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

Contribution à la modélisation hydrologique pluriannuelle par introduction des paramètres dynamiques : cas du bassin versant de la rivière Ruvubu en république du Burundi

NKURUNZIZA, Protais

2021-01
UB
https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/37

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

REPUBLIQUE DU BURUNDI

MINISTERE DE L'EDUCATION NATIONALE ET DE

LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DU BURUNDI



FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

CONTRIBUTION A LA MODELISATION HYDROLOGIQUE PLURIANNUELLE PAR INTRODUCTION DES PARAMETRES DYNAMIQUES : *CAS DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIERE RUVUBU EN REPUBLIQUE DU BURUNDI.*

Par

NKURUNZIZA Protais

Mémoire

Présenté publiquement

en vue de l'obtention du grade de

Master en Sciences de l'ingénieur

Option : Génie Civil, Aménagement et Maitrise des Projets.

Composition du Jury

Dr Ir HATUNGIMANA Daniel	: Président
Dr. Ir. NZEYIMANA Joseph	: Lecteur principal
Dr Ir NIYONZIMA Nestor	: Directeur
Dr. Ir. MVUYEKURE Jean Claude	: Co Directeur

Bujumbura, Décembre 2021.

IDENTIFICATION DES MEMBRES DU JURY

Dr. Ir. NIYONZIMA Nestor : Directeur du mémoire

Dr Ir MVUYEKURE Jean Claude : Co-Directeur du mémoire

Dr. Ir. HATUNGIMANA Daniel : Président du Jury

Dr. Ir. NZEYIMANA Joseph : Lecteur principal

DEDICACES

Je dédie ce travail :

- A Dieu Tout Puissant
- A mon regretté père KAMANGAZA Pascal pour qui le glas de l'éternité a déjà sonné sans voir mûrir les fruits de votre fils ;
- A ma tendre mère RUCUMUHIMBA Bernadette pour son affection et son encouragement ;
- A mon grand frère NTAKARUTIMANA Nestor et ta famille pour votre soutien inlassable et surtout pour nous avoir été une lumière qui nous guide comme cette étoile des Mages ;
- A ma très chère épouse IRAMBONA Vénérande et nos chers enfants : NKURUNZIZA Liz Praise, NKURUNZIZA Adon Thibaut, NKURUNZIZA Laura Miella et NKURUNZIZA Dan Maël.
- A mes frères et sœurs ;
- A mes oncles et tantes ;
- A mes cousins et cousines ;
- A tous ceux qui me sont chers.

REMERCIEMENTS

Au moment où notre plume verse sa dernière encre pour parfaire ce travail, l'honneur m'échoit pour exprimer mes sincères remerciements à tous ceux qui, de près ou de loin, m'ont accordé leur soutien plus particulièrement :

- A Dieu Tout Puissant, qui m'a créé et qui m'a gardé toujours en vie, c'est par sa volonté que j'ai pu arriver à cette étape, louange et gloire à Lui pour l'éternité.

- Aux Dr Ir NIYONZIMA Nestor et Dr Ir MVUYEKURE Jean Claude respectivement Directeur et Co-directeur de ce travail, c'est un grand honneur que vous m'avez fait en m'acceptant pour guider mes pas chancelant dans la recherche. Personne ne peut voir au-delà d'une montagne sans monter au épaules des géants ; tel a été mon cas, je ne saurais arriver à un tel aboutissement n'eut été vos conseils et vos orientations. Votre esprit scientifique ne cessera jamais de m'émerveiller et je vous dis merci et je vous en reste débiteur.

- A mes parents, je dis sincèrement merci pour n'avoir ménagé aucun effort en vous privant de tous afin de me faire savourer le goût sucré du savoir. Votre soutien tant moral que matériel et surtout l'affection que vous m'avez couverte m'ont poussé à l'échelon où je suis.

- A ma tendre et chère épouse Madame IRAMBONA Vénérande et nos enfants vous avez été à mon côté, lorsque les soirs je rentrais étant au bout de mes souffles, pour m'encourager ; les mots ne sont pas suffisants pour exprimer ma reconnaissance. Que Dieu vous comble de ses bénédictions.

- Aux membres de jury pour le temps que vous avez consacré à la lecture et à l'amélioration de ce travail, votre contribution a été d'une importance capitale

- Qu'il me soit permis d'adresser mes remerciements à mes enseignants, pour leur formation tant humaine que scientifique qu'ils m'ont fait bénéficier, qu'ils trouvent à travers ces lignes l'expression de ma profonde gratitude et l'encouragement dans leur lourde et noble tâche.

- Que tous ceux qui de prêt ou de loin ont contribué aussi bien sur le plan moral que matériel à l'aboutissement de ce travail trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

RESUME

Les études hydrologiques sont la clé d'une part pour l'évaluation de la quantité de ressource en eau disponible pour assurer les usages comme l'alimentation en eau potable, l'assainissement, l'irrigation et d'autre part pour le dimensionnement des ouvrages hydrotechniques comme les digues, les barrages ou les ponts. Ces études conduisent à la détermination des débits maximaux ou minimaux des cours d'eau utiles pour garantir la sécurité, la rentabilité et l'exploitation des ouvrages afin de contribuer au maintien du bon état écologique ou assurer la satisfaction des usagers.

Toutefois, les données de base pour cette étude sont indisponibles ou insuffisante ; c'est pour cette raison que notre étude a été menée pour mettre au point des modèles hydrologiques afin de rendre disponibles ces données d'études malgré l'absence ou le nombre limité des stations de jaugeages dans le bassin majeur de la rivière Ruvubu en République du Burundi.

Notre étude a commencé à résoudre le problème de la disparité des périodes d'observations des données météorologiques et hydrologiques par l'homogénéisation par extension.

Ensuite nous avons mis en relief les contraintes liées à l'universalité des modèles empiriques lorsqu'ils sont utilisés pour des bassins qui ne sont pas similaires à ceux pour lesquels ils ont été calés et validés.

Enfin, nous avons essayé d'apporter notre contribution pour faire face à cette contrainte, en mettant aux points de modèles empiriques avec des coefficients d'adaptation dynamiques par une corrélation linéaire entre le coefficient et les précipitations du bassin étudié.

Mots clés : Bassin versant, homogénéisation, modélisation, modèle empirique, paramètre dynamique, calage et validation d'un modèle

ABSTRACT

Hydrological studies are the key on the one hand for evaluating the quantity of water resources available to ensure uses such as drinking water supply, sanitation, irrigation and on the other hand for designing and analyzing the hydrotechnical structures such as dykes, dams or bridges. These studies lead to the determination of the maximum or minimum flows of river useful to guarantee the safety, profitability and operation of structures in order to help maintain good ecological status or ensure user satisfaction.

However, the basic data for this study are unavailable or insufficient, it is for this reason that our study was carried out to develop hydrological models to make these study data available despite the absence or the limited number of stations of gauging in the major basin of the Ruvubu river in the Republic of Burundi.

Our study began to solve the problem of the disparity of observation periods of meteological and hydrological data by homogenization by extension.

Then we highlighted the constraints linked to the universality of empirical models when they are used for basins that are not similar to those for which they were calibrated and validated.

Finally, we tried to make our contribution to face this constraint, by developing empirical models with dynamic adaptation coefficients by a linear correlation between the coefficient and the precipitation of the studied basin.

Keywords: watershed, homogenization, hydrological modeling, empirical model, dynamic parameter, calibration and validation of a model.

TABLE DE MATIERE

IDENTIFICATION DES MEMBRES DU JURY I

DEDICACES II

REMERCIEMENTS III

RESUME IV

ABSTRACT V

TABLE DE MATIERE VI

LISTE DES TABLEAUX VIII

LISTE DES FIGURES X

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS XII

AVANT-PROPOS XIII

INTRODUCTION GENERALE 1

0.1 Introduction 1
0.2 Problématique. 1
0.2.1 Répartition des stations hydrométéorologiques 1
0.2.2 Modélisation hydrologique au Burundi 3
0.3 Objectifs de l'étude 4
0.3.1 Objectif global 4
0.3.2 Objectifs spécifiques 4
0.4 Délimitation du sujet et méthodologie de travail 4
0.4.1 Délimitation du sujet 4
0.4.2 Méthodologie de travail 7

CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTERATURE 10

I.1 Introduction 10
I.2 Modélisation hydrologique 10
I.2.1 Classification des modèles hydrologiques selon le type 11
I.2.2 Classification selon le degré de spatialisation 13
I.3 Traitement des données hydro météorologiques 13
I.3.1 Introduction 13
I.3.2 Homogénéisation des données 14
I.3.3 Détermination de la précipitation moyenne du bassin 15

I.4 Détermination de l'évapotranspiration potentielle 19
I.5 Choix de la méthode de transformation pluie-débit 20
I.5.1 Utilité d'un modèle pluie-débit 20
I.5.2 Modèles existants 20
I.5.3 Critère de calage 21

CHAPITRE II : MODELISATION HYDROLOGIQUE ET ANALYSE DES RESULTATS 22

II.1 Introduction 22
II.2 Homogénéisation des données hydrométéorologiques 22
II.2.1 Homogénéisation des précipitations 23
II.2.2 Homogénéisation des températures 25
II.2.3 Homogénéisation de l'évapotranspiration 27
II.2.4 Homogénéisation des débits 29
II.3 Modèles à base des données météorologiques 31
II.3.1 Variation de l'affectation du paramètre 31
II.3.2 Analyse des résultats 34
II.3.3 Choix du modèle le mieux adapté au bassin 35
II.4 Modèles à paramètres météo-physique et physiques du bassin 44
II.4.1 Introduction 44
II.4.2 Développement des modèles 44
II.4.3 Analyse des résultats du modèle à base mixte 47
II.4.4 Analyse des résultats du modèle à base des caractéristiques physiques 61
II.5 Validation des modèles choisis 76
II.6 Analyse des résultats 77

CHAPITRE III : CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATION 84

III.1 Conclusion 84
III.2 Recommandation 85

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 86

ANNEXES 89

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II-1 : Périodes et durées d'observations pour les données hydrométéorologiques dans le bassin de la Ruvubu 22

Tableau II-2: Précipitation moyenne annuelle homogénéisée 23

Tableau II-3 : Température moyenne annuelle homogénéisée 26

Tableau II-4 : Evapotranspiration potentielle moyenne annuelle calculée 28

Tableau II-5 : Débits observés aux différentes stations hydrologiques du Bassin de la Ruvubu . 30

Tableau II-6: Résultats de la variation de l'affection d'un paramètre dans le modèle SCS pour le sous bassin de la Kayongozi-Nyenkanda 32

Tableau II-7: Synthèse des Résultats de la variation de l'affection d'un paramètre dans le modèle SCS dans le bassin de la rivière Ruvubu 34

Tableau II-8: Ruissellement en mm en fonction du paramètre et du type de modèle au sous bassin de la Kayongozi-Nyenkanda 37

Tableau II-9: Valeurs des paramètres adaptés et moyens en fonction du modèle dans le sous bassin de la Kayongozi-Nyenkanda 42

Tableau II-10 : Valeurs de NSE suivant le modèle à paramètre adapté et moyen pour le sous bassin de la Kayongozi-Nyenkanda 43

Tableau II-11 : Caractéristiques physiques de la zone d'étude 44

Tableau II-12 : Formule de calcul des coefficients dynamiques des modèles adaptés au bassin de la Ruvubu pour le modèle mixte 46

Tableau II-13 : Formule de calcul des coefficients dynamiques des modèles adaptés au bassin de la Ruvubu pour le modèle à base physique 46

Tableau II-14 : Débits simulés à base des caractéristiques physiques dans la Kayongozi-Nyenkanda 47

Tableau II-15: Débits simulés à base des caractéristiques physiques dans la la Nyabaha-Mubuga 50

Tableau II-16 : Débits simulés à base des caractéristiques physiques dans la Ruvubu-Muyinga 53

Tableau II-17 : Débits simulés à base des caractéristiques physiques dans la Ruvyironza-Kibaya 56

Tableau II-18 : Débits simulés à base des caractéristiques physiques dans la Ruvubu-Muyinga 59

Tableau II-19 : Débits simulés pour le modèle mixte dans le bassin de la Kayongozi-Nyenkanda 62
Tableau II-20 : Débits simulés pour le modèle mixte dans le bassin de la Nyabaha-Mubuga 65
Tableau II-21 : Débits simulés pour le modèle mixte dans le bassin de la Ruvubu-Gitega.....68
Tableau II-22 : Débits simulés pour le modèle mixte dans le bassin de la Ruvyironza-Kibaya..71
Tableau II-23 : Débits simulés pour le modèle mixte dans le bassin de la Ruvubu-Muyinga.....74
Tableau II-24 : Synthèse des valeurs de NSE pour la méthode GR1A.....76
Tableau II-25 : Résultats de la validation des modèles choisis.....76
Tableau II-26 : Simulations avec NSE acceptable dans les sous bassins.....77
Tableau II-27 : Valeurs de NSE pour les modèles validés du bassin de la Ruvubu 78

LISTE DES FIGURES

Figure 0-1 : Répartition des stations hydrométriques au Burundi et leur bassin versant (IGEBU, 2010) 3

Figure 0-2:Carte de situation du bassin versant de la Ruvubu 6

Figure 0-3 : Carte des pentes de la Ruvubu 8

Figure 0-4 : Carte du réseau hydrographique de la Ruvubu 9

Figure I-1: Illustration du polygone de Thiessen 16

Figure I-2 : Les stations principales (du second ordre) du bassin de la Ruvubu. 17

Figure I-3: Illustration des isohyètes 18

Figure II-1: Programme de minimisation de l'erreur de simulation 36

Figure II-2 : Courbes des ruissellements observés et simulés avec les modèles proposés par les auteurs 39

Figure II-3 : Courbes des ruissellements observés et simulés avec les modèles adaptés au sous bassin 40

Figure II-4 : Courbes des ruissellements observés et simulés avec les modèles à paramètre moyen du sous bassin de la Kayongozi-Nyenkanda 41

Figure II-5 : Débits simulés à base des caractéristiques physiques dans la Kayongozi-Nyenkanda 49

Figure II-6 : Débits simulés à base des caractéristiques physiques dans la Nyabaha-Mubuga 52

Figure II-7 : Débits simulés à base des caractéristiques physiques dans la Ruvubu-Gitega 55

Figure II-8 : Débits simulés à base des caractéristiques physiques dans la Ruvyironza-Kibaya 58

Figure II-9: Courbes comparatives des débits simulés en fonction du type de coefficient dans le bassin de la Ruvubu-Muyinga 60

Figure II-10 : Débits simulés pour le modèle mixte dans le bassin de la Kayongozi-Nyenkanda 64

Figure II-11 : Débits simulés pour le modèle mixte dans le bassin de la Nyabaha-Mubuga 67

Figure II-12 : Débits simulés pour le modèle mixte dans le bassin de la Ruvubu-Gitega 70

Figure II-13 : Débits simulés pour le modèle mixte dans le bassin de la Kayongozi-Nyenkanda 73

Figure II-14 : Débits simulés pour le modèle mixte dans le bassin de la Ruvubu-Muyinga 75

Figure II-15 : Courbes comparatives des modèles choisis dans le bassin de la Kayongozi-Nyenkanda.....79
Figure II-16 : Courbes comparatives des modèles choisis dans le bassin de la Nyabaha-Mubuga 80
Figure II-17 : Courbes comparatives des modèles choisis dans le bassin de la Ruvubu-Gitega ..81
Figure II-18 : Courbes comparatives des modèles choisis dans le bassin de la Ruvyironza-Kibaya 82
Figure II-19: Courbes comparatives des modèles choisis dans le bassin de la Ruvubu-Gitega ...83

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

Abréviation Grecques

α, β : Paramètres du modèle hydrologique

Sigles et abréviations romaines

A : Surface totale du bassin

A_i : Superficie du polygone associée à la station i.

CEMAGRAF : Centre d'Etude du Machinisme Agricole et du Génie Rural des eaux et Forêts

D_d : Densité de drainage (km/km²)

E : Evapotranspiration moyenne annuelle (mm)

ETP : Evapotranspiration potentielle du mois considéré

GR1A : Génie Rural avec un paramètre Annuel

IGEBU : Institut Géographique du Burundi

i_m : Pente moyenne du bassin (m/m)

K : Coefficient d'ajustement mensuel

K_f : Indice de couverture forestière (%)

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_k : Précipitation moyenne annuelle de l'année k

P_{k-1} : Précipitation moyenne annuelle de l'année k-1

P_m : Précipitation moyenne du bassin

P_m : Précipitation moyenne annuelle (mm)

Q : Débit

$Q_{i,ca}$: Débit calculé au pas de temps i

$Q_{i,ob}$: Débit observé au pas de temps i,

Q_k : Débit annuel pour l'année k

Q_{moy} : Moyenne des débits observés sur la période considérée.

SCS : Soil Conservation System

T : Température moyenne mensuelle du mois considéré

X : Paramètre du modèle de GR1A

AVANT-PROPOS

Les phénomènes hydrologiques se caractérisent par une grande variabilité, une dimension aléatoire et une forte incertitude. L'évaluation de la quantité de ressource en eau disponible, la prévision des événements hydrologiques extrêmes (crue et étiage) et le calcul de débits minimums biologiques sont autant d'exercices qui nécessitent de connaître les débits des rivières et leur variabilité pour mettre au point des ouvrages hydrauliques sur ces dernières.

La conception et la réalisation de ces ouvrages est un processus qui est fait en plusieurs étapes réalisées par plusieurs intervenants suivant la spécialité de chacun en complexité des études à mener. L'analyse est fondée sur les objectifs à atteindre et le nœud du problème est beaucoup de fois basé sur les données d'entrées.

Les enjeux sont multiples : 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 usages, comme l'alimentation en eau potable et l'irrigation.

Puisque il n'y a pas possibilité d'installer des stations de jaugeage tout le long de la rivière, avec le développement informatique, on peut proposer une solution pour pallier à cette 'absence de stations de mesure hydrométrique et en conséquence rendre disponible les données hydrologiques utiles par modélisation.

C'est dans ce cadre que s'insère notre travail de contribution à la modélisation dans le bassin de la Ruvubu afin de pouvoir mettre au point des modèles dont la finalité conduit à l'acquisition des données d'entrée pour faire les études hydrologiques.

INTRODUCTION GENERALE

0.1 Introduction

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 hydrologiques extrêmes (crue et étiage) et le calcul de débits minimums biologiques sont des études qui nécessitent de connaître les débits des rivières et leur variabilité. Ces études sont utiles pour 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.

Dans ce travail, nous nous sommes focalisés sur l'analyse des contraintes liées à l'acquisition et à la transformation des données hydrologiques afin de proposer des solutions pouvant aider à contourner ces contraintes.

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

Dans la classification de l'OMM, on a trois types de station **(OMM-N°169, 1994)** :

Station de premier ordre : ce sont des stations de mesure de plusieurs paramètres (précipitations, évaporation, température, ensoleillement, vitesse et direction du vent…) ;

Station de second ordre : ce sont des stations de mesure des précipitations et des évaporations ;

Stations du troisième ordre : ce sont des stations de mesure des précipitations.

0.2 Problématique.

0.2.1 Répartition des stations hydrométéorologiques

Alors qu'une station météorologique fourni des données concernant une surface plus ou moins étendue, la station hydrométrique mesure des valeurs ponctuelles dans l'espace. C'est pour cette raison que le principe de l'établissement du réseau hydrométrique est différent de celui du réseau météorologique.

A partir des observations d'un ensemble de pluviomètres, il se dégage des caractéristiques communes concernant la répartition statistique dans le temps des pluies journalières et la corrélation n'est possible que pour des stations de faible écart de distance. Par contre si on s'intéresse, aux pluies annuelles, la notion de corrélation peut être appliquée mais l'écart-type est

souvent important et les périodes d'observations doivent être très longues. Pour les autres paramètres hydrologiques, comme la température, l'humidité, insolation, etc. ; la dispersion est beaucoup faible que pour la pluviométrie. Il n'est pas donc nécessaire de prévoir des stations qui mesurent tous ces paramètres mais un réseau de station diversifiées. Avec une densité qui croit des stations de premier ordre jusqu'aux stations de troisième ordre (poste pluviométriques). Puisque les stations du premier ordre nécessitent l'achat d'un matériel très coûteux qui exige aussi un personnel très qualifié, il faut au moins deux stations pour 500 000 km². Pour les stations du second ordre (stations évaporométriques), il faut en prévoir une station pour 50 000 km². Quant à la densité des stations du troisième ordre (les postes pluviométriques),elle doit être très importante jusqu'à deux stations pour 1000km² dans les zones tempérées et une station pour 2000km² pour les zones tropicales où la pluie y sont plus régulières. **(OMM-N°169, 1994).** Néanmoins **Paturel E. et al., (1986)** cités par **ARTHUR Marchandise, (2007)**, en faisant varier la densité du réseau, la taille des bassins versants, la position de l'épicentre, la fonction d'abattement, arrivent à une densité de 20 à 30 postes pour estimer la lame d'eau avec une erreur inférieure à 10 % sur des bassins versants de superficie comprise entre 100 km^2 et 250 km^2.

La qualité et la quantité des données hydrométéorologiques ont un impact majeur sur l'exactitude des calculs hydrologiques. Or, la mise en place et la maintenance des réseaux de mesure hydrométéorologiques représentent un coût non négligeable pour leurs gestionnaires. Au Burundi, les stations hydrologiques qui fournissent ces données hydrologiques sont inégalement réparties et beaucoup d'entre elles sont plus récentes. **(IGEBU, 2010)**.

Cette répartition des stations hydrologiques est montrée sur la figure de la page suivante :

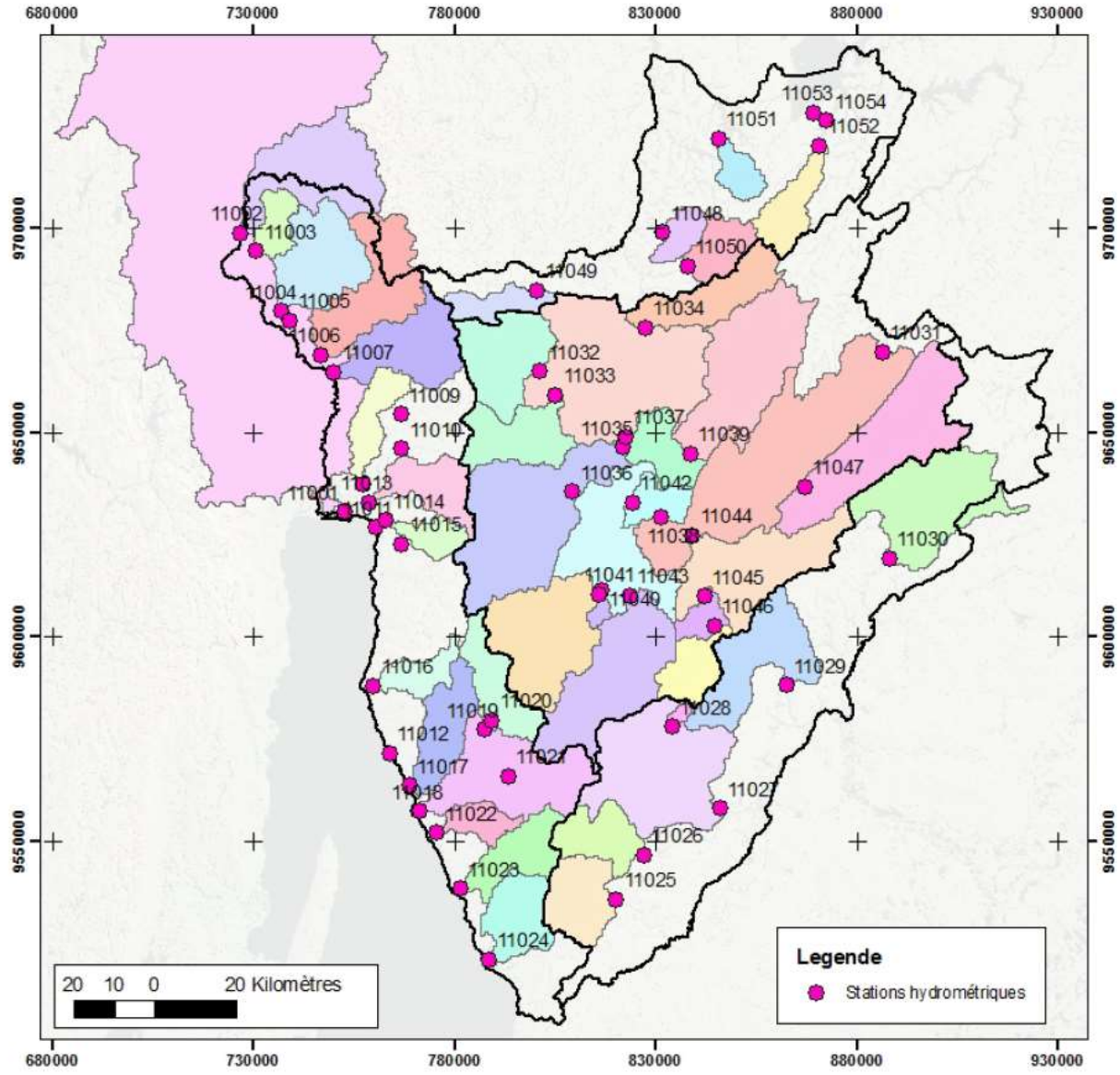


Figure 0-1 : Répartition des stations hydrométriques au Burundi et leur bassin versant (IGEBU, 2010)

0.2.2 Modélisation hydrologique au Burundi

Comme il n'est donc pas possible d'installer des stations de jaugeages pour mesurer les débits de tous les cours d'eau ; le développement informatique a permis la construction des modèles de simulation du comportement hydrologique du bassin versant pour pallier à l'absence de stations de mesure hydrométrique. Cette extrapolation ou transposition des données pour les bassins versants peu ou pas jaugé se fait avec des hypothèses simplificatrices qui ne reflètent pas exactement la réalité du bassin versant.

Au Burundi, comme ces modèles de simulation ne sont pas répandus, dans beaucoup d'études hydrologiques, on utilise des modèles hydrologiques qui ont été calés aux bassins versant dont les caractéristiques hydrologiques ne sont pas similaires à celles des bassins versants du Burundi.
Ces modèles, en tant que tels utilisés, fournissent-ils des résultats fiables exploitables lors des études hydrologiques ? Comment faut-il les adapter pour être plus précis et général ?
Telles sont les interrogations auxquelles le présent travail va devoir apporter des éclaircissements ou des réponses.

0.3 Objectifs de l'étude

0.3.1 Objectif global

L'objectif du présent travail est de mettre au point des modèles hydrologiques qui permettent d'acquérir des données utiles permettant de faire des études hydrologiques dans les bassins des rivières peu ou pas jaugées à base des données météorologiques ou des caractéristiques physiques dans le bassin versant de la rivière RUVUBU.

0.3.2 Objectifs spécifiques

Pour notre étude, les objectifs spécifiques sont :

- L'analyse des données hydrologiques et homogénéisation
- L'étude comparative des méthodes de transformation pluie-débit
- L'établissement des modèles plus fiables dans le bassin de la RUVUBU

0.4 Délimitation du sujet et méthodologie de travail

0.4.1 Délimitation du sujet

Notre recherche est orientée vers la mise au point des modèles hydrologiques permettant l'acquisition des données utiles pour les études hydrologiques dès la conception à l'exploitation des ouvrages hydrauliques dans le bassin de la Ruvubu.
Le choix du bassin versant de la Ruvubu comme zone d'étude a été fait en tenant compte :

- De la densité du réseau et de la répartition des stations hydrométéorologiques :
  il a lui seul plus de 47 % du réseau national soit un total de 80 stations sur 169 que compte tout le Burundi dont 10 stations principales sur 21 de tout le Burundi;

- De la grandeur de sa superficie qui est de 10073 km² qui représente plus d'un tiers 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 Ruvubu.

Le bassin versant de la Ruvubu, centre de notre étude, a une superficie de 10073 km² au Burundi et collecte environ 95% des eaux superficielles du Burundi qui se jettent dans le Nil. Il représente 36% de la superficie totale du Burundi et couvre les plateaux centraux des provinces de Gitega, Karuzi, Muramvya, Mwaro, Kayanza, Ngozi, Muyinga, Cankuzo et Ruyigi ainsi qu'une partie de la région montagneuse des Provinces Bujumbura et Bururi **(IGEBU, 2010)** . Il est situé entre 29°30' et 30°40' de longitude Est et entre 2°30' et 3°50' de latitude sud.

La figure de la page suivante montre les limites du bassin versant de la rivière Ruvubu coloré en bleu ainsi que les différentes provinces du Burundi faisant parties de ce dernier.

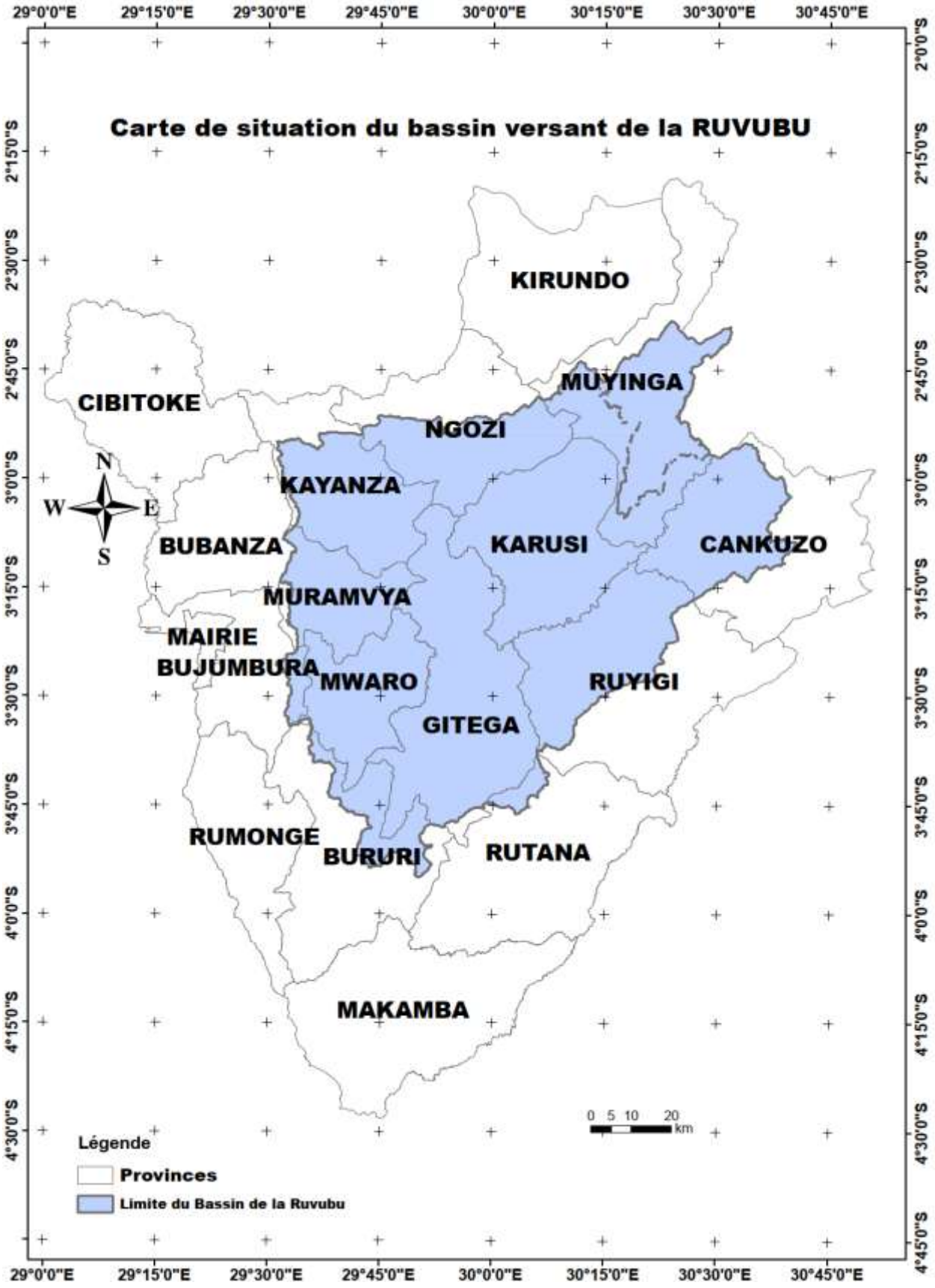


Figure 0-2:Carte de situation du bassin versant de la Ruvubu

0.4.2 Méthodologie de travail

L'objectif du travail étant de produire un modèle permettant la détermination du débit de n'importe quelle rivière du bassin de la Ruvubu ;pour mener à fond notre étude, nous nous sommes basés sur la documentation tiré des ouvrages ayant traité le sujet similaire de **(Francou J. et J. A.Rodier, 1969) (Arsenault Richard et François Brissette, 2014), (Böschl G.et al., 2013) (Grayson R et al., 1992) , (Parajka J., 2005)** et de **(Safouane MOUELHI, 2003) .**

Nous avons commencé d'abord à délimiter la zone d'étude, à analyser et traiter les données disponibles et enfin à faire une simulation qui nous a permis de produire le modèle recherché.

Dans la délimitation, faite à l'aide du modèle numérique de terrain (MNT) fourni par le Bureau de Normalisation Géomatique et du logiciel Arc GIS 10.3, nous avons produit des cartes du relief, du réseau hydrographique, de la couverture du sol et de situation des stations hydrologiques du bassin versant de la Ruvubu.

Ensuite nous avons fait le traitement des données météorologiques et hydrologiques fournies par l'IGEBU en homogénéisant par extension car ces données s'étalonnent sur des périodes d'observation diversifiées

Enfin, nous avons adapté les modèles hydrologiques à notre zone d'étude et en définitive nous avons procédé à une étude comparative de ces modèles hydrologiques afin de choisir les modèles les mieux adaptés à notre zone d'étude.

Les figures 0.3 et 0.4 qui suivent représente respectivement le relief et le réseau hydrographique de la zone d'étude.

Pour la figure 0.3, la partie colorée en rouge symbolise les points les plus élevés de la crête Congo-Nil tandis que la partie verdâtre représente, les parties planes du bassin de la rivière Ruvubu.

Quant à la figure 0.4, les traits en bleu représentent les différents affluents de la rivière Ruvubu ; la grandeur du trait est fonction du numéro d'ordre de chaque affluent suivant la classification de Strahler. Cette classification ne se résume en 4 points

- Tout affluent sortant directement de la source est classé l'affluent de 1er degré
- Deux affluents de 1er degré qui se rencontrent forment un cours d'eau de 2ème degré, ceux de 2ème degré forment un cours d'eau de 3ème degré…et ainsi de suite.
- Deux affluents de degrés différents qui se rencontrent forment un cours d'eau dont le degré est celui du plus grand des deux.
- Le degré du bassin est donc le plus grand degré qu'on trouve à l'exutoire de tous les affluents du réseau fluvial de ce bassin.

