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

Contribution à l'étude de la gestion intégrée des ressources en eau pour une irrigation optimisée et une lutte contre les inondations : cas du bassin versant de la rivière Mutimbuzi en république du Burundi

Twagirayezu, Eugénie

2021-12
UB, ITS
https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/218

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

CONTRIBUTION A L'ETUDE DE LA GESTION INTEGREE DES RESSOURCES EN EAU POUR UNE IRRIGATION OPTIMISEE ET UNE LUTTE CONTRE LES INONDATIONS : CAS DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIERE MUTIMBUZI EN REPUBLIQUE DU BURUNDI.

Par : TWAGIRAYEZU Eugénie

Mémoire

présenté en vue d'obtenir

le diplôme 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. NIYONZIMA Nestor : Directeur
- Dr. Ir. MVUYEKURE Jean Claude : Lecteur principal
- Dr. Ir. NZEYIMANA Joseph : Membre

Bujumbura, Décembre 2021

Identification des membres du jury

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

Dédicaces

A Dieu Tout Puissant,

A mon cher époux,

A mes chères filles,

A mes chers parents,

A mes chers beaux-parents,

A mes sœurs et frère,

A mes camarades étudiants,

Je dédie ce travail.

Remerciements

Au terme du présent travail, il nous tient d'exprimer notre action de gratitude à l'endroit de toutes les personnes tant physiques que morales qui ont contribué à sa réalisation et plus particulièrement :

- A mon directeur de mémoire Dr. Ir Nestor NIYONZIMA, enseignant à l'Université du Burundi pour les conseils et orientations prodigués. Je vous remercie pour votre confiance, votre aide scientifique, vos efforts fournis en tant que formateur et votre soutien permanent.
- A ceux qui m'ont fait l'honneur de faire partie du jury de mon mémoire : Dr. Ir. Daniel HATUNGIMANA, Dr. Ir. Jean Claude MVUYEKURE et Dr. Ir. Joseph NZEYIMANA, tous enseignants à l'Université du Burundi dans la Faculté des Sciences de l'Ingénieur (FSI) pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail.
- A tout le corps enseignant pour la qualité de la formation reçue.

Un grand merci à mon cher époux et à ma famille à qui je dois ce que je suis devenue.

Résumé

Au Burundi, en particulier dans la plaine de l'Imbo, le risque d'inondation est parmi les risques qui causent le plus de problèmes tant sur le plan social qu'économique. De plus dans la plaine de l'Imbo l'agriculture à base de l'irrigation occupe une place très importante dans le développement du pays et dans la stabilité de la sécurité alimentaire. Mais cette agriculture présente des problèmes de manque d'eau.

Le présent travail est consacré à l'étude de la problématique d'inondation et la gestion intégrée des ressources en eau du bassin versant de la rivière Mutimbuzi plus précisément dans sa partie aval. Cette zone hébergeant l'Aéroport international Melchior NDANDAYE qui est un lieu hautement stratégique du pays nécessite des mesures de gestion intégrée et durables.

Ce travail comporte cinq chapitres. Le premier est consacré à la revue bibliographique. Le deuxième chapitre présente et caractérise le bassin versant de la rivière Mutimbuzi. Le troisième chapitre porte sur le traitement des données (climatologiques et hydrologiques) du bassin versant de la rivière Mutimbuzi et ses affluents ainsi que l'évaluation des besoins en eau d'irrigation des périmètres à irriguer et des cultures pratiquées dans le bassin versant de la rivière Mutimbuzi. Quant au quatrième chapitre, il est question de proposer un modèle de gestion intégrée des ressources en eau du bassin versant de la rivière Mutimbuzi. Le dernier chapitre présente les conclusions et recommandations formulées sur base des résultats de cette étude.
Les résultats obtenus nous ont permis de proposer la construction des barrages d'accumulation sur les affluents de la rivère Mutimbuzi. Ces barrages permettront de pratiquer l'agriculture irriguée toute l'année, avec possibilité de 3 saisons culturales par an. Ils serviront de bassins d'écrêtement des crues ce qui limiteront les crues à plus de 90% et de pratique de la pisciculture.

Quant à la gestion des inondations, pour une période de retour de 100ans, le débit entrant de 165,3 m ^{3}/s sera laminé jusqu'à 10.57 m^3/s soit une capacité de rétention de plus de 90%. Après vérification de la capacité hydraulique du tronçon en aval des barrages, les résultats trouvés démontrent que ce canal naturel sera capable de transporter le débit sortant jusqu'une période de retour de 100ans.

Dans le but de la valorisation des barrages d'accumulation, notre étude propose la pratique de la pisciculture qui est une activité génératrice de revenus.

Mots clés : Rivière Mutimbuzi, inondation, irrigation, pisciculture, laminage des crues.

