kibaya)	$Q = P - E^{\beta} \tanh(\frac{P}{E^{\beta}})$	94,82	0,9553
	RUVYIRONZA (Embouchure avec Waga)	$Q = \frac{\left(P^{\alpha} - \frac{\beta E}{6}\right)^2}{(P^{\alpha} + \frac{2\beta E}{3})}$	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

CHAPITREIII: 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 combines 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'emboiter 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 repartir 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. M**EDANE Kheira**. (2012). Hydrologie et modelisation pluie-debit : cas du bassin versant de l'oued boumessaoud (tafna nw- algerien). Algérie: UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID – TLEMCEN .
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. B**ESSIERE Hélène**. (2008). Assimilation de données variationnelle pour la modélisation hydrologique distribuéedes crues à cinétique rapide. Toulouse: Université de Toulouse.
5. places and scales. Cambridge: University press.
6. D**ESBORDES 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 del'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.0. M. sér. Hydrol.
11. **Grayson R et al.** (1992). Physically-based modelling. Water Resources Research.
12. H**e 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. I**GEBU**. (2010). Rapport Hydrologique annuel du Burundi. Gitega.

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. O**MM-N°168**. (2014). Guide des pratiques hydrologiques, (éd. 6ème édition, Vol. volume II).
19. **OMM-N°169**. (1994). Guide des paratiques hydrologiques.
20. O**udin L. et al.** (2008). .Spatial proximity, physical similarity,regression and ungauged catchments: A comparison of regionalization approches based on 913 French catchments. Water Resources Research .
21. **NERIAS G., R.** (1976). Hydrologie de l'ingénieur. Paris: Eyrolies.
22. S**afouane 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 climatemetadata and homogenization. World Meteorologica