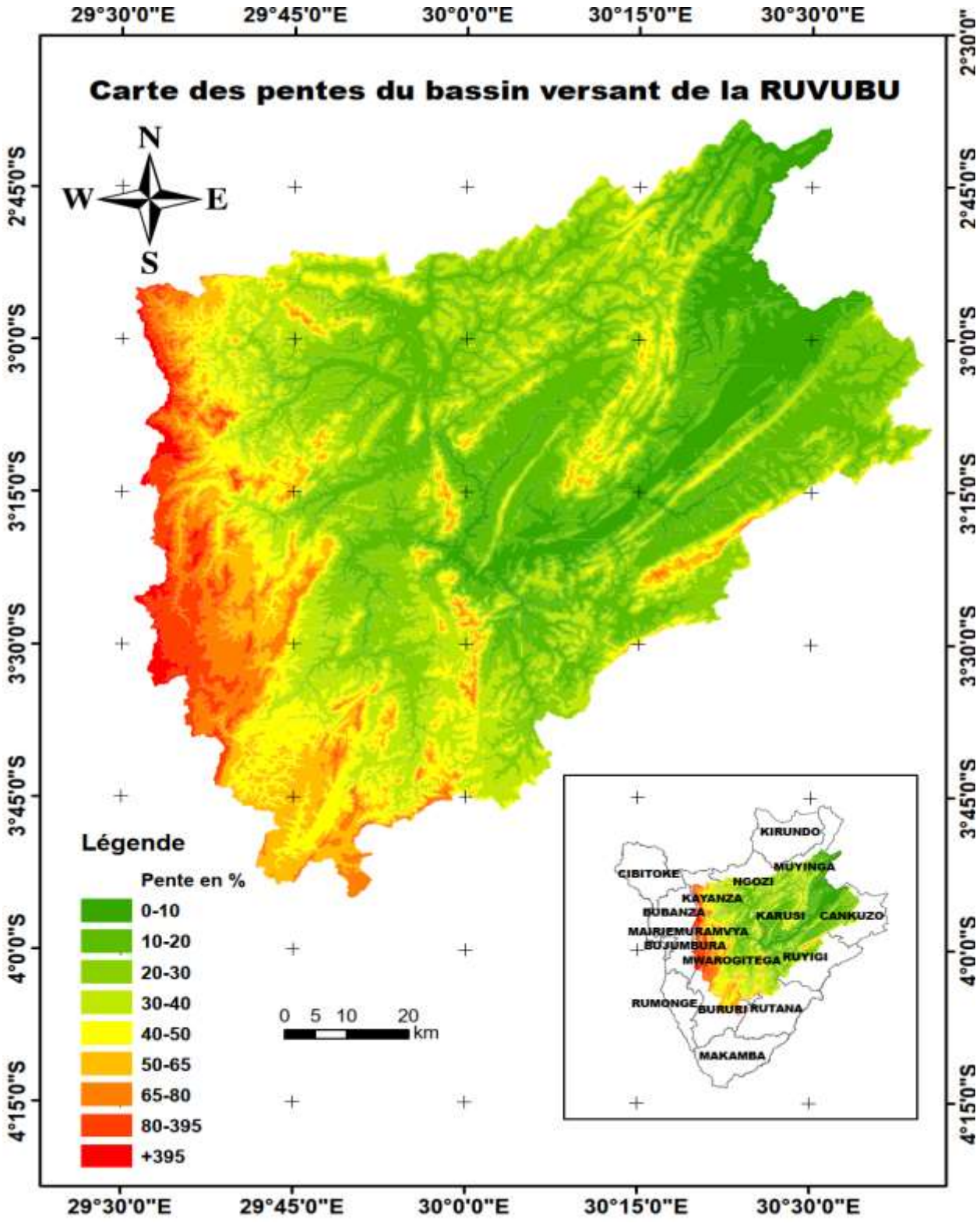


Figure 0-3 : Carte des pentes de la Ruvubu

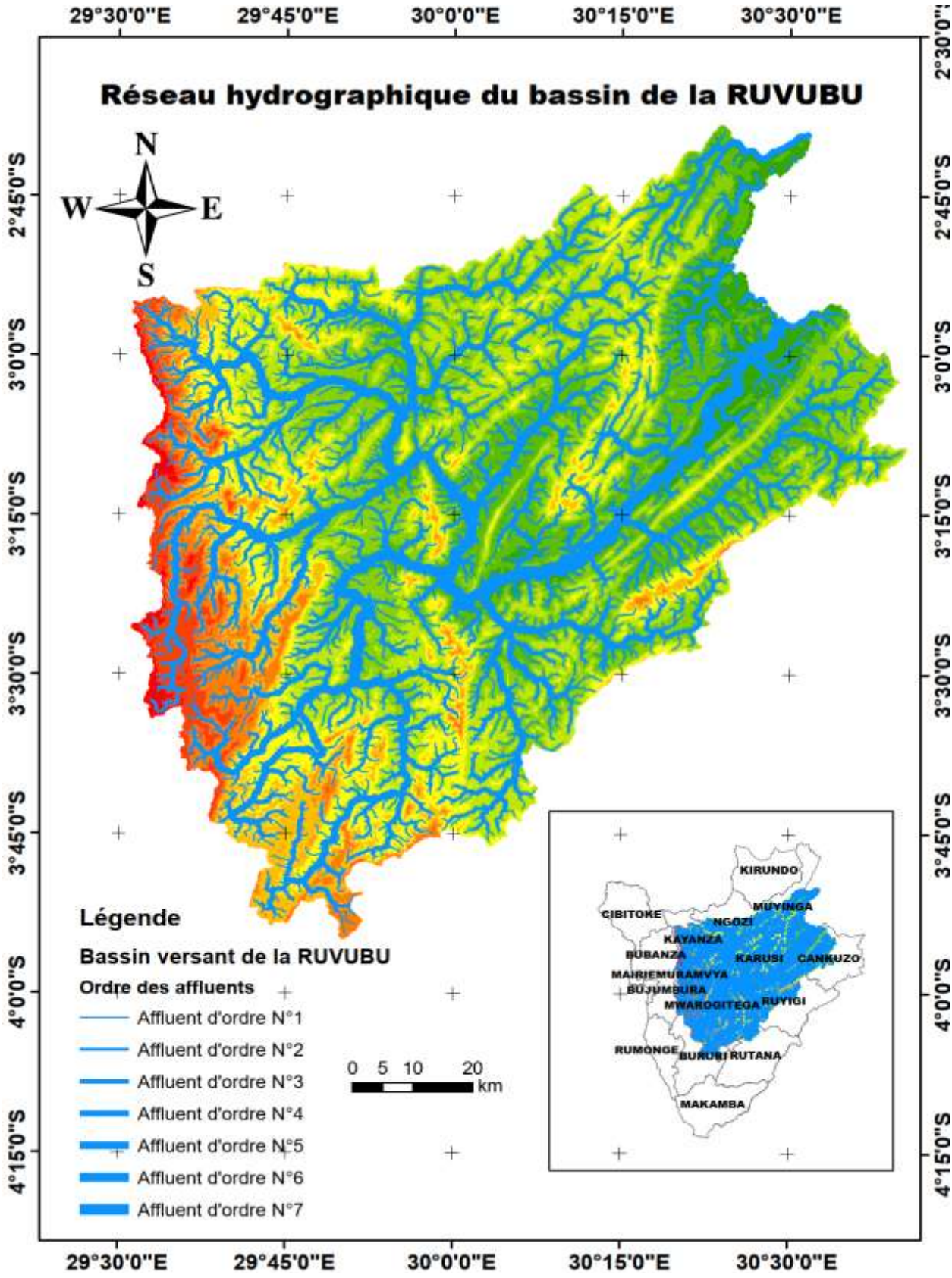


Figure 0-4 : Carte du réseau hydrographique de la Ruvubu

CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTERATURE

I.1 Introduction

Les études hydrologiques sont fondées sur plusieurs paramètres qui dépendent des données météorologiques et hydrométriques ou des caractéristiques physiques du bassin versant. Le réseau des stations hydrométriques ne peut pas couvrir l'ensemble du linéaire des cours d'eau, l'estimation des débits des cours d'eau non ou peu suivis, c'est-à-dire sur lesquels il n'existe aucune ou très peu de mesures de débit s'appuient sur les données de débit issues d'autres bassins versants dont l'exutoire est équipé d'une station hydrométrique ou au traitement des données météorologiques qui transforme les pluies en débit. La prévision hydrologique bien que fortement liée à la simulation hydrologique, se tourne vers l'évolution future des débits du bassin versant à partir de l'instant présent.

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 enjeux 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.2.1 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.

A. 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.

B. 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).**

C. 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.2.2 Classification selon le degré de spatialisation

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

A. 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)**

B. 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.

C. 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.3 Traitement des données hydro météorologiques

I.3.1 Introduction

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.3.2 Homogénéisation des données

A. Introduction

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.

B. Homogénéisation pour l'extension des données

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) :

$$\mathbf{y_x = \overline{y_k} + r_{xy}\ \frac{S_{y,k}}{S_{x,k}}(x - \overline{x_k})} \qquad \textbf{I-1}$$

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

$\mathbf{S_{x,k}}$ **:** écart type de x sur k valeurs expérimentales

$\mathbf{S_{y,k}}$ **:** écart type de y sur k valeurs expérimentales

$\mathbf{r_{xy}}$ **:** Coefficient de corrélation entre x et y

$$r_{xy} = a\frac{\sum xy - \sum x \sum y}{\sum y^2 - (\sum y)^2} \qquad \text{I-2}$$

a= coefficient de pente de la droite de régression

La moyenne et la variance de l'échantillon avec extension sont données respectivement par les formules suivantes :

$$\hat{\bar{y}} = \overline{y_k} + r_{xy}\frac{S_{y,k}}{S_{x,k}}(\overline{x_n} - \overline{x_k}) \qquad \text{I-3}$$

$$\bar{\sigma}_y^2 = S_{y,k}^2 + r_{xy,k}^2\frac{S_{y,k}^2}{S_{x,k}^2}\left(S_{x,n}^2 - S_{x,k}^2\right) \qquad \text{I-4}$$

Avec $\hat{\bar{y}}$: moyenne de l'échantillon avec extension

$\overline{\mathbf{x_n}}$: moyenne de toutes les valeurs de l'échantillon la plus longue

$\overline{\mathbf{x_k}}$: moyenne des k valeurs expérimentales de l'échantillon la plus longue

$\bar{\sigma}_y^2$: la variance de l'échantillon avec extension

$S_{y,k}^2$: la variance de y sur k valeurs expérimentales

$S_{x,n}^2$: la variance de toutes les valeurs de l'échantillon la plus longue

$S_{x,k}^2$: variance de x sur k valeurs expérimentales

I.3.3 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.

A. Moyenne arithmétique

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

$$P_m = \sum A_i \,.\, P_i / A \qquad \textbf{I-5}$$

Avec : P_m = précipitation moyenne du bassin

N= nombre de station

P_i = Précipitation à la station i

B. 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: Illustration du polygone de Thiessen

$$P_m = \sum A_i \cdot P_i / A \qquad \text{I-6}$$

Avec : P_m = précipitation moyenne du bassin

P_i = Précipitation à la station i

A_i = superficie du polygone associée à la station i.

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

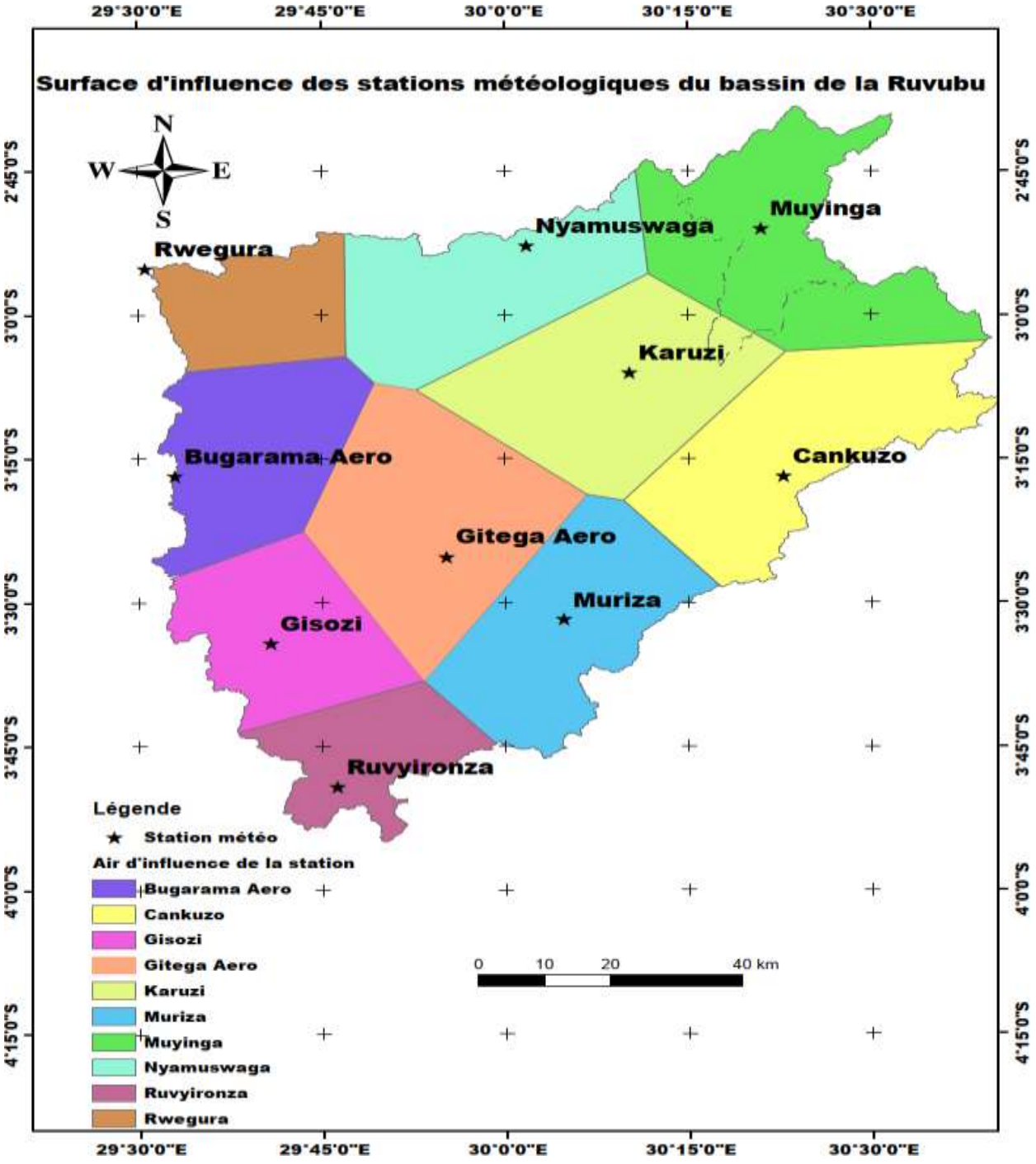


Figure I-2 : Les stations principales (du second ordre) du bassin de la Ruvubu.

C. 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 :

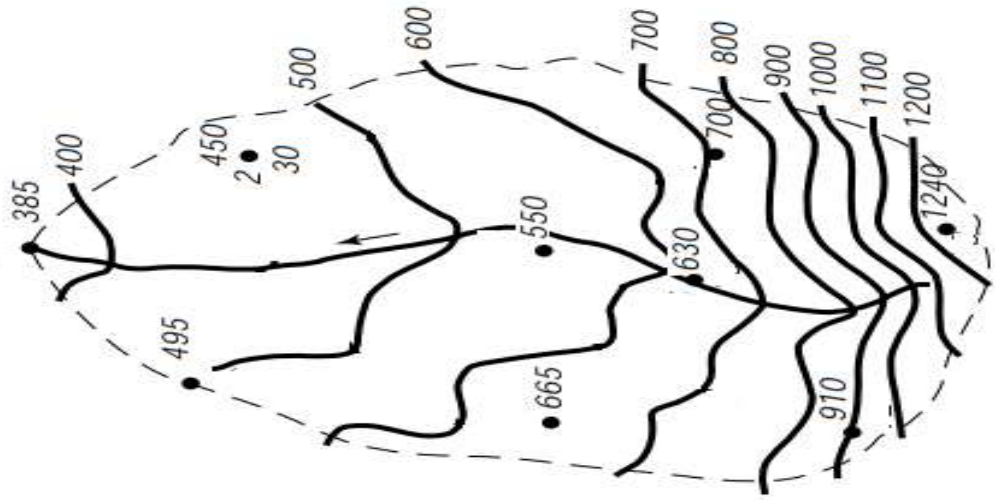


Figure I-3: Illustration des isohyètes

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

$$\mathbf{P_m = \sum A_i \,.\, P_i / A} \qquad \textbf{I-7}$$

$$\mathbf{P_i = \frac{h_i + h_{i+1}}{2}} \qquad \textbf{I-8}$$

Avec : P_m = précipitation moyenne du bassin

Pi:la moyenne des isohyètes consécutives i et i+1

A_i = superficie du polygone associée à la station **i**.

A : surface totale du bassin ($\sum$ 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 Ruvubu qui fait l'objet de notre étude a été calculée avec la méthode du polygone de Thiessen.

I.4 Détermination de l'évapotranspiration potentielle

L'évapotranspiration potentielle (ETP) représente la partie de la précipitation qui est interceptée par la végétation et celle qui s'évapore et en conséquence ne participe pas au ruissellement. L'ETP peut être calculée par plusieurs formules empiriques dont les principales sont :

- **Formule de Thornthwaite :**

$$\mathbf{ETP} = \mathbf{1.6}\left(\frac{\mathbf{10}t}{I}\right)^{a}.\boldsymbol{K} \qquad \textbf{I-9}$$

Avec : $I = \sum_1^n i$

$$i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1.514} \qquad \textbf{I-10}$$

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

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

T=Température moyenne mensuelle du mois considéré

ETP= Evapotranspiration potentielle du mois considéré

K= coefficient d'ajustement mensuelle

I= indice thermique annuel

n = 12 : nombre de mois d'une année

- **Formule de Turc**

$$\mathbf{ETP = 0,4\ (Ig +50)\ k\ t/(t+15)} \qquad \textbf{I-11}$$

Avec :

ETP : évapotranspiration potentielle mensuelle (en mm d'eau) ;

T : Température moyenne mensuelle de l'air (en °C) ;

Ig : radiation globale moyenne mensuelle reçue au sol (en calorie/cm²/jour).

Ig = IgA (0,18+ 0,62 h/H)

IgA : radiation globale théorique

H : Durée d'insolation mesurée pendant le mois considéré

H : durées astronomiques théoriques des jours du mois.

K : un coefficient égal à 1 si l'humidité relative est supérieur à 50% sinon il est égal à : $1 + \frac{50-hr}{70}$

hr : humidité relative de l'air pendant le mois considéré.

I.5 Choix de la méthode de transformation pluie-débit

I.5.1 Utilité d'un modèle 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.5.2 Modèles existants

Safouane Mouelhi (2003), a essayé d'améliorer les modèles établis par certains auteurs en introduisant des paramètres sur les équations établies. Lors de cette étude, il a conclu que le modèle est amélioré lorsque le paramètre est affecté à l'évaporation. Ainsi, il a obtenu les équations transformées suivantes **(Safouane MOUELHI, 2003)**[1]:

- Ol'dekop : $$\mathbf{Q = P - \alpha E tanh\left(\frac{P}{\alpha E}\right)}$$ **I-12**
- Tixeront: $$\boldsymbol{Q = (P^2 + (\alpha E)^2)^{\frac{1}{2}} - \alpha E}$$ **I-13**

Afin de faire apparaitre l'évapotranspiration dans le modèle SCS, Mouelhi a commencé à le transformer par la division euclidienne de l'équation du modèle : $\mathbf{Q=\frac{(P-0.2S)^2}{P+0.8S}}$ et il a obtenu

$$\mathbf{Q= P-1.2S+ \frac{S^2}{P} - 0.8\frac{S^3}{P}} \quad \textbf{I-14}$$

Ce qui fait que lorsque P est élevé, le 3ème et le 4ème terme sont négligeables. En posant E= 1.2S et en replaçant S par sa valeur l'équation du modèle SCS devient[2] :

- SCS $$\mathbf{Q = \frac{\left(P-\frac{E}{6}\right)^2}{P+\frac{2}{3}E}}$$ I-15

Le modèle SCS amélioré est alors : $$\mathbf{Q = \frac{\left(P-\frac{\alpha E}{6}\right)^2}{P+\frac{2}{3}\alpha E}}$$ I-16

Avec Q,P et E respectivement le débit, la précipitation et l'évapotranspiration en mm

α : paramètre d'amélioration

[1] Safouane Mouelhi,2003, page 81
[2]Safouane Mouelhi,2003, page 56-57

De part les modèles améliorés par Mouelhi, le Centre d'Etude du Machinisme Agricole et du Génie Rural des eaux et Forêts (CEMAGRAF) a commencé à développer au début des années 1980 des modèles hydrologiques (du Génie Rural – GR) permettant de faire le lien entre la lame d'eau précipitée sur un bassin versant et son débit à l'exutoire. Au-delà de leur aspect pratique, ces modèles ont soulevé des questions essentielles sur la façon de représenter la transformation de la pluie en débit à l'échelle du bassin versant parce qu'ils s'apparentent à des modèles conceptuels du fait de leur structure à réservoirs. Leur construction s'est faite sur la base de grands jeux de données et en découvrant progressivement la structure permettant de reproduire au mieux le comportement hydrologique du bassin versant

I.5.3 Critère de calage

L'ambition, lors de l'élaboration d'un modèle, est d'obtenir un outil le plus performant possible. On peut apprécier la qualité d'un modèle et ses aptitudes selon des critères définis par le concepteur du modèle. Ainsi, **(Najiba CHKIR, 1994)** a proposé les critères suivants :

- ✓ **Précision** : Il se doit de reconstituer au mieux les débits observés.
- ✓ **Généralité** : Il doit pouvoir simuler aussi bien les crues que les étiages.
- ✓ **Universalité** : II doit pouvoir être utilisé pour des bassins versants très différents.
- ✓ **Richesse** : Il doit pouvoir intégrer un grand nombre de caractéristiques permettant de différencier le comportement d'un bassin à un autre.
- ✓ **Adaptabilité** : Il doit pouvoir être corrigé pour tenir compte de nouvelles données sur le bassin modélisé.

En réalité, il est impossible de satisfaire tous ces critères simultanément ; suite aux contraintes des données requises, dans le présent travail, nous nous sommes fixé d'atteindre la précision, la robustesse, la généralité et l'adaptabilité.

Servat et al. (1989)cité par **Safouane MOUELHI (2003)** a montré que le critère de Nash(NSE=Nash Sutcliffe Evaluation) s'impose comme celui qui, globalement, permet d'accéder au meilleur modèle. Il s'exprime par l'équation ci-dessous :

$$\mathbf{NSE = 100x[1 - \sum(Q_{i,ob} - Q_{i,ca})^2 / \sum(Q_{i,ob} - Q_{moy})^2} \qquad \textbf{I-17}$$

Avec :$Q_{i,ob}$ et $Q_{i,ca}$ = les débits observes et calculés au pas de temps i,

Q_{moy} = la moyenne des débits observés sur la période considérée.

(MEDANE Kheira, 2012) estime que la simulation est le critère de Nash-Sutcliffe acceptable lorsqu'il est supérieur à 70% et est parfaite lorsque ce critère est égal à 100% .

CHAPITRE II : MODELISATION HYDROLOGIQUE ET ANALYSE DES RESULTATS

II.1 Introduction

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 dans les différentes rivières du bassin de la Ruvubu. 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.

Le tableau II.-1 montre la disparité des périodes d'observation pour les précipitations et les températures pour les différentes stations météorologiques ainsi que pour les débits aux stations de jaugeage dans le bassin de la Ruvubu.

Tableau II-1 : Périodes et durées d'observations pour les données hydrométéorologiques dans le bassin de la Ruvubu

	Précipitation		**Température**		**Débit**		
Station	**Période**	**Durée**	**Période**	**Durée**	**Station**	**Période**	**Durée**
Cankuzo	1991-2020	30	1991-2020	30	Kayongozi-Nyenkanda	1986-2016	31
Gitega aéro	1991-2020	30	1991-2020	30			
Gisozi	1991-2020	30	1991-2020	30	Nyabaha-Mubuga	1986-2016	31
Karuzi	1991-2020	30	1991-2020	30			
Muriza	1991-2020	30	1991-2020	30	Ruvubu-Gitega	1986-2016	31
Muyinga	1991-2020	30	1991-2020	30			

	Précipitation		Température		Débit		
Station	**Période**	**Durée**	**Période**	**Durée**	**Station**	**Période**	**Durée**
Nyamuswaga	1991-2020	30	1991-2020	30	Ruvyironza-Kibaya	1986-2016	31
Bugarama	1980-2017	38	-	-			
Ruvyironza	1980-2019	41	1981-2016	36	Ruvubu-Muyinga	1986-1993 2011-2016	14
Rwegura	1980-2016	37	1980-2020	41			

L'homogénéisation a été faite sur les données météorologiques (précipitations, températures et l'évapotranspiration potentielle) en appliquant les équations I-1 à I-3 tandis que pour les débits, nous avons choisi une période commune en fonction des périodes d'observation sans devoir faire des transformations afin de réduire la propagation des erreurs dans la modélisation.

II.2.1 Homogénéisation des précipitations

Après analyse de la corrélation et de la période d'observations des précipitations recueillies sur les stations météorologique se trouvant dans le bassin de la Ruvubu, la station pluviométrique de la Ruvyironza a été comme base pour l'extension des données pour les autres stations.
Le tableau II.2 condense les résultats de l'homogénéisation des précipitations pour laquelle les stations de Cankuzo, Gitega aéro, Gisozi, Karuzi, Muriza, Muyinga et Nyamuswaga, nous avons fait l'extension de 1990 à 1980 tandis que pour Bugarama et Rwegura la période d'extension a été de 2017 à 2020.

Tableau II-2: Précipitation moyenne annuelle homogénéisée en mm

Station	**RUVYIRONZA**	**Cankuzo**	**Gitega aéro**	**Gisozi**	**Karuzi**	**Muriza**	**Muyinga**	**Nyamuswaga**	**Bugarama**	**Rwegura**	**Bassin Ruvubu**
Ai/A	0.056	0.123	0.130	0.084	0.124	0.107	0.124	0.103	0.091	0.057	1.000
Année	Pi	Pi	Pi	Pi	Pi	Pi	Pi	Pi	Pi	Pi	Pm
1980	1203.3	1159.6	1059.9	1435.0	1172.0	1095.2	1071.9	1216.8	1898.4	1634.5	**1256.0**
1981	1246.8	1165.0	1078.4	1440.5	1177.1	1100.9	1076.6	1236.1	1429.6	1481.0	**1214.6**
1982	1388.8	1182.5	1138.8	1458.3	1193.6	1119.3	1092.1	1298.9	1745.2	1905.7	**1299.3**

Station	RUVYIRONZA	Cankuzo	Gitega aéro	Gisozi	Karuzi	Muriza	Muyinga	Nyamuswaga	Bugarama	Rwegura	Bassin Ruvubu
Ai/A	0.056	0.123	0.130	0.084	0.124	0.107	0.124	0.103	0.091	0.057	1.000
Année	Pi	Pi	Pi	Pi	Pi	Pi	Pi	Pi	Pi	Pi	Pm
1983	1191.9	1158.2	1055.1	1433.6	1170.7	1093.7	1070.6	1211.7	1377.6	1465.5	**1196.7**
1984	1235.4	1163.6	1073.6	1439.1	1175.8	1099.4	1075.4	1231.0	1542.3	1409.6	**1218.2**
1985	1391.1	1182.8	1139.8	1458.6	1193.9	1119.6	1092.3	1300.0	1632.9	1679.0	**1276.7**
1986	1302.4	1171.8	1102.1	1447.5	1183.6	1108.1	1082.7	1260.7	1763.3	1872.0	**1279.6**
1987	1014.8	1236.4	979.8	1411.4	1150.1	1070.7	1051.4	1133.3	1878.1	1700.5	**1227.9**
1988	1359.9	1178.9	1126.5	1454.7	1190.3	1115.6	1088.9	1286.1	1800.2	1973.1	**1301.6**
1989	1521.9	1198.9	1195.4	1475.0	1209.1	1136.6	1106.5	1357.9	1915.6	1714.8	**1333.8**
1990	1165.5	1372.9	1043.9	1430.3	1167.6	1090.3	1067.8	1200.1	1346.1	1645.0	**1225.0**
1991	1191.1	1165.1	1082.9	1535.2	1136.7	1160.1	955.2	1243.7	1445.4	1743.8	**1223.5**
1992	1212.6	1160.5	1073.2	1230.2	1274.9	1130.8	1067.8	1118.5	1713.4	1690.7	**1233.5**
1993	1155.4	1194.5	911.0	1285.2	905.3	1191.6	1032.5	882.1	1526.8	1366.5	**1114.3**
1994	1266.8	1170.5	1179.7	1318.0	938.0	1165.8	983.2	1224.0	1881.8	1564.1	**1229.3**
1995	1534.3	1234.7	1010.8	1317.9	652.1	1242.6	996.1	1356.0	1683.3	1595.0	**1201.9**
1996	1580.5	1092.7	1269.5	1469.0	751.9	1012.1	1041.5	1179.8	1380.8	1510.0	**1176.4**
1997	1537.9	1436.7	1442.1	1792.3	1418.4	1550.6	1532.8	1570.8	1527.2	1851.5	**1540.6**
1998	1382.2	1034.4	1217.6	1361.7	1426.5	1145.8	854.3	1092.3	1636.7	1670.5	**1240.5**
1999	1221.1	973.6	1132.1	1515.0	1316.7	1040.5	824.3	1151.3	1720.1	1736.5	**1214.6**
2000	1239.6	955.0	980.6	1500.1	1336.1	1092.8	891.5	1071.5	1230.0	1571.2	**1146.7**
2001	1507.3	1067.9	1136.7	1465.0	1822.9	1114.7	1237.2	1090.0	1628.8	1454.3	**1330.0**
2002	1423.4	1145.8	1233.4	1274.1	1503.1	1057.3	1019.6	1157.1	1828.9	2016.2	**1315.6**
2003	1265.9	1109.3	834.5	1460.9	1089.3	1023.5	1048.7	1108.8	1617.8	1527.0	**1162.7**
2004	1169.2	999.8	1149.2	1199.5	1323.1	1028.3	1120.0	1187.4	1364.4	1618.6	**1191.4**
2005	1016.9	887.0	781.4	1102.9	987.6	726.1	926.5	1057.6	1370.4	1283.4	**983.0**
2006	1464.8	1109.0	1480.2	1476.1	1700.6	1057.1	1103.4	1386.4	1714.1	1295.6	**1369.7**
2007	1276.6	1190.4	1110.4	1463.3	1051.5	989.3	1031.6	1122.4	1539.2	1602.6	**1197.5**

Station	RUVYIRONZA	Cankuzo	Gitega aéro	Gisozi	Karuzi	Muriza	Muyinga	Nyamuswaga	Bugarama	Rwegura	Bassin Ruvubu
Ai/A	0.056	0.123	0.130	0.084	0.124	0.107	0.124	0.103	0.091	0.057	1.000
Année	Pi	Pi	Pi	Pi	Pi	Pi	Pi	Pi	Pi	Pi	Pm
2008	1210.8	1042.0	1012.5	1465.7	1013.0	943.4	1095.9	1349.8	1485.9	1545.5	**1176.6**
2009	1352.8	1142.2	1117.0	1531.9	1030.5	1090.5	1210.3	1357.8	1743.5	1642.0	**1277.9**
2010	1152.7	1139.6	1198.8	1501.2	1063.3	1065.4	972.9	1197.5	1528.3	1762.9	**1217.2**
2011	1504.5	1123.7	1145.9	1411.4	1316.3	1144.6	1245.6	1569.2	1649.9	1859.2	**1349.1**
2012	1426.1	1184.9	1097.2	1728.3	1083.4	1063.3	1205.4	1523.6	1762.5	1550.6	**1318.0**
2013	1480.1	1140.7	1034.3	1733.5	1070.1	1071.2	1190.4	1332.7	1597.9	1775.3	**1283.3**
2014	1324.9	1114.6	1304.2	1573.5	1164.7	1027.9	928.5	1254.8	1600.2	1773.9	**1259.8**
2015	1324.3	1208.8	1469.2	1620.8	1266.5	1142.5	1175.9	1515.5	1726.4	1665.3	**1384.5**
2016	1489.5	1119.5	1035.6	1408.3	1085.3	996.9	749.3	1465.1	1680.5	1508.7	**1199.3**
2017	1277.1	1221.4	937.1	1332.5	1163.3	1035.6	1118.9	1366.7	1604.3	1637.4	**1230.5**
2018	1270.1	1304.6	987.5	1375.1	1160.5	1527.2	1360.1	1478.3	1603.8	1637.1	**1344.1**
2019	1277.1	1223.2	1222.8	1847.6	1292.8	1203.2	1441.3	1294.2	1594.7	1636.8	**1377.0**
2020	1751.1	1500.8	1137.6	1417.3	1302.9	1462.9	1039.3	1809.5	1635.6	1656.3	**1427.7**

II.2.2 Homogénéisation des températures

Par le même principe utilisé pour la précipitation, l'homogénéisation a été faite sur la température mais avec plusieurs stations de base.

La station de Muriza a été la base d'extension pour les stations de Cankuzo, Karuzi, Muyinga et Nyamuswaga et la station de Rwegura a servi pour l'extension des températures de Gitega aéro, Gisozi et Ruvyironza. Pour la station de Bugarama dépourvu des données de température, nous avons utilisé la moyenne des stations de Rwegura, Gisozi et Ruvyironza par le principe de la similitude de climat.

Les résultats sont consignés dans le Tableau II-3 de la page suivante

Tableau II-3 : Température moyenne annuelle homogénéisée

Station	Muriza	Cankuzo	RWEGURA	Gitega Aéro	Gisozi	Karuzi	Muyinga	Nyamuswaga	Ruvyironza	Bugarama
Année	**T_m (°c)**	**T_m (°c)**	**T_m (°c)**	**T_m (°c)**	**T_m (°c)**	**T_m (°c)**	**T_m (°c)**	**T_m (°c)**	**T_m (°c)**	**T_m (°c)**
1981	19.18	19.57	15.49	19.94	16.48	19.96	20.16	19.49	16.88	16.28
1982	18.42	19.57	15.44	19.94	16.46	19.77	20.15	19.29	16.70	16.20
1983	18.65	19.57	16.18	19.95	16.68	19.83	20.15	19.35	17.19	16.68
1984	18.21	19.56	15.82	19.94	16.58	19.72	20.15	19.24	16.72	16.37
1985	18.47	19.57	15.68	19.94	16.53	19.78	20.15	19.31	16.71	16.31
1986	18.20	19.56	15.94	19.94	16.61	19.72	20.15	19.24	16.63	16.39
1987	19.17	19.57	17.71	19.97	17.13	19.96	20.16	19.48	17.56	17.47
1988	18.74	19.57	18.40	19.99	17.33	19.85	20.15	19.37	17.12	17.62
1989	18.27	19.56	17.19	19.97	16.98	19.73	20.15	19.26	16.50	16.89
1990	18.52	19.57	16.20	19.95	16.69	19.80	20.15	19.32	17.06	16.65
1991	18.35	19.58	16.14	19.95	16.46	19.17	19.98	18.96	17.19	16.59
1992	18.64	19.73	16.05	19.95	16.55	18.58	20.10	18.89	17.11	16.57
1993	15.34	20.09	16.27	19.95	16.59	18.95	20.29	18.70	17.26	16.71
1994	15.83	19.80	16.52	19.95	16.51	18.92	20.02	18.77	17.20	16.75
1995	19.16	19.85	16.40	19.95	16.76	18.84	20.26	19.08	17.45	16.87
1996	19.06	19.56	16.29	19.95	16.54	18.83	19.73	19.04	17.42	16.75
1997	17.70	18.02	16.46	19.95	16.73	18.91	20.16	19.17	17.54	16.91
1998	18.07	18.06	17.02	19.96	17.13	18.27	20.08	18.39	17.93	17.36
1999	18.98	19.14	16.04	19.95	16.48	18.59	19.26	18.70	17.28	16.60
2000	19.21	19.25	16.45	19.95	16.81	18.90	19.46	18.82	17.40	16.89
2001	18.62	18.57	16.20	19.95	16.56	18.76	19.11	18.84	17.37	16.71
2002	19.54	18.92	16.27	19.95	16.95	19.25	20.21	19.10	17.83	17.02
2003	17.57	18.90	16.15	19.95	16.75	19.43	20.24	19.20	17.72	16.87
2004	18.10	18.58	16.15	19.95	16.72	19.93	20.42	19.12	17.55	16.80
2005	20.07	19.12	16.15	19.95	17.02	20.61	21.97	19.43	17.82	17.00
2006	19.67	17.94	16.24	19.95	16.73	20.09	19.93	19.15	17.73	16.90
2007	19.60	17.49	16.18	19.95	16.73	19.94	19.65	19.30	17.72	16.88

Station	Muriza	Cankuzo	RWEGURA	Gitega Aéro	Gisozi	Karuzi	Muyinga	Nyamuswaga	Ruvyironza	Bugarama
Année	**T_m (°c)**	**T_m (°c)**	**T_m (°c)**	**T_m (°c)**	**T_m (°c)**	**T_m (°c)**	**T_m (°c)**	**T_m (°c)**	**T_m (°c)**	**T_m (°c)**
2008	19.64	17.11	14.70	19.92	16.35	19.88	19.56	19.25	17.47	16.17
2009	19.97	18.38	16.32	19.95	16.70	20.37	20.22	19.40	17.73	16.92
2010	20.14	19.87	16.58	19.96	16.93	20.83	20.15	19.61	18.00	17.17
2011	18.48	20.46	14.55	19.92	16.54	20.73	20.28	19.46	17.67	16.25
2012	19.47	20.84	16.02	19.95	16.31	20.88	20.37	19.68	17.33	16.55
2013	19.59	20.93	16.07	19.95	16.37	21.32	20.55	19.94	17.14	16.53
2014	19.50	20.91	16.09	19.95	16.55	21.39	20.33	20.00	17.43	16.69
2015	19.74	21.24	16.49	19.95	17.20	21.88	20.89	20.42	18.05	17.25
2016	19.71	21.19	16.56	19.95	16.95	22.04	20.79	20.28	18.35	17.29
2017	19.56	21.10	16.30	19.95	16.53	21.59	20.39	20.16	17.39	16.74
2018	19.28	20.67	15.92	19.94	15.68	20.01	19.71	20.06	17.39	16.33
2019	19.21	21.09	16.70	19.96	16.99	20.17	20.17	20.44	17.38	17.03
2020	19.40	20.88	16.17	19.95	17.07	19.08	20.18	20.33	17.39	16.88

II.2.3 Homogénéisation de l'évapotranspiration

Avec les stations météorologiques du bassin de la Ruvubu, l'évapotranspiration n'est pas mesurée sur les stations mais elle est calculée avec de formule empirique Thornthwaite.

Cette formule de Thornthwaite, donne l'évapotranspiration potentielle mensuelle alors que les modèles utilisent des données annuelles, nous avons commencé à calculer la moyenne mensuelle et après nous avons fait la moyenne annuelle. Comme nous avons utilisé pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle les températures homogénéisées, nous avons obtenu des résultats homogénéisés de l'ETP.