Abstract

In Burundi, particularly in the Imbo plain, the risk of flooding is among the risks that cause the most problems both socially and economically. In addition, in the Imbo plain, irrigation-based agriculture plays a very important role in the development of the country and in the stability of food security. But this agriculture presents problems of lack of water.

This work is devoted to the study of the problem of flooding and the integrated management of water resources in the watershed of the Mutimbuzi River, more specifically in its downstream part. This area hosting the Melchior NDANDAYE International Airport, which is a highly strategic place in the country, requires integrated and sustainable management measures.

This work has five chapters. The first is devoted to the bibliographical review. The second chapter presents and characterizes the watershed of the Mutimbuzi River. The third chapter deals with the processing of data (climatological and hydrological) of the watershed of the Mutimbuzi River and its tributaries as well as the assessment of the irrigation water needs of the perimeters to be irrigated and the crops grown in the watershed of the Mutimbuzi. Mutimbuzi river. As for the fourth chapter, it is a question of proposing a model of integrated management of the water resources of the watershed of the Mutimbuzi river. The last chapter presents the conclusions and recommendations formulated on the basis of the results of this study.

The results obtained allowed us to propose the construction of accumulation dams on the tributaries of the Mutimbuzi River. These dams will make it possible to practice irrigated agriculture all year round, with the possibility of 3 growing seasons per year. They will serve as flood-shaving basins which will limit floods to more than 90% and as a practice for fish farming.

As for flood management, for a return period of 100 years, the incoming flow of 165.3 m3/s will be reduced to 10.57 m3/s, a retention capacity of more than 90%. After checking the hydraulic capacity of the section downstream of the dams, the results found show that this natural channel will be able to transport the outflow up to a return period of 100 years.

With the aim of enhancing the accumulation dams, our study proposes the practice of fish farming which is an income-generating activity.

Keywords: Mutimbuzi River, flooding, irrigation, fish farming, flood lamination.

Table des matières

Identification des membres du jury i
Dédicaces ii
Remerciements iii
Résumé iv
Abstract v
Table des matières v
Liste des tableaux ix
Liste des figures xii
Sigles et abréviations xiv
Avant-propos xv
0. INTRODUCTION GENERALE 1
0.1. Contexte, problématique et Justification de l'étude 1
0.1.1. Contexte de l'étude 1
0.1.2. Problématique 1
0.1.3. Justification de l'étude 2
0.2. Objectifs 3
0.2.1. Objectif global 3
0.2.2. Objectifs spécifiques 3
0.3. Méthodologie 3
CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTERATURE 4
I.1. Conceptualisation 4
I.1.1. Cycle hydrologique 4
I.1.2. Processus de génération de crue 5
I.1.3. Caractéristiques du bassin versant 6
I.1.4. Inondation 11
I.1.5. Transport solide 11
I.2. Modélisation hydrologique et modélisation hydraulique 13
I.2.1. Modélisation hydrologique 13
I.2.2. Modélisation hydraulique 19
I.3. Ressources en eau au Burundi 21
I.3.1. Gestion intégrée des ressources en eaux 21
I.3.2. Eau et irrigation 22

I.3.3. Pisciculture 25
I.4. Etudes déjà faites 26
CHAPITRE II : PRESENTATION ET CARACTERISATION HYDROLOGIQUE ET HYDRAULIQUE DE LA ZONE D'ETUDE 27
II.1. Description de la zone d'étude 27
II.1.1. Situation géographique et administrative 27
II.1.2. Climat 28
II.1.3. Géomorphologie et lithologie 28
II.1.4. Hydrographie de la zone d'étude 28
II.2. Situation hydrologique de la zone d'étude 29
II.3. Situation hydraulique de la zone d'étude 31
II.4. Situation hydroagricole de la zone d'étude 34
CHAPITRE III : TRAITEMENT DES DONNEES ET ANALYSES DES RESULTATS 35
III.1. Traitement des données topographiques 35
III.1.1. Délimitation du bassin et réseau hydrographique 35
III.2. Données du sol 40
III.3. Temps de concentration du bassin versant de Mutimbuzi 46
III.4. Caractéristiques du bassin versant de la rivière Mutimbuzi 47
III.5. Traitement des données climatiques et évaluation des crues afférentes 47
III.5.1. Analyse climatologique 47
III.5.2. Analyse fréquentielle des précipitations 50
III.5.3. Evaluation des crues fréquentielles 53
III.6. Analyse hydroagricole 64
III.6.1. Calcul des besoins en eau des cultures 65
III.6.2. Bilan hydrique 71
III.6.3. Choix des cultures 79
CHAPITRE IV : MODELE DE GESTION INTEGREE DE LA RIVIERE MUTIMBUZI 83
IV.1. Introduction 83
IV.2. Critères de choix du site d'emplacement du barrage d'accumulation 83
IV.3. Relation entre hauteur du barrage, volume retenu et surface inondée 84
IV.4. Calcul de l'apport solide en suspension 86
IV.5. Laminage des crues 86
IV.5.1. Calcul du débit entrant 87
IV.5.2. Relation rétention -Débit sortant 87