Le tableau II-4 renferme les résultats de l'ETP trouvé

Tableau II-4 : Evapotranspiration potentielle moyenne annuelle calculée en mm

Années	Ruvyironza	Cankuzo	Gitega aéro	Gisozi	Karuzi	Muriza	Muyinga	Nyamuswaga	Rwegura	Bugarama
1981.0	774.2	735.0	723.4	676.3	660.1	688.5	724.3	613.7	736.1	728.9
1982.0	769.1	734.8	719.5	677.3	660.0	666.0	724.5	610.7	734.6	727.0
1983.0	781.5	734.9	596.4	678.4	660.0	671.5	725.6	611.4	754.0	737.9
1984.0	770.1	734.8	596.4	678.4	660.0	660.0	725.6	609.9	744.7	731.1
1985.0	769.6	734.8	596.4	678.4	660.0	667.7	725.6	610.9	741.3	729.8
1986.0	768.2	734.8	596.4	678.4	660.0	660.8	725.6	610.0	748.1	731.6
1987.0	792.3	735.0	596.4	678.5	660.0	686.2	725.6	613.4	796.0	755.6
1988.0	780.3	734.9	596.4	678.6	660.0	673.9	725.6	611.7	814.1	757.7
1989.0	764.0	734.8	596.4	678.5	660.0	662.4	724.3	610.2	782.8	741.8
1990.0	778.7	734.9	596.4	678.3	660.0	668.9	724.3	611.1	754.5	737.2
1991.0	781.9	754.2	719.2	675.6	667.1	663.7	712.1	623.1	752.8	736.8
1992.0	779.9	756.1	722.3	672.2	660.8	671.8	729.0	610.6	750.7	734.3
1993.0	784.7	761.7	720.8	671.9	650.8	593.7	734.0	601.4	732.2	729.6
1994.0	783.0	753.8	720.3	672.0	647.5	618.4	730.1	611.8	738.4	731.1
1995.0	789.2	749.4	720.3	677.5	640.4	686.5	730.7	617.3	708.1	724.9
1996.0	788.2	736.2	720.9	674.7	634.9	683.4	711.8	619.6	757.7	740.2
1997.0	772.6	714.8	693.9	679.0	631.9	677.2	725.7	622.0	739.3	730.3
1998.0	782.2	703.3	719.2	686.5	592.9	687.7	720.2	595.5	723.7	730.8
1999.0	784.4	712.3	729.7	674.6	625.5	680.9	684.7	612.5	725.8	728.3
2000.0	788.8	707.6	730.0	677.0	634.2	688.1	689.4	602.3	761.7	742.5
2001.0	787.3	693.3	731.2	680.5	650.6	672.1	691.0	628.2	754.7	740.8
2002.0	799.6	696.1	737.0	683.2	653.8	697.3	729.4	618.0	756.2	746.4
2003.0	797.2	691.5	732.4	678.2	660.2	655.5	734.4	621.3	753.2	742.9
2004.0	792.9	683.3	730.1	675.2	665.5	659.7	729.1	612.2	753.2	740.4
2005.0	799.4	687.1	740.7	681.2	676.3	712.3	756.9	625.4	753.2	744.6
2006.0	797.1	652.5	742.0	680.5	661.9	700.2	716.5	624.3	743.6	740.4
2007.0	796.6	637.4	741.1	684.9	665.5	698.4	704.6	635.1	743.4	741.6

Années	Ruvyironza	Cankuzo	Gitega aéro	Gisozi	Karuzi	Muriza	Muyinga	Nyamuswaga	Rwegura	Bugarama
2008.0	789.7	624.9	734.1	670.7	665.3	700.0	698.5	625.9	684.1	714.8
2009.0	797.4	669.3	741.5	673.6	672.3	708.0	723.4	628.7	758.3	743.1
2010.0	804.0	736.2	749.6	678.1	680.8	714.7	723.4	627.9	754.6	745.6
2011.0	795.4	779.0	744.0	674.9	674.2	682.6	737.6	642.3	714.0	728.1
2012.0	786.4	788.3	742.9	663.6	667.2	696.0	728.8	635.2	739.1	729.7
2013.0	781.6	789.0	746.8	659.2	664.9	697.5	736.5	643.0	751.2	730.7
2014.0	788.6	798.0	758.7	669.9	678.0	695.4	727.6	650.6	751.8	736.8
2015.0	805.6	756.0	766.7	682.1	692.4	701.7	778.9	665.7	762.6	750.1
2016.0	814.0	757.0	773.3	676.2	692.5	701.8	743.1	641.7	744.1	744.7
2017.0	791.8	754.3	760.1	665.8	686.2	697.6	739.3	652.1	757.9	738.5
2018.0	811.4	794.1	762.1	677.3	674.5	689.1	709.5	663.4	746.8	745.2
2019.0	825.4	753.1	769.8	684.5	676.7	687.5	723.4	698.5	698.5	736.1
2020.0	828.0	751.5	774.7	687.5	676.5	693.6	723.4	715.0	730.3	748.6

II.2.4 Homogénéisation des débits

Comme la modélisation a été orientée vers la minimisation de l'écart entre les débits observés et les débits simulés et de plus toute manipulation conduit à des valeurs approchées, on a décidé de garder les débits observés intacts. En conséquence la période commune considérée pour faire l'homogénéisation a été donc celle des observations des débits c'est-à–dire de 1986 à 2016 pour toutes les stations excepté pour le bassin de la Ruvubu qui des observations avec interruption de 1993 à 2010 ; donc de courte durée.

Le tableau II-5 fournit les débits observés en m^3/s dans la première moitié et dans la seconde ces derniers transformés en ruissellement car il y a des modèles hydrologiques dont les données d'entrée sont les hauteurs des lames ruisselées qui ont atteint les rivières.

Tableau II-5 : Débits observés aux différentes stations hydrologiques du Bassin de la Ruvubu

Station	Kayongozi-Nyenkanda	Nyabaha-Mubuga	Ruvubu-Gitega	Ruvyironza-Kibaya	Ruvubu-Muyinga	Kayongozi-Nyenkanda	Nyabaha-Mubuga	Ruvubu-Gitega	Ruvyironza-Kibaya	Ruvubu-Muyinga
Année	Q (m^3/s)	Q (m^3/s)	Q (m^3/s)	Q (m^3/s)	Q (m^3/s)	Q (mm)	Q (mm)	Q (mm)	Q (mm)	Q (mm)
1986	6.80	13.58	81.14	22.66	124.18	317.19	456.35	611.96	360.36	419.62
1987	6.85	12.33	70.98	19.53	109.70	319.69	414.38	535.29	310.69	370.67
1988	7.21	12.59	81.31	25.08	126.19	336.33	422.98	613.22	398.94	426.41
1989	7.32	13.23	88.38	29.25	138.19	341.47	444.74	666.57	465.19	466.95
1990	8.65	13.02	58.76	22.67	103.10	403.66	437.63	443.14	360.49	348.38
1991	6.53	12.49	65.44	22.55	107.01	304.69	419.63	493.51	358.70	361.60
1992	6.44	12.72	62.43	20.07	101.66	300.65	427.52	470.83	319.18	343.54
1993	6.71	14.24	52.93	18.85	92.73	312.86	478.46	399.21	299.88	313.35
1994	6.38	13.74	69.60	18.74		297.80	461.85	524.93	297.98	
1995	7.07	15.33	62.83	21.84		329.91	515.06	473.83	347.37	
1996	5.58	10.72	58.87	24.31		260.39	360.11	443.96	386.69	
1997	9.51	20.57	97.51	32.97		443.77	691.14	735.38	524.40	
1998	5.72	14.49	74.70	26.49		266.88	486.78	563.35	421.26	
1999	5.02	9.13	69.35	24.06		234.40	306.91	523.02	382.65	
2000	4.18	11.51	56.88	19.35		195.20	386.74	428.98	307.70	
2001	5.86	12.87	69.47	25.40		273.23	432.40	523.93	404.00	
2002	6.69	10.42	79.95	22.65		312.02	350.15	602.98	360.23	
2003	5.88	9.77	63.75	18.16		274.24	328.37	480.77	288.91	
2004	4.85	9.34	59.87	16.74		226.31	313.85	451.55	266.19	
2005	4.31	5.68	51.62	12.89		201.06	190.84	389.32	205.04	
2006	6.78	8.98	84.26	26.15		316.51	301.77	635.50	415.89	
2007	7.65	10.67	71.74	22.21		356.80	358.70	541.07	353.30	

Station	Kayongozi-Nyenkanda	Nyabaha-Mubuga	Ruvubu-Gitega	Ruvyironza-Kibaya	Ruvubu-Muyinga	Kayongozi-Nyenkanda	Nyabaha-Mubuga	Ruvubu-Gitega	Ruvyironza-Kibaya	Ruvubu-Muyinga
Année	Q (m^3/s)	Q (m^3/s)	Q (m^3/s)	Q (m^3/s)	Q (m^3/s)	Q (mm)	Q (mm)	Q (mm)	Q (mm)	Q (mm)
2008	6.78	8.82	63.45	23.10		316.32	296.30	478.51	367.37	
2009	7.40	10.97	70.42	22.14		345.33	368.80	531.07	352.15	
2010	6.44	9.22	68.05	23.41		300.62	309.73	513.21	372.37	
2011	6.33	12.83	81.06	25.53	125.75	295.10	431.02	611.34	406.08	424.91
2012	7.05	11.51	80.03	25.31	123.91	328.94	386.92	603.59	402.57	418.70
2013	6.82	12.64	76.20	27.21	122.88	318.34	424.72	574.72	432.76	415.21
2014	5.57	11.34	76.47	25.08	118.45	259.74	381.10	576.70	398.88	400.27
2015	6.59	12.20	82.74	26.63	128.16	307.33	409.83	624.04	423.61	433.07
2016	5.78	11.11	75.77	23.75	116.41	269.47	373.39	571.46	377.81	393.38

II.3 Modèles à base des données météorologiques

II.3.1 Variation de l'affectation du paramètre

Safouane MOUELHI (2003), dans sa thèse pour améliorer les modèles hydrologiques en se basant sur l'équation du bilan hydrologique, a conclu qu'un modèle est amélioré si on affecte un coefficient sur l'évaporation. Nous avons vérifié cette affirmation en faisant varier l'affectation du paramètre dans le modèle SCS ce qui nous a conduit à cinq scénarii :

- Pour le scénario1, on affecte le paramètre b à l'évapotranspiration ;

$$\mathbf{Q} = \frac{\left(P - b\frac{E}{6}\right)^2}{P + \frac{2}{3}bE} \qquad \textbf{II-1}$$

- Pour le scénario 2, le paramètre a est affecté à la précipitation ;

$$\mathbf{Q} = \frac{\left(aP - \frac{E}{6}\right)^2}{aP + \frac{2}{3}E} \qquad \textbf{II-2}$$

- Le 3ème scénario correspond à l'affectation du terme indépendant c ;

$$\mathbf{Q} = \frac{\left(P - \frac{E}{6} + C\right)^2}{P + \frac{2}{3}\alpha E + C} \qquad \textbf{II-3}$$

- Les scénarii 4 et 5 correspondent à une combinaison des précédents :

  Le 4ème se fait avec l'affectation à la fois à la précipitions et à l'évapotranspiration ;

$$\mathbf{Q} = \frac{\left(aP - b\frac{E}{6}\right)^2}{aP + \frac{2}{3}bE} \qquad \textbf{II-4}$$

  Tandis que le scénario 5 on ajoute en plus le terme indépendant.

$$\mathbf{Q} = \frac{\left(aP - b\frac{E}{6} + C\right)^2}{aP + \frac{2}{3}bE + C} \qquad \textbf{II-5}$$

Après l'application de toutes ces formules les résultats pour le sous bassin de la Kayongozi-Nyenkanda sont rassemblés dans le tableau II-6 suivant :

Tableau II-6: Résultats de la variation de l'affection d'un paramètre dans le modèle SCS pour le sous bassin de la Kayongozi-Nyenkanda

Kayongozi	**Données**			**Scénario 1**	**Scénario 2**	**Scénario 3**	**Scénario 4**	**Scénario 5**
Année	**P (mm)**	**ETP (mm)**	**Qob (mm)**	**Qc (mm)**	**Qc (mm)**	**Qc (mm)**	**Qc (mm)**	**Qc (mm)**
1986	1158.37	733.40	**317.19**	**320.88**	**277.11**	**321.55**	**315.24**	**305.85**
1987	1208.45	733.58	**319.69**	**351.47**	**299.29**	**359.94**	**344.09**	**329.45**
1988	1165.32	733.48	**336.33**	**325.05**	**280.15**	**326.81**	**319.17**	**309.07**
1989	1184.92	733.21	**341.47**	**337.15**	**288.92**	**341.89**	**330.59**	**318.43**
1990	1326.78	733.25	**403.66**	**427.24**	**353.40**	**454.19**	**415.29**	**387.28**
1991	1133.33	747.80	**304.69**	**298.70**	**261.71**	**297.95**	**294.50**	**288.35**
1992	1146.49	751.97	**300.65**	**304.39**	**266.13**	**306.38**	**299.96**	**292.71**
1993	1170.02	757.54	**312.86**	**315.56**	**274.63**	**322.16**	**310.60**	**301.29**
1994	1142.19	750.21	**297.80**	**302.73**	**264.80**	**303.75**	**298.35**	**291.45**
1995	1198.64	746.56	**329.91**	**338.48**	**290.69**	**347.73**	**332.07**	**319.22**
1996	1084.96	732.49	**260.39**	**277.90**	**245.53**	**267.27**	**274.57**	**272.38**

Kayongozi	**Données**			**Scénario 1**	**Scénario 2**	**Scénario 3**	**Scénario 4**	**Scénario 5**
Année	**P (mm)**	**ETP (mm)**	**Qob (mm)**	**Qc (mm)**	**Qc (mm)**	**Qc (mm)**	**Qc (mm)**	**Qc (mm)**
1997	1451.22	716.48	**443.77**	**522.16**	**418.64**	**564.70**	**503.70**	**458.98**
1998	1007.18	705.82	**266.88**	**245.92**	**220.35**	**219.70**	**243.83**	**247.71**
1999	951.05	708.14	**234.40**	**213.98**	**196.46**	**180.74**	**213.47**	**222.19**
2000	945.40	704.85	**195.20**	**212.32**	**195.04**	**177.84**	**211.85**	**220.92**
2001	1093.50	692.97	**273.23**	**302.58**	**261.39**	**286.28**	**297.28**	**292.41**
2002	1126.73	701.17	**312.02**	**318.49**	**273.44**	**308.57**	**312.44**	**304.59**
2003	1100.14	697.99	**274.24**	**304.00**	**262.72**	**289.59**	**298.71**	**293.41**
2004	1017.97	690.23	**226.31**	**259.32**	**229.48**	**231.89**	**256.32**	**258.62**
2005	892.97	697.63	**201.06**	**187.59**	**175.84**	**145.72**	**188.13**	**201.07**
2006	1108.15	662.20	**316.51**	**328.05**	**277.94**	**307.92**	**320.76**	**312.74**
2007	1166.40	647.54	**356.80**	**373.83**	**309.64**	**358.88**	**363.49**	**348.15**
2008	1050.15	635.99	**316.32**	**306.24**	**260.58**	**272.79**	**299.75**	**296.41**
2009	1152.49	677.50	**345.33**	**347.43**	**292.83**	**336.74**	**339.27**	**327.36**
2010	1114.41	734.28	**300.62**	**294.22**	**257.65**	**288.31**	**290.05**	**285.11**
2011	1142.11	772.73	**295.10**	**291.75**	**257.97**	**296.39**	**288.31**	**282.49**
2012	1188.00	779.32	**328.94**	**315.35**	**275.72**	**328.38**	**310.76**	**300.76**
2013	1148.21	781.09	**318.34**	**291.30**	**258.09**	**298.21**	**288.01**	**281.99**
2014	1086.47	787.33	**259.74**	**253.72**	**230.37**	**251.83**	**252.40**	**252.33**
2015	1203.82	759.47	**307.33**	**334.88**	**288.84**	**347.17**	**328.89**	**316.21**
2016	1063.55	754.93	**269.47**	**255.35**	**229.94**	**245.12**	**253.49**	**254.21**
Critère de Nash Sutcliffe				**81.3**	**42.18**	**58.66**	**86.19**	**88.23**

Le tableau II-7 synthétise les résultats obtenus après la variation de l'élément sur lequel est lié le coefficient d'adaptation pour tous les sous bassin de la rivière Ruvubu. Ce tableau II-7 montre les valeurs moyennes des paramètres et le critère d'évaluation de Nash –Sutcliffe (NSE) correspondant.

Tableau II-7: Synthèse des Résultats de la variation de l'affection d'un paramètre dans le modèle SCS dans le bassin de la rivière Ruvubu

Scénario	1		2		3		4			5			
Paramètre	b	NSE	a	NSE	c	NSE	a	b	NSE	a	b	c	NSE
Kayongozi-Nyenkanda	2.4	**81.3**	0.6	**42.2**	-403.8	**58.7**	2	0.9	**86.2**	1.6	0.7	105.5	**88.2**
Nyabaha-Mubuga	1.9	**85.7**	0.8	**65.2**	-269.8	**83.8**	2.2	1.1	**80.9**	1.6	1	-34.8	**35.1**
Ruvubu-Gitega	2.1	**84.9**	0.7	**61.8**	-341.8	**75.4**	2.1	1	**84.9**	1.4	0.7	130	**54.1**
Ruvyironza-Kibaya	2.6	**79.3**	0.6	**52.0**	-467	**55.0**	2	0.9	**68.2**	1.6	0.7	102.4	**84.6**
Affectation pour le bassin de la Ruvubu													
Ruvubu-Muyinga	2.46	**71.7**	0.66	**74.6**	-432	**59.2**	2.01	0.9	**72.6**	1.53	0.8	49	**71.9**

II.3.2 Analyse des résultats

L'affectation d'un (es) paramètre (s) aux éléments du bilan hydrologique a des effets variés. La simulation donne des résultats optimaux pour le scénario 5 dans le sous bassin Kayongozi-Nyenkanda tandis que le même scénario fournit des résultats médiocres pour le sous bassin de Nyabaha-Mubuga.

Selon **MEDANE Kheira (2012),** la simulation est acceptable lorsque le critère de Nash Sutcliffe est supérieur à 70%. Pour les sous bassins de la Ruvubu objets de notre étude, les simulations acceptables sont variables suivant le sous basin considéré.

En conclusion, en fonction des résultats des Tableau 0-.6 et 0-7, nos résultats colloborent avec ceux de **Mouelhi (2003)** ; la modélisation donne des résultats fiables lorsqu'on affecte le paramètre à l'évapotranspiration. La conclusion conduit à analyser par après l'effet de ce paramètre affecté à l'évapotranspiration dans les différents modèles.

II.3.3 Choix du modèle le mieux adapté au bassin

A. Procédure

Après avoir conclu que le paramètre donne une simulation acceptable lorsqu'il est lié à l'évapotranspiration, le problème qui se pose pour l'étape suivante est la détermination du coefficient qui donne le modèle répondant à beaucoup de critères d'évaluation des modèles.

Pour y arriver, lors de notre étude, nous avons procédé de la manière suivante :

- ☞ Utiliser les données de notre zone d'étude dans les modèles existants tels que conçu sans adaptation du paramètre pour évaluer leur universalité et leur précision ;
- ☞ Adapter ces modèles, pour améliorer la simulation, en faisant une minimisation de l'écart entre le débit mesuré et le débit simulé à travers un programme de calcul d'Excel et déterminer la valeur du NSE correspondant ;
- ☞ Calculer le paramètre moyen pour le sous bassin considéré et déterminer le NSE ;
- ☞ Comparer les valeurs de NSE pour chaque modèle et choisir le modèle le plus performant.

Les modèles à base des données hydrologiques considérés sont les modèles de Tixeront, Ol'dekop et SCS améliorés par MOUELHI (2003) ainsi que le modèle annuel de génie rural (GR1A) mise au point par le Centre d'Etude du Machinisme Agricole et du Génie Rural des Eaux et Forêts (CEMAGRAF). La structure du modèle se résume à une simple équation dont le débit simulé pour l'année k est fonction de la précipitation de cette année, de celle qui la précède k-1 et de l'évapotranspiration potentielle moyenne annuelle.

$$\mathbf{Q_k = P_k \left\{ 1 - \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{0.7P_k + 0.3P_{k-1}}{XE} \right)^2 \right]^{0.5}} \right\}} \qquad \textbf{II-6}$$

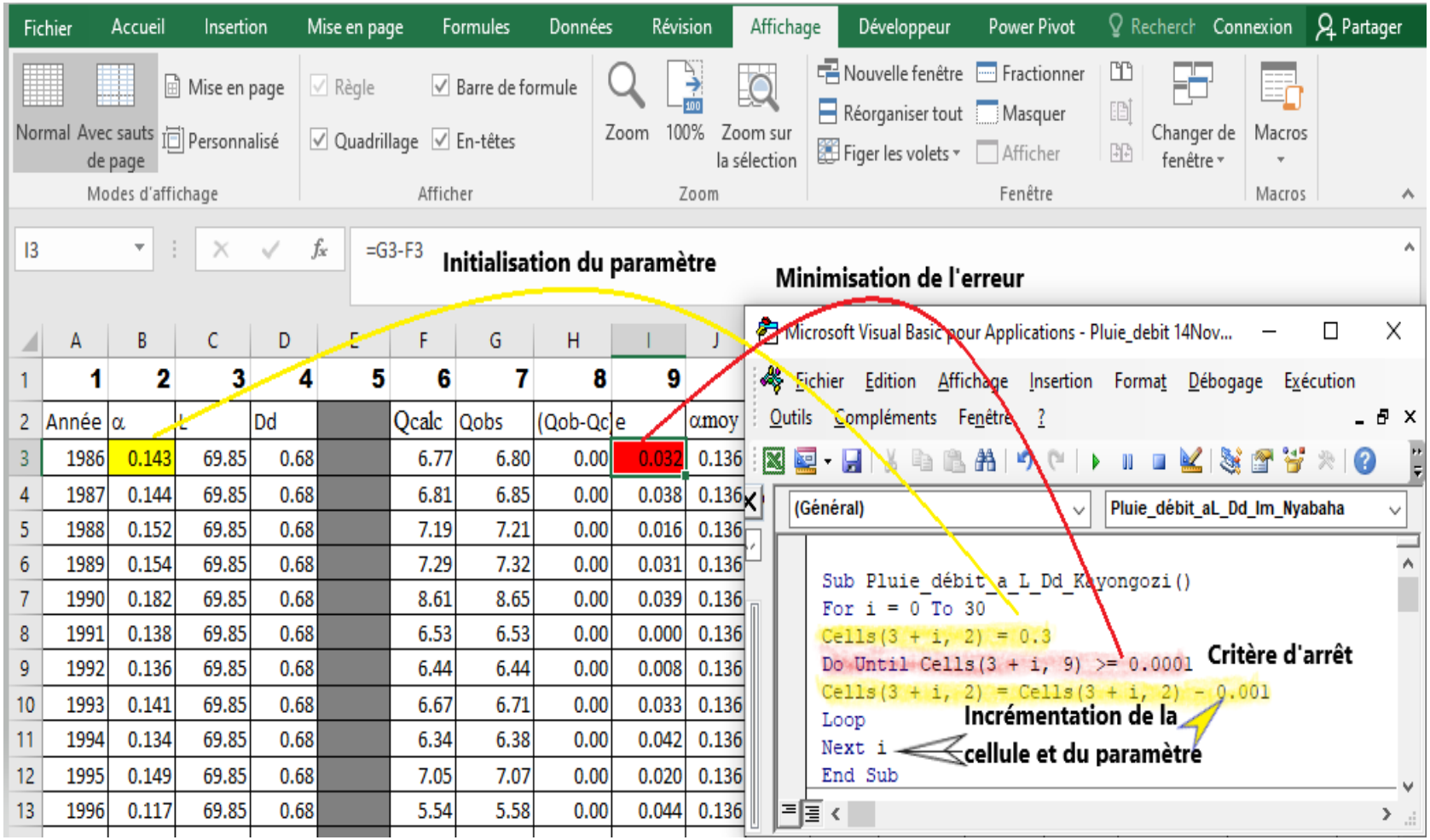
Avec : Q_k= Débit annuel pour l'année k

P_k P_{k-1}= Précipitation moyenne annuelle de l'année k et l'année k-1

E= Evapotranspiration moyenne annuelle

X = paramètre du modèle

Après avoir choisi les modèles à utiliser, nous avons ensuite procédé à une mise au point d'un programme Excel qui permet la minimisation de l'erreur entre les débits observés et débits simulés. La syntaxe de ce modèle est représentée sur la figure II-1



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
2	Année	α	L	Dd		Qcalc	Qobs	(Qob-Qc	e	αmoy
3	1986	0.143	69.85	0.68		6.77	6.80	0.00	0.032	0.136
4	1987	0.144	69.85	0.68		6.81	6.85	0.00	0.038	0.136
5	1988	0.152	69.85	0.68		7.19	7.21	0.00	0.016	0.136
6	1989	0.154	69.85	0.68		7.29	7.32	0.00	0.031	0.136
7	1990	0.182	69.85	0.68		8.61	8.65	0.00	0.039	0.136
8	1991	0.138	69.85	0.68		6.53	6.53	0.00	0.000	0.136
9	1992	0.136	69.85	0.68		6.44	6.44	0.00	0.008	0.136
10	1993	0.141	69.85	0.68		6.67	6.71	0.00	0.033	0.136
11	1994	0.134	69.85	0.68		6.34	6.38	0.00	0.042	0.136
12	1995	0.149	69.85	0.68		7.05	7.07	0.00	0.020	0.136
13	1996	0.117	69.85	0.68		5.54	5.58	0.00	0.044	0.136

Figure II-1: Programme de minimisation de l'erreur de simulation

Le tableau II-8 est subdivisé en 4 parties dont la 2ème, représente les résultats de l'application des modèles tels que proposés par les auteurs, la 3ème les résultats des modèles adaptés au sous bassin de la Kayongozi-Nyenkanda tandis que la 4ème partie du tableau montre les résultats trouvés avec l'utilisation du paramètre moyen.

Tableau II-8: Ruissellement en mm en fonction du paramètre et du type de modèle au sous bassin de la Kayongozi-Nyenkanda

Kayongozi		Q (en mm) selon les auteurs			Q (en mm) avec b adapté au sous bassin				Q (en mm) avec b moyen			
Années	Q_{ob}	$Q_{Tixeront}$	$Q_{Ol'dekop}$	Q_{SCS}	$Q_{Tixeront}$	$Q_{Ol'dekop}$	Q_{SCS}	Q_{GR1A}	$Q_{Tixeront}$	$Q_{Ol'dekop}$	Q_{SCS}	Q_{GR1A}
1986	317.19	369.38	643.93	620.04	317.07	317.14	316.96	317.10	369.38	315.05	320.88	310.86
1987	319.69	402.17	691.70	662.46	319.55	319.57	319.50	319.65	402.17	347.69	351.47	340.01
1988	336.33	373.84	650.50	625.88	336.15	336.20	336.22	336.08	373.84	319.47	325.05	322.76
1989	341.47	386.80	669.39	642.62	341.35	341.15	341.24	341.40	386.80	332.37	337.15	328.62
1990	403.66	483.63	806.40	764.65	403.61	403.64	403.41	403.52	483.63	430.27	427.24	407.96
1991	304.69	346.16	611.31	592.10	304.59	304.60	304.58	304.57	346.16	291.27	298.70	310.68
1992	300.65	352.40	621.17	601.12	300.62	300.57	300.54	300.54	352.40	297.11	304.39	295.88
1993	312.86	364.53	639.98	618.16	312.82	312.82	312.71	312.70	364.53	308.66	315.56	306.00
1994	297.80	350.55	618.19	598.36	297.72	297.70	297.67	297.72	350.55	295.41	302.73	298.33
1995	329.91	388.69	674.06	647.65	329.91	329.89	329.90	329.67	388.69	333.29	338.48	325.91
1996	260.39	323.40	575.13	559.02	260.31	260.22	260.26	260.29	323.40	270.03	277.90	281.99
1997	443.77	585.59	939.74	883.56	443.61	443.68	443.71	443.67	585.59	537.58	522.16	481.56
1998	266.88	288.31	518.51	507.07	266.86	266.70	266.87	266.78	288.31	237.71	245.92	280.97
1999	234.40	254.43	465.62	460.35	234.40	234.16	234.29	234.34	254.43	205.42	213.98	213.09
2000	195.20	252.55	462.34	457.22	195.11	195.00	195.15	195.07	252.55	203.81	212.32	206.88
2001	273.23	348.36	607.46	585.01	273.18	273.14	273.12	273.07	348.36	297.04	302.58	280.88

Kayongozi		Q (en mm) selon les auteurs			Q (en mm) avec b adapté au sous bassin				Q (en mm) avec b moyen			
Années	Q_{ob}	Q Tixeront	Q Ol'dekop	Q SCS	Q Tixeront	Q Ol'dekop	Q SCS	Q_{GR1A}	Q Tixeront	Q Ol'dekop	Q SCS	Q_{GR1A}
2002	312.02	365.69	634.00	609.09	311.94	311.90	311.93	311.83	365.69	313.65	318.49	308.76
2003	274.24	350.06	610.65	588.17	274.18	274.10	274.23	274.06	350.06	298.37	304.00	300.25
2004	226.31	302.03	537.83	523.12	226.26	226.21	226.21	226.25	302.03	251.82	259.32	260.73
2005	201.06	226.03	419.10	418.33	200.96	200.95	200.92	201.03	226.03	179.43	187.59	193.39
2006	316.51	374.61	641.00	612.76	316.40	316.47	316.36	316.48	374.61	325.46	328.05	299.65
2007	356.80	423.36	706.99	670.67	356.71	356.72	356.74	356.74	423.36	376.15	373.83	364.12
2008	316.32	350.30	602.03	576.42	316.25	316.17	316.22	316.22	350.30	303.07	306.24	313.03
2009	345.33	395.94	673.88	642.99	345.29	345.13	345.21	345.23	395.94	345.75	347.43	331.35
2010	300.62	340.89	601.73	582.70	300.56	300.38	300.62	300.59	340.89	286.97	294.22	290.99
2011	295.10	339.65	604.43	587.70	295.07	294.81	294.99	294.89	339.65	283.40	291.75	281.61
2012	328.94	365.09	643.58	622.82	328.93	328.83	328.82	328.78	365.09	307.79	315.35	303.29
2013	318.34	339.47	605.12	588.87	318.27	318.19	318.36	318.16	339.47	282.74	291.30	287.70
2014	259.74	299.68	544.24	535.37	259.70	259.55	259.65	259.73	299.68	244.25	253.72	252.41
2015	307.33	385.28	670.89	645.69	307.22	307.08	307.19	307.32	385.28	329.00	334.88	315.77
2016	269.47	300.19	541.90	531.11	269.35	269.33	269.38	269.41	300.19	246.42	255.35	261.59
NSE		**-33.14**	**-3901.31**	**-3354**	**100.00**	**100.00**	**100.00**	**100.00**	**11.55**	**76.46**	**83.33**	**89.78**

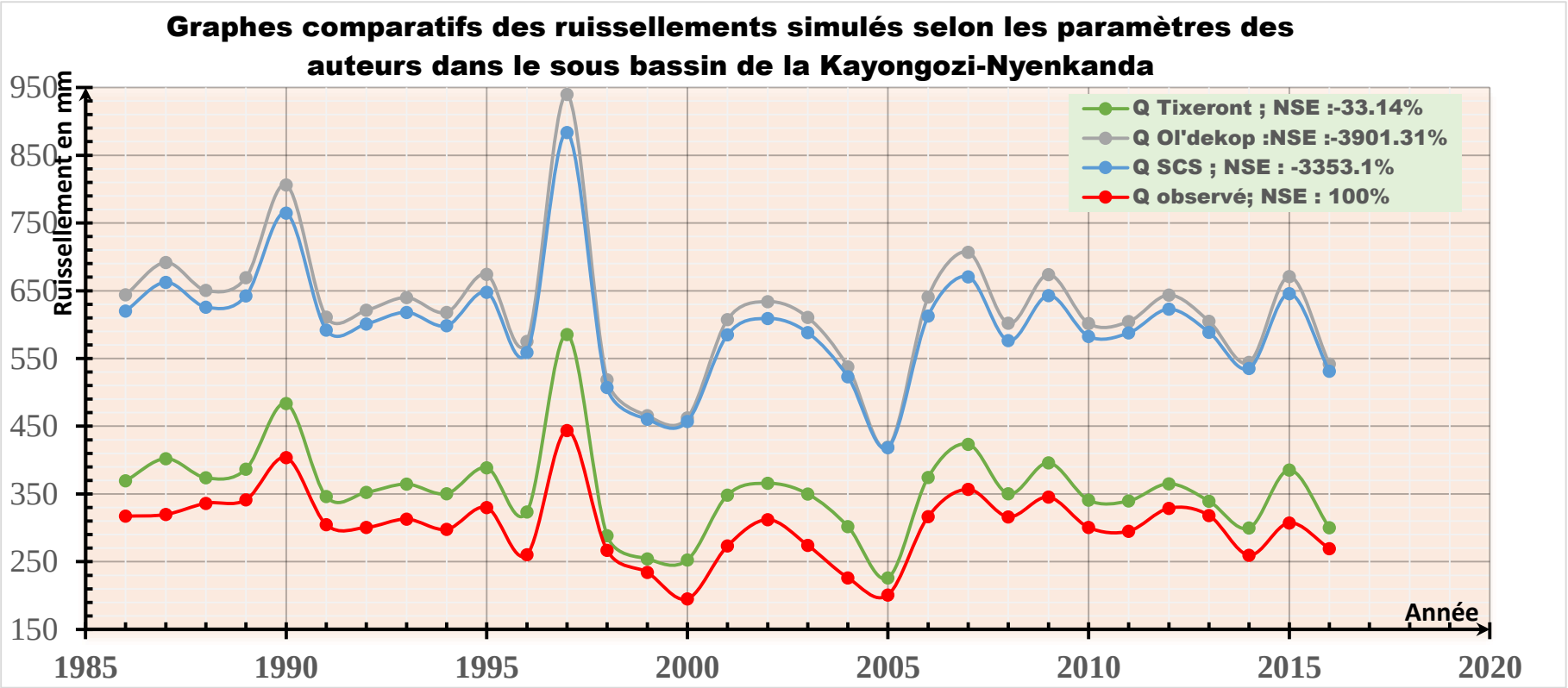


Figure II-2 : Courbes des ruissellements observés et simulés avec les modèles proposés par les auteurs

L'application des équations non adaptées au bassin conduit à une simulation de faible précision avec un écart minimal de 20.03 mm pour le modèle de Tixeront pour l'année 1999 et maximal de 495.97mm pour le modèle de Ol'dekop pour l'année 1997(**Voir Tableau II-8 et figure II-2).** Pour ces mêmes modèles, le critère d'évaluation de Nash est toujours négatif ce qui conduit à conclure que l'application des modèles empiriques non adapté aboutit à une mauvaise simulation.

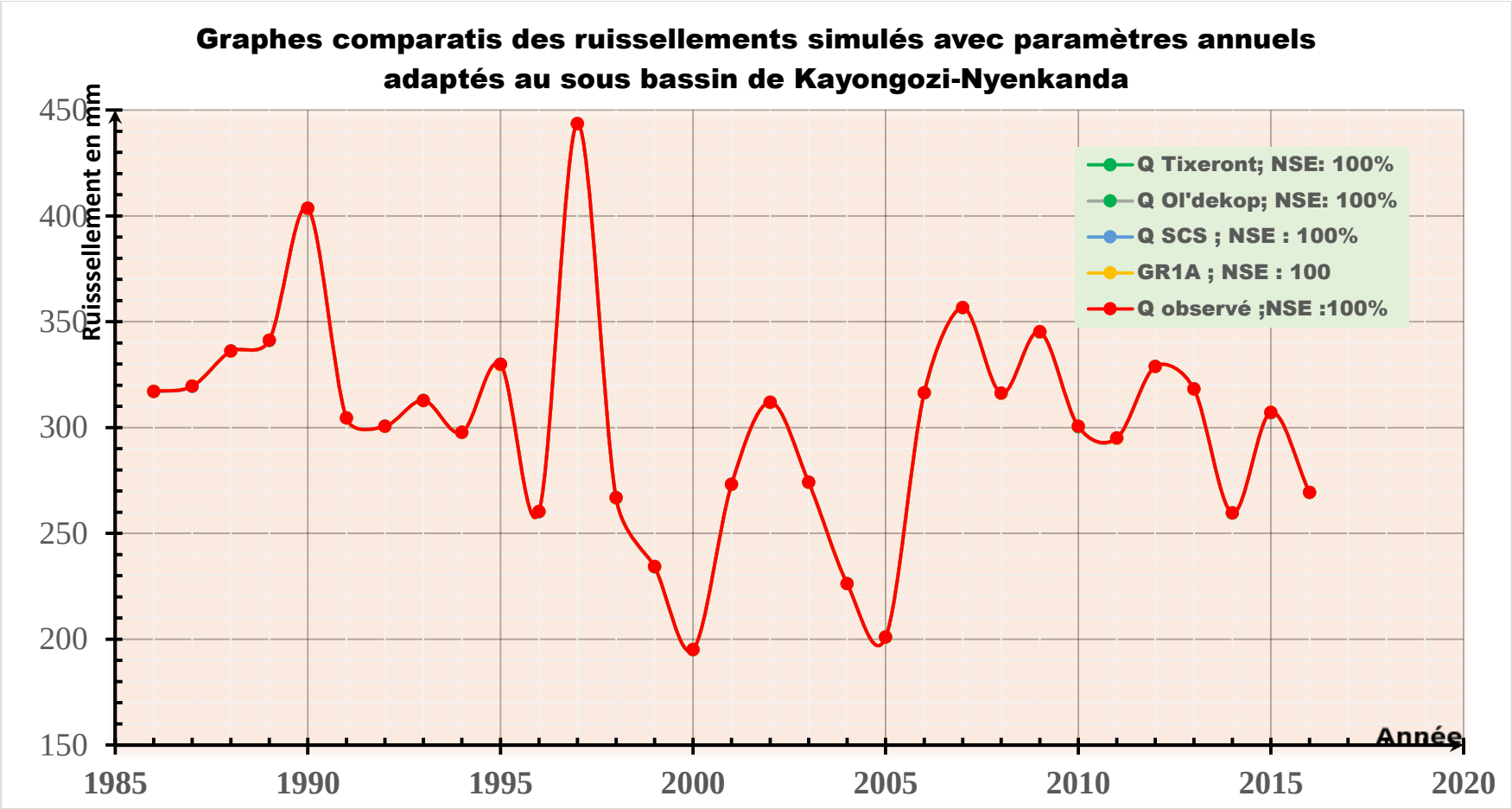


Figure II-3 : Courbes des ruissellements observés et simulés avec les modèles adaptés au sous bassin

Avec les modèles adaptés, les courbes sont confondues car la précision est optimale et l'écart se situe entre -0.32mm et 0.00mm pour le modèle de Tixeront respectivement pour les années 1989 et 1995 et le NSE est à peu près égal à 100% **(Voir Tableau II-8).**

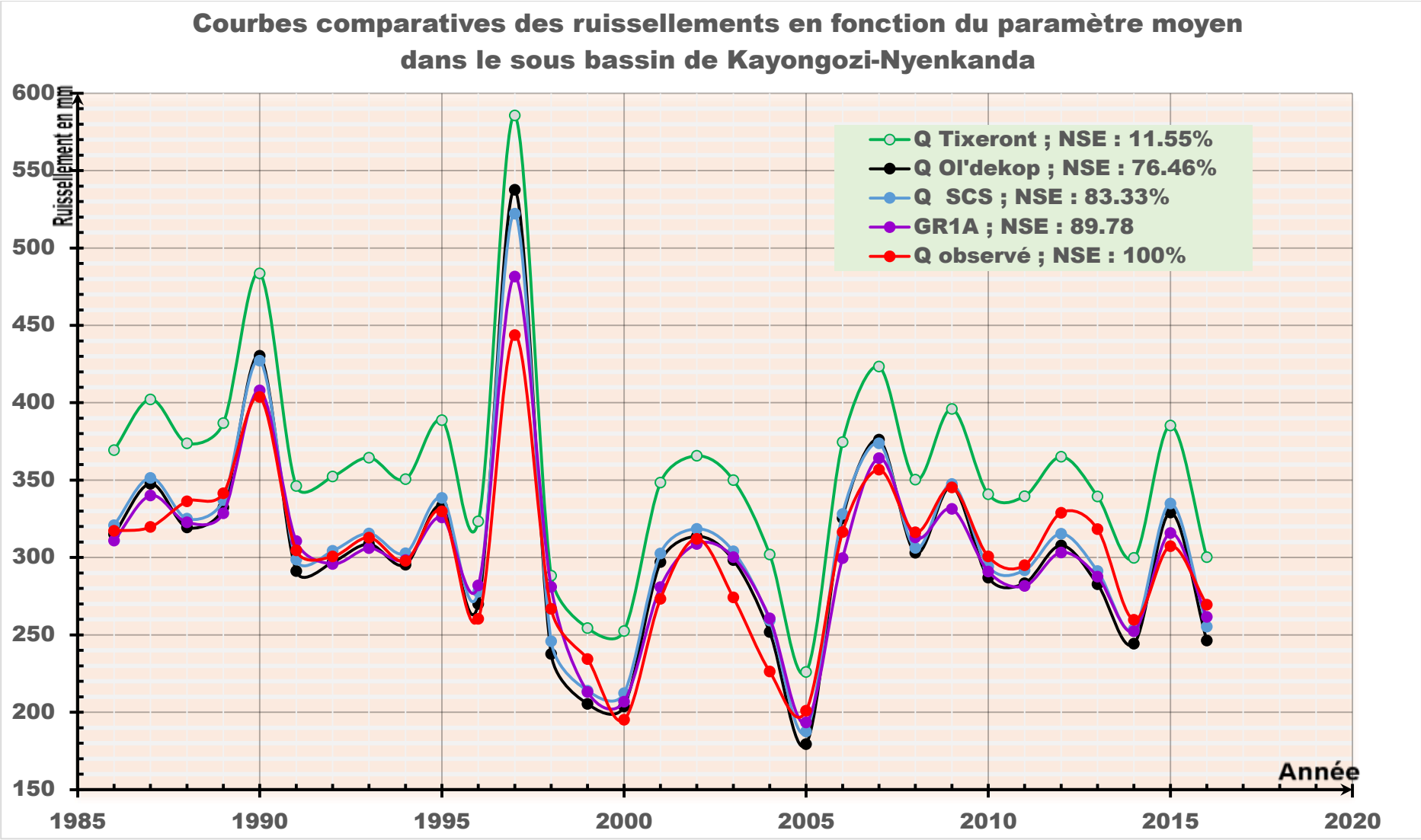


Figure II-4 : Courbes des ruissellements observés et simulés avec les modèles à paramètre moyen du sous bassin de la Kayongozi-Nyenkanda

B. Analyse des résultats

La contrainte pour ces modèles adaptés est qu'ils sont construits à base des paramètres variables avec le débit ruisselé ce qui conduit à plusieurs valeurs du paramètre considéré (Tableau II-8)
Pour contourner cette contrainte, nous avons pris la valeur moyenne des paramètres adaptés au bassin. Cette approche a pour avantage l'utilisation d'une valeur unique du paramètre pour le sous bassin considéré et pour inconvénient que la précision décroit par rapport à l'utilisation des paramètres adaptés.
Ce tableau représente pour sa 1ère partie les valeurs des paramètres adaptés quant à sa 2ème partie, il s'agit de la valeur moyenne des paramètres pour la station de la Kayongozi.

Tableau II-9: Valeurs des paramètres adaptés et moyens en fonction du modèle dans le sous bassin de la Kayongozi-Nyenkanda

Kayongozi	**Paramètres adaptés au sous bassin**				**Paramètre moyen**			
Modèle	**Tixeront**	**Ol'dekop**	**SCS**	**GR1A**	**Tixeront**	**Ol'dekop**	**SCS**	**GR1A**
Années	b_{adap}	b_{adap}	b_{adap}	X_{adap}	b_{moy}	b_{moy}	b_{moy}	X_{moy}
1986	-3.48	1.43	2.42	1.66				
1987	-3.69	1.53	2.60	1.77				
1988	-3.41	1.38	2.33	1.63				
1989	-3.47	1.41	2.37	1.63				
1990	-3.79	1.51	2.53	1.70				
1991	-3.37	1.39	2.36	1.71				
1992	-3.43	1.42	2.42	1.66				
1993	-3.44	1.42	2.42	1.65				
1994	-3.44	1.43	2.43	1.68				
1995	-3.53	1.45	2.45	1.67				
1996	-3.48	1.47	2.52	1.79				
1997	-4.23	1.69	2.82	1.81				
1998	-3.19	1.32	2.25	1.75				
1999	-3.11	1.31	2.24	1.57				
2000	-3.38	1.48	2.54	1.75				
2001	-3.63	1.53	2.61	1.72				
2002	-3.52	1.44	2.44	1.67	-3.48	1.44	2.40	1.68

Kayongozi	**Paramètres adaptés au sous bassin**				**Paramètre moyen**			
Modèle	**Tixeront**	**Ol'dekop**	**SCS**	**GR1A**	**Tixeront**	**Ol'dekop**	**SCS**	**GR1A**
Années	b_{adap}	b_{adap}	b_{adap}	X_{adap}	b_{moy}	b_{moy}	b_{moy}	X_{moy}
2003	-3.63	1.53	2.61	1.80				
2004	-3.59	1.55	2.66	1.87				
2005	-3.10	1.33	2.29	1.63				
2006	-3.61	1.47	2.48	1.61				
2007	-3.76	1.50	2.51	1.71				
2008	-3.47	1.39	2.33	1.67				
2009	-3.59	1.44	2.41	1.62				
2010	-3.37	1.39	2.36	1.64				
2011	-3.35	1.40	2.38	1.62				
2012	-3.34	1.37	2.32	1.58				
2013	-3.22	1.32	2.23	1.55				
2014	-3.25	1.38	2.36	1.65				
2015	-3.61	1.51	2.58	1.72				
2016	-3.22	1.35	2.30	1.64				

Tableau II-10 : Valeurs de NSE suivant le modèle à paramètre adapté et moyen pour le sous bassin de la Kayongozi-Nyenkanda

Modèle adapté au bassin				Modèle avec paramètre moyen			
Tixeront	Ol'dekop	SCS	GR1A	Tixeront	Ol'dekop	**SCS**	**GR1A**
100.0	100.00	100.0	100.00	11.6	76.46	**83.33**	**89.78**

Les quatre colonnes premières montrent que l'adaptation du modèle conduit à une simulation optimale tandis que si nous optons pour l'utilisation des paramètres moyens aboutit à une réduction de la précision car la valeur de NSE a sensiblement diminué pour le modèle de Tixeront, toutefois pour les autres modèles la valeur est dans la plage acceptable c'est-à-dire supérieure à 70%.

Pour la suite de notre étude, nous avons pris les deux meilleurs modèles à paramètres moyens du sous bassin, qui ont une valeur de NSE plus élevé, à savoir le modèle SCS développé aux Etats Unis et le modèle GR1A développé en France qui sont comparés aux modèles mixtes et purement à base des caractéristiques physiques.

II.4 Modèles à paramètres météo-physique et physiques du bassin

II.4.1 Introduction

Le critère de richesse d'un modèle stipule que le modèle doit pouvoir intégrer un grand nombre de caractéristiques permettant de différencier le comportement d'un bassin à un autre ; c'est pour cette raison que dans la suite, les éléments de base des modèles sont changés pour mettre au point des modèles adaptables aux bassins peu ou pas jaugés. Ainsi, au lieu de considérer les seules variables météorologiques, on a fait un modèle mixte qui marie la précipitation et la superficie et un modèle basé sur les caractéristiques physiques du bassin. Les caractéristiques physiques du bassin considérés sont la densité de drainage et la longueur du rectangle équivalent car elles sont les plus corrélatives aux débits des sous bassins considérés.

II.4.2 Développement des modèles

Dans certaines zones des bassins versants, les données météorologiques sont parfois indisponibles. Ce qui fait que les modèles à base hydrologiques ne sont pas le meilleur moyen de simulation des ruissellements atteignant les rivières dans ces zones. Pour intégrer le critère de la richesse du modèle et diversifier les paramètres du modèle ; la présente partie est consacrée aux modèles à base des caractéristiques mixtes et physique du bassin. Les principales caractéristiques physiques de notre zone d'étude sont rassemblées dans le tableau II-11.

Tableau II-11 : Caractéristiques physiques de la zone d'étude

Station	A	K_G	L	l	i_m	D_d	K_f
Kayongozi-Nyenkanda	677.29	1.71	69.85	9.70	0.24	0.68	14.81
Nyabaha-Mubuga	938.85	2.10	106.13	8.85	0.15	0.70	4.40
Ruvubu-Gitega	4171.27	1.94	203.64	20.48	0.19	0.71	13.37
Ruvyironza-Kibaya	1976.82	1.89	135.32	14.61	0.17	0.74	9.55
Ruvubu-Muyinga	9332.61	1.97	310.18	30.09	0.32	0.75	12.74

Avec A= Superficie du sous bassin (km^2)

K_G = Indice de compacité de Gravélius

L= Longueur du rectangle équivalent (km)

l = Largeur du rectangle équivalent (km)

i_m= Pente moyenne du bassin (m/m)

D_d= Densité de drainage du réseau (km/km^2)

K_f= Indice de couverture forestière (%)

Puisque les caractéristiques physiques du bassin sont nombreuses, le choix de celles qui vont faire partie du modèle a tenu compte des caractéristiques avec un coefficient de corrélation le plus élevé. Il a été retenu alors ; la superficie (A), la longueur du rectangle équivalent (L) et l'indice de drainage (D_d). Pour mettre en lumière l'influence du type de paramètre, premièrement nous avons remplacé l'évapotranspiration par la superficie du bassin et deuxièmement nous avons remplacé tous les termes météorologiques par les caractéristiques physiques.

Il a été établi deux modèles :

- La simulation mixte qui intègre les caractéristiques hydrologiques (précipitations) et les caractéristiques physiques (superficie).

$$\mathbf{Q = \alpha \beta P_m A} \qquad \textbf{II-7}$$

Q= débit en m^3/s

α,β= paramètres du modèle hydrologique

P_m= précipitation moyenne annuelle (mm)

A= superficie du bassin (km^2)

- La simulation basée sur les caractéristiques physiques seulement : la longueur du rectangle équivalent et l'indice de drainage.

$$\mathbf{Q = \alpha L D_d} \qquad \textbf{II-8}$$

Q = Débit (m^3/s)

α = Paramètre du modèle hydrologique

L = Longueur du rectangle équivalent (km)

D_d = Densité de drainage (km /km^2)

La procédure est similaire à celle utilisée pour les modèles à base météorologiques :

- Minimiser l'écart entre le débit mesuré et le débit simulé à travers un programme de calcul Excel et déterminer la valeur du NSE correspondant ;
- Déterminer le paramètre global du bassin et calculer le NSE.

Après l'analyse de la couverture du bassin de la Ruvubu en terme de station météorologique, nous avons constaté que les stations pluviométriques représentent 62.5% de la couverture (50 stations sur un total de 80 stations **(IGEBU, 2010)**) ce qui montre que les données pluviométriques sont très abondantes. Nous avons établi une fonction paramètre-précipitation qui fournit des valeurs des paramètres dynamiques et assurant aussi une bonne représentation du bassin. L'objectif de cette fonction est d'éviter le fait que la variation des données induit une nouvelle modélisation car pour les modèles empiriques éxistants les valeurs des paramètres sont fixées dans le calage.

Les paramètres globaux ont été déterminés de deux façons :

- ☑ Calcul de la moyenne des valeurs des paramètres ;
- ☑ Etablir une fonction paramètre-pluie spécifiques du sous bassin par régression linéaire.

La simulation à base des caractéristiques mixtes fournit des résultats acceptables avec l'adaptation au bassin. Toutefois lorsqu'on utilise un paramètre moyen la précision diminue considérablement jusqu'à une valeur de Nash Sutcliffe négatif.

Pour avoir un facteur d'adaptions qui permet d'avoir une meilleure adaptation avec n'importe quelle variation des données, nous avons choisi de rendre dynamique ces facteurs sous forme d'équation qui est fonction de la précipitation (Tableau II-12).

Pour les deux modèles (à base mixte et à base physique), la transformation sous forme d'équation des paramètres adaptés est résumé dans les tableaux II-12 et II-13

Tableau II-12 : Formule de calcul des coefficients dynamiques des modèles adaptés au bassin de la Ruvubu pour le modèle mixte

Type de modèle	**$a.b.H_m.A$**		
Paramètres	α	β	NSH
Kayongozi	**$a= 8.4828*10^{-7}*P+0.00254$**	**$b=8.4828*10^{-7}*P+0.00154$**	**80.1**
Nyabaha	**$a=1.4343*10^{-6}*P+0.00237$**	**$b=1.4343*10^{-6}*P+0.00137$**	**82.3**
Ruvubu-Gitega	**$a= 9.5302*10^{-7}*P+0.00277$**	**$b=9.5302*10^{-7}*P+0.00177$**	**86.4**
Ruvyironza	**$a=8.3809*10^{-7}*P+0.00250$**	**$b=8.3809*10^{-7}*P+0.00150$**	**81.6**
Modélisation pour le bassin de la Ruvubu			
Ruvubu-Muyinga	**$a=8.2803*10^{-8}*P+0.00108$**	**$b=5.7962* 10^{-7}*P+0.00751$**	**74.0**

Tableau II-13 : Formule de calcul des coefficients dynamiques des modèles adaptés au bassin de la Ruvubu pour le modèle à base physique

Type de modèle	**$\alpha.L.D_d$**	
Paramètres	α	NSH
Kayongozi	**$a= 2.036*10^{-4}*P-0.0930$**	**86.0**
Nyabaha	**$a=2.792*10^{-4}*P-0.1472$**	**86.4**
Ruvubu-Gitega	**$a= 6.187*10^{-4}*P-0.3531$**	**85.5**
Ruvyironza	**$a= 3.0201*10^{-4}*P-0.1529$**	**82.4**
Modélisation pour le bassin de la Ruvubu		
Ruvubu-Muyinga	**$a=6.6.263*10^{-4}*P-0.3377$**	**74.9**

II.4.3 Analyse des résultats du modèle à base mixte

Les tableau II-14 à II-18 ainsi que les figures II-5 à II-9, mettent en relief les conséquences de l'utilisation de l'un ou l'autre forme de paramètre sur les résultats de la simulation du modèle mixte. Pour chaque démarche utilisée, ces tableaux montrent les valeurs des paramètres et les débits trouvés et à la fin de la colonne des débits est mis le NSE pour montrer la qualité de la précision obtenue.

Tableau II-14 : Débits simulés à base des caractéristiques physiques dans la Kayongozi-Nyenkanda

Kayongozi		**Modèle avec α adapté au bassin**		**Modèle avec α moyen**		**Modèle avec α dynamique**		
Année	**Q_{ob}(m^3/s)**	**α**	**Q_{ca} (m^3/s)**	**α**	**Q_{ca} (m^3/s))**	**α**	**Q_{ca} (m^3/s)**	**Q_{ca} (mm)**
1986	**6.80**	0.143	**6.77**	0.13635	**6.45**	0.10	**6.76**	**314.65**
1987	**6.85**	0.144	**6.81**	0.13635	**6.45**	0.14	**7.24**	**337.12**
1988	**7.21**	0.152	**7.19**	0.13635	**6.45**	0.54	**6.82**	**317.77**
1989	**7.32**	0.154	**7.29**	0.13635	**6.45**	0.71	**7.01**	**326.56**
1990	**8.65**	0.182	**8.61**	0.13635	**6.45**	4.74	**8.38**	**390.21**
1991	**6.53**	0.138	**6.53**	0.13635	**6.45**	0.00	**6.52**	**303.42**
1992	**6.44**	0.136	**6.44**	0.13635	**6.45**	0.00	**6.64**	**309.32**
1993	**6.71**	0.141	**6.67**	0.13635	**6.45**	0.05	**6.87**	**319.87**
1994	**6.38**	0.134	**6.34**	0.13635	**6.45**	0.01	**6.60**	**307.39**
1995	**7.07**	0.149	**7.05**	0.13635	**6.45**	0.35	**7.15**	**332.72**
1996	**5.58**	0.117	**5.54**	0.13635	**6.45**	0.80	**6.05**	**281.71**
1997	**9.51**	0.2	**9.47**	0.13635	**6.45**	9.22	**9.58**	**446.04**
1998	**5.72**	0.12	**5.68**	0.13635	**6.45**	0.57	**5.30**	**246.81**
1999	**5.02**	0.106	**5.02**	0.13635	**6.45**	2.11	**4.76**	**221.63**
2000	**4.18**	0.088	**4.16**	0.13635	**6.45**	5.25	**4.71**	**219.10**
2001	**5.86**	0.123	**5.82**	0.13635	**6.45**	0.38	**6.13**	**285.54**
2002	**6.69**	0.141	**6.67**	0.13635	**6.45**	0.04	**6.45**	**300.45**
2003	**5.88**	0.124	**5.87**	0.13635	**6.45**	0.36	**6.20**	**288.52**

Kayongozi		**Modèle avec α adapté au bassin**		**Modèle avec α moyen**		**Modèle avec α dynamique**		
Année	**Q_{ob}(m^3/s)**	**α**	**Q_{ca} (m^3/s)**	**α**	**Q_{ca} (m^3/s))**	**α**	**Q_{ca} (m^3/s)**	**Q_{ca} (mm)**
2004	**4.85**	0.102	**4.83**	0.13635	**6.45**	2.64	**5.40**	**251.65**
2005	**4.31**	0.091	**4.31**	0.13635	**6.45**	4.69	**4.20**	**195.57**
2006	**6.78**	0.143	**6.77**	0.13635	**6.45**	0.09	**6.27**	**292.12**
2007	**7.65**	0.161	**7.62**	0.13635	**6.45**	1.37	**6.84**	**318.25**
2008	**6.78**	0.143	**6.77**	0.13635	**6.45**	0.09	**5.71**	**266.09**
2009	**7.40**	0.156	**7.38**	0.13635	**6.45**	0.86	**6.70**	**312.01**
2010	**6.44**	0.136	**6.44**	0.13635	**6.45**	0.00	**6.33**	**294.92**
2011	**6.33**	0.133	**6.29**	0.13635	**6.45**	0.02	**6.60**	**307.35**
2012	**7.05**	0.148	**7.00**	0.13635	**6.45**	0.33	**7.04**	**327.94**
2013	**6.82**	0.144	**6.81**	0.13635	**6.45**	0.12	**6.66**	**310.09**
2014	**5.57**	0.117	**5.54**	0.13635	**6.45**	0.83	**6.06**	**282.39**
2015	**6.59**	0.139	**6.58**	0.13635	**6.45**	0.01	**7.20**	**335.04**
2016	**5.78**	0.122	**5.77**	0.13635	**6.45**	0.49	**5.84**	**272.10**
Critère de calage			99.94		-0.05		86.02	

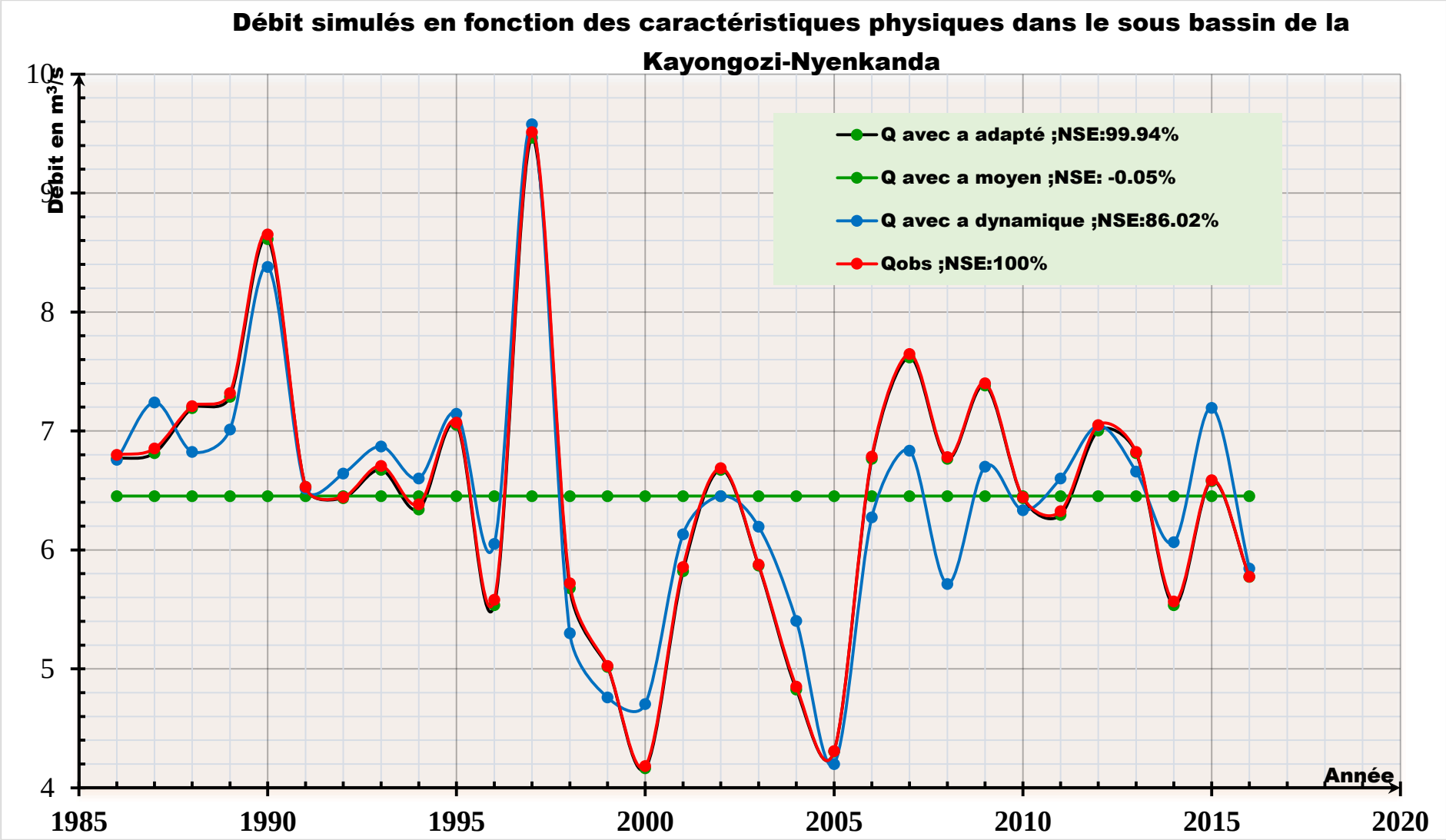


Figure II-5 : Débits simulés à base des caractéristiques physiques dans la Kayongozi-Nyenkanda

Tableau II-15: Débits simulés à base des caractéristiques physiques dans la la Nyabaha-Mubuga

Nyabaha-Mubuga		**Modèle avec α adapté au bassin**		**Modèle avec α moyen**		**Modèle avec α dynamique**		
Année	**Q_{ob}(m^3/s)**	**α**	**Q_{ca} (m^3/s)**	**α**	**Q_{ca} (m^3/s))**	**α**	**Q_{ca} (m^3/s)**	**Q_{ca} (mm)**
1986	**13.58**	0.183	**13.55**	0.16	**11.84**	0.17	**12.26**	**411.85**
1987	**12.33**	0.166	**12.30**	0.16	**11.84**	0.16	**11.87**	**398.62**
1988	**12.59**	0.169	**12.52**	0.16	**11.84**	0.17	**12.42**	**417.10**
1989	**13.23**	0.178	**13.18**	0.16	**11.84**	0.17	**12.86**	**431.89**
1990	**13.02**	0.175	**12.96**	0.16	**11.84**	0.17	**12.73**	**427.74**
1991	**12.49**	0.168	**12.44**	0.16	**11.84**	0.18	**13.10**	**439.93**
1992	**12.72**	0.171	**12.67**	0.16	**11.84**	0.17	**12.59**	**422.91**
1993	**14.24**	0.192	**14.22**	0.16	**11.84**	0.19	**13.72**	**460.99**
1994	**13.74**	0.185	**13.70**	0.16	**11.84**	0.18	**13.22**	**444.18**
1995	**15.33**	0.206	**15.26**	0.16	**11.84**	0.20	**14.75**	**495.57**
1996	**10.72**	0.144	**10.67**	0.16	**11.84**	0.14	**10.37**	**348.47**
1997	**20.57**	0.277	**20.52**	0.16	**11.84**	0.28	**20.71**	**695.57**
1998	**14.49**	0.195	**14.44**	0.16	**11.84**	0.17	**12.37**	**415.46**
1999	**9.13**	0.123	**9.11**	0.16	**11.84**	0.14	**10.36**	**348.08**
2000	**11.51**	0.155	**11.48**	0.16	**11.84**	0.15	**11.15**	**374.67**
2001	**12.87**	0.173	**12.81**	0.16	**11.84**	0.16	**11.98**	**402.37**
2002	**10.42**	0.14	**10.37**	0.16	**11.84**	0.15	**11.33**	**380.43**
2003	**9.77**	0.131	**9.70**	0.16	**11.84**	0.14	**10.59**	**355.61**
2004	**9.34**	0.126	**9.33**	0.16	**11.84**	0.14	**10.26**	**344.62**
2005	**5.68**	0.076	**5.63**	0.16	**11.84**	0.06	**4.75**	**159.43**
2006	**8.98**	0.121	**8.96**	0.16	**11.84**	0.15	**11.20**	**376.14**
2007	**10.67**	0.144	**10.67**	0.16	**11.84**	0.14	**10.35**	**347.63**
2008	**8.82**	0.119	**8.81**	0.16	**11.84**	0.12	**9.00**	**302.26**
2009	**10.97**	0.148	**10.96**	0.16	**11.84**	0.16	**11.86**	**398.22**
2010	**9.22**	0.124	**9.18**	0.16	**11.84**	0.15	**11.42**	**383.72**
2011	**12.83**	0.173	**12.81**	0.16	**11.84**	0.17	**12.69**	**426.39**
2012	**11.51**	0.155	**11.48**	0.16	**11.84**	0.16	**11.57**	**388.59**

Nyabaha-Mubuga		**Modèle avec α adapté au bassin**		**Modèle avec α moyen**		**Modèle avec α dynamique**		
Année	**Q_{ob}(m^3/s)**	**α**	**Q_{ca} (m^3/s)**	**α**	**Q_{ca} (m^3/s))**	**α**	**Q_{ca} (m^3/s)**	**Q_{ca} (mm)**
2013	**12.64**	0.17	**12.59**	0.16	**11.84**	0.16	**11.53**	**387.20**
2014	**11.34**	0.153	**11.33**	0.16	**11.84**	0.14	**10.71**	**359.91**
2015	**12.20**	0.164	**12.15**	0.16	**11.84**	0.18	**13.00**	**436.81**
2016	**11.11**	0.15	**11.11**	0.16	**11.84**	0.14	**10.20**	**342.79**
Critère de calage			99.97		-0.02		86.38	

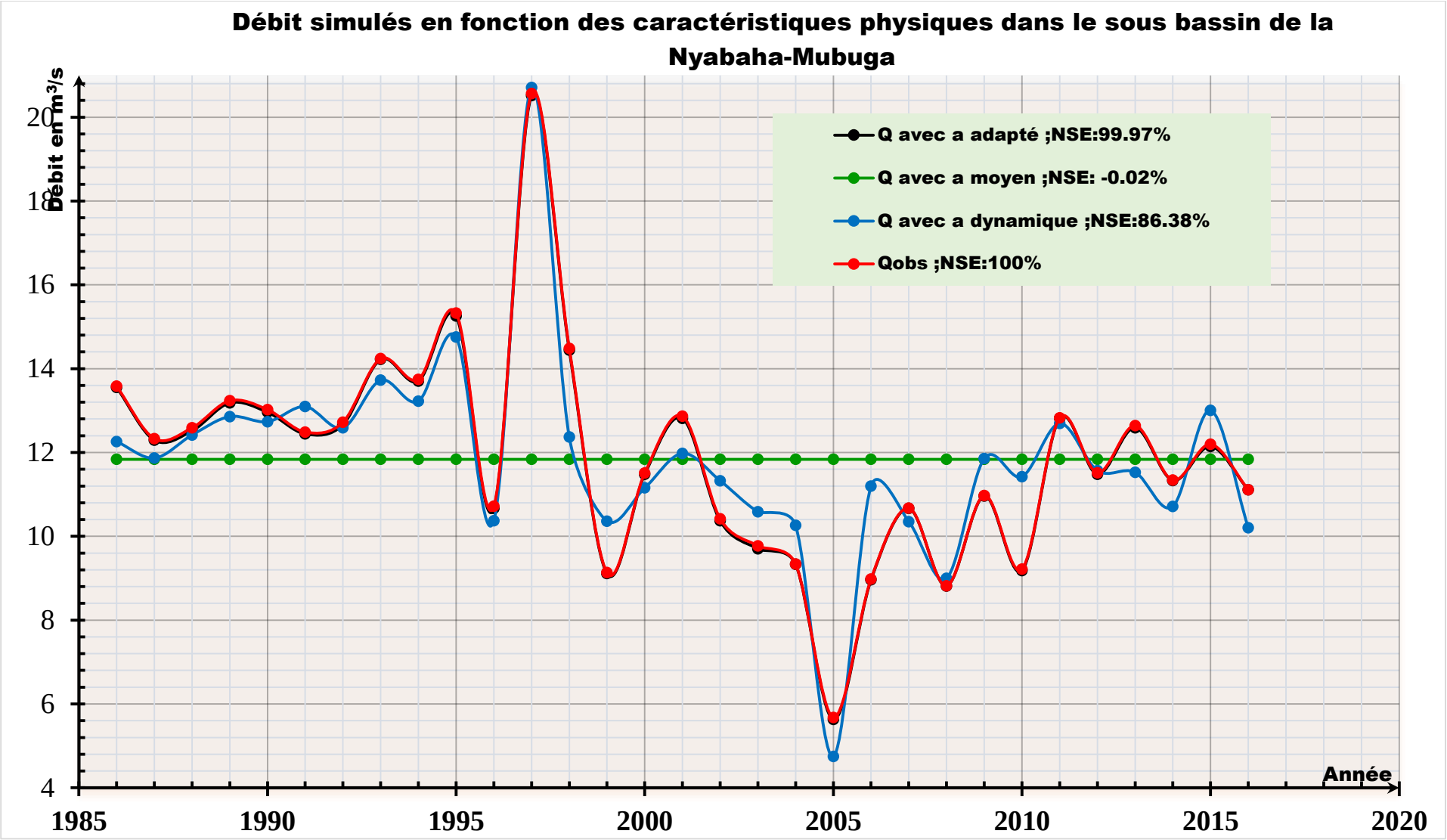


Figure II-6 : Débits simulés à base des caractéristiques physiques dans la Nyabaha-Mubuga

Tableau II-16 : Débits simulés à base des caractéristiques physiques dans la Ruvubu-Muyinga

Ruvubu-Gitega		**Modèle avec α adapté au bassin**		**Modèle avec α moyen**		**Modèle avec α dynamique**		
Année	**Q_{ob}(m^3/s)**	**α**	**Q_{ca} (m^3/s)**	**α**	**Q_{ca} (m^3/s))**	**α**	**Q_{ca} (m^3/s)**	**Q_{ca} (mm)**
1986	81**.14**	0.56	**81.15**	0.49	**71.22**	0.53	**76.71**	**579.95**
1987	**70.98**	0.49	**71.00**	0.49	**71.22**	0.50	**72.06**	**544.83**
1988	**81.31**	0.56	**81.44**	0.49	**71.22**	0.55	**79.62**	**601.96**
1989	**88.38**	0.61	**88.39**	0.49	**71.22**	0.56	**81.40**	**615.38**
1990	**58.76**	0.41	**58.83**	0.49	**71.22**	0.44	**63.53**	**480.33**
1991	**65.44**	0.45	**65.50**	0.49	**71.22**	0.47	**67.51**	**510.38**
1992	**62.43**	0.43	**62.45**	0.49	**71.22**	0.48	**70.25**	**531.09**
1993	**52.93**	0.37	**53.04**	0.49	**71.22**	0.35	**50.16**	**379.21**
1994	**69.60**	0.48	**69.70**	0.49	**71.22**	0.48	**69.82**	**527.87**
1995	**62.83**	0.43	**62.89**	0.49	**71.22**	0.44	**63.26**	**478.29**
1996	**58.87**	0.41	**58.98**	0.49	**71.22**	0.40	**57.35**	**433.55**
1997	**97.51**	0.67	**97.52**	0.49	**71.22**	0.62	**89.79**	**678.81**
1998	**74.70**	0.52	**74.77**	0.49	**71.22**	0.49	**71.28**	**538.89**
1999	**69.35**	0.48	**69.41**	0.49	**71.22**	0.51	**73.26**	**553.87**
2000	**56.88**	0.39	**56.95**	0.49	**71.22**	0.41	**59.22**	**447.71**
2001	**69.47**	0.48	**69.56**	0.49	**71.22**	0.53	**76.77**	**580.37**
2002	**79.95**	0.55	**79.99**	0.49	**71.22**	0.57	**82.41**	**623.04**
2003	**63.75**	0.44	**63.76**	0.49	**71.22**	0.43	**62.39**	**471.69**
2004	**59.87**	0.41	**59.99**	0.49	**71.22**	0.45	**65.62**	**496.07**
2005	**51.62**	0.36	**51.73**	0.49	**71.22**	0.34	**48.62**	**367.58**
2006	**84.26**	0.58	**84.34**	0.49	**71.22**	0.58	**83.36**	**630.19**
2007	**71.74**	0.50	**71.87**	0.49	**71.22**	0.44	**63.73**	**481.81**
2008	**63.45**	0.44	**63.47**	0.49	**71.22**	0.46	**65.94**	**498.51**
2009	**70.42**	0.49	**70.42**	0.49	**71.22**	0.51	**74.46**	**562.92**
2010	**68.05**	0.47	**68.11**	0.49	**71.22**	0.47	**68.01**	**514.16**
2011	**81.06**	0.56	**81.15**	0.49	**71.22**	0.58	**84.36**	**637.76**
2012	**80.03**	0.55	**80.13**	0.49	**71.22**	0.55	**79.21**	**598.87**

Ruvubu-Gitega		**Modèle avec α adapté au bassin**		**Modèle avec α moyen**		**Modèle avec α dynamique**		
Année	**Q_{ob}(m^3/s)**	**α**	**Q_{ca} (m^3/s)**	**α**	**Q_{ca} (m^3/s))**	**α**	**Q_{ca} (m^3/s)**	**Q_{ca} (mm)**
2013	**76.20**	0.53	**76.22**	0.49	**71.22**	0.51	**73.72**	**557.38**
2014	**76.47**	0.53	**76.51**	0.49	**71.22**	0.51	**73.55**	**556.04**
2015	**82.74**	0.57	**82.89**	0.49	**71.22**	0.59	**85.07**	**643.13**
2016	**75.77**	0.52	**75.79**	0.49	**71.22**	0.49	**71.08**	**537.42**
Critère de calage			99.99		0.00		85.52	