IV.5.3. Calcul du débit sortant 91
IV.6. Caractéristiques dimensionnelles des barrages 98
IV.7. Vérification de la capacité hydraulique du tronçon en aval des barrages 100
IV.8. Pratique de la pisciculture dans les barrages d'irrigation 103
IV.9. Fonctionnement du modèle de gestion 104
CHAPITRE V : CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS 106
V.1. Conclusion 106
V.2. Recommandations 107
Bibliographie 108
Annexes 110

Liste des tableaux

Tableau I-1 : Distribution des précipitations par la méthode SCS 17
Tableau I-2 : Paramètres de l'hydrogramme unitaire 18
Tableau I-3 : Coordonnées de l'hydrogramme unitaire synthétique du NRCS 19
Tableau I-4 : Caractéristiques dont dépend le calcul des besoins en eau des cultures 23
Tableau II-1 : Répartition de la pluviométrie et température de la zone d'étude 28
Tableau II-2 : Caractéristiques des périmètres irrigués de l'Est Mpanda 34
Tableau III-1 : Répartition de la superficie du BV Mutimbuzi en fonction des altitudes 37
Tableau III-2 : Abscisses et ordonnées du cours d'eau principal pour le profil en long 39
Tableau III-3 : Occupation du sol de la zone d'étude 41
Tableau III-4 : Groupes pédologiques du BV Mutimbuzi à une profondeur de 0-5cm 44
Tableau III-5 : Curve number CN (II) 45
Tableau III-6 : Hauteurs maximales annuelles des précipitations entre les années (1991-2020) 48
Tableau III-7 : Précipitations moyennes mensuelles de la station Buja-Aéroport 48
Tableau III-8 : Variation de la température maximale et minimale moyenne mensuelle de la station Buja-Aéroport 48
Tableau III-9 : Variation de la température maximale et minimale (moyenne décadaire) de la station Buja-Aéroport 49
Tableau III-10 : Variation de l'humidité relative maximale et minimale (moyenne mensuelle) de la station Buja-Aéroport 49
Tableau III-11 : Variation de l'humidité relative maximale et minimale (moyenne décadaire) de la station Buja-Aéroport 50
Tableau III-12 : Hauteurs maximales des précipitations selon les périodes de retour 51
Tableau III-13 : Précipitations moyennes décadaires (année humide, année moyenne, année sèche) 52
Tableau III-14: Débits moyens mensuels de la rivière Mutimbuzi et ses affluents 53
Tableau III-15 : Débits de quelques rivières traversant la plaine de l'Imbo 54
Tableau III-16 : Hauteur de la pluie nette 55
Tableau III-17:Répartition de la pluie totale ; T=100ans 55
Tableau III-18 : Répartition de la pluie nette ; T=100ans 57
Tableau III-19 : Valeurs des paramètres de l'hydrogramme unitaire 58
Tableau III-20:Calcul de l'hydrogramme unitaire 59

Tableau III-21 : Résultats des débits de crues 60
Tableau III-22 : Répartition de la pluie nette/période de retour de 100ans 61
Tableau III-23 : Résultats de calcul de l'hydrogramme de crues ; T=100ans 61
Tableau III-24 : Résultats de l'hydrogrammme des crues (Rivière Mutimbuzi, Muzazi, Murago, Gikoma) ; T=100ans 63
Tableau III-25 : Périmètres irrigués par chaque rivière 64
Tableau III-26 : Besoins en eau d'irrigation suivant différents calendriers 67
Tableau III-27 : Besoins en eau d'irrigation et les débits de projet pour deux cultures 70
Tableau III-28 : Besoins en eau d'irrigation et les débits mensuels d'irrigation [riz-riz-polyculture] (Début Octobre →Fin Janvier ; Mi-Février→ Mi- Juin ; Début Juillet-Fin Août) 71
Tableau III-29 : Bilan hydrique de la rivière Muzazi avec rotation des cultures (riz-riz) 72
Tableau III-30 : Bilan hydrique de la rivière Murago avec rotation des cultures (riz-riz) 73
Tableau III-31 : Bilan hydrique de la rivière Gikoma avec rotation des cultures (riz-riz) 74
Tableau III-32 : Bilan hydrique annuel avec rotation des cultures [riz-riz] (Muzazi, Murago,Gikoma) 75
Tableau III-33 : Bilan hydrique de la rivière Muzazi avec rotation des cultures (riz-riz-polyculture) 76
Tableau III-34 : Bilan hydrique de la rivière Murago avec rotation des cultures (riz-riz-polyculture) 77
Tableau III-35 : Bilan hydrique de la rivière Gikoma avec rotation des cultures (riz-riz-polyculture) 78
Tableau III-36 : Bilan hydrique annuel avec rotation des cultures [riz-riz-polyculture] (Muzazi, Murago,Gikoma) 79
Tableau III-37 : Résultats des périmètres irrigables avec les apports disponibles 80
Tableau III-38 : Résultats des revenus pour chaque pratique de rotation des cultures 81
Tableau III-39 : Volume à stocker pour Muzazi ,Murago et Gikoma 82
Tableau IV-1 : Volume retenu et surface inondée en fonction de la hauteur 84
Tableau IV-2 : Résultats de calcul de la relation rétention -débit pour le barrage Muzazi 87
Tableau IV-3 : Résultats de calcul de la relation rétention -débit pour le barrage Murago 89
Tableau IV-4 : Résultats de calcul de la relation rétention -débit pour le barrage Gikoma 90
Tableau IV-5 : Résultats de calcul du débit sortant /barrages Muzazi 92
Tableau IV-6 : Résultats de calcul du débit sortant /barrage Murago 93
Tableau IV-7 : Résultats de calcul du débit sortant /barrage Gikoma 95