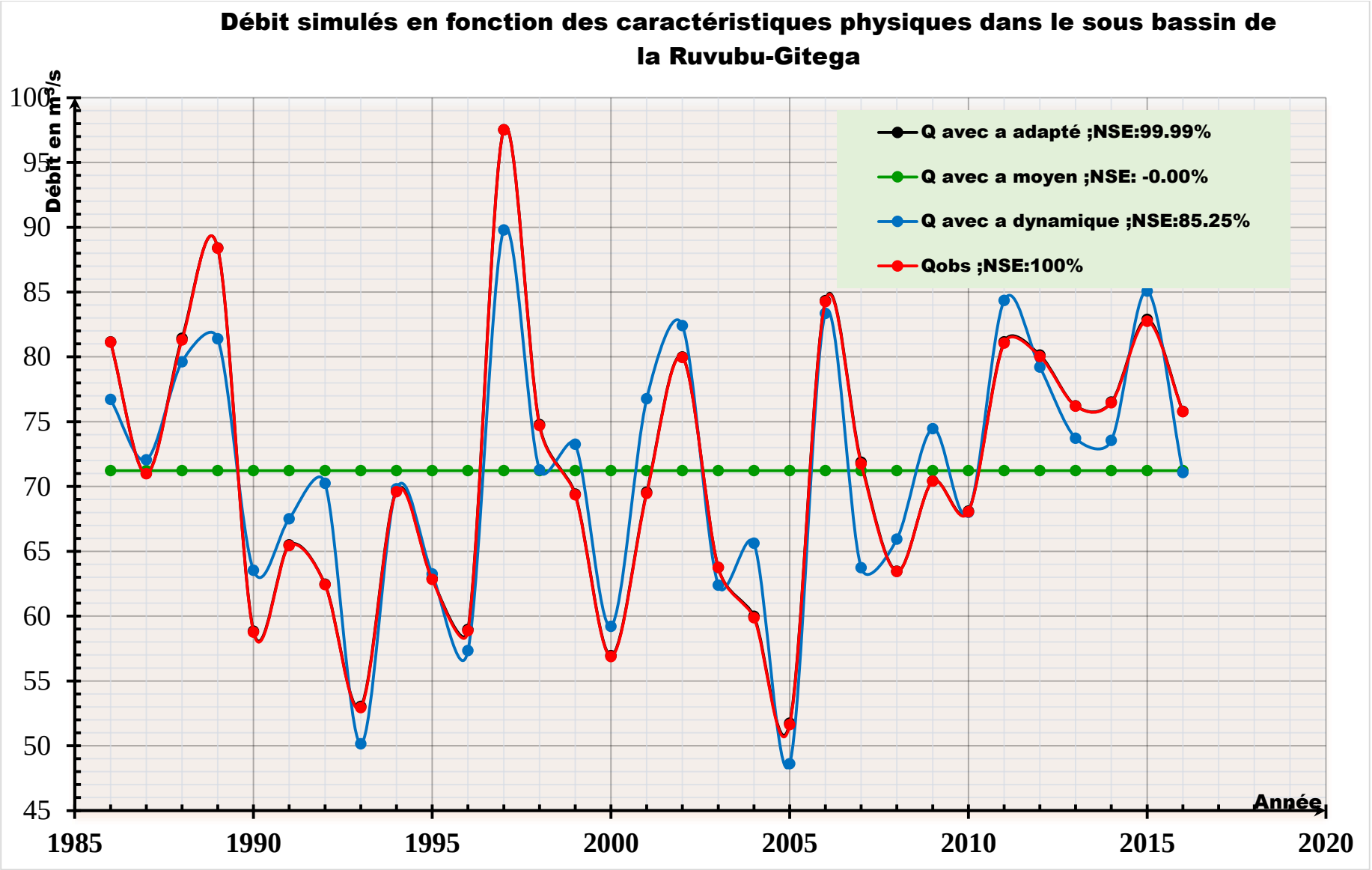


Figure II-7 : Débits simulés à base des caractéristiques physiques dans la Ruvubu-Gitega

Tableau II-17 : Débits simulés à base des caractéristiques physiques dans la Ruvyironza-Kibaya

Ruvyironza-Kibaya		**Modèle avec α adapté au bassin**		**Modèle avec α moyen**		**Modèle avec α dynamique**		
Année	**Q_{ob}(m^3/s)**	**α**	**Q_{ca} (m^3/s)**	**α**	**Q_{ca} (m^3/s)**	**α**	**Q_{ca} (m^3/s)**	**Q_{ca} (mm)**
1986	**22.66**	0.23	**22.58**	0.23	**23.01**	0.23	**22.62**	**360.90**
1987	**19.53**	0.20	**19.50**	0.23	**23.01**	0.19	**18.56**	**296.10**
1988	**25.08**	0.25	**25.07**	0.23	**23.01**	0.24	**23.43**	**373.86**
1989	**29.25**	0.29	**29.25**	0.23	**23.01**	0.26	**25.72**	**410.36**
1990	**22.67**	0.23	**22.58**	0.23	**23.01**	0.21	**20.69**	**330.05**
1991	**22.55**	0.23	**22.48**	0.23	**23.01**	0.23	**22.42**	**357.62**
1992	**20.07**	0.20	**20.00**	0.23	**23.01**	0.20	**19.77**	**315.31**
1993	**18.85**	0.19	**18.80**	0.23	**23.01**	0.18	**18.38**	**293.23**
1994	**18.74**	0.19	**18.70**	0.23	**23.01**	0.22	**22.13**	**353.04**
1995	**21.84**	0.22	**21.79**	0.23	**23.01**	0.23	**23.02**	**367.17**
1996	**24.31**	0.24	**24.27**	0.23	**23.01**	0.27	**26.49**	**422.60**
1997	**32.97**	0.33	**32.93**	0.23	**23.01**	0.32	**32.32**	**515.55**
1998	**26.49**	0.27	**26.46**	0.23	**23.01**	0.24	**23.79**	**379.59**
1999	**24.06**	0.24	**23.97**	0.23	**23.01**	0.23	**22.59**	**360.42**
2000	**19.35**	0.19	**19.30**	0.23	**23.01**	0.21	**21.32**	**340.15**
2001	**25.40**	0.26	**25.37**	0.23	**23.01**	0.25	**24.87**	**396.82**
2002	**22.65**	0.23	**22.58**	0.23	**23.01**	0.23	**23.26**	**371.00**
2003	**18.16**	0.18	**18.11**	0.23	**23.01**	0.20	**19.57**	**312.23**
2004	**16.74**	0.17	**16.71**	0.23	**23.01**	0.20	**19.54**	**311.69**
2005	**12.89**	0.13	**12.83**	0.23	**23.01**	0.13	**12.89**	**205.56**
2006	**26.15**	0.26	**26.06**	0.23	**23.01**	0.28	**27.75**	**442.67**
2007	**22.21**	0.22	**22.18**	0.23	**23.01**	0.22	**22.24**	**354.85**
2008	**23.10**	0.23	**23.08**	0.23	**23.01**	0.21	**20.61**	**328.81**
2009	**22.14**	0.22	**22.08**	0.23	**23.01**	0.24	**23.87**	**380.85**
2010	**23.41**	0.24	**23.38**	0.23	**23.01**	0.23	**22.62**	**360.78**
2011	**25.53**	0.26	**25.47**	0.23	**23.01**	0.25	**24.57**	**391.95**
2012	**25.31**	0.25	**25.27**	0.23	**23.01**	0.26	**25.92**	**413.57**

Ruvyironza-Kibaya		**Modèle avec α adapté au bassin**		**Modèle avec α moyen**		**Modèle avec α dynamique**		
Année	**Q_{ob}(m^3/s)**	**α**	**Q_{ca} (m^3/s)**	**α**	**Q_{ca} (m^3/s)**	**α**	**Q_{ca} (m^3/s)**	**Q_{ca} (mm)**
2013	**27.21**	0.27	**27.16**	0.23	**23.01**	0.26	**25.85**	**412.31**
2014	**25.08**	0.25	**25.07**	0.23	**23.01**	0.26	**25.61**	**408.53**
2015	**26.63**	0.27	**26.56**	0.23	**23.01**	0.28	**27.97**	**446.27**
2016	**23.75**	0.24	**23.68**	0.23	**23.01**	0.23	**22.88**	**364.98**
Critère de calage			99.98		-0.02		82.43	

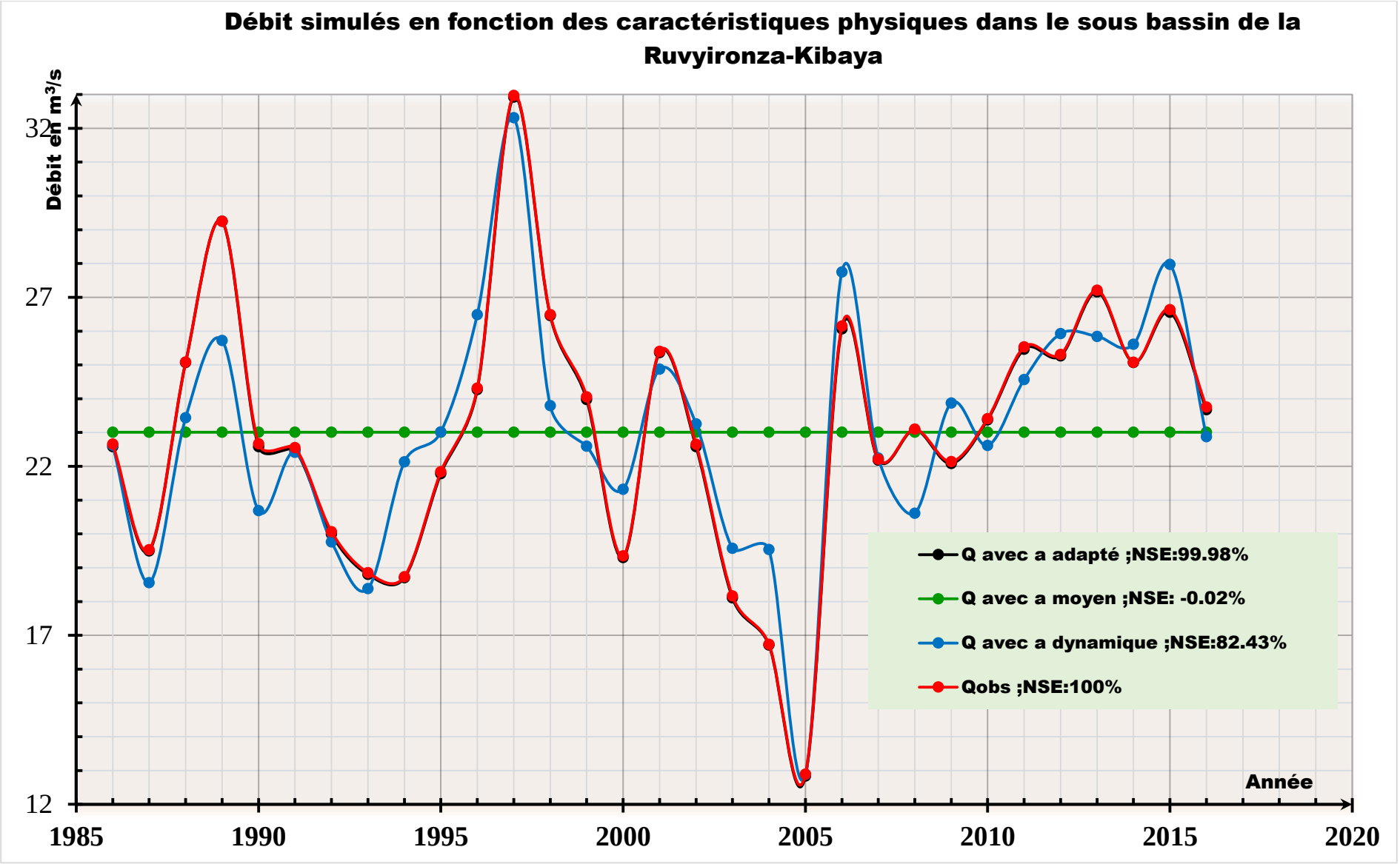


Figure II-8 : Débits simulés à base des caractéristiques physiques dans la Ruvyironza-Kibaya

Tableau II-18 : Débits simulés à base des caractéristiques physiques dans la Ruvubu-Muyinga

Ruvubu-Muyinga		**Modèle avec α adapté au bassin**		**Modèle avec α moyen**		**Modèle avec α fonction de P_m**		
Année	**Q_{ob}(m^3/s)**	**α**	**Q_{ca} (m^3/s)**	**α**	**Q_{ca} (m^3/s))**	**α**	**Q_{ca} (m^3/s)**	**Q_{ca} (mm)**
1986	**124.18**	0.532	**124.22**	0.50164	**117.1303**	0.5102	**119.13**	**402.56**
1987	**109.70**	0.47	**109.74**	0.50164	**117.1303**	0.4759	**111.13**	**375.52**
1988	**126.19**	0.541	**126.32**	0.50164	**117.1303**	0.5248	**122.54**	**414.08**
1989	**138.19**	0.592	**138.23**	0.50164	**117.1303**	0.5461	**127.52**	**430.90**
1990	**103.10**	0.442	**103.20**	0.50164	**117.1303**	0.474	**110.68**	**374.01**
1991	**107.01**	0.459	**107.17**	0.50164	**117.1303**	0.4731	**110.46**	**373.25**
1992	**101.66**	0.436	**101.80**	0.50164	**117.1303**	0.4796	**111.99**	**378.44**
1993	**92.73**	0.398	**92.93**	0.50164	**117.1303**	0.4007	**93.56**	**316.16**
2011	**125.75**	0.539	**125.85**	0.50164	**117.1303**	0.5563	**129.89**	**438.92**
2012	**123.91**	0.531	**123.98**	0.50164	**117.1303**	0.5356	**125.07**	**422.63**
2013	**122.88**	0.527	**123.05**	0.50164	**117.1303**	0.5127	**119.71**	**404.51**
2014	**118.45**	0.508	**118.61**	0.50164	**117.1303**	0.4971	**116.07**	**392.20**
2015	**128.16**	0.549	**128.19**	0.50164	**117.1303**	0.5798	**135.37**	**457.43**
2016	**116.41**	0.499	**116.51**	0.50164	**117.1303**	0.457	**106.70**	**360.56**
Critère de calage			99.99		-0.01		74.92	

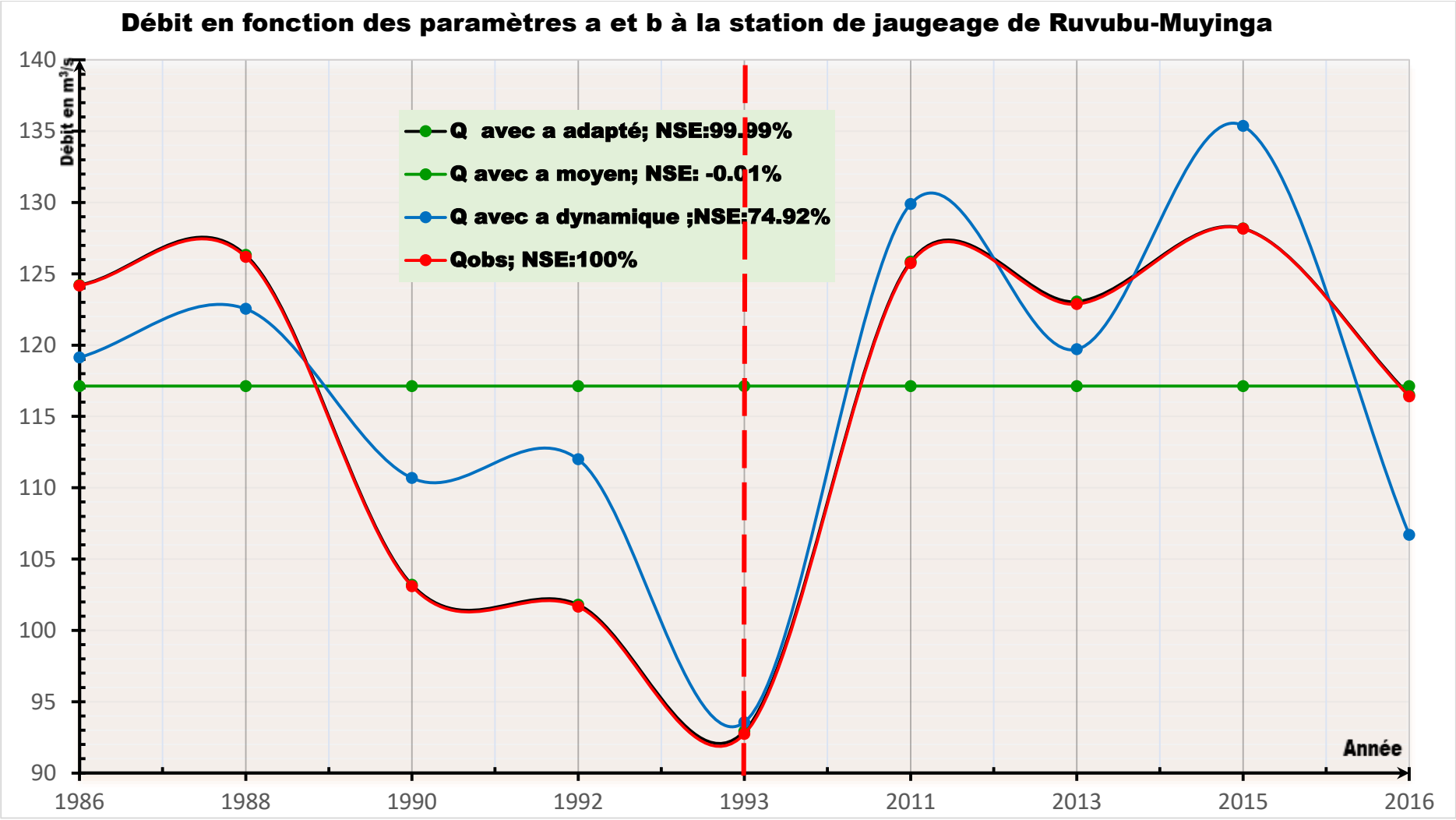


Figure II-9: Courbes comparatives des débits simulés en fonction du type de coefficient dans le bassin de la Ruvubu-Muyinga

Commentaire sur les résultats du modèle à base mixte

La simulation à base des caractéristiques mixtes fournit des résultats acceptables proche de la réalité avec le paramètre adapté au bassin et lorsqu'on utilise un paramètre moyen la précision diminue considérablement jusqu'à une valeur de Nash Sutcliffe qui tend vers 0%. Toute fois quand on utilise le paramètre dynamique la précision diminue mais reste acceptable car la valeur de NSE est toujours supérieure à 70%.

II.4.4 Analyse des résultats du modèle à base des caractéristiques physiques

Comme il a été fait pour le modèle à base mixte, la simulation des débits a été fait en trois étapes et à chaque fois nous avons analysé la précision.

Premièrement, nous avons fait un modèle avec les paramètres adaptés à chaque débit du sous bassin considéré ce qui nous a conduit à avoir les résultats des $3^{ème}$,$4^{ème}$ et $5^{ème}$ colonnes des tableau II-19 à II-23.

Deuxièmement, nous avons calculé les valeurs moyennes des paramètres adaptés et les avons appliqués à notre modèle à base physique. Les résultats sont consignés dans les $6^{ème}$,$7^{ème}$ et $8^{ème}$ colonnes des mêmes Tableaux II-19 à II-23

Troisièmement, pour terminer notre étude de l'effet du type de paramètre sur les résultats, nous avons modélisé avec les paramètres dynamiques. Les résultats sont dans les quatre dernières colonnes de chaque tableau de ce modèle à base physique.

Tableau II-19 : Débits simulés pour le modèle mixte dans le bassin de la Kayongozi-Nyenkanda

Kayongozi-Nyenkanda		Modèles avec a et b adaptés			Modèles avec a et b moyens			Modèles avec a et b dynamiques			
Année	Qobs(m3/s)	a	b	Qcal(m3/s)	a	b	Qcal(m3/s)	a	b	Qcal(m3/s)	Qcal(mm)
1986	6.80	0.004	0.0025	6.86	0.0035	0.003	6.86	0.0035	0.00253	6.99	325.54
1987	6.85	0.004	0.0025	7.16	0.0035	0.003	7.16	0.0036	0.00257	7.51	349.49
1988	7.21	0.004	0.0026	7.39	0.0035	0.003	7.18	0.0035	0.00253	7.06	328.81
1989	7.32	0.004	0.0026	7.51	0.0035	0.003	7.30	0.0035	0.00255	7.26	338.12
1990	8.65	0.004	0.0027	8.98	0.0035	0.003	8.49	0.0037	0.00267	8.80	409.91
1991	6.53	0.004	0.0025	6.72	0.0035	0.003	6.72	0.0035	0.00251	6.74	313.93
1992	6.44	0.004	0.0025	6.79	0.0035	0.003	6.79	0.0035	0.00252	6.87	320.00
1993	6.71	0.004	0.0025	6.93	0.0035	0.003	6.93	0.0035	0.00254	7.11	331.03
1994	6.38	0.004	0.0025	6.77	0.0035	0.003	6.77	0.0035	0.00251	6.83	318.01
1995	7.07	0.004	0.0025	7.10	0.0035	0.003	7.10	0.0036	0.00256	7.40	344.72
1996	5.58	0.003	0.0024	6.00	0.0035	0.003	6.17	0.0035	0.00246	6.27	292.15
1997	9.51	0.004	0.0027	9.82	0.0035	0.003	9.29	0.0038	0.00278	10.30	479.50
1998	5.72	0.004	0.0025	5.97	0.0035	0.003	5.97	0.0034	0.0024	5.56	258.92
1999	5.02	0.003	0.0024	5.26	0.0035	0.003	5.41	0.0034	0.00235	5.07	236.28
2000	4.18	0.003	0.0022	4.51	0.0035	0.003	4.93	0.0033	0.00235	5.03	234.06

Kayongozi-Nyenkanda		**Modèles avec a et b adaptés**			**Modèles avec a et b moyens**			**Modèles avec a et b dynamiques**			
Année	**Qobs(m3/s)**	**a**	**b**	**Qcal(m3/s)**	**a**	**b**	**Qcal(m3/s)**	**a**	**b**	**Qcal(m3/s)**	**Qcal(mm)**
2001	5.86	0.003	0.0024	6.04	0.0035	0.003	6.22	0.0035	0.00247	6.36	295.93
2002	6.69	0.004	0.0026	7.14	0.0035	0.003	6.94	0.0035	0.0025	6.68	310.90
2003	5.88	0.003	0.0024	6.08	0.0035	0.003	6.26	0.0035	0.00248	6.42	298.89
2004	4.85	0.003	0.0022	4.85	0.0035	0.003	5.31	0.0034	0.00241	5.66	263.40
2005	4.31	0.003	0.0023	4.59	0.0035	0.003	4.87	0.0033	0.0023	4.60	214.01
2006	6.78	0.004	0.0026	7.03	0.0035	0.003	6.83	0.0035	0.00248	6.50	302.48
2007	7.65	0.004	0.0027	7.89	0.0035	0.003	7.47	0.0035	0.00253	7.07	329.32
2008	6.78	0.004	0.0027	7.11	0.0035	0.003	6.72	0.0034	0.00244	5.95	277.00
2009	7.40	0.004	0.0027	7.80	0.0035	0.003	7.38	0.0035	0.00252	6.93	322.80
2010	6.44	0.004	0.0025	6.60	0.0035	0.003	6.60	0.0035	0.00249	6.56	305.30
2011	6.33	0.004	0.0025	6.77	0.0035	0.003	6.77	0.0035	0.00251	6.83	317.97
2012	7.05	0.004	0.0026	7.53	0.0035	0.003	7.32	0.0036	0.00255	7.29	339.60
2013	6.82	0.004	0.0026	7.28	0.0035	0.003	7.08	0.0035	0.00252	6.89	320.80
2014	5.57	0.003	0.0023	5.59	0.0035	0.003	5.92	0.0035	0.00247	6.29	292.82
2015	6.59	0.003	0.0024	6.65	0.0035	0.003	6.85	0.0036	0.00257	7.46	347.23
2016	5.78	0.003	0.0024	5.88	0.0035	0.003	6.05	0.0034	0.00245	6.07	282.78
Critère de calage			NSE	93.14		NSE	91.37		NSE	80.13	

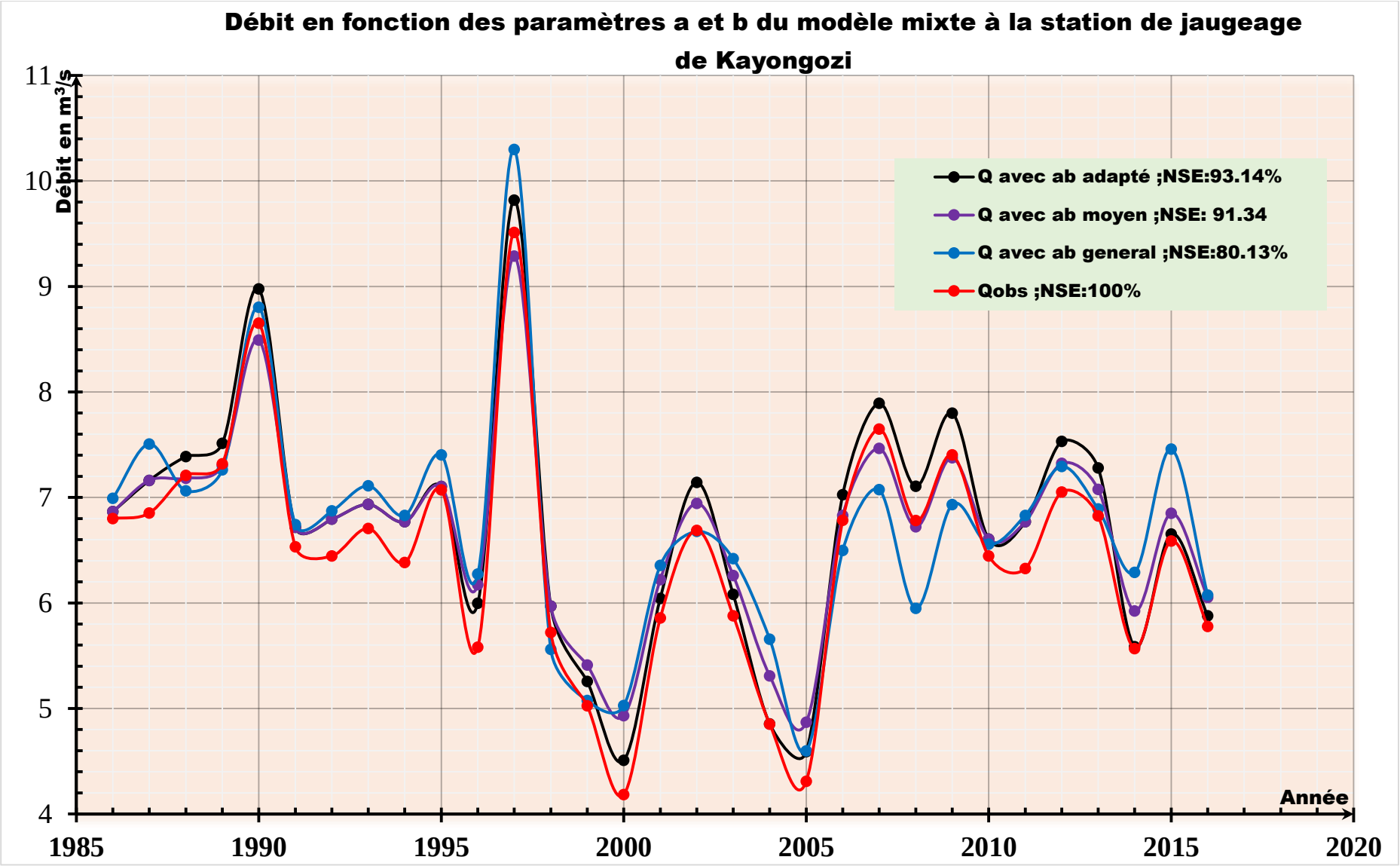


Figure II-10 : Débits simulés pour le modèle mixte dans le bassin de la Kayongozi-Nyenkanda

Tableau II-20 : Débits simulés pour le modèle mixte dans le bassin de la Nyabaha-Mubuga

Nyabaha-Mubuga		Modèles avec a et b adaptés			Modèles avec a et b moyens			Modèles avec a et b généralisés			
Année	Qobs(m3/s)	a	b	Qcal(m3/s)	a	b	Qcal(m3/s)	a	b	Qcal(m3/s)	Qcal(mm)
1986	13.58	0.004	0.0032	14.14	0.00395	0.003	13.30	0.004	0.00298	12.48	419.33
1987	12.33	0.004	0.003	12.41	0.00395	0.003	12.26	0.004	0.00295	12.08	405.62
1988	12.59	0.004	0.003	12.71	0.00395	0.003	12.55	0.004	0.00299	12.65	424.85
1989	13.23	0.004	0.0031	13.71	0.00395	0.003	13.22	0.004	0.00302	13.12	440.63
1990	13.02	0.004	0.0031	13.64	0.00395	0.003	13.15	0.004	0.00301	12.98	436.16
1991	12.49	0.004	0.003	13.08	0.00395	0.003	12.92	0.004	0.00304	13.38	449.36
1992	12.72	0.004	0.003	12.80	0.00395	0.003	12.65	0.004	0.003	12.83	431.01
1993	14.24	0.004	0.0032	15.03	0.00395	0.003	14.14	0.0041	0.00308	14.07	472.73
1994	13.74	0.004	0.0031	13.93	0.00395	0.003	13.42	0.004	0.00305	13.52	454.02
1995	15.33	0.004	0.0032	15.66	0.00395	0.003	14.73	0.0042	0.00315	15.26	512.71
1996	10.72	0.004	0.0029	10.93	0.00395	0.003	11.07	0.0039	0.00285	10.60	356.16
1997	20.57	0.004	0.0034	21.47	0.00395	0.003	19.28	0.0046	0.00357	23.38	785.40
1998	14.49	0.004	0.0033	15.00	0.00395	0.003	13.78	0.004	0.00299	12.60	423.12
1999	9.13	0.004	0.0027	9.65	0.00395	0.003	10.30	0.0038	0.00285	10.59	355.80
2000	11.51	0.004	0.003	12.02	0.00395	0.003	11.87	0.0039	0.0029	11.36	381.51

Nyabaha-Mubuga		**Modèles avec a et b adaptés**			**Modèles avec a et b moyens**			**Modèles avec a et b généralisés**			
Année	**Qobs(m3/s)**	**a**	**b**	**Qcal(m3/s)**	**a**	**b**	**Qcal(m3/s)**	**a**	**b**	**Qcal(m3/s)**	**Qcal(mm)**
2001	12.87	0.004	0.0031	13.21	0.00395	0.003	12.73	0.004	0.00296	12.19	409.48
2002	10.42	0.004	0.0028	10.74	0.00395	0.003	11.17	0.0039	0.00292	11.53	387.23
2003	9.77	0.004	0.0028	10.38	0.00395	0.003	10.80	0.0039	0.00286	10.81	362.97
2004	9.34	0.004	0.0027	9.60	0.00395	0.003	10.25	0.0038	0.00284	10.50	352.53
2005	5.68	0.003	0.0024	5.80	0.00395	0.003	6.74	0.0035	0.00246	6.05	203.18
2006	8.98	0.004	0.0026	9.39	0.00395	0.003	10.31	0.0039	0.00291	11.40	382.97
2007	10.67	0.004	0.0029	10.92	0.00395	0.003	11.06	0.0038	0.00285	10.58	355.37
2008	8.82	0.004	0.0027	9.03	0.00395	0.003	9.64	0.0038	0.00275	9.35	314.01
2009	10.97	0.004	0.0028	11.00	0.00395	0.003	11.44	0.004	0.00295	12.06	405.22
2010	9.22	0.004	0.0026	9.49	0.00395	0.003	10.42	0.0039	0.00292	11.63	390.52
2011	12.83	0.004	0.003	12.86	0.00395	0.003	12.70	0.004	0.00301	12.94	434.73
2012	11.51	0.004	0.0029	11.54	0.00395	0.003	11.69	0.0039	0.00293	11.77	395.42
2013	12.64	0.004	0.0031	12.95	0.00395	0.003	12.48	0.0039	0.00293	11.73	394.01
2014	11.34	0.004	0.003	11.78	0.00395	0.003	11.64	0.0039	0.00287	10.93	367.10
2015	12.20	0.004	0.0029	12.28	0.00395	0.003	12.44	0.004	0.00303	13.28	445.96
2016	11.11	0.004	0.003	11.50	0.00395	0.003	11.36	0.0038	0.00284	10.44	350.81
Critère de calage			NSE	99.96		NSE	94.30		NSE	82.25	

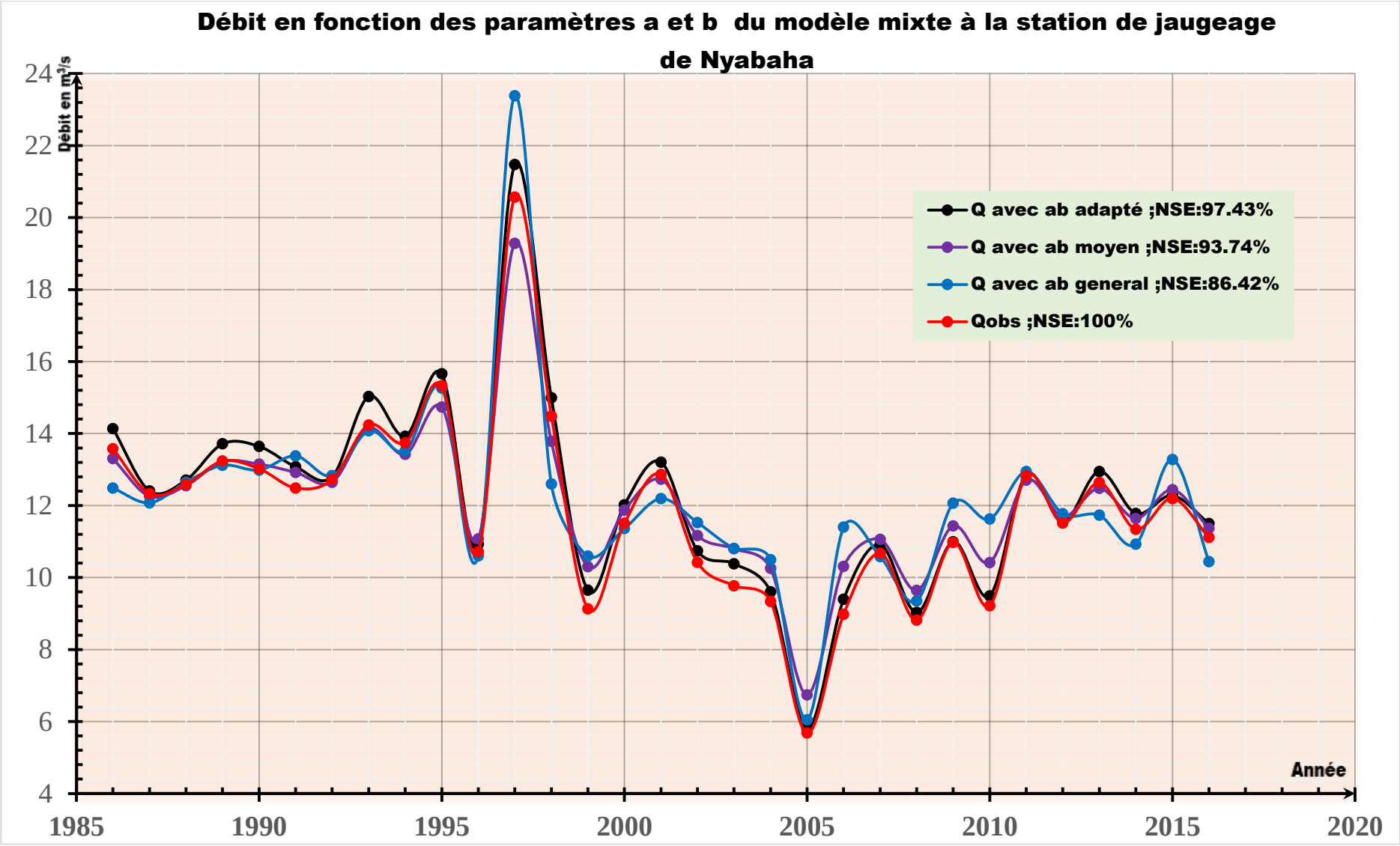


Figure II-11 : Débits simulés pour le modèle mixte dans le bassin de la Nyabaha-Mubuga

Tableau II-21 : Débits simulés pour le modèle mixte dans le bassin de la Ruvubu-Gitega