Tableau IV-8 : Résultats de laminage des crues pour les barrages (Muzazi , Murago,Gikoma) : T=2ans ; T=5ans ; T=10ans ; T=25ans ; T=50ans ; T=100ans 97
Tableau IV-9 : Caractéristiques dimensionnelles des barrages..... 100
Tableau IV-10 : Résultats de calcul des débits capable du tronçon en aval des barrages..... 102

Liste des figures

Figure 0-1 : Photos illustrant les dégâts causés par la rivière Mutimbuzi dans la zone de Buterere en 2018 2
Figure I-1 : Schéma illustrant le Cycle de l'eau 4
Figure I-2 : Schéma illustrant le bassin versant 6
Figure I-3 : Modèle des pluies nettes de NRCS (SCS) 14
Figure I-4 : Caractéristique de l'hydrogramme unitaire 18
Figure II-1 : Localisation géographique de la zone d'étude 27
Figure II-2: Dégâts causés par la rivière Mutimbuzi en 2018 30
Figure II-3 : Photos prises sur terrain des travaux de curage sur la rivière Mutimbuzi 31
Figure II-4 : Photos prises sur terrain de prises d'eau existant sur la rivière Mutimbuzi et ses affluents 32
Figure II-5 : Les ponts sur la rivière Muzazi et ses affluents 33
Figure III-1 : Surface du BV de la rivière Mutimbuzi 35
Figure III-2 : Relief de la zone d'étude 36
Figure III-3 : Carte topographique de la zone d'étude 36
Figure III-4 : Courbe hypsométrique du bassin versant de la rivière Mutimbuzi 37
Figure III-5 : Réseau hydrographique de la zone d'étude 38
Figure III-6 : Profil en long du cours d'eau principal du BV Mutimbuzi 39
Figure III-7 : Occupation du terrain de la zone d'étude 40
Figure III-8 : Type de sol de la zone d'étude 42
Figure III-9 : Groupes pédologiques de la zone d'étude 43
Figure III-10 : Groupes pédologiques de la zone d'étude à une profondeur de 0-5cm 44
Figure III-11 : Répartition de la pluie totale ; T=100ans 56
Figure III-12 : Répartition de la pluie nette ; T=100ans 58
Figure III-13 : Hydrogramme unitaire 60
Figure III-14 : Hydrogramme des crues ; T=100ans 62
Figure III-15: Hydrogramme des crues de la rivière Mutimbuzi et ses affluents 64
Figure III-16 : Schéma de calcul d'AquaCrop 66
Figure III-17: Besoins nets selon le calendrier du terrain [Riz-riz] (Début Octobre → Fin Janvier ; Début Mars→ Fin Juin) 68
Figure III-18 : Besoins nets [Riz-riz-Polyculture] (Début Octobre →Fin Janvier ; Mi-Février→ Mi- Juin ; Début Juillet-Fin Août) 69

Figure III-19 : Bilan hydrique de la rivière Muzazi avec rotation des cultures (riz-riz)..... 72
Figure III-20 : Bilan hydrique de la rivière Murago avec rotation des cultures (riz-riz) 73
Figure III-21 : Bilan hydrique de la rivière Gikoma avec rotation des cultures (riz-riz)..... 74
Figure III-22 : Bilan hydrique annuel avec rotation des cultures [riz-riz] (Muzazi, Murago,Gikoma) 75
Figure III-23 : Bilan hydrique de la rivière Muzazi avec rotation des cultures [riz-riz-polyculture] 76
Figure III-24 : Bilan hydrique de la rivière Murago avec rotation des cultures [riz-riz-polyculture] 77
Figure III-25 : Bilan hydrique de la rivière Gikoma avec rotation des cultures [riz-riz-polyculture] 78
Figure III-26 : Bilan hydrique annuel avec rotation des trois cultures (Muzazi, Murago, Gikoma)..... 79
Figure IV-1 : Emplacement des barrages sur Muzazi, Murago et Gikoma..... 84
Figure IV-2 : Volume retenu et surface inondée en fonction de la hauteur 85
Figure IV-3 : Relation rétention-débit sortant / barrage Muzazi..... 88
Figure IV-4 : Relation rétention-débit sortant / barrage Murago 90
Figure IV-5 : Relation rétention-débit sortant / barrage Gikoma..... 91
Figure IV-6 : Laminage des crues/barrage Muzazi..... 93
Figure IV-7 : Laminage des crues /barrage Murago 95
Figure IV-8 : Laminage des crues/ barrage Gikoma 97
Figure IV-9 : Les différentes hauteurs d’un barrage 98
Figure IV-10 : Différentes sections testées en aval des barrages..... 101
Figure IV-11 : Coupe transversale du profil 19 102
Figure IV-12 : Fonctionnement du modèle proposé 104