Ruvubu-Gitega		Modèles avec a et b adaptés			Modèles avec a et b moyens			Modèles avec a et b généralisés			
Année	Qobs(m3/s)	a	b	Qcal(m3/s)	a	b	Qcal(m3/s)	a	b	Qcal(m3/s)	Qcal(mm)
1986	81.14	0.004	0.00323	81.29	0.00407	0.003	78.14	0.0041	0.00313	76.73	580.07
1987	70.98	0.004	0.00306	71.23	0.00407	0.003	71.34	0.0041	0.00308	71.90	543.58
1988	81.31	0.004	0.00319	81.34	0.00407	0.003	78.93	0.0042	0.00316	79.84	603.65
1989	88.38	0.004	0.00332	88.46	0.00407	0.003	83.26	0.0042	0.00318	81.78	618.29
1990	58.76	0.004	0.00286	58.92	0.00407	0.003	62.06	0.004	0.00299	63.50	480.11
1991	65.44	0.004	0.00298	65.49	0.00407	0.003	66.90	0.004	0.00303	67.34	509.12
1992	62.43	0.004	0.00287	62.75	0.00407	0.003	65.92	0.0041	0.00306	70.06	529.68
1993	52.93	0.004	0.00289	53.00	0.00407	0.003	55.40	0.0038	0.00284	51.52	389.52
1994	69.60	0.004	0.00306	69.94	0.00407	0.003	70.04	0.0041	0.00305	69.63	526.45
1995	62.83	0.004	0.00298	63.15	0.00407	0.003	64.51	0.004	0.00298	63.25	478.18
1996	58.87	0.004	0.00296	59.18	0.00407	0.003	60.76	0.0039	0.00292	57.78	436.87
1997	97.51	0.004	0.00339	97.60	0.00407	0.003	90.39	0.0043	0.00326	91.31	690.32
1998	74.70	0.004	0.00316	74.89	0.00407	0.003	73.20	0.0041	0.00307	71.10	537.54
1999	69.35	0.004	0.003	69.47	0.00407	0.003	70.62	0.0041	0.00309	73.12	552.84
2000	56.88	0.004	0.00287	57.05	0.00407	0.003	59.93	0.0039	0.00294	59.48	449.71

Ruvubu-Gitega		**Modèles avec a et b adaptés**			**Modèles avec a et b moyens**			**Modèles avec a et b généralisés**			
Année	**Qobs(m3/s)**	**a**	**b**	**Qcal(m3/s)**	**a**	**b**	**Qcal(m3/s)**	**a**	**b**	**Qcal(m3/s)**	**Qcal(mm)**
2001	69.47	0.004	0.00296	69.77	0.00407	0.003	71.64	0.0041	0.00313	76.78	580.51
2002	79.95	0.004	0.00313	80.34	0.00407	0.003	79.09	0.0042	0.00319	82.90	626.74
2003	63.75	0.004	0.00301	63.77	0.00407	0.003	64.66	0.004	0.00297	62.42	471.95
2004	59.87	0.004	0.00286	59.99	0.00407	0.003	63.18	0.004	0.00301	65.50	495.19
2005	51.62	0.004	0.00288	51.88	0.00407	0.003	54.37	0.0038	0.00283	50.23	379.78
2006	84.26	0.004	0.00321	84.59	0.00407	0.003	81.69	0.0042	0.0032	83.95	634.69
2007	71.74	0.004	0.0032	71.85	0.00407	0.003	69.55	0.004	0.00299	63.69	481.52
2008	63.45	0.004	0.00295	63.49	0.00407	0.003	65.35	0.004	0.00301	65.81	497.54
2009	70.42	0.004	0.00301	70.55	0.00407	0.003	71.53	0.0041	0.0031	74.36	562.21
2010	68.05	0.004	0.00304	68.10	0.00407	0.003	68.54	0.004	0.00303	67.83	512.83
2011	81.06	0.004	0.00313	81.51	0.00407	0.003	80.25	0.0042	0.00321	85.07	643.16
2012	80.03	0.004	0.00317	80.19	0.00407	0.003	78.19	0.0042	0.00315	79.40	600.30
2013	76.20	0.004	0.00316	76.39	0.00407	0.003	74.66	0.0041	0.00309	73.60	556.46
2014	76.47	0.004	0.00317	76.71	0.00407	0.003	74.79	0.0041	0.00309	73.42	555.08
2015	82.74	0.004	0.00315	82.86	0.00407	0.003	81.18	0.0042	0.00321	85.87	649.23
2016	75.77	0.004	0.00319	76.03	0.00407	0.003	73.78	0.0041	0.00307	70.90	536.06
Critère de calage			NSE	99.96		NSE	94.30		NSE	86.42	

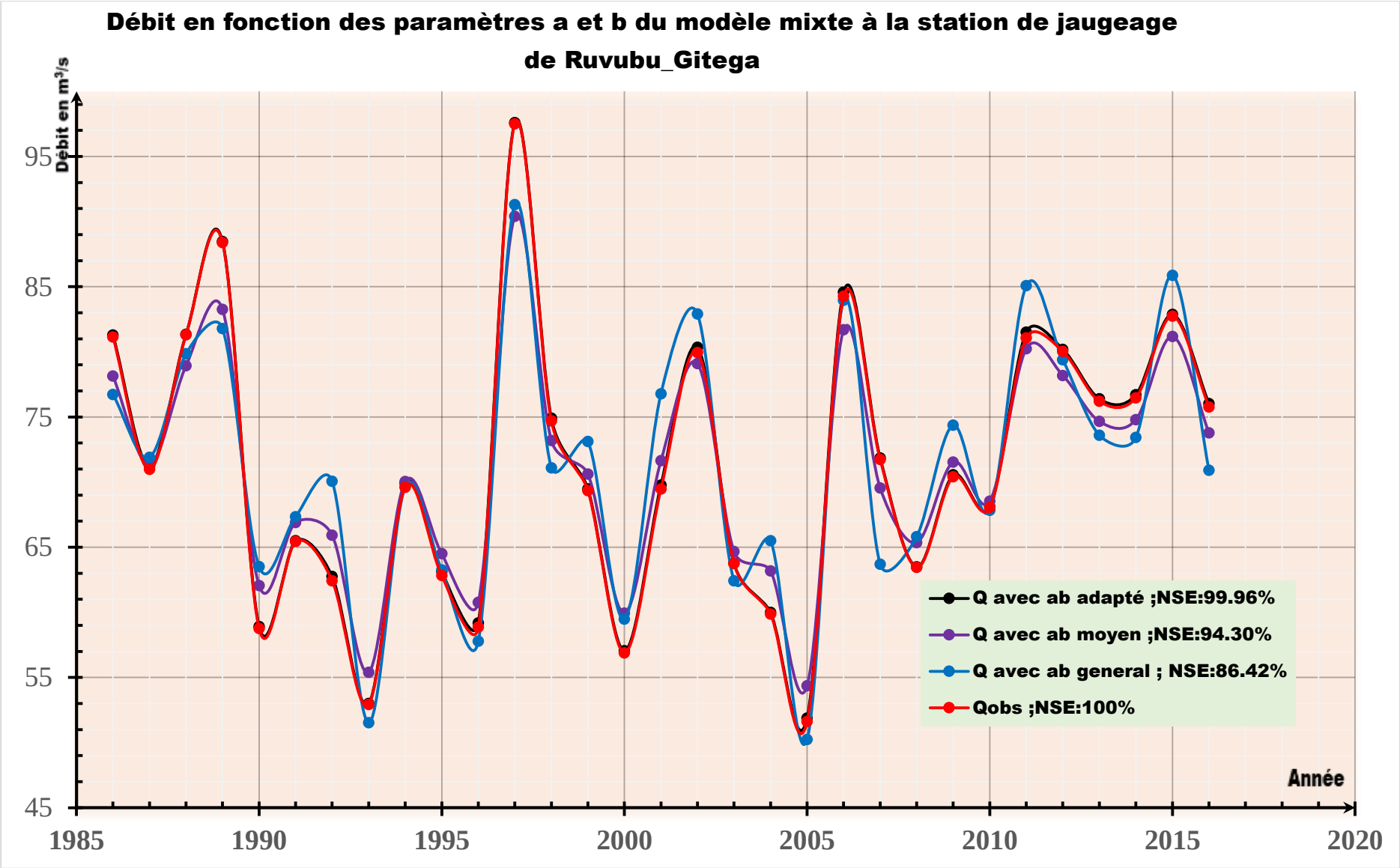


Figure II-12 : Débits simulés pour le modèle mixte dans le bassin de la Ruvubu-Gitega

Tableau II-22 : Débits simulés pour le modèle mixte dans le bassin de la Ruvyironza-Kibaya

Ruvyironza-Kibaya		Modèles avec a et b adaptés			Modèles avec a et b moyens			Modèles avec a et b généralisés			
Année	Qobs(m3/s)	a	b	Qcal(m3/s)	a	b	Qcal(m3/s)	a	b	Qcal(m3/s)	Qcal(mm)
1986	22.657	0.004	0.00256	22.687	0.00356	0.003	22.7	0.0036	0.00255	22.552	359.78
1987	19.534	0.004	0.00251	19.576	0.00356	0.003	19.87	0.0034	0.00244	18.623	297.09
1988	25.083	0.004	0.00269	25.24	0.00356	0.003	24.36	0.0036	0.00257	23.389	373.13
1989	29.248	0.004	0.00284	29.372	0.00356	0.003	27.25	0.0036	0.00264	25.842	412.26
1990	22.665	0.004	0.00264	22.699	0.00356	0.003	22.21	0.0035	0.0025	20.629	329.09
1991	22.553	0.004	0.00256	22.564	0.00356	0.003	22.58	0.0035	0.00255	22.343	356.44
1992	20.068	0.004	0.0025	20.136	0.00356	0.003	20.49	0.0035	0.00247	19.744	314.98
1993	18.854	0.003	0.00247	18.944	0.00356	0.003	19.45	0.0034	0.00243	18.459	294.47
1994	18.735	0.003	0.00231	18.786	0.00356	0.003	20.22	0.0035	0.00254	22.053	351.81
1995	21.84	0.003	0.00249	21.857	0.00356	0.003	22.31	0.0036	0.00256	22.955	366.21
1996	24.313	0.004	0.00252	24.339	0.00356	0.003	24.63	0.0037	0.00266	26.696	425.88
1997	32.971	0.004	0.00279	33.067	0.00356	0.003	31.08	0.0038	0.00282	33.72	537.93
1998	26.486	0.004	0.00276	26.633	0.00356	0.003	25.23	0.0036	0.00258	23.765	379.13
1999	24.058	0.004	0.00265	24.059	0.00356	0.003	23.48	0.0036	0.00255	22.522	359.29
2000	19.346	0.003	0.00239	19.475	0.00356	0.003	20.46	0.0035	0.00251	21.248	338.97

Ruvyironza-Kibaya		**Modèles avec a et b adaptés**			**Modèles avec a et b moyens**			**Modèles avec a et b généralisés**			
Année	**Qobs(m3/s)**	**a**	**b**	**Qcal(m3/s)**	**a**	**b**	**Qcal(m3/s)**	**a**	**b**	**Qcal(m3/s)**	**Qcal(mm)**
2001	25.401	0.004	0.00265	25.511	0.00356	0.003	24.9	0.0036	0.00261	24.916	397.48
2002	22.649	0.004	0.00254	22.758	0.00356	0.003	22.9	0.0036	0.00257	23.203	370.16
2003	18.165	0.003	0.00237	18.279	0.00356	0.003	19.32	0.0035	0.00247	19.562	312.07
2004	16.736	0.003	0.00226	16.845	0.00356	0.003	18.41	0.0035	0.00247	19.53	311.56
2005	12.892	0.003	0.00219	12.915	0.00356	0.003	14.42	0.0033	0.00228	13.82	220.47
2006	26.149	0.004	0.00259	26.282	0.00356	0.003	26.08	0.0037	0.00269	28.132	448.78
2007	22.213	0.004	0.00255	22.309	0.00356	0.003	22.38	0.0035	0.00254	22.167	353.63
2008	23.098	0.004	0.00268	23.246	0.00356	0.003	22.5	0.0035	0.0025	20.554	327.89
2009	22.141	0.003	0.00248	22.194	0.00356	0.003	22.72	0.0036	0.00259	23.848	380.45
2010	23.412	0.004	0.00261	23.45	0.00356	0.003	23.14	0.0036	0.00255	22.545	359.65
2011	25.532	0.004	0.00267	25.648	0.00356	0.003	24.89	0.0036	0.00261	24.588	392.24
2012	25.311	0.004	0.0026	25.333	0.00356	0.003	25.07	0.0036	0.00264	26.064	415.8
2013	27.209	0.004	0.00272	27.334	0.00356	0.003	26.17	0.0036	0.00264	25.977	414.41
2014	25.079	0.004	0.0026	25.139	0.00356	0.003	24.87	0.0036	0.00263	25.716	410.24
2015	26.634	0.004	0.00261	26.772	0.00356	0.003	26.42	0.0037	0.0027	28.394	452.97
2016	23.754	0.004	0.00262	23.769	0.00356	0.003	23.39	0.0036	0.00256	22.814	363.95
Critère de calage			NSE	99.94		NSE	94.77		NSE	81.63	

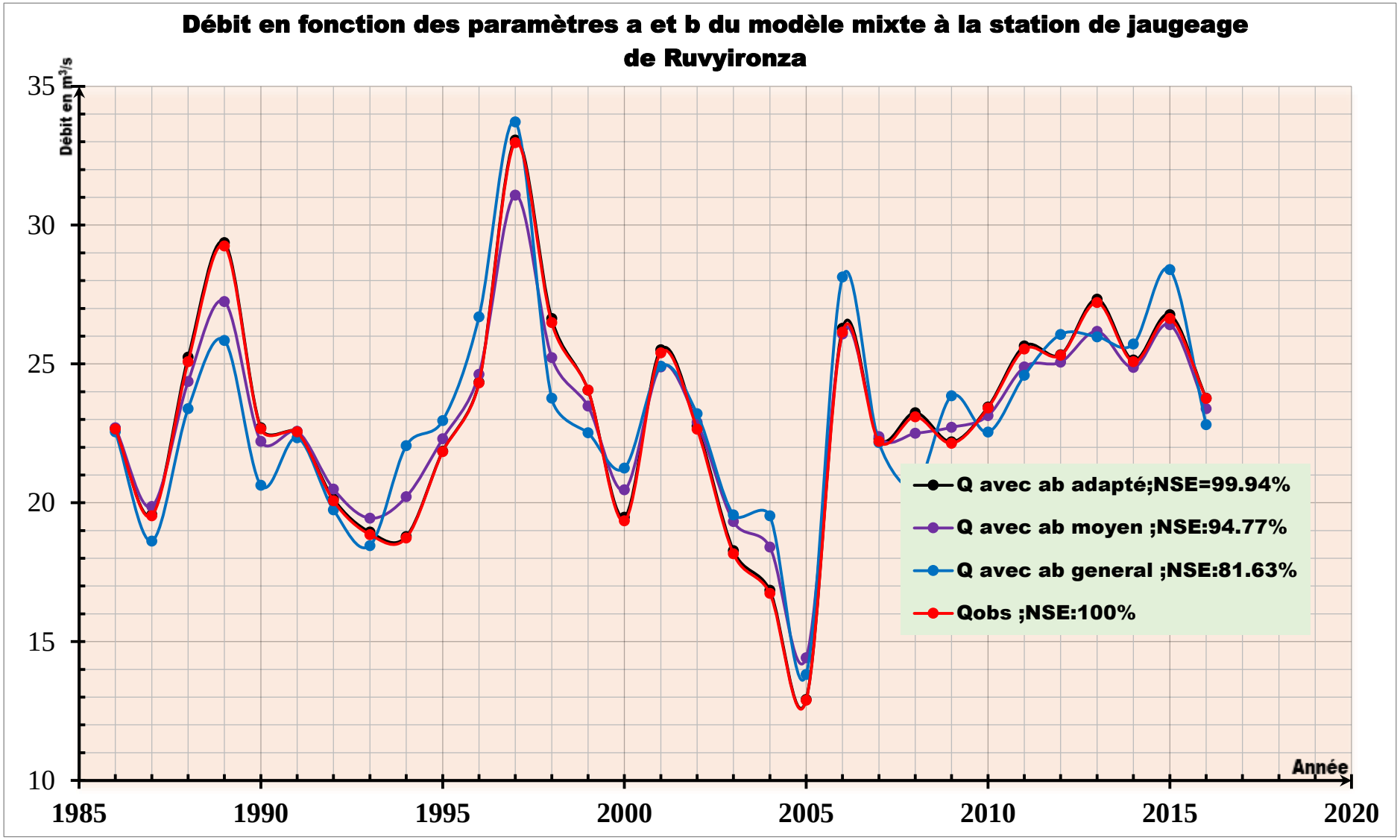


Figure II-13 : Débits simulés pour le modèle mixte dans le bassin de la Kayongozi-Nyenkanda

Tableau II-23 : Débits simulés pour le modèle mixte dans le bassin de la Ruvubu-Muyinga

Ruvubu-Muyinga		**Modèles avec a et b adaptés**			**Modèles avec a et b moyens**			**Modèles avec a et b généralisés**			
Année	**Qobs(m3/s)**	**a**	**b**	**Qca(m3/s)**	**a**	**b**	**Qca(m3/s)**	**a**	**b**	**Qca(m3/s)**	**Qca(mm)**
1986	124.18	0.001	0.00854	124.42	0.00119	0.008	121.43	0.0012	0.00837	119.43	403.56
1987	109.70	0.001	0.00819	109.81	0.00119	0.008	111.75	0.0012	0.00824	111.14	375.54
1988	126.19	0.001	0.00854	126.56	0.00119	0.008	123.52	0.0012	0.00842	123.06	415.85
1989	138.19	0.001	0.00882	138.33	0.00119	0.008	130.73	0.0012	0.0085	128.49	434.18
1990	103.10	0.001	0.00798	104.00	0.00119	0.008	108.63	0.0012	0.00823	110.68	374.01
1991	107.01	0.001	0.00812	107.55	0.00119	0.008	110.40	0.0012	0.00823	110.45	373.24
1992	101.66	0.001	0.00791	102.89	0.00119	0.008	108.42	0.0012	0.00825	112.01	378.51
1993	92.73	0.001	0.00791	92.96	0.00119	0.008	97.95	0.0011	0.00796	94.13	318.07
2011	125.75	0.001	0.0084	126.92	0.00119	0.008	125.93	0.0012	0.00854	131.13	443.09
2012	123.91	0.001	0.0084	123.99	0.00119	0.008	123.03	0.0012	0.00846	125.80	425.11
2013	122.88	0.001	0.00854	124.78	0.00119	0.008	121.79	0.0012	0.00838	120.04	405.62
2014	118.45	0.001	0.0084	118.51	0.00119	0.008	117.59	0.0012	0.00832	116.21	392.69
2015	128.16	0.001	0.0084	130.25	0.00119	0.008	129.24	0.0012	0.00863	137.33	464.06
2016	116.41	0.001	0.00854	116.61	0.00119	0.008	113.81	0.0012	0.00817	106.70	360.54
Critère de calage			NSE	99.40		NSE	90.20		NSE	73.98	

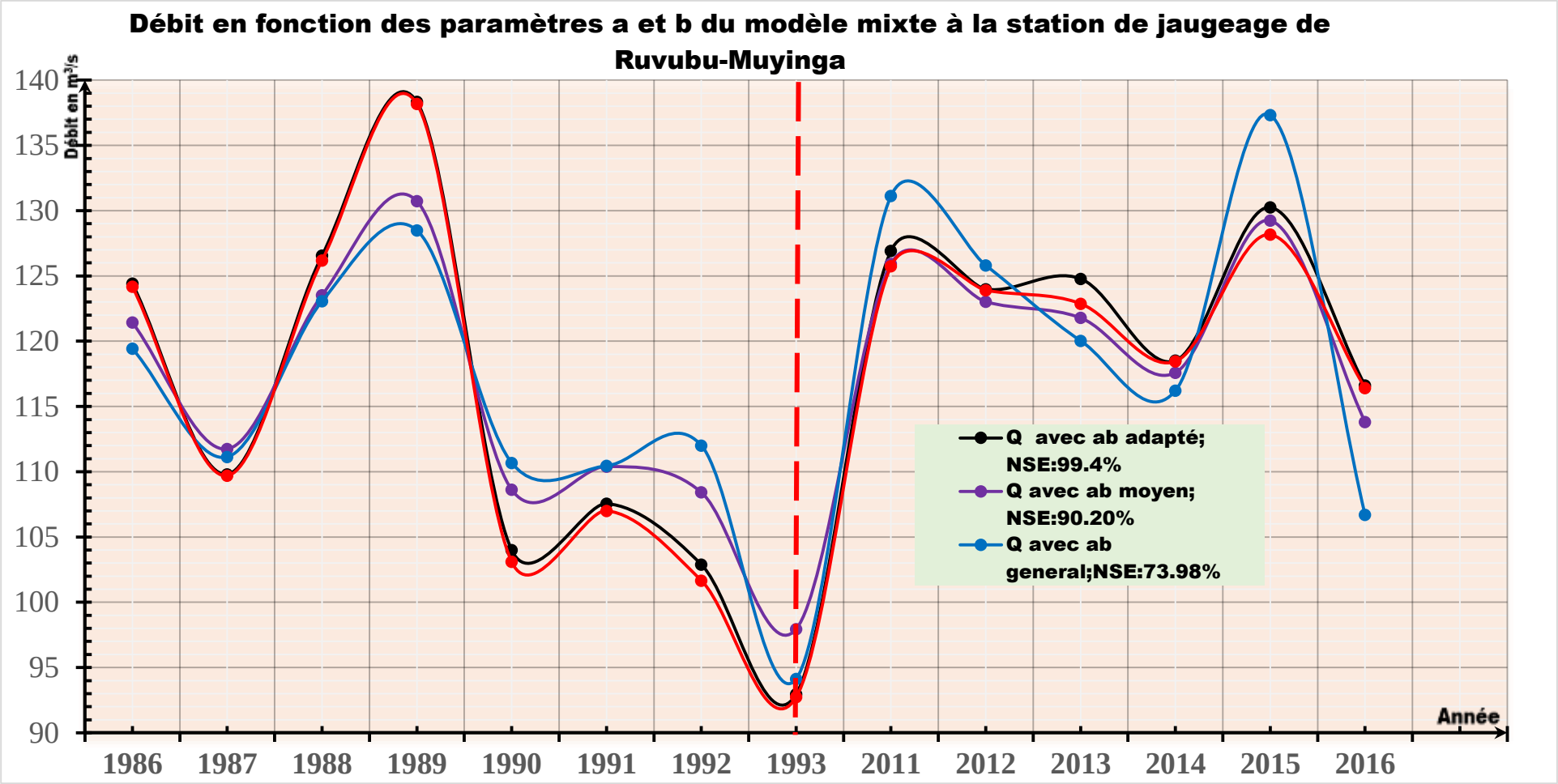


Figure II-14 : Débits simulés pour le modèle mixte dans le bassin de la Ruvubu-Muyinga

II.5 Validation des modèles choisis

Après l'opération de calage des modèles, le modèle GR1A a été rejeté car avait un critère de Nash-Sutcliffe inférieure à la valeur de référence adopté (NSE=60% <70%) pour le sous bassin de la Ruvyironza-Kibaya comme les résultats du tableau II-24 le montre.

Tableau II-24 : Synthèse des valeurs de NSE pour la méthode GR1A

Station	x adapté	X moyen	X dynamique
Kayongozi-Nyenkanda	100%	89.78%	90.15%
Nyabaha-Mubuga	100%	89.74%	89.88%
Ruvubu-Gitega	100%	86.21%	86.86%
Ruvyironza-Kibaya	100%	87.13%	60.42%
Ruvubu-Muyinga	87.82%	49.01%	47.55%

Bien que ces trois autres méthodes soient été choisies, il faut les soumettre à la validation afin de s'assurer de l'adaptabilité de ces modèles.

Pour la validation, comme nous n'avions pas des données de très grandes séries d'observation, nous avons subdivisé les données en deux séries :

La première série : les données de 1986 à 2000

La deuxième série : de 2001 à 2016

Le principe de la validation consiste à tester, les modèles calés sur la première série, s'il est applicable aux données de la deuxième série. Avec les trois modèles testés tous ont été validé car le NSE été acceptable (NSE>70%) (Voir Tableau II-25)

Tableau II-25 : Résultats de la validation des modèles choisis

Station	**SCS**		**abP_m A**		**α LD_d**	
	NSE (%)		**NSE (%)**		**NSE (%)**	
	Calage	**Validation**	**Calage**	**Validation**	**Calage**	**Validation**
Kayongozi-Nyenkanda	93.48	**77.48**	90.28	**70.51**	94.50	**73.47**
Nyabaha-Mubuga	89.45	**72.38**	85.35	**73.64**	91.10	**72.17**
Ruvubu-Gitega	91.87	**72.63**	92.31	**71.03**	90.30	**74.07**
Ruvyironza-Kibaya	83.50	**85.45**	78.07	**84.02**	78.31	**85.61**

Exception faite sur le sous bassin de la Ruvyironza où la validation a conduit à l'amélioration de la valeur du NSE, pour les autres sous bassins ce processus a réduit cette valeur.

Le modèle SCS a des variations presque de même ordre de grandeur tandis qu'elle est accentuée pour les modèles à base des caractéristiques physiques du bassin.

II.6 Analyse des résultats

Nos résultats colloborent avec ceux de **(Safouane MOUELHI, 2003)**en ce qui concerne l'affectation des coefficients pour les modèles à base météorologiques. Dans sa Thèse, il avait conclu que le modèle hydrologique est plus précis lorsque le coefficient est affecté à l'évaporation. De même dans notre objectif d'amélioration du modèle SCS, seule la variante où le paramètre est lié à l'évapotranspiration potentielle a donné des valeurs de NSE acceptable pour tous les sous bassins étudiés (Tableau II-26). Le tableau II-26 synthétise les vérifications des scénarios utilisés : Lorsque le critère de Nash Sutcliffe est supérieur à 70% on marque « OUI » et « Non » au contraire.

Tableau II-26 : Simulations avec NSE acceptable dans les sous bassins

Scénario / Sous bassin	1	2	3	4	5
Kayongozi- Nyenkanda	Oui	Non	Non	Oui	Oui
Nyabaha-Mubuga	Oui	Non	Oui	Oui	Non
Ruvubu-Gitega	Oui	Non	Oui	Oui	Non
Ruvyironza-Kibaya	Oui	Non	Non	Non	Oui
Ruvubu-Muyinga	Oui	Oui	Non	Oui	Oui

Les modèles empiriques sont calés et validés en fonctions des paramètres et des caractéristiques des bassins utilisés pour faire l'étude. C'est pour cette raison que les modèles de Tixeront, Ol'dekop et SCS ont donné des résultats avec une très faible précision. L'écart va jusqu'au double pour le modèle de l'Ol'dekop, pour l'année 1997 qui a été l'année la plus pluvieuse, de plus pour les périodes d'étiage, les débits sont élevés et sont comparables au débit maximal observé (FigureII-2).

Au contraire si les modèles sont adaptés aux sous bassins une minimisation de l'écart entre le débit observé et celui simulé est faible ce qui fait que les courbes représentatives des débits simulés et observés sont confondues (Figure II -3). Bien que cette procédure conduise à des résultats très satisfaisants pour la précision, elle a un inconvénient de pouvoir l'adapter pour chaque variation des données d'entrées car ces paramètres sont reliés au débit. Pour contourner cette contrainte, **Safouane MOUELHI (2003)** avait utilisé la valeur moyenne des paramètres adaptés.

Pour notre cas le paramètre moyen donne des résultats satisfaisants pour le modèle SCS et le modèle mixte tandis pour le modèle GR1A et celui à base physique, le NSE est inférieur à la valeur acceptable.

Le calage des modèles permet de juger la précision des débits simulés par rapport aux débits observés. Toutefois, il faut vérifier si les modèles calés restent toujours valables quand les données sont modifiées dans le même bassin par la validation des modèles. Nous avons soumis à la validation les modèles SCS, modèle mixte et le modèle à base physique. Les résultats de tous ces modèles ont été acceptables car le critère de Nash est supérieur à 70%.

Le tableau II-27 montre la synthèse des résultats de calcul de la valeur de NSE pour chaque sous bassin de la rivière Ruvubu considéré.

Tableau II-27 : Valeurs de NSE pour les modèles validés du bassin de la Ruvubu

Station	Modèle SCS	Modèle à base mixte	Modèle à base physique
Kayongozi-Nyenkanda	88.46%	80.13%	86.02%
Nyabaha-Mubuga	85.94%	82.25%	86.38%
Ruvubu-Gitega	85.39%	86.42%	85.52%
Ruvyironza-Kibaya	85.01%	81.63%	82.43%
Ruvubu-Muyinga	73.15%	73.98%	74.92%

L'analyse comparative des modèles pour chaque sous bassin de la Ruvubu conduit aux conclusions suivantes :

- Dans le sous bassin de la Kayongozi-Nyenkanda, l'analyse des résultats de calcul montre que la méthode SCS est la mieux indiquée si toutes les conditions sont favorables pour l'utilisation de l'un ou l'autre de ces modèles.
- Dans le sous bassin de la Nyabaha-Mubuga, c'est le modèle à base des caractéristiques physiques du bassin qui offre une meilleure simulation
- Dans les sous bassins de la Ruvubu-Gitega ou Ruvubu-Muyinga, les valeurs de NSE sont proche ce qui laisse présager qu'en fonction des données disponibles, on peut utiliser l'un ou l'autre modèle.
- Pour le sous bassin de la Ruvyironza c'est le modèle SCS qui est le plus précis plus que les autres modèles.

Les figures suivantes montrent les courbes comparatives de l'application de chaque modèle dans les sous bassins de la Ruvubu.

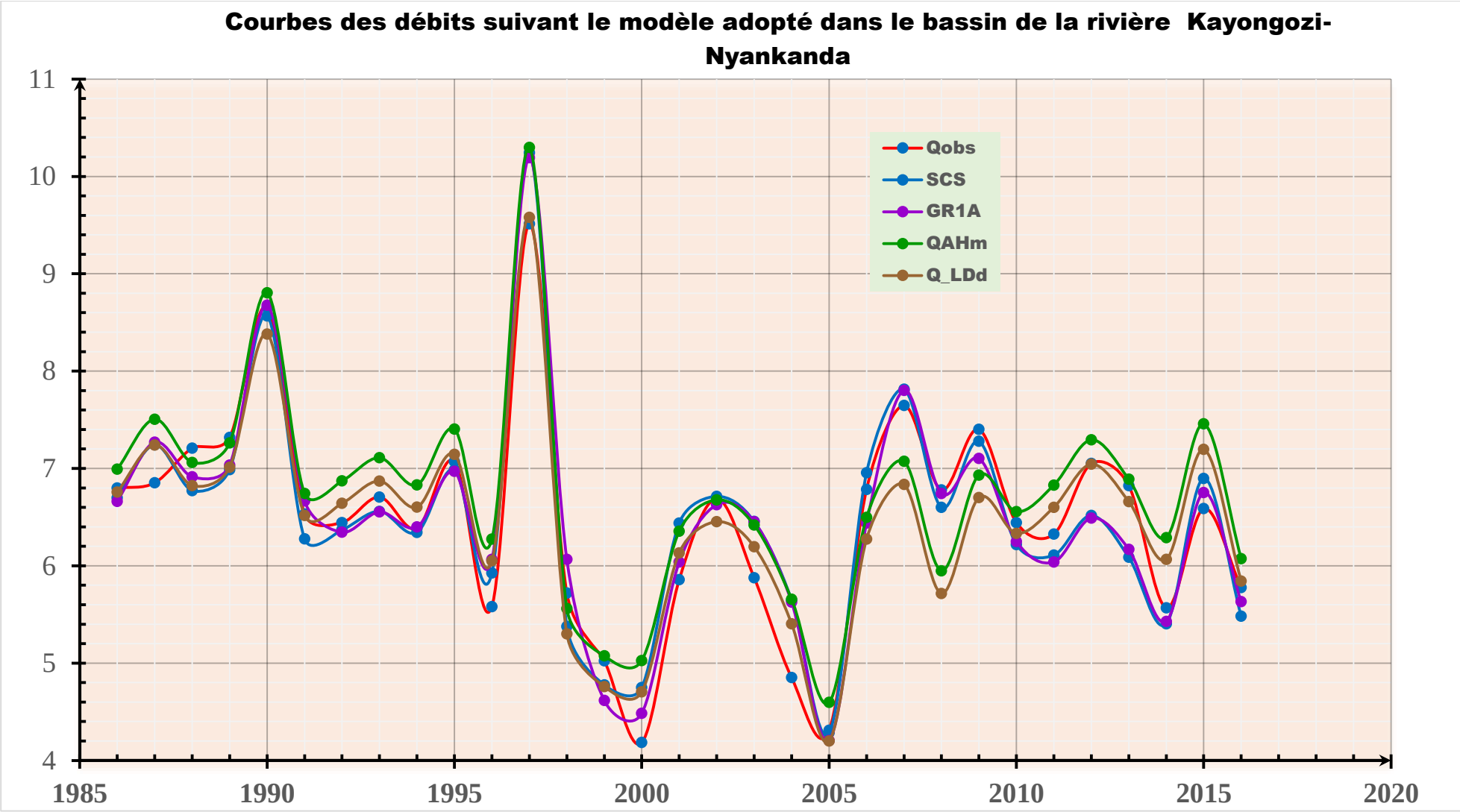


Figure II-15 : Courbes comparatives des modèles choisis dans le bassin de la Kayongozi-Nyenkanda

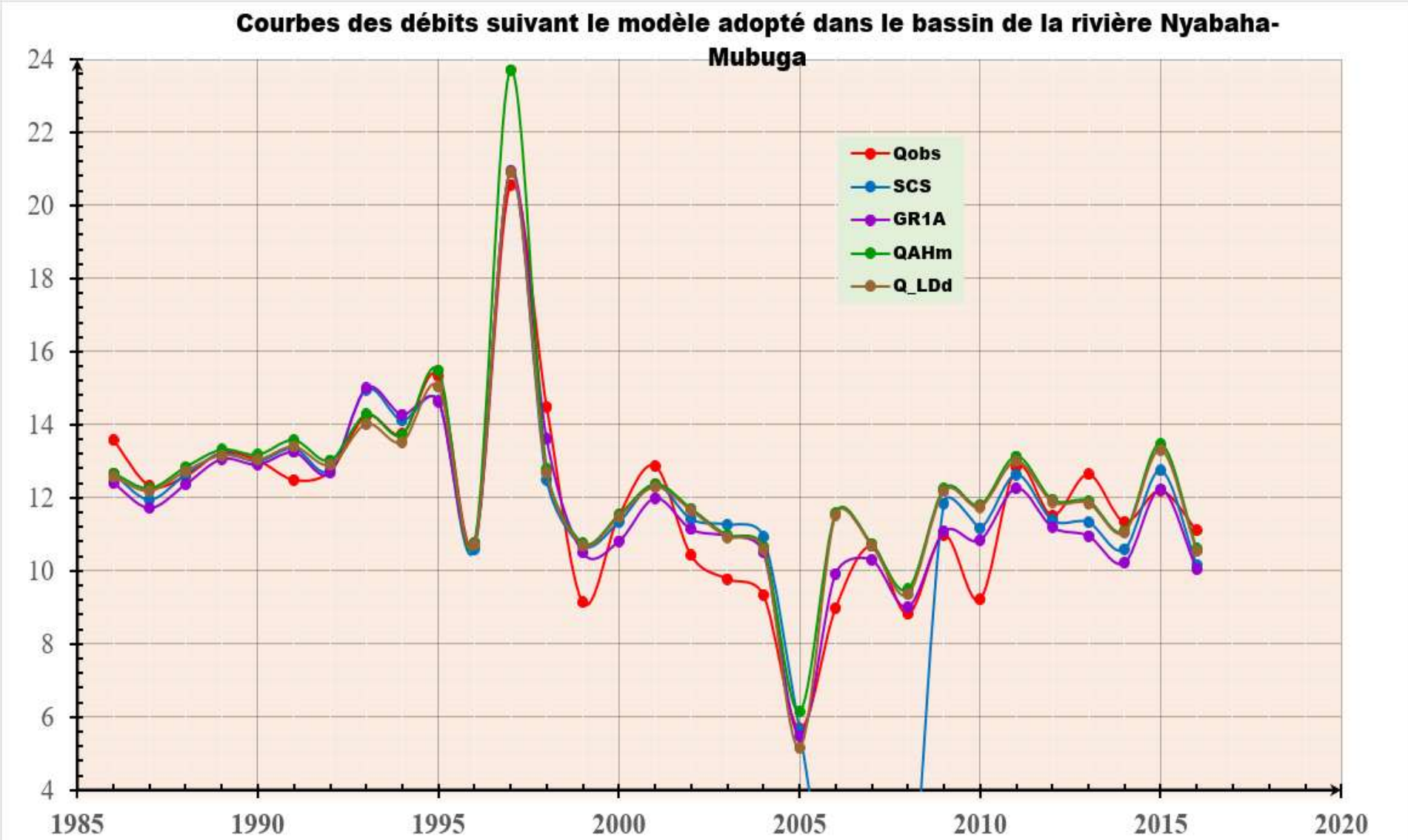


Figure II-16 : Courbes comparatives des modèles choisis dans le bassin de la Nyabaha-Mubuga