Sigles et abréviations

BV	**: B**assin **V**ersant
CN	: **C**urve **N**umber
HRmax	: Humidité relative maximale
HRmin	: Humidité relative minimale
HU	: **H**ydrogramme **U**nitaire
IGEBU	: **I**nstitut **G**éographique du **Bu**rundi
Max	: Maximale
Min	: Minimale
MNT	: **M**odèle **N**umérique de **T**errain
Moy	: moyenne
PDDAA	: **P**rogramme **D**étaillé pour le **D**éveloppement de l'**A**griculture **A**fricaine
PRASAB	: **P**rogramme de **R**éhabilitation du **S**ecteur **A**gricole au **B**URUNDI
RN	: **R**oute **N**ationale
SBV	**: S**ous **B**assin **V**ersant
SCS	**: S**oil **C**onservation **S**ervice
SRDI	: **S**ociété **R**égionale de **D**éveloppement de l'**I**mbo
Temp	: Température
Temp max	: Température maximale
Temp min	: Température minimale
V	: Volume
v	: Vitesse

Avant-propos

Les inondations sont comptées parmi les catastrophes naturelles les plus fréquentes et graves. Elles perturbent le quotidien des populations et leurs moyens de subsistance, et causent des dégâts et des souffrances immenses, en particulier dans les pays à faible revenu où les réseaux d'évacuation des eaux et les dispositifs de protection, ont tendance à être moins développés

Le Burundi est l'un des 20 pays les plus vulnérables aux effets du changement climatique au monde. Les pluies torrentielles tombées en date du 28/4/2018 à Bujumbura et ses environs ont fait qu'une des digues de la rivière Mutimbuzi a cédé et cela a occasionné des inondations qui ont provoqué des dégâts énormes dans la zone Buterere, Quartier Kiyange .

Mais certaines causes des catastrophes citées ci-haut peuvent être profitées dans l'amélioration du rendement agricole, en récurrence les inondations. En outre l'absence de gestion de l'eau (pluviale) condamne le pays à des rendements agricoles faibles.

Alors qu'il n'y a pas de gros problèmes d'insuffisance en eau au niveau national, de graves pénuries d'eau d'irrigation s'observent dans la plaine de l'Imbo. Le présent travail de fin d'études, intitulé « **Contribution à l'étude de la gestion intégrée des ressources en eau pour une irrigation optimisée et une lutte contre les inondations : Cas du bassin versant de la rivière Mutimbuzi en république du Burundi** », s'inscrit dans le cadre de résoudre les problèmes d'inondations et de carence d'eau d'irrigation qui s'observent dans le bassin versant de la rivière Mutimbuzi vers l'aval.

Au cours de ce travail les inondations dans le bassin versant de la rivière Mutimbuzi et les besoins en eau d''irrigation ont été évalués. Il a été également question d'évaluer la capacité de rétention des barrages d'accumulation proposés et la capacité hydraulique du tronçon en aval des barrages.

0. INTRODUCTION GENERALE

0.1. Contexte, problématique et Justification de l'étude

0.1.1. Contexte de l'étude

Les inondations sont comptées parmi les catastrophes naturelles les plus fréquentes et graves. Elles perturbent le quotidien des populations et leurs moyens de subsistance, et causent des dégâts et des souffrances immenses, en particulier dans les pays à faible revenu où les réseaux d'évacuation des eaux et les dispositifs de protection, ont tendance à être moins développés. Tous les pays sont confrontés aux risques d'inondation, quel que soit leur niveau de développement, mais la vaste majorité des populations exposées (89 %) réside dans des pays à revenu faible ou intermédiaire. En outre, même des épisodes circonscrits mais fréquents peuvent saper des années de progrès en matière de réduction de la pauvreté et de développement, au même titre que des catastrophes majeures et plus rares. [https://blogs.worldbank.org/fr/voices/1-47-milliard-de-personnes-sont-exposees-risque-inondation] (Consulté le 10/08/2021 à 11h00')