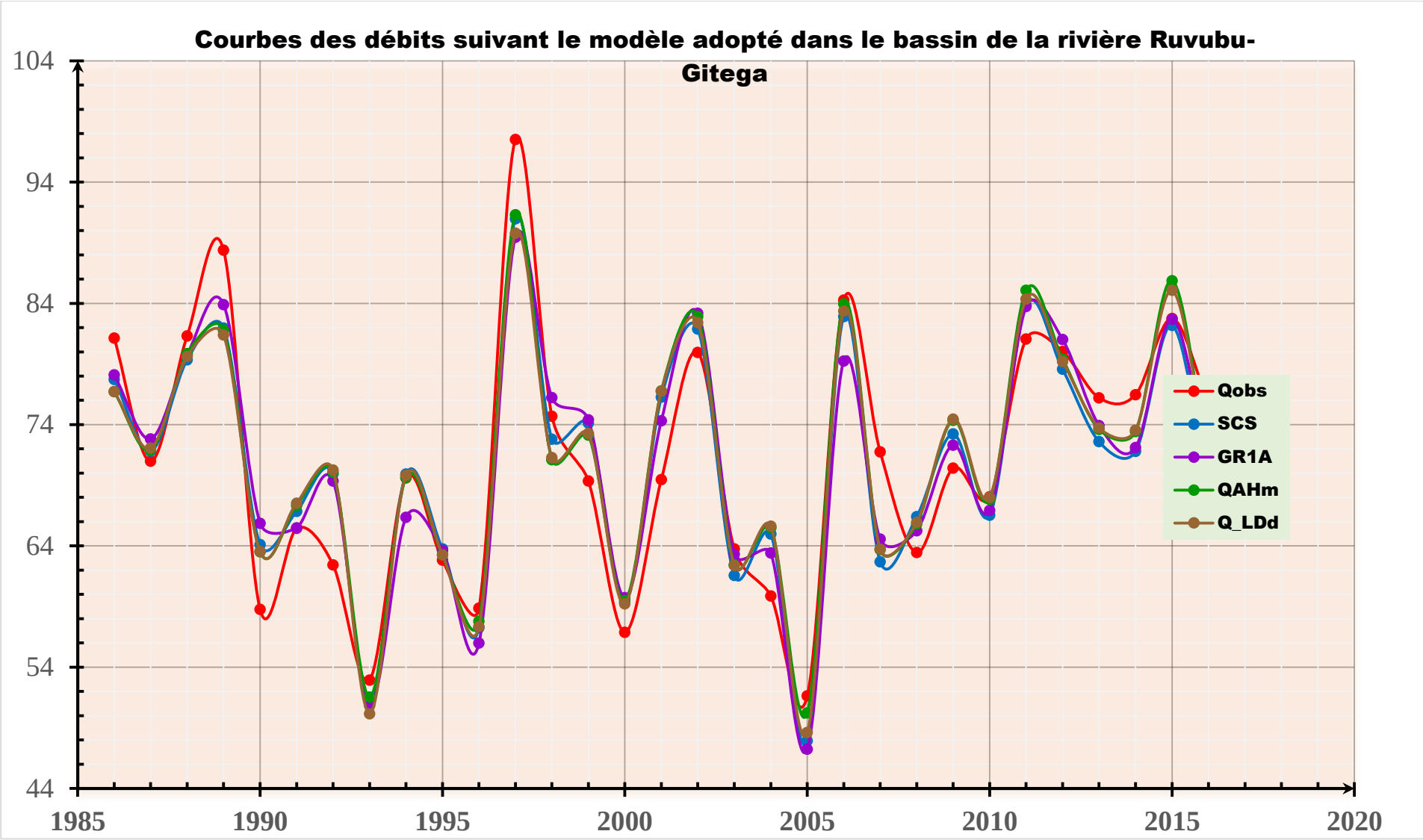


Figure II-17 : Courbes comparatives des modèles choisis dans le bassin de la Ruvubu-Gitega

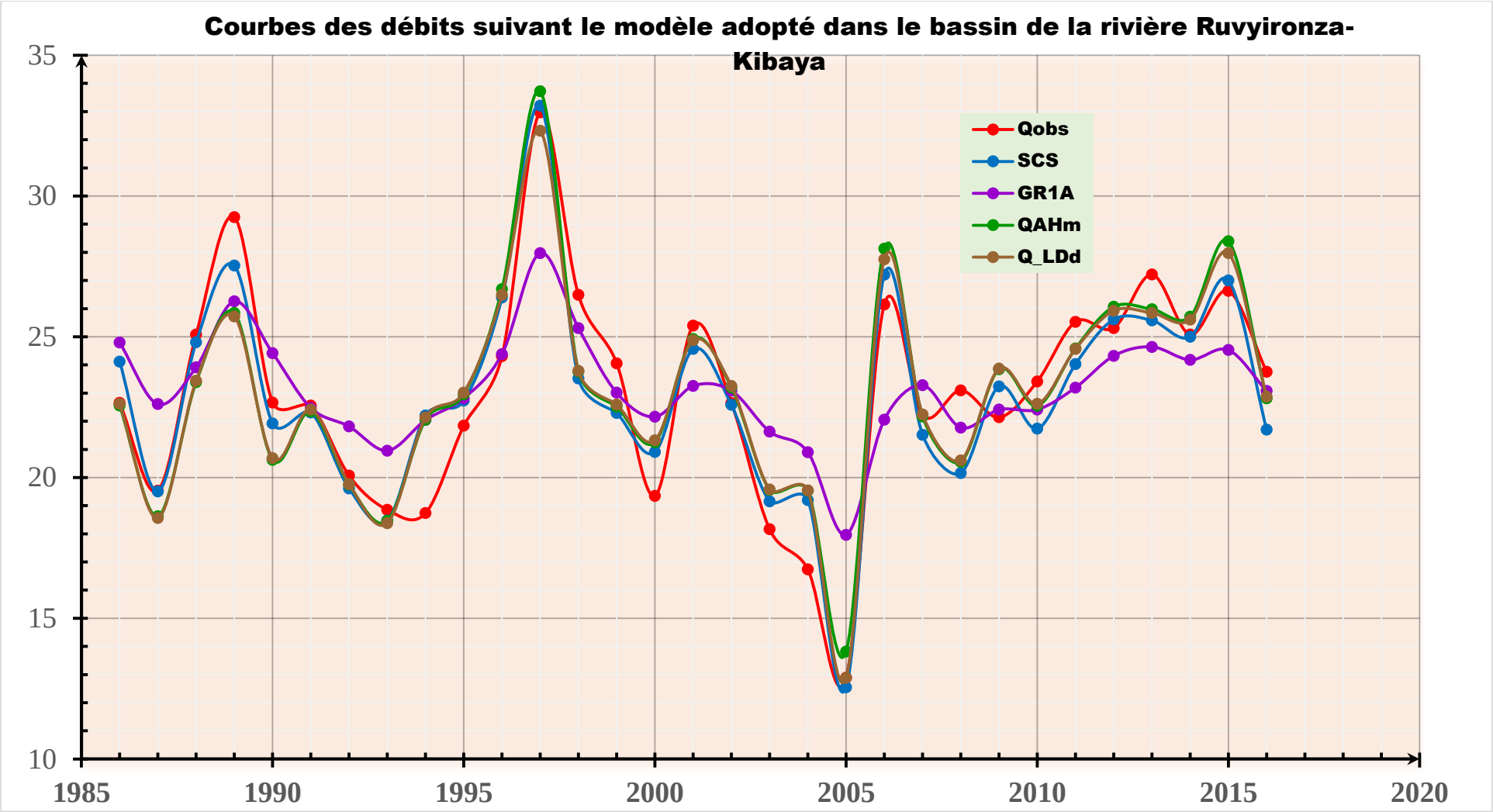


Figure II-18 : Courbes comparatives des modèles choisis dans le bassin de la Ruvyironza-Kibaya

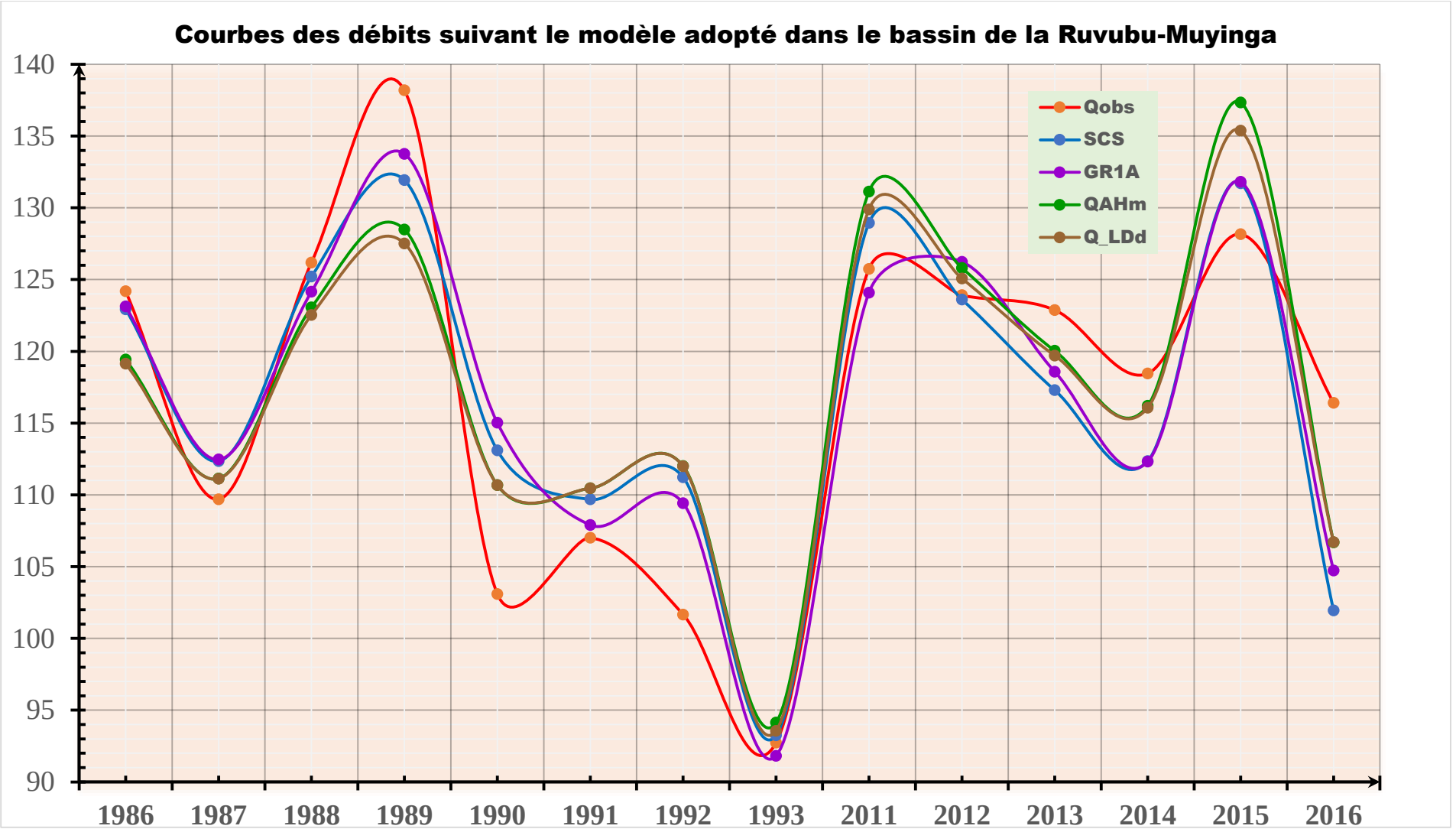


Figure II-19: Courbes comparatives des modèles choisis dans le bassin de la Ruvubu-Gitega

CHAPITRE III : CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATION

III.1 Conclusion

Les études hydrologiques doivent être menées avec des données d'entrées recueillies sur les différentes stations hydrologiques et météorologiques. Toutefois au Burundi, il y a des zones non couvertes comme c'est recommandé par (OMM-N°168, 2014). C'est pour cette raison que nous avons mené cette étude pour mettre au point des modèles capables de fournir ces données malgré l'insuffisance ou l'absence de station de jaugeage. Dans notre étude, nous avons fait une modélisation par minimisation de l'erreur entre les débits simulés et observés. Par après, nous avons procédé à une étude comparative des modèles empiriques à base des données météorologiques, mixte météorologiques et caractéristiques du bassin ainsi que des modèles à base des caractéristiques purement physiques du bassin.

Malgré les contraintes sur l'acquisition des données hydrométéorologiques, notre étude a atteint ses objectifs et a conduit à des conclusions suivantes :

Les modèles empiriques sont adaptés aux conditions de leur mise au point ; si une fois il y a changement des données d'entrées, la précision des modèles diminue. Cette conclusion est tirée en considérant les valeurs de NSE obtenues lorsque nous avons appliqué les modèles existants avec les données de notre bassin versant (Tableau 0-1). Les valeurs de NSE qui montre la précision du modèle sont devenues négatives pour les modèles testés alors qu'il devait être supérieurs à 70% pour être acceptable.

De ce qui précède, il est indispensable de faire des modèles avec des coefficients permettant de les adaptés en fonction du changement des variables d'entrée. **Safouane MOUELHI (2003)** avait fait une introduction de ces coefficients dans sa thèse d'amélioration des modèles en fonction du pas de temps ; nous lui avons emboité le pas et avons abouti aux mêmes conclusions ; que les modèles sont plus performants lorsque le coefficient est lié à l'évaporation. Par une variation de l'affectation des coefficients successivement sur la précipitation, l'évapotranspiration potentielle et ainsi que le paramètre indépendant nous avons fait cinq scénarios, seul le scénario où le coefficient est affecté à l'évapotranspiration potentielle a donné un modèle avec un NSE supérieur à 70% pour tous les sous bassin de la Ruvubu.

Pour des bassins peu ou pas jaugés, les modèles à base météorologiques ne sont pas les mieux indiqués à cause du manque des données d'entrée suffisantes. Pour cette raison, nous avons contourné cet obstacle en faisant une modélisation qui est basé sur les caractéristiques mixtes météo-physique et purement physiques du bassin.

Pour éviter de réadapter les modèles à chaque fois que les données d'entrée changent, nous avons introduit des facteurs d'amélioration dynamiques. Pour rendre dynamique les coefficients, nous avons passé par la régression linéaire du coefficient en fonction de la précipitation du sous bassin. Le choix de la précipitation s'est fondé sur la disponibilité des stations pluviométriques par rapport aux autres types de station dans le bassin de la Ruvubu.

Certes, nous avons atteint notre objectif de mettre au point des modèles hydrologiques, toutefois nous avons rencontré des contraintes sur l'acquisition des données hydrométéorologiques. Alors que nous avons besoin des données de longue période d'observation pour mener bien notre étude malheureusement le serveur de l'IGEBU est tombé en panne avant que l'on ait ces données. Nous avons obtenu des données mensuelles et annuelles seulement et sur des périodes variées, ce qui nous a conduit à faire une homogénéisation de ces dernières. De part, la durée d'observation qui était courte, la couverture spatiale n'était pas aussi assurée. Cela nous a contraint à une limitation de notre étude sur les modèles empiriques seulement alors qu'on devait se pencher sur les modèles distribuées et semi distribués ainsi que la transposition des données hydrologiques.

III.2 Recommandation

Au moment où nous nous acheminons vers la fin de notre travail qui nous a conduit à l'établissement des modèles hydrologiques applicables dans le bassin versant de la Ruvubu, les recommandations suivantes sont formulées :

Afin de faciliter les études hydrologiques au Burundi ; les autres chercheurs intéressés par le domaine d'étendre l'étude aux autres bassins majeurs du Burundi afin d'avoir une base complète sur tout le territoire.

Pour avoir des modèles variés et performants, il faut avoir des données d'entrée de longue période et spatialement représentatives. Pour cette raison, nous recommandons au gouvernement de densifier le réseau des stations hydrologiques et météorologiques et les équiper des appareils modernes automatiques pour parier aux absences de lectures.

A l'IGEBU, nous lui recommandons de faciliter l'accès aux données hydrométéorologiques et les rendre disponibles pour ceux qui veulent faire des recherches.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. **Abbott M.B. et al.** (1986). An introduction to the European Hydrological System- Système Hydrologique Européen "SHE". Journal of Hydrology.
2. **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.
3. **Aguilar E. et al.** (2003). Guidelines on climatemetadata and homogenization. World Meteorological Organization, Geneva.
4. **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.
5. **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 .
6. B**ESSIERE Hélène**. (2008). Assimilation de données variationnelle pour la modélisation hydrologique distribuéedes crues à cinétique rapide. Toulouse: Université de Toulouse.
7. **Beven and Keith**. (2011). Rainfall-runoff modelling – The primer, 2e edition,. Chichester.
8. Böschl G.et al. (2013). Runoff prediction in ungauged basins. Syn- thesis across processes, places and scales. Cambridge: University press.
9. D**ESBORDES M.** (1984). Modélisation en hydrologie Urbaine. Recherches et applications,. LHM.
10. **Dubreuil, P.** (1974). Initiation à l'analyse hydrologique. Paris: Masson et Cie.
11. Edijatno C. et Michel C., E. (1989). Un modèle pluie-débit à trois paramètres (Vol. 2). La Houille Blanche.
12. **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.
13. **Francou J. et J. A.Rodier**. (1969). Essai de classification des crues maximales. AIHS Publication.
14. F**RANCOU.J.et RODIER.J-A., F**. (1967). . Essai de classification des crues maximales observées dans le monde. , (Vol. Vol. IV ,no3 1967). Cah. O.R.S.T.0. M. sér. Hydrol.
15. **Grayson R et al.** (1992). Physically-based modelling. Water Resources Research.

16. H**e Y., A. B**. (2011). A review of regionalisation for continuous streamflow simulation. Hydrology and Earth System Sciences, 3539-3553.
17. **Hrachowitz M. et al.,** H. (2013). A decade of Predictions in Ungauged Basins (PUB) – a review. Hydrological Sciences Journal, 1198-1255.
18. I**GEBU**. (2010). Rapport Hydrologique annuel du Burundi. Gitega.
19. J**OVANOVIC S**. (1986). Hydrologic appraoches in urban drainage system modelling. Urban Drainage Modelling. Dubrovnik: Pergamon Press.
20. K**okkonen T.** (2003). Predicting daily flows in ungaugedcatchments: model regionalization from catchment descriptors at the Coweeta Hydrologic Laboratory. North Carolina: Hydrological Processes 17.
21. 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 .
22. **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.
23. **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.
24. O**MM-N°168**. (2014). Guide des pratiques hydrologiques, (éd. 6ème édition, Vol. volume II).
25. **OMM-N°169**. (1994). Guide des paratiques hydrologiques.
26. 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 .
27. **Parajka J.** (2005). A comparison of regionalisation methods for catchment model parameters. Hydrology and Earth System Sciences 9.
28. P**arajka J. et al., P.** (2013). Comparative assessment of predictions in ungauged basins – Part 1: Runoff hydrograph studies. Hydrology and Earth System Sciences, 1783-1795.
29. **Paturel E. et al.** (1986). Evaluation de l'influence de la densité des réseaux pluviographiques sur la détermination des lames précipitée . Plan Urbain, rapport LHM,, Paris.
30. **RANDRIANASOLO A**. (2012). Généralisation de l'approche d'ensemble à la prévision hydrologique dans les bassins versants non jaugés,. Paris: AgroParisTech.
31. R**azavi Tara et Paulin Coulibaly, R.** (2013). Streamflow prediction in ungauged basins: Review of regionalization methods. Journal of Hydrologic Engineering, 958-975.
32. **REMENERIAS G., R.** (1976). Hydrologie de l'ingénieur. Paris: Eyrolies.

33. 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.
34. **Sauquet E.** (2006). Mapping mean annual river discharges: Geostatistical developments for incorporating rivernetwork dependencies. Journal of Hydrology 331.
35. S**EMSAR A.** (1995). Mise au point d'une méthodologie d'évaluation et de comparaison desmodèles de simulation hydraulique des réseaux d'assainissement. Thèse de l'INSA Lyon.
36. **Sing V.P.** (1995). Computer models of watershed hydrology. 2e edition. Colorado: Water.
37. **Sivapalan et al.**, S. (2003). IAHS Decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003-2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences. Hydrological Sciences Journal, Vol 48 issue 6, 857-880.

ANNEXES

Annexe 1 : Précipitations moyennes annuelles aux différentes stations du bassin de la Ruvubu

Année	Cankuzo	Gitega aéro	Gisozi	Karuzi	Muriza	Muyinga	Nyamuswaga	Bugarama	Ruvyironza	Rwegura
1980								1429.60	1246.80	1481.00
1981								1745.20	1388.80	1905.70
1982								1377.60	1191.90	1465.50
1983								1542.30	1235.40	1409.60
1984								1632.90	1391.10	1679.00
1985								1763.30	1302.40	1872.00
1986								1878.10	1014.80	1700.50
1987								1800.20	1359.90	1973.10
1988								1915.60	1521.90	1714.80
1989								1346.10	1165.50	1645.00
1990								1445.40	1191.10	1743.80
1991	1165.05	1082.90	1535.20	1136.70	1160.10	955.20	1243.70	1713.40	1212.60	1690.70
1992	1372.90	1073.20	1230.20	1274.90	1130.80	1194.50	1118.50	1526.82	1155.40	1366.52
1993	1194.50	911.00	1285.23	905.34	1191.59	1032.50	882.10	1881.77	1266.80	1564.09
1994	1170.50	1179.70	1318.00	938.00	1165.85	983.20	1224.00	1683.30	1534.30	1595.00

Année	Cankuzo	Gitega aéro	Gisozi	Karuzi	Muriza	Muyinga	Nyamuswaga	Bugarama	Ruvyironza	Rwegura
1995	1234.70	1010.80	1317.90	652.10	1242.60	996.10	1356.00	1380.75	1580.50	1510.00
1996	1092.70	1269.50	1469.00	751.90	1012.10	1041.50	1179.80	1527.25	1537.90	1851.50
1997	1436.70	1442.10	1792.30	1418.40	1550.60	1532.80	1570.80	1636.70	1382.20	1670.50
1998	1034.40	1217.60	1361.70	1426.50	1145.80	854.30	1092.30	1720.11	1221.10	1736.50
1999	973.62	1132.10	1515.00	1316.70	1040.50	824.30	1151.30	1230.00	1239.60	1571.20
2000	955.00	980.60	1500.12	1336.10	1092.80	891.50	1071.50	1628.80	1507.30	1454.30
2001	1067.91	1136.70	1465.00	1822.90	1114.70	1237.20	1089.99	1828.90	1423.40	2016.20
2002	1145.80	1233.42	1274.10	1503.10	1057.30	1019.60	1157.09	1617.80	1265.90	1526.95
2003	1109.30	834.54	1460.90	1089.30	1023.50	1048.70	1108.82	1364.43	1169.20	1618.57
2004	999.80	1149.20	1199.46	1323.10	1028.30	1120.00	1187.40	1370.37	1016.90	1283.40
2005	887.00	781.40	1102.90	987.60	726.10	926.50	1057.60	1714.10	1464.80	1295.58
2006	1109.00	1480.20	1476.10	1700.60	1057.10	1103.40	1386.40	1539.20	1276.60	1602.60
2007	1190.40	1110.40	1463.30	1051.50	989.30	1031.62	1122.40	1485.90	1210.80	1545.48
2008	1042.00	1012.50	1465.70	1012.98	943.40	1095.90	1349.80	1743.50	1352.80	1642.00
2009	1142.20	1117.00	1531.90	1030.50	1090.50	1210.30	1357.80	1528.30	1152.70	1762.93
2010	1139.60	1198.80	1501.20	1063.30	1065.40	972.90	1197.50	1649.90	1504.50	1859.21
2011	1123.68	1145.90	1411.40	1316.30	1144.55	1245.61	1569.20	1762.50	1426.10	1550.60
2012	1184.90	1097.20	1728.30	1083.40	1063.30	1205.40	1523.60	1597.90	1480.10	1775.30

Année	Cankuzo	Gitega aéro	Gisozi	Karuzi	Muriza	Muyinga	Nyamuswaga	Bugarama	Ruvyironza	Rwegura
2013	1140.70	1034.30	1733.50	1070.10	1071.20	1190.40	1332.70	1600.20	1324.90	1773.90
2014	1114.60	1304.20	1573.50	1164.70	1027.90	928.50	1254.80	1726.40	1324.30	1665.30
2015	1208.78	1469.16	1620.83	1266.50	1142.50	1175.93	1515.50	1680.54	1489.50	1508.72
2016	1119.50	1035.60	1408.30	1085.30	996.90	749.30	1465.12	1628.80	1277.10	2016.20
2017	1221.40	937.10	1332.53	1163.30	1035.60	1118.90	1366.70	1831.13	1270.10	
2018	1304.60	987.50	1375.10	1160.50	1527.20	1360.10	1478.30		1203.30	
2019	1223.20	1222.82	1847.60	1292.80	1203.20	1441.30	1294.20		1751.10	
2020	1500.80	1137.60	1417.34	1302.90	1462.90	1039.30	1809.50			

Annexe 2 : Température moyenne annuelles aux différentes stations du bassin de la Ruvubu

Année	Cankuzo	Gitega aéro	Gisozi	Karuzi	Muyinga	Nyamuswaga	Muriza	Ruvyironza	Rwegura
1980									15.85
1981								16.88	15.49
1982								16.70	15.44
1983								17.19	16.18
1984								16.72	15.82
1985								16.71	15.68
1986								16.63	15.94
1987								17.56	17.71
1988								17.12	18.40
1989								16.50	17.19
1990								17.06	16.20
1991	19.58	18.94	16.46	19.17	19.98	18.96	19.18	17.19	16.14
1992	19.73	19.17	16.55	18.58	20.10	18.89	18.42	17.11	16.05
1993	20.09	19.30	16.59	18.95	20.29	18.70	18.65	17.26	16.27
1994	19.80	19.27	16.51	18.92	20.02	18.77	18.21	17.20	16.52
1995	19.85	19.52	16.76	18.84	20.26	19.08	18.47	17.45	16.40
1996	19.56	19.40	16.54	18.83	19.73	19.04	18.20	17.42	16.29
1997	18.02	19.51	16.73	18.91	20.16	19.17	19.17	17.54	16.46
1998	18.06	20.33	17.13	18.27	20.08	18.39	18.74	17.93	17.02
1999	19.14	19.64	16.48	18.59	19.26	18.70	18.27	17.28	16.04
2000	19.25	20.07	16.81	18.90	19.46	18.82	18.52	17.40	16.45
2001	18.57	19.69	16.56	18.76	19.11	18.84	18.35	17.37	16.20
2002	18.92	20.35	16.95	19.25	20.21	19.10	18.64	17.83	16.27
2003	18.90	20.19	16.75	19.43	20.24	19.20	15.34	17.72	16.15
2004	18.58	19.93	16.72	19.93	20.42	19.12	15.83	17.55	16.15
2005	19.12	20.41	17.02	20.61	21.97	19.43	19.16	17.82	16.15
2006	17.94	19.99	16.73	20.09	19.93	19.15	19.06	17.73	16.24
2007	17.49	19.94	16.73	19.94	19.65	19.30	17.70	17.72	16.18

Année	Cankuzo	Gitega aéro	Gisozi	Karuzi	Muyinga	Nyamuswaga	Muriza	Ruvyironza	Rwegura
2008	17.11	19.78	16.35	19.88	19.56	19.25	18.07	17.47	14.70
2009	18.38	20.09	16.70	20.37	20.22	19.40	18.98	17.73	16.32
2010	19.87	20.42	16.93	20.83	20.15	19.61	19.21	18.00	16.58
2011	20.46	20.04	16.54	20.73	20.28	19.46	18.62	17.67	14.55
2012	20.84	20.03	16.31	20.88	20.37	19.68	19.54	17.33	16.02
2013	20.93	20.23	16.37	21.32	20.55	19.94	17.57	17.14	16.07
2014	20.91	20.31	16.55	21.39	20.33	20.00	18.10	17.43	16.09
2015	21.24	20.60	17.20	21.88	20.89	20.42	20.07	18.05	16.49
2016	21.19	21.00	16.95	22.04	20.79	20.28	19.67	18.35	16.56
2017	21.10	20.53	16.53	21.59	20.39	20.16	19.60		16.30
2018	20.67	20.34	15.68	20.01	19.71	20.06	19.64		15.92
2019	21.09	20.14	16.99	20.17	20.17	20.44	19.97		16.70
2020	20.88	20.23	17.07	19.08	20.18	20.33	20.14		16.17

Annexe 3 : Tableau de calcul de la Précipitation moyenne et évapotranspiration moyenne dans le bassin de la Kayongozi-Nyenkanda

	$P_{Cankuzo}$	$P_{Muyinga}$	Pm	$ETP_{Cankuzo}$	$ETP_{Muyinga}$	ETP_m
Superficie	**573.809**	**102.164**	**675.973**	**573.809**	**102.164**	**675.973**
1980	1159.64	1071.87	**1146.38**			
1981	1165.00	1076.60	**1151.64**	735.01	724.27	**733.39**
1982	1182.49	1092.05	**1168.82**	734.83	724.51	**733.27**
1983	1158.24	1070.63	**1145.00**	734.87	725.58	**733.47**
1984	1163.59	1075.36	**1150.26**	734.78	725.60	**733.39**
1985	1182.77	1092.30	**1169.10**	734.84	725.62	**733.45**
1986	1171.85	1082.65	**1158.37**	734.79	725.61	**733.40**
1987	1236.42	1051.36	**1208.45**	734.99	725.65	**733.58**
1988	1178.93	1088.91	**1165.32**	734.89	725.58	**733.48**
1989	1198.88	1106.53	**1184.92**	734.80	724.26	**733.21**
1990	1372.90	1067.76	**1326.78**	734.85	724.26	**733.25**

	$P_{Cankuzo}$	$P_{Muyinga}$	Pm	$ETP_{Cankuzo}$	$ETP_{Muyinga}$	ETP_{m}
Superficie	**573.809**	**102.164**	**675.973**	**573.809**	**102.164**	**675.973**
1991	1165.05	955.20	**1133.33**	754.16	712.09	**747.80**
1992	1160.50	1067.80	**1146.49**	756.06	728.99	**751.97**
1993	1194.50	1032.50	**1170.02**	761.73	734.02	**757.54**
1994	1170.50	983.20	**1142.19**	753.80	730.05	**750.21**
1995	1234.70	996.10	**1198.64**	749.38	730.74	**746.56**
1996	1092.70	1041.50	**1084.96**	736.19	711.76	**732.49**
1997	1436.70	1532.80	**1451.22**	714.84	725.69	**716.48**
1998	1034.40	854.30	**1007.18**	703.26	720.20	**705.82**
1999	973.62	824.30	**951.05**	712.32	684.66	**708.14**
2000	955.00	891.50	**945.40**	707.61	689.40	**704.85**
2001	1067.91	1237.20	**1093.50**	693.32	690.99	**692.97**
2002	1145.80	1019.60	**1126.73**	696.14	729.40	**701.17**
2003	1109.30	1048.70	**1100.14**	691.51	734.39	**697.99**
2004	999.80	1120.00	**1017.97**	683.30	729.15	**690.23**
2005	887.00	926.50	**892.97**	687.08	756.90	**697.63**
2006	1109.00	1103.40	**1108.15**	652.54	716.49	**662.20**
2007	1190.40	1031.62	**1166.40**	637.39	704.57	**647.54**
2008	1042.00	1095.90	**1050.15**	624.86	698.49	**635.99**
2009	1142.20	1210.30	**1152.49**	669.33	723.40	**677.50**
2010	1139.60	972.90	**1114.41**	736.21	723.40	**734.28**
2011	1123.68	1245.61	**1142.11**	778.99	737.55	**772.73**
2012	1184.90	1205.40	**1188.00**	788.31	728.83	**779.32**
2013	1140.70	1190.40	**1148.21**	789.03	736.49	**781.09**
2014	1114.60	928.50	**1086.47**	797.96	727.65	**787.33**
2015	1208.78	1175.93	**1203.82**	756.01	778.91	**759.47**
2016	1119.50	749.30	**1063.55**	757.03	743.13	**754.93**
2017	1221.40	1118.90	**1205.91**	754.35	739.32	**752.08**
2018	1304.60	1360.10	**1312.99**	794.13	709.55	**781.34**
2019	1223.20	1441.30	**1256.16**	753.08	723.40	**748.60**
2020	1500.80	1039.30	**1431.05**	751.45	723.40	**747.21**

Annexe 4 : Tableau de calcul de la Précipitation moyenne et évapotranspiration moyenne dans le bassin de la Nyabaha-Mubuga

	$P_{Cankuzo}$	**$P_{Ruvyironza}$**	**P_{Muriza}**	**$P_{Gitega\ aero}$**	**Pm**	**$ETP_{Cankuzo}$**	**$ETP_{Ruvyironza}$**	**ETP_{Muriza}**	**$ETP_{Gitega\ aero}$**	**ETPm**
Ai / Année	**175.97**	**1.86**	**757.59**	**3.03**	**938.45**	**175.97**	**1.86**	**757.59**	**3.03**	**938.45**
1980	1159.64	1203.30	1095.21	1059.93	**1107.39**					
1981	1165.00	1246.80	1100.87	1078.43	**1113.11**	735.01	774.21	688.49	723.43	**697.50**
1982	1182.49	1388.80	1119.33	1138.79	**1131.77**	734.83	769.11	665.97	719.54	**679.26**
1983	1158.24	1191.90	1093.73	1055.09	**1105.89**	734.87	781.50	671.46	596.36	**683.32**
1984	1163.59	1235.40	1099.38	1073.58	**1111.61**	734.78	770.07	660.00	596.36	**674.03**
1985	1182.77	1391.10	1119.63	1139.76	**1132.07**	734.84	769.63	667.70	596.36	**680.26**
1986	1171.85	1302.40	1108.10	1102.06	**1120.41**	734.79	768.22	660.84	596.36	**674.71**
1987	1236.42	1014.80	1070.70	979.81	**1101.37**	734.99	792.29	686.23	596.36	**695.29**
1988	1178.93	1359.90	1115.57	1126.50	**1127.97**	734.89	780.34	673.87	596.36	**685.27**
1989	1198.88	1521.90	1136.63	1195.37	**1149.26**	734.80	763.97	662.41	596.36	**675.97**
1990	1372.90	1165.50	1090.30	1043.87	**1143.29**	734.85	778.70	668.85	596.36	**681.21**
1991	1165.05	1191.10	1160.10	1082.90	**1160.84**	754.16	781.90	663.68	719.25	**681.06**
1992	1160.50	1212.60	1130.80	1073.20	**1136.34**	756.06	779.89	671.79	722.29	**687.97**
1993	1194.50	1155.40	1191.59	911.00	**1191.16**	761.73	784.69	593.70	720.83	**626.00**
1994	1170.50	1266.80	1165.85	1179.70	**1166.97**	753.80	782.99	618.40	720.26	**644.45**
1995	1234.70	1534.30	1242.60	1010.80	**1240.95**	749.38	789.24	686.53	720.27	**698.63**
1996	1092.70	1580.50	1012.10	1269.50	**1029.17**	736.19	788.18	683.43	720.94	**693.65**

	$P_{Cankuzo}$	$P_{Ruvyironza}$	P_{Muriza}	$P_{Gitega\ aero}$	Pm	$ETP_{Cankuzo}$	$ETP_{Ruvyironza}$	ETP_{Muriza}	$ETP_{Gitega\ aero}$	ETPm
Ai / Année	**175.97**	**1.86**	**757.59**	**3.03**	**938.45**	**175.97**	**1.86**	**757.59**	**3.03**	**938.45**
1997	1436.70	1537.90	1550.60	1442.10	**1528.87**	714.84	772.61	677.21	693.89	**684.51**
1998	1034.40	1382.20	1145.80	1217.60	**1125.61**	703.26	782.18	687.70	719.20	**690.90**
1999	973.62	1221.10	1040.50	1132.10	**1028.61**	712.32	784.40	680.92	729.67	**687.17**
2000	955.00	1239.60	1092.80	980.60	**1066.89**	707.61	788.76	688.07	729.97	**692.07**
2001	1067.91	1507.30	1114.70	1136.70	**1106.77**	693.32	787.32	672.09	731.23	**676.49**
2002	1145.80	1423.40	1057.30	1233.42	**1075.19**	696.14	799.62	697.27	736.97	**697.39**
2003	1109.30	1265.90	1023.50	834.54	**1039.46**	691.51	797.17	655.52	732.40	**662.80**
2004	999.80	1169.20	1028.30	1149.20	**1023.63**	683.30	792.86	659.67	730.09	**664.59**
2005	887.00	1016.90	726.10	781.40	**757.03**	687.08	799.40	712.32	740.65	**707.85**
2006	1109.00	1464.80	1057.10	1480.20	**1069.01**	652.54	797.15	700.22	742.01	**691.61**
2007	1190.40	1276.60	989.30	1110.40	**1027.97**	637.39	796.61	698.37	741.15	**687.26**
2008	1042.00	1210.80	943.40	1012.50	**962.64**	624.86	789.71	700.05	734.13	**686.24**
2009	1142.20	1352.80	1090.50	1117.00	**1100.80**	669.33	797.37	708.00	741.49	**701.03**
2010	1139.60	1152.70	1065.40	1198.80	**1079.92**	736.21	803.96	714.72	749.65	**719.04**
2011	1123.68	1504.50	1144.55	1145.90	**1141.35**	778.99	795.42	682.60	743.98	**701.10**
2012	1184.90	1426.10	1063.30	1097.20	**1086.93**	788.31	786.43	695.98	742.94	**713.63**
2013	1140.70	1480.10	1071.20	1034.30	**1084.92**	789.03	781.55	697.46	746.75	**714.96**
2014	1114.60	1324.90	1027.90	1304.20	**1045.64**	797.96	788.59	695.43	758.69	**715.04**