0.1.2. Problématique

Le Burundi est l'un des 20 pays les plus vulnérables aux effets du changement climatique au monde. Depuis 2018, 445 catastrophes naturelles ont affecté près de 270 000 personnes au Burundi. Parmi elles, 100 000 ont été déplacées. [https://burundi.un.org/fr/131779-la-montee-des-eaux-cause-de-graves-inondations-au-burundi].(Consulté le 12/08/2021à 9h00')

A titre d'exemple, les pluies torrentielles tombées en date du 28/4/2018 à Bujumbura et ses environs ont fait que dans les quartiers de Kiyange 1et 2 et dans le site Sabe, 325 maisons soient complètement détruites, 186 autres partiellement détruites au moment où 416 autres se sont écroulées. Les dégâts causés par ces inondations ont laissé 2576 personnes sans logement. La situation s'est empirée lorsqu' une des digues de la rivière Mutimbuzi a cédé faisant sortir cette dernière de son lit. [https://reliefweb.int/report/burundi/bujumbura-encore-face-aux-inondations] (Consulté le 12/08/2021 à 10h00')

La figure ci-dessous illustre les dégâts causés par les inondations de la rivière Mutimbuzi en 2018.



Figure 0-1 : Photos illustrant les dégâts causés par la rivière Mutimbuzi dans la zone de Buterere en 2018

Source : https://www.iwacu-burundi.org/la-riviere-mutimbuzi-cree-des-degats-dans-la-zone-de-buterere/ (Publié le 05/05/2018)

0.1.3. Justification de l'étude

Certaines causes des catastrophes citées ci-haut peuvent être profitées dans l'amélioration du rendement agricole, en récurrence les inondations. En outre, l'absence de gestion de l'eau (pluviale) condamne le pays à des rendements agricoles faibles.

Alors qu'il n'y a pas de gros problèmes d'insuffisance en eau au niveau national, de graves pénuries d'eau d'irrigation s'observent dans la plaine de l'Imbo. Par exemple dans la zone de notre étude des rotations d'approvisionnement en eau d'irrigation et des décalages des semis sont observés.

C'est dans cette logique que notre étude vise à marier ces problèmes (inondations et carence d'eau d'irrigation) afin d'augmenter le rendement agricole dans la plaine de l'Imbo.

0.2. Objectifs

0.2.1. Objectif global

L'objectif global est d'évaluer les inondations causées par la rivière Mutimbuzi et ses affluents afin de proposer des mesures résilientes et durables.

0.2.2. Objectifs spécifiques

Pour atteindre l'objectif global, il faut :

- Etudier le comportement hydrologique de la rivière Mutimbuzi et son bassin versant ;
- Evaluer les inondations dans le bassin versant de la rivière Mutimbuzi ;
- Evaluer la gestion des eaux d'irrigation dans le BV de la rivière Mutimbuzi ;
- Examiner la possibilité d'une gestion intégrée des ressources en eau du BV de la rivière Mutimbuzi.

0.3. Méthodologie

Afin d'atteindre l'objectif de ce travail, la méthodologie utilisée est la suivante :

- Une revue de la littérature sur les processus, les modèles hydrologiques et hydrauliques pour les bassins versants, les caractéristiques du BV ainsi que les théories des méthodes de transformation pluie-débit, est présentée dans le chapitre I ;
- Une description de la zone d'étude est présentée dans le chapitre II ;
- Une caractérisation du bassin versant de la rivière Mutimbuzi et une analyse des données météorologiques, calcul des débits des crues pour différentes périodes de retour à l'aide de la méthode transformation pluie-débit dite méthode de l'hydrogramme unitaire ainsi que le calcul des besoins en eau avec le logiciel Aquacrop sont présentés dans le chapitre III. Les caractéristiques du bassin versant sont déterminées à l'aide du logiciel Arcgis (10.3) en présence des données du modèle numérique du terrain (MNT), Landsat émanant du bureau de centralisation des données "Géomatique" ;
- Une proposition du modèle de gestion des eaux de la rivière Mutimbuzi et son fonctionnement sont présentées dans le chapitre IV.

CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTERATURE

I.1. Conceptualisation

I.1.1. Cycle hydrologique

Le cycle hydrologique est un concept qui englobe les phénomènes du mouvement et du renouvellement des eaux sur la terre. Cette définition implique que les mécanismes régissant le cycle hydrologique ne surviennent pas seulement les uns à la suite des autres, mais sont aussi parallèles.

La figure suivante montre que le cycle hydrologique n'a donc ni commencement, ni fin.

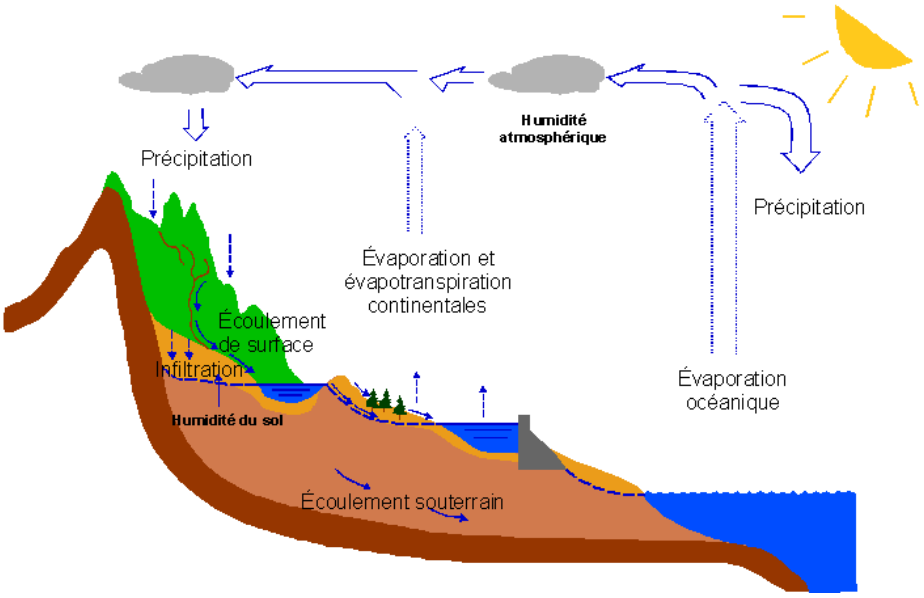


Figure I-1 : Schéma illustrant le Cycle de l'eau

Source : [http://medhycos.mpl.ird.fr/en/data/hyd/Drobot/1C.htm](Consulté le 26/29/2021 à 15h)

Une partie de l'eau précipitée retourne vers l'atmosphère, par évapotranspiration (cfr la figure I-1).

Le terme d'évaporation désigne les pertes en eau des nappes d'eau libres sous forme de vapeur (lacs, retenues, mares); alors que l'évapotranspiration regroupe les pertes du sol : absorption de l'eau par le couvert végétal ou animal, et restitution à l'atmosphère par transpiration.

L'évapotranspiration est liée à un certain nombre de paramètres climatiques tels que température, vent, humidité, rayonnement , etc.

L’eau non restituée à l’atmosphère migre sous forme :

- d’écoulements de surface rapides (rivières, ravines...), transitant parfois par des zones de stockage naturel (étangs, mares...) ou artificiel (retenues...);
- d’écoulements souterrains intervenant après infiltration; ces eaux sont souvent stockées en profondeur dans des réservoirs constitués de roches poreuses et perméables formant les aquifères.

Les eaux souterraines parviennent finalement à la mer. Etant donné que ces eaux des mers et des océans sont exposées à des températures élévées , cela provoque une évaporation océanique sous forme de vapeurs d’eau .

Suite à l’humidification atmosphérique, ces dernières subissent le phénomène de condensation afin de former les nuages, et éventuellement précipitation.

I.1.2. Processus de génération de crue

On distingue quatre principaux processus de génération de crue (Musy, et al., 1998 p. 9) :

a. **Précipitations directes à la surface libre du cours d’eau** : sa contribution dans la génération des crues est négligeable du fait que la surface occupée par les cours d’eau ne représente qu’une très faible fraction de la surface totale du bassin versant.
b. **Ecoulement souterrain** : l’eau qui rejoint la nappe peut être considéré comme de l’eau souterraine. Une partie de cette eau, après percolation, va transiter à travers l’aquifère avec une vitesse de quelques mètres par jour à quelques millimètres par an avant de rejoindre le cours d’eau souvent par le biais d’un phénomène de résurgence de la nappe. Si l’on s’attache à la zone de résurgence ou zone de la nappe, on doit noter que celle-ci n’existe pas nécessairement. Il peut donc s’avérer, dans certaines situations, que la nappe souterraine n’apporte aucune contribution à l’écoulement de la rivière. Cette situation peut notamment se produire dans des climats semi-arides à arides présentant un faible module pluviomètre.
c. **Ecoulement de surface ou ruissellement de surface** : c’est l’écoulement qui apparait lorsque le sol est saturé. Il apparait lorsque l’intensité de la pluie dépasse la capacité maximale du sol à absorber l’eau. Cette capacité caractérisée par l’infiltrabilité du sol est supposée décroissante dans le temps jusqu’à une valeur constante.

d. **Ecoulement de subsurface ou écoulement rapide interne** : pour avoir l'écoulement de subsurface, il faut que la conductivité hydraulique latérale du milieu doit être nettement supérieure à la conductivité verticale. Dans ce cas, l'eau s'écoule latéralement en zone non saturée, par un mécanisme type « toit de chaume ». L'écoulement de subsurface en régime non-saturé était capable de devenir l'écoulement de base dans des terrains de forte pente ; une frange saturée réduite au pied du bassin versant étant continuellement alimentée par les écoulements non-saturés. Ces écoulements dominent dans les régions humides aux sols couverts de végétation et bien drainés.