	$P_{Cankuzo}$	$P_{Ruvyironza}$	P_{Muriza}	$P_{Gitega\ aero}$	Pm	$ETP_{Cankuzo}$	$ETP_{Ruvyironza}$	ETP_{Muriza}	$ETP_{Gitega\ aero}$	ETPm
Ai / Année	**175.97**	**1.86**	**757.59**	**3.03**	**938.45**	**175.97**	**1.86**	**757.59**	**3.03**	**938.45**
2015	1208.78	1324.30	1142.50	1469.16	**1156.34**	756.01	805.58	701.71	766.72	**712.30**
2016	1119.50	1489.50	996.90	1035.60	**1020.99**	757.03	814.01	701.85	773.29	**712.65**
2017	1221.40	1277.10	1035.60	937.10	**1070.60**	754.35	791.83	697.59	760.10	**708.62**
2018	1304.60	1270.10	1527.20	987.50	**1483.21**	794.13	811.40	689.14	762.06	**709.31**
2019	1223.20	1277.10	1203.20	1222.82	**1207.16**	753.08	825.43	687.49	769.81	**700.33**
2020	1500.80	1751.10	1462.90	1137.60	**1469.53**	751.45	827.98	693.62	774.74	**704.99**

Annexe 5 :Tableau de calcul de la Précipitation moyenne et évapotranspiration moyenne dans le bassin de la Ruvubu-Gitega

	$P_{Muyinga}$	$P_{Nyamuswaga}$	$P_{Rwegura}$	$P_{Bugarama}$	P_{Gisozi}	$P_{Gitega\ aero}$	P_{Karuzi}	Pm	$ETP_{Muyinga}$	$ETP_{Nyamuswaga}$	$ETP_{Rwegura}$	$ETP_{Bugarama}$	ETP_{Gisozi}
Ai / Année	**240.53**	**1036.32**	**571.21**	**907.90**	**273.79**	**393.81**	**757.97**	**4181.53**	**240.53**	**1036.32**	**571.21**	**907.90**	**273.79**
1980	1071.9	1216.8	1634.5	1898.4	1435.0	1059.9	1172.0	**1404.91**	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1981	1076.6	1236.1	1481.0	1429.6	1440.5	1078.4	1177.1	**1290.22**	724.3	613.7	736.1	728.9	676.3
1982	1092.1	1298.9	1905.7	1745.2	1458.3	1138.8	1193.6	**1443.08**	724.5	610.7	734.6	727.0	677.3
1983	1070.6	1211.7	1465.5	1377.6	1433.6	1055.1	1170.7	**1266.64**	725.6	611.4	754.0	737.9	678.4

	$P_{Muyinga}$	$P_{Nyamuswaga}$	$P_{Rwegura}$	$P_{Bugarama}$	P_{Gisozi}	$P_{Gitega\ aero}$	P_{Karuzi}	Pm	$ETP_{Muyinga}$	$ETP_{Nyamuswaga}$	$ETP_{Rwegura}$	$ETP_{Bugarama}$	ETP_{Gisozi}
Ai / Année	**240.53**	**1036.32**	**571.21**	**907.90**	**273.79**	**393.81**	**757.97**	**4181.53**	**240.53**	**1036.32**	**571.21**	**907.90**	**273.79**
1984	1075.4	1231.0	1409.6	1542.3	1439.1	1073.6	1175.8	**1302.83**	725.6	609.9	744.7	731.1	678.4
1985	1092.3	1300.0	1679.0	1632.9	1458.6	1139.8	1193.9	**1388.16**	725.6	610.9	741.3	729.8	678.4
1986	1082.7	1260.7	1872.0	1763.3	1447.5	1102.1	1183.6	**1426.39**	725.6	610.0	748.1	731.6	678.4
1987	1051.4	1133.3	1700.5	1878.1	1411.4	979.8	1150.1	**1374.58**	725.6	613.4	796.0	755.6	678.5
1988	1088.9	1286.1	1973.1	1800.2	1454.7	1126.5	1190.3	**1458.88**	725.6	611.7	814.1	757.7	678.6
1989	1106.5	1357.9	1714.8	1915.6	1475.0	1195.4	1209.1	**1478.68**	724.3	610.2	782.8	741.8	678.5
1990	1067.8	1200.1	1645.0	1346.1	1430.3	1043.9	1167.6	**1279.43**	724.3	611.1	754.5	737.2	678.3
1991	955.2	1243.7	1743.8	1445.4	1535.2	1082.9	1136.7	**1323.76**	712.1	623.1	752.8	736.8	675.6
1992	1067.8	1118.5	1690.7	1713.4	1230.2	1073.2	1274.9	**1354.31**	729.0	610.6	750.7	734.3	672.2
1993	1032.5	882.1	1366.5	1526.8	1285.2	911.0	905.3	**1130.24**	734.0	601.4	732.2	729.6	671.9
1994	983.2	1224.0	1564.1	1881.8	1318.0	1179.7	938.0	**1349.56**	730.1	611.8	738.4	731.1	672.0
1995	996.1	1356.0	1595.0	1683.3	1317.9	1010.8	652.1	**1276.41**	730.7	617.3	708.1	724.9	677.5
1996	1041.5	1179.8	1510.0	1380.8	1469.0	1269.5	751.9	**1210.40**	711.8	619.6	757.7	740.2	674.7
1997	1532.8	1570.8	1851.5	1527.2	1792.3	1442.1	1418.4	**1572.26**	725.7	622.0	739.3	730.3	679.0
1998	854.3	1092.3	1670.5	1636.7	1361.7	1217.6	1426.5	**1365.81**	720.2	595.5	723.7	730.8	686.5
1999	824.3	1151.3	1736.5	1720.1	1515.0	1132.1	1316.7	**1387.92**	684.7	612.5	725.8	728.3	674.6
2000	891.5	1071.5	1571.2	1230.0	1500.1	980.6	1336.1	**1231.29**	689.4	602.3	761.7	742.5	677.0
2001	1237.2	1090.0	1454.3	1628.8	1465.0	1136.7	1822.9	**1427.02**	691.0	628.2	754.7	740.8	680.5

	$P_{Muyinga}$	$P_{Nyamuswaga}$	$P_{Rwegura}$	$P_{Bugarama}$	P_{Gisozi}	$P_{Gitega\ aero}$	P_{Karuzi}	Pm	$ETP_{Muyinga}$	$ETP_{Nyamuswaga}$	$ETP_{Rwegura}$	$ETP_{Bugarama}$	ETP_{Gisozi}
Ai / Année	**240.53**	**1036.32**	**571.21**	**907.90**	**273.79**	**393.81**	**757.97**	**4181.53**	**240.53**	**1036.32**	**571.21**	**907.90**	**273.79**
2002	1019.6	1157.1	2016.2	1828.9	1274.1	1233.4	1503.1	**1489.97**	729.4	618.0	756.2	746.4	683.2
2003	1048.7	1108.8	1527.0	1617.8	1460.9	834.5	1089.3	**1266.67**	734.4	621.3	753.2	742.9	678.2
2004	1120.0	1187.4	1618.6	1364.4	1199.5	1149.2	1323.1	**1302.65**	729.1	612.2	753.2	740.4	675.2
2005	926.5	1057.6	1283.4	1370.4	1102.9	781.4	987.6	**1113.08**	756.9	625.4	753.2	744.6	681.2
2006	1103.4	1386.4	1295.6	1714.1	1476.1	1480.2	1700.6	**1500.53**	716.5	624.3	743.6	740.4	680.5
2007	1031.6	1122.4	1602.6	1539.2	1463.3	1110.4	1051.5	**1281.61**	704.6	635.1	743.4	741.6	684.9
2008	1095.9	1349.8	1545.5	1485.9	1465.7	1012.5	1013.0	**1306.24**	698.5	625.9	684.1	714.8	670.7
2009	1210.3	1357.8	1642.0	1743.5	1531.9	1117.0	1030.5	**1401.27**	723.4	628.7	758.3	743.1	673.6
2010	972.9	1197.5	1762.9	1528.3	1501.2	1198.8	1063.3	**1329.33**	723.4	627.9	754.6	745.6	678.1
2011	1245.6	1569.2	1859.2	1649.9	1411.4	1145.9	1316.3	**1511.68**	737.6	642.3	714.0	728.1	674.9
2012	1205.4	1523.6	1550.6	1762.5	1728.3	1097.2	1083.4	**1454.31**	728.8	635.2	739.1	729.7	663.6
2013	1190.4	1332.7	1775.3	1597.9	1733.5	1034.3	1070.1	**1393.10**	736.5	643.0	751.2	730.7	659.2
2014	928.5	1254.8	1773.9	1600.2	1573.5	1304.2	1164.7	**1391.12**	727.6	650.6	751.8	736.8	669.9
2015	1175.9	1515.5	1665.3	1726.4	1620.8	1469.2	1266.5	**1519.62**	778.9	665.7	762.6	750.1	682.1
2016	749.3	1465.1	1508.7	1680.5	1408.3	1035.6	1085.3	**1363.65**	743.1	641.7	744.1	744.7	676.2
2017	1118.9	1366.7	1637.4	1604.3	1332.5	937.1	1163.3	**1361.45**	739.3	652.1	757.9	738.5	665.8
2018	1360.1	1478.3	1637.1	1603.8	1375.1	987.5	1160.5	**1409.87**	709.5	663.4	746.8	745.2	677.3
2019	1441.3	1294.2	1636.8	1594.7	1847.6	1222.8	1292.8	**1443.97**	723.4	698.5	698.5	736.1	684.5

	$P_{Muyinga}$	$P_{Nyamuswaga}$	$P_{Rwegura}$	$P_{Bugarama}$	P_{Gisozi}	$P_{Gitega\ aero}$	P_{Karuzi}	Pm	$ETP_{Muyinga}$	$ETP_{Nyamuswaga}$	$ETP_{Rwegura}$	$ETP_{Bugarama}$	ETP_{Gisozi}
Ai / Année	**240.53**	**1036.32**	**571.21**	**907.90**	**273.79**	**393.81**	**757.97**	**4181.53**	**240.53**	**1036.32**	**571.21**	**907.90**	**273.79**
2020	1039.3	1809.5	1656.3	1635.6	1417.3	1137.6	1302.9	**1525.73**	723.4	715.0	730.3	748.6	687.5

Annexe 6 :Tableau de calcul de la Précipitation moyenne et évapotranspiration moyenne dans le bassin de la Ruvyironza-Kibaya

	P_{Gisozi}	$P_{Ruvyironza}$	P_{Muriza}	$P_{Gitega\ aero}$	Pm	ETP_{Gisozi}	$ETP_{Ruvyironza}$	ETP_{Muriza}	$ETP_{Gitega\ aero}$	ETPm
Ai / Année	**573.00**	**561.56**	**209.89**	**638.32**	**1982.78**	**573.00**	**561.56**	**209.89**	**638.32**	**1982.78**
1980	1435.03	1203.30	1095.21	1059.93	**1212.67**					
1981	1440.49	1246.80	1100.87	1078.43	**1233.12**	676.28	774.21	738.49	723.43	**725.78**
1982	1458.33	1388.80	1119.33	1138.79	**1299.88**	677.30	769.11	715.97	719.54	**720.99**
1983	1433.60	1191.90	1093.73	1055.09	**1207.31**	678.36	781.50	721.46	596.36	**685.73**
1984	1439.06	1235.40	1099.38	1073.58	**1227.76**	678.39	770.07	710.00	596.36	**681.29**
1985	1458.62	1391.10	1119.63	1139.76	**1300.96**	678.38	769.63	717.70	596.36	**681.98**
1986	1447.48	1302.40	1108.10	1102.06	**1259.26**	678.40	768.22	710.84	596.36	**680.86**
1987	1411.36	1014.80	1070.70	979.81	**1124.05**	678.53	792.29	736.23	596.36	**690.41**
1988	1454.70	1359.90	1115.57	1126.50	**1286.29**	678.59	780.34	723.87	596.36	**685.72**
1989	1475.04	1521.90	1136.63	1195.37	**1362.45**	678.50	763.97	712.41	596.36	**679.85**
1990	1430.28	1165.50	1090.30	1043.87	**1194.90**	678.34	778.70	718.85	596.36	**684.66**
1991	1535.20	1191.10	1160.10	1082.90	**1252.43**	675.64	781.90	713.68	719.25	**723.80**
1992	1230.20	1212.60	1130.80	1073.20	**1164.15**	672.24	779.89	721.79	722.29	**724.09**
1993	1285.23	1155.40	1191.59	911.00	**1118.07**	671.85	784.69	643.70	720.83	**716.60**
1994	1318.00	1266.80	1165.85	1179.70	**1242.87**	671.98	782.99	668.40	720.26	**718.58**
1995	1317.90	1534.30	1242.60	1010.80	**1272.35**	677.47	789.24	736.53	720.27	**729.16**
1996	1469.00	1580.50	1012.10	1269.50	**1387.99**	674.75	788.18	733.43	720.94	**727.96**

	P_{Gisozi}	$P_{Ruvyironza}$	P_{Muriza}	$P_{Gitega\ aero}$	**Pm**	ETP_{Gisozi}	$ETP_{Ruvyironza}$	ETP_{Muriza}	$ETP_{Gitega\ aero}$	**ETPm**
Ai / Année	**573.00**	**561.56**	**209.89**	**638.32**	**1982.78**	**573.00**	**561.56**	**209.89**	**638.32**	**1982.78**
1997	1792.30	1537.90	1550.60	1442.10	**1581.92**	678.98	772.61	727.21	693.89	**715.40**
1998	1361.70	1382.20	1145.80	1217.60	**1298.26**	686.50	782.18	737.70	719.20	**729.54**
1999	1515.00	1221.10	1040.50	1132.10	**1258.26**	674.62	784.40	730.92	729.67	**729.39**
2000	1500.12	1239.60	1092.80	980.60	**1215.97**	677.02	788.76	738.07	729.97	**732.18**
2001	1465.00	1507.30	1114.70	1136.70	**1334.21**	680.50	787.32	722.09	731.23	**731.49**
2002	1274.10	1423.40	1057.30	1233.42	**1280.34**	683.18	799.62	747.27	736.97	**740.26**
2003	1460.90	1265.90	1023.50	834.54	**1157.72**	678.20	797.17	705.52	732.40	**732.24**
2004	1199.46	1169.20	1028.30	1149.20	**1156.59**	675.18	792.86	709.67	730.09	**729.84**
2005	1102.90	1016.90	726.10	781.40	**935.15**	681.24	799.40	762.32	740.65	**742.41**
2006	1476.10	1464.80	1057.10	1480.20	**1429.87**	680.50	797.15	750.22	742.01	**740.72**
2007	1463.30	1276.60	989.30	1110.40	**1246.64**	684.88	796.61	748.37	741.15	**741.36**
2008	1465.70	1210.80	943.40	1012.50	**1192.32**	670.70	789.71	750.05	734.13	**733.23**
2009	1531.90	1352.80	1090.50	1117.00	**1300.88**	673.64	797.37	758.00	741.49	**739.46**
2010	1501.20	1152.70	1065.40	1198.80	**1259.01**	678.13	803.96	764.72	749.65	**745.96**
2011	1411.40	1504.50	1144.55	1145.90	**1324.05**	674.90	795.42	732.60	743.98	**737.38**
2012	1728.30	1426.10	1063.30	1097.20	**1369.14**	663.61	786.43	745.98	742.94	**732.65**
2013	1733.50	1480.10	1071.20	1034.30	**1366.53**	659.20	781.55	747.46	746.75	**731.38**
2014	1573.50	1324.90	1027.90	1304.20	**1358.64**	669.91	788.59	745.43	758.69	**740.10**

	P_{Gisozi}	$P_{Ruvyironza}$	P_{Muriza}	$P_{Gitega\ aero}$	Pm	ETP_{Gisozi}	$ETP_{Ruvyironza}$	ETP_{Muriza}	$ETP_{Gitega\ aero}$	ETPm
Ai / Année	**573.00**	**561.56**	**209.89**	**638.32**	**1982.78**	**573.00**	**561.56**	**209.89**	**638.32**	**1982.78**
2015	1620.83	1324.30	1142.50	1469.16	**1437.38**	682.11	805.58	751.71	766.72	**751.68**
2016	1408.30	1489.50	996.90	1035.60	**1267.76**	676.16	814.01	751.85	773.29	**754.48**
2017	1332.53	1277.10	1035.60	937.10	**1158.10**	665.81	791.83	747.59	760.10	**740.51**
2018	1375.10	1270.10	1527.20	987.50	**1236.68**	677.30	811.40	739.14	762.06	**749.12**
2019	1847.60	1277.10	1203.20	1222.82	**1416.67**	684.48	825.43	737.49	769.81	**757.48**
2020	1417.34	1751.10	1462.90	1137.60	**1426.63**	687.46	827.98	743.62	774.74	**761.30**

Annexe 7 : Synthèse des calculs des modèles validés dans le sous bassin de la Kayongozi-Nyenkanda

Modèle			Base météorologique			Base mixte			Base physique	
Données				Modèle SCS		Modèle Q_A_Hm			Modèle Q_L_Dd	
Année	P (mm)	Q_{ob}(m^3/s)	E(mm)	b	Q_{ca}(m^3/s)	α	β	Q_{ca}(m^3/s)	α	Q_{ca}(m^3/s)
1986	1158.37	**6.80**	733.40	2.46	**6.70**	0.0035	0.0025	**6.99**	0.10	**6.76**
1987	1208.45	**6.85**	733.58	2.49	**7.24**	0.0036	0.0026	**7.51**	0.14	**7.24**
1988	1165.32	**7.21**	733.48	2.46	**6.77**	0.0035	0.0025	**7.06**	0.54	**6.82**
1989	1184.92	**7.32**	733.21	2.47	**6.99**	0.0035	0.0025	**7.26**	0.71	**7.01**
1990	1326.78	**8.65**	733.25	2.56	**8.57**	0.0037	0.0027	**8.80**	4.74	**8.38**
1991	1133.33	**6.53**	747.80	2.44	**6.28**	0.0035	0.0025	**6.74**	0.00	**6.52**
1992	1146.49	**6.44**	751.97	2.45	**6.37**	0.0035	0.0025	**6.87**	0.00	**6.64**
1993	1170.02	**6.71**	757.54	2.46	**6.56**	0.0035	0.0025	**7.11**	0.05	**6.87**
1994	1142.19	**6.38**	750.21	2.45	**6.34**	0.0035	0.0025	**6.83**	0.01	**6.60**
1995	1198.64	**7.07**	746.56	2.48	**6.99**	0.0036	0.0026	**7.40**	0.35	**7.15**
1996	1084.96	**5.58**	732.49	2.41	**5.93**	0.0035	0.0025	**6.27**	0.80	**6.05**
1997	1451.22	**9.51**	716.48	2.63	**10.24**	0.0038	0.0028	**10.30**	9.22	**9.58**
1998	1007.18	**5.72**	705.82	2.37	**5.38**	0.0034	0.0024	**5.56**	0.57	**5.30**
1999	951.05	**5.02**	708.14	2.33	**4.78**	0.0034	0.0024	**5.07**	2.11	**4.76**
2000	945.40	**4.18**	704.85	2.33	**4.75**	0.0033	0.0023	**5.03**	5.25	**4.71**
2001	1093.50	**5.86**	692.97	2.42	**6.44**	0.0035	0.0025	**6.36**	0.38	**6.13**
2002	1126.73	**6.69**	701.17	2.44	**6.71**	0.0035	0.0025	**6.68**	0.04	**6.45**
2003	1100.14	**5.88**	697.99	2.42	**6.46**	0.0035	0.0025	**6.42**	0.36	**6.20**
2004	1017.97	**4.85**	690.23	2.37	**5.65**	0.0034	0.0024	**5.66**	2.64	**5.40**
2005	892.97	**4.31**	697.63	2.30	**4.29**	0.0033	0.0023	**4.60**	4.69	**4.20**
2006	1108.15	**6.78**	662.20	2.43	**6.96**	0.0035	0.0025	**6.50**	0.09	**6.27**
2007	1166.40	**7.65**	647.54	2.46	**7.81**	0.0035	0.0025	**7.07**	1.37	**6.84**
2008	1050.15	**6.78**	635.99	2.39	**6.60**	0.0034	0.0024	**5.95**	0.09	**5.71**
2009	1152.49	**7.40**	677.50	2.45	**7.28**	0.0035	0.0025	**6.93**	0.86	**6.70**
2010	1114.41	**6.44**	734.28	2.43	**6.22**	0.0035	0.0025	**6.56**	0.00	**6.33**
2011	1142.11	**6.33**	772.73	2.45	**6.11**	0.0035	0.0025	**6.83**	0.02	**6.60**
2012	1188.00	**7.05**	779.32	2.48	**6.52**	0.0036	0.0026	**7.29**	0.33	**7.04**
2013	1148.21	**6.82**	781.09	2.45	**6.09**	0.0035	0.0025	**6.89**	0.12	**6.66**
2014	1086.47	**5.57**	787.33	2.41	**5.40**	0.0035	0.0025	**6.29**	0.83	**6.06**
2015	1203.82	**6.59**	759.47	2.49	**6.90**	0.0036	0.0026	**7.46**	0.01	**7.20**
2016	1063.55	**5.78**	754.93	2.40	**5.48**	0.0034	0.0024	**6.07**	0.49	**5.84**
Critère de calage de Nash				**NSE**	**88.46**			**80.13**		**86.02**

Annexe 8 : Synthèse des calculs des modèles validés dans le sous bassin de la Nyabaha-Mubuga

Modèle			Base météorologique			Base mixte			Base physique	
	Données			Modèle SCS		Modèle Q_A_Hm			Modèle Q_L_Dd	
Année	P (mm)	$Q_{ob}(m^3/s)$	E(mm)	b	$Q_{ca}(m^3/s)$	α	β	$Q_{ca}(m^3/s)$	α	$Q_{ca}(m^3/s)$
1986	1120.41	**13.58**	**0.00**	**1.90**	**12.42**	0.00398	0.00298	12.48	0.17	12.26
1987	1101.37	**12.33**	**0.00**	**1.89**	**11.70**	0.00395	0.00295	12.08	0.16	11.87
1988	1127.97	**12.59**	**0.00**	**1.90**	**12.39**	0.00399	0.00299	12.65	0.17	12.42
1989	1149.26	**13.23**	**0.00**	**1.90**	**12.98**	0.00402	0.00302	13.12	0.17	12.86
1990	1143.29	**13.02**	**0.00**	**1.90**	**12.77**	0.00401	0.00301	12.98	0.17	12.73
1991	1160.84	**12.49**	**0.00**	**1.90**	**13.14**	0.00404	0.00304	13.38	0.18	13.10
1992	1136.34	**12.72**	**0.00**	**1.90**	**12.52**	0.00400	0.00300	12.83	0.17	12.59
1993	1191.16	**14.24**	**0.00**	**1.90**	**14.76**	0.00408	0.00308	14.07	0.19	13.72
1994	1166.97	**13.74**	**0.00**	**1.90**	**13.91**	0.00405	0.00305	13.52	0.18	13.22
1995	1240.95	**15.33**	**0.00**	**1.91**	**14.49**	0.00415	0.00315	15.26	0.20	14.75
1996	1029.17	**10.72**	**0.00**	**1.89**	**10.31**	0.00385	0.00285	10.60	0.14	10.37
1997	1528.87	**20.57**	**0.00**	**1.95**	**21.04**	0.00457	0.00357	23.38	0.28	20.71
1998	1125.61	**14.49**	**0.00**	**1.90**	**12.25**	0.00399	0.00299	12.60	0.17	12.37
1999	1028.61	**9.13**	**0.00**	**1.89**	**10.39**	0.00385	0.00285	10.59	0.14	10.36
2000	1066.89	**11.51**	**0.00**	**1.89**	**11.06**	0.00390	0.00290	11.36	0.15	11.15
2001	1106.77	**12.87**	**0.00**	**1.89**	**12.11**	0.00396	0.00296	12.19	0.16	11.98
2002	1075.19	**10.42**	**0.00**	**1.89**	**11.15**	0.00392	0.00292	11.53	0.15	11.33
2003	1039.46	**9.77**	**0.00**	**1.89**	**10.98**	0.00386	0.00286	10.81	0.14	10.59
2004	1023.63	**9.34**	**0.00**	**1.88**	**10.64**	0.00384	0.00284	10.50	0.14	10.26
2005	757.03	**5.68**	**0.00**	**1.85**	**5.29**	0.00346	0.00246	6.05	0.06	4.75
2006	1069.01	**8.98**	**0.00**	**1.89**	**11.11**	0.00391	0.00291	11.40	0.15	11.20
2007	1027.97	**10.67**	**0.00**	**1.89**	**10.38**	0.00385	0.00285	10.58	0.14	10.35
2008	962.64	**8.82**	**0.00**	**1.88**	**9.14**	0.00375	0.00275	9.35	0.12	9.00
2009	1100.80	**10.97**	**0.00**	**1.89**	**11.60**	0.00395	0.00295	12.06	0.16	11.86
2010	1079.92	**9.22**	**0.00**	**1.89**	**10.91**	0.00392	0.00292	11.63	0.15	11.42
2011	1141.35	**12.83**	**0.00**	**1.90**	**12.41**	0.00401	0.00301	12.94	0.17	12.69
2012	1086.93	**11.51**	**0.00**	**1.89**	**11.13**	0.00393	0.00293	11.77	0.16	11.57
2013	1084.92	**12.64**	**0.00**	**1.89**	**11.07**	0.00393	0.00293	11.73	0.16	11.53
2014	1045.64	**11.34**	**0.00**	**1.89**	**10.31**	0.00387	0.00287	10.93	0.14	10.71
2015	1156.34	**12.20**	**0.00**	**1.90**	**12.53**	0.00403	0.00303	13.28	0.18	13.00
2016	1020.99	**11.11**	**0.00**	**1.88**	**9.87**	0.00384	0.00284	10.44	0.14	10.20
Critère de calage de Nash				**NSE**	**88.46**			**82.25**		**86.38**

Annexe 9 : Synthèse des calculs des modèles validés dans le sous bassin de la Ruvubu-Gitega

Modèle			Base météorologique			Base mixte			Base physique	
	Données			Modèle SCS		Modèle Q_A_Hm			Modèle Q_L_Dd	
Année	P (mm)	$Q_{ob}(m^3/s)$	E(mm)	b	$Q_{ca}(m^3/s)$	α	β	$Q_{ca}(m^3/s)$	α	$Q_{ca}(m^3/s)$
1986	1426.39	**81.14**	**0.00**	**2.15**	**77.73**	0.00413	0.00313	76.73	0.53	76.71
1987	1374.58	**70.98**	**0.00**	**2.14**	**71.81**	0.00408	0.00308	71.90	0.50	72.06
1988	1458.88	**81.31**	**0.00**	**2.15**	**79.34**	0.00416	0.00316	79.84	0.55	79.62
1989	1478.68	**88.38**	**0.00**	**2.16**	**81.97**	0.00418	0.00318	81.78	0.56	81.40
1990	1279.43	**58.76**	**0.00**	**2.12**	**64.10**	0.00399	0.00299	63.50	0.44	63.53
1991	1323.76	**65.44**	**0.00**	**2.13**	**66.84**	0.00403	0.00303	67.34	0.47	67.51
1992	1354.31	**62.43**	**0.00**	**2.13**	**69.94**	0.00406	0.00306	70.06	0.48	70.25
1993	1130.24	**52.93**	**0.00**	**2.09**	**50.84**	0.00384	0.00284	51.52	0.35	50.16
1994	1349.56	**69.60**	**0.00**	**2.13**	**69.91**	0.00405	0.00305	69.63	0.48	69.82
1995	1276.41	**62.83**	**0.00**	**2.12**	**63.75**	0.00398	0.00298	63.25	0.44	63.26
1996	1210.40	**58.87**	**0.00**	**2.11**	**57.25**	0.00392	0.00292	57.78	0.40	57.35
1997	1572.26	**97.51**	**0.00**	**2.17**	**90.96**	0.00426	0.00326	91.31	0.62	89.79
1998	1365.81	**74.70**	**0.00**	**2.13**	**72.81**	0.00407	0.00307	71.10	0.49	71.28
1999	1387.92	**69.35**	**0.00**	**2.14**	**74.12**	0.00409	0.00309	73.12	0.51	73.26
2000	1231.29	**56.88**	**0.00**	**2.11**	**59.36**	0.00394	0.00294	59.48	0.41	59.22
2001	1427.02	**69.47**	**0.00**	**2.15**	**76.26**	0.00413	0.00313	76.78	0.53	76.77
2002	1489.97	**79.95**	**0.00**	**2.16**	**81.88**	0.00419	0.00319	82.90	0.57	82.41
2003	1266.67	**63.75**	**0.00**	**2.12**	**61.57**	0.00397	0.00297	62.42	0.43	62.39
2004	1302.65	**59.87**	**0.00**	**2.12**	**64.96**	0.00401	0.00301	65.50	0.45	65.62
2005	1113.08	**51.62**	**0.00**	**2.09**	**47.93**	0.00383	0.00283	50.23	0.34	48.62
2006	1500.53	**84.26**	**0.00**	**2.16**	**82.91**	0.00420	0.00320	83.95	0.58	83.36
2007	1281.61	**71.74**	**0.00**	**2.12**	**62.69**	0.00399	0.00299	63.69	0.44	63.73
2008	1306.24	**63.45**	**0.00**	**2.12**	**66.41**	0.00401	0.00301	65.81	0.46	65.94
2009	1401.27	**70.42**	**0.00**	**2.14**	**73.23**	0.00410	0.00310	74.36	0.51	74.46
2010	1329.33	**68.05**	**0.00**	**2.13**	**66.53**	0.00403	0.00303	67.83	0.47	68.01
2011	1511.68	**81.06**	**0.00**	**2.16**	**83.86**	0.00421	0.00321	85.07	0.58	84.36
2012	1454.31	**80.03**	**0.00**	**2.15**	**78.56**	0.00415	0.00315	79.40	0.55	79.21
2013	1393.10	**76.20**	**0.00**	**2.14**	**72.59**	0.00409	0.00309	73.60	0.51	73.72
2014	1391.12	**76.47**	**0.00**	**2.14**	**71.80**	0.00409	0.00309	73.42	0.51	73.55
2015	1519.62	**82.74**	**0.00**	**2.16**	**82.18**	0.00421	0.00321	85.87	0.59	85.07
2016	1363.65	**75.77**	**0.00**	**2.13**	**68.99**	0.00407	0.00307	70.90	0.49	71.08
Critère de calage de Nash				**NSE**	**85.94**			**86.42**		**85.52**

Annexe 10 : Synthèse des calculs des modèles validés dans le sous bassin de la Ruvyironza-Kibaya

Modèle			Base météorologique			Base mixte			Base physique	
	Données			Modèle SCS		Modèle Q_A_Hm			Modèle Q_L_Dd	
Année	P (mm)	Q_{ob}(m³/s)	E(mm)	b	Q_{ca}(m³/s)	α	β	Q_{ca}(m³/s)	α	Q_{ca}(m³/s)
1986	1259.26	**22.66**	**0.00**	**2.58**	**24.12**	0.00355	0.00255	22.55	0.23	22.62
1987	1124.05	**19.53**	**0.00**	**2.48**	**19.51**	0.00344	0.00244	18.62	0.19	18.56
1988	1286.29	**25.08**	**0.00**	**2.60**	**24.80**	0.00357	0.00257	23.39	0.24	23.43
1989	1362.45	**29.25**	**0.00**	**2.66**	**27.53**	0.00364	0.00264	25.84	0.26	25.72
1990	1194.90	**22.67**	**0.00**	**2.53**	**21.92**	0.00350	0.00250	20.63	0.21	20.69
1991	1252.43	**22.55**	**0.00**	**2.57**	**22.31**	0.00355	0.00255	22.34	0.23	22.42
1992	1164.15	**20.07**	**0.00**	**2.51**	**19.61**	0.00347	0.00247	19.74	0.20	19.77
1993	1118.07	**18.85**	**0.00**	**2.47**	**18.47**	0.00343	0.00243	18.46	0.18	18.38
1994	1242.87	**18.74**	**0.00**	**2.57**	**22.20**	0.00354	0.00254	22.05	0.22	22.13
1995	1272.35	**21.84**	**0.00**	**2.59**	**22.73**	0.00356	0.00256	22.96	0.23	23.02
1996	1387.99	**24.31**	**0.00**	**2.68**	**26.39**	0.00366	0.00266	26.70	0.27	26.49
1997	1581.92	**32.97**	**0.00**	**2.82**	**33.21**	0.00382	0.00282	33.72	0.32	32.32
1998	1298.26	**26.49**	**0.00**	**2.61**	**23.52**	0.00358	0.00258	23.77	0.24	23.79
1999	1258.26	**24.06**	**0.00**	**2.58**	**22.29**	0.00355	0.00255	22.52	0.23	22.59
2000	1215.97	**19.35**	**0.00**	**2.54**	**20.91**	0.00351	0.00251	21.25	0.21	21.32
2001	1334.21	**25.40**	**0.00**	**2.63**	**24.57**	0.00361	0.00261	24.92	0.25	24.87
2002	1280.34	**22.65**	**0.00**	**2.59**	**22.58**	0.00357	0.00257	23.20	0.23	23.26
2003	1157.72	**18.16**	**0.00**	**2.50**	**19.16**	0.00347	0.00247	19.56	0.20	19.57
2004	1156.59	**16.74**	**0.00**	**2.50**	**19.20**	0.00347	0.00247	19.53	0.20	19.54
2005	935.15	**12.89**	**0.00**	**2.33**	**12.54**	0.00328	0.00228	13.82	0.13	12.89
2006	1429.87	**26.15**	**0.00**	**2.71**	**27.20**	0.00369	0.00269	28.13	0.28	27.75
2007	1246.64	**22.21**	**0.00**	**2.57**	**21.52**	0.00354	0.00254	22.17	0.22	22.24
2008	1192.32	**23.10**	**0.00**	**2.53**	**20.16**	0.00350	0.00250	20.55	0.21	20.61
2009	1300.88	**22.14**	**0.00**	**2.61**	**23.24**	0.00359	0.00259	23.85	0.24	23.87
2010	1259.01	**23.41**	**0.00**	**2.58**	**21.73**	0.00355	0.00255	22.54	0.23	22.62
2011	1324.05	**25.53**	**0.00**	**2.63**	**24.03**	0.00361	0.00261	24.59	0.25	24.57
2012	1369.14	**25.31**	**0.00**	**2.66**	**25.61**	0.00364	0.00264	26.06	0.26	25.92
2013	1366.53	**27.21**	**0.00**	**2.66**	**25.58**	0.00364	0.00264	25.98	0.26	25.85
2014	1358.64	**25.08**	**0.00**	**2.65**	**25.00**	0.00363	0.00263	25.72	0.26	25.61
2015	1437.38	**26.63**	**0.00**	**2.71**	**27.00**	0.00370	0.00270	28.39	0.28	27.97
2016	1267.76	**23.75**	**0.00**	**2.58**	**21.70**	0.00356	0.00256	22.81	0.23	22.88
Critère de calage de Nash				**NSE**	**85.01**			**81.63**		**82.43**

Annexe 11 : Synthèse des calculs des modèles validés dans le sous bassin de la Ruvubu-Muyinga

Modèle			Base météorologique			Base mixte			Base physique	
	Données			Modèle SCS		Modèle Q_A_Hm			Modèle Q_L_Dd	
Année	P (mm)	$Q_{ob}(m^3/s)$	E(mm)	b	$Q_{ca}(m^3/s)$	α	β	$Q_{ca}(m^3/s)$	α	$Q_{ca}(m^3/s)$
1986	1279.59	**124.18**	**683.12**	**2.47**	**122.93**	0.00120	0.00837	119.43	0.51	119.132
1987	1227.87	**109.70**	**692.49**	**2.44**	**112.35**	0.00118	0.00824	111.14	0.48	111.1292
1988	1301.62	**126.19**	**691.52**	**2.47**	**125.20**	0.00120	0.00842	123.06	0.52	122.54087
1989	1333.79	**138.19**	**685.82**	**2.49**	**131.92**	0.00121	0.00850	128.49	0.55	127.51817
1990	1224.98	**103.10**	**685.38**	**2.44**	**113.10**	0.00118	0.00823	110.68	0.47	110.68251
1991	1223.52	**107.01**	**703.65**	**2.44**	**109.68**	0.00118	0.00823	110.45	0.47	110.45652
1992	1233.45	**101.66**	**704.42**	**2.45**	**111.22**	0.00118	0.00825	112.01	0.48	111.99293
1993	1114.34	**92.73**	**693.76**	**2.40**	**93.25**	0.00114	0.00796	94.13	0.40	93.563073
2011	1349.13	**125.75**	**715.66**	**2.49**	**128.95**	0.00122	0.00854	131.13	0.56	129.89153
2012	1317.97	**123.91**	**715.55**	**2.48**	**123.61**	0.00121	0.00846	125.80	0.54	125.07051
2013	1283.31	**122.88**	**717.89**	**2.47**	**117.29**	0.00120	0.00838	120.04	0.51	119.70731
2014	1259.78	**118.45**	**723.53**	**2.46**	**112.36**	0.00119	0.00832	116.21	0.50	116.06613
2015	1384.54	**128.16**	**733.58**	**2.51**	**131.71**	0.00123	0.00863	137.33	0.58	135.37103
2016	1199.25	**116.41**	**726.11**	**2.43**	**101.95**	0.00117	0.00817	106.70	0.46	106.7018
Critère de calage de Nash				**NSE**	**73.15**			**73.98**		**74.92**