I.1.3. Caractéristiques du bassin versant

Un bassin versant est l'espace drainé par un cours d'eau et ses affluents. L'ensemble des eaux qui tombent dans cet espace convergent vers un même point de sortie appelé exutoire : cours d'eau, lac, mer, océan, etc. [http://dictionnaire.sensagent.leparisien.fr/Bassin%20versant/fr-fr/#anchorWiki] (Consulté le 28/09/2021)

L'exutoire d'un bassin est le point le plus en aval du réseau hydrographique par lequel passent toutes les eaux de ruissellement drainées par le bassin. La ligne de crête d'un bassin versant est la ligne de partage des eaux. La ligne ainsi définie, limite les bassins versants topographiques adjacents. (Marc More II at all, 1999 p. 10)

La figure suivante montre à titre d'exemple la vue d'un bassin versant

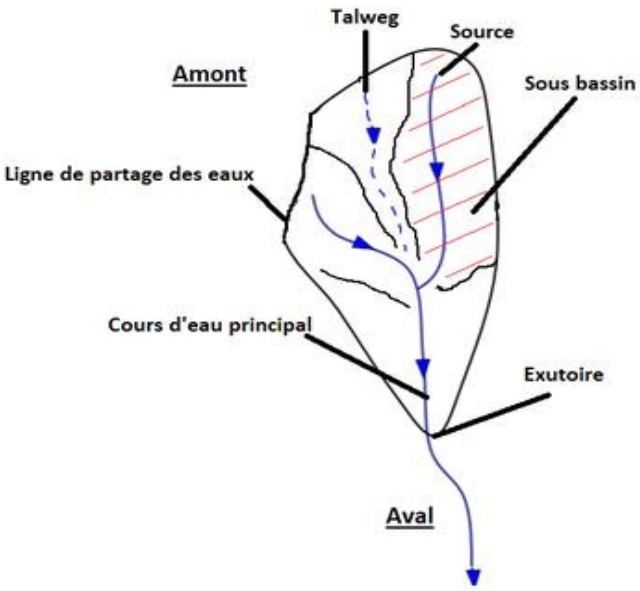


Figure I-2 : Schéma illustrant le bassin versant

Les caractéristiques physiographiques d'un bassin versant influencent fortement sa réponse hydrologique, et notamment le régime des écoulements en période de crue ou d'étiage (Marc More II at all, 1999 p. 12).

Le temps de concentration t_c caractérise en partie la vitesse et l'intensité de la réaction du bassin versant à une sollicitation des précipitations. Il est influencé par diverses caractéristiques morphologiques : en premier lieu, la taille du bassin (sa surface), sa forme, son élévation, sa pente et son orientation.

A ces facteurs s'ajoutent encore le type de sol, le couvert végétal et les caractéristiques du réseau hydrographique. Ces facteurs d'ordre purement géométrique ou physique, s'estiment aisément à partir des cartes adéquates ou en recourant à des techniques digitales et à des modèles numériques. [https://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre2/main.html] (visité le 25/Juillet/2021)

I.1.3.1. Caractéristiques géométriques

- **La surface**

Le bassin versant étant l'aire de réception des précipitations et d'alimentation des cours d'eau, les débits vont être en partie reliés à sa surface.

- **La forme**

La forme d'un bassin versant influence l'allure de l'hydrogramme à l'exutoire du bassin versant. Par exemple, une forme allongée favorise, pour une même pluie, les faibles débits de pointe de crue, ceci en raison des temps d'acheminement de l'eau à l'exutoire plus importants. Ce phénomène est lié à la notion de temps de concentration.

Il existe différents indices morphologiques permettant de caractériser le milieu, mais aussi de comparer les bassins versants entre eux, Citons à titre d'exemple l'indice de compacité de Gravelius (1914) K_G, défini comme le rapport du périmètre du bassin au périmètre du cercle ayant la même surface[https://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre2/main.html].(visité le 26/Juillet/2021) :

$$K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} \approx 0{,}28\frac{P}{\sqrt{A}} \qquad \textbf{(I-1)}$$

Avec :

K_G : l'indice de compacité de Gravélius,

A : Surface du bassin versant [km^2]

P : périmètre du bassin [km]

Si L et l représentent respectivement la longueur et la largeur du rectangle équivalent, alors :

Le périmètre du rectangle équivalent vaut : P=2. (L+l) ; la surface : A=L.l; le coefficient de compacité : $K_G = 0{,}28\frac{P}{\sqrt{A}}$

En combinant ces trois relations, on obtient :

$$L = \frac{K\sqrt{A}}{1{,}12} x \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1{,}12}{K}\right)^2}\right] \quad si\ K_G \geq 1{,}12 \qquad \textbf{(I-2)}$$

- **Le relief**

L'influence du relief sur l'écoulement se conçoit aisément, car de nombreux paramètres hydrométéorologiques varient avec l'altitude (précipitations, températures, etc,) et la morphologie du bassin. En outre, la pente influe sur la vitesse d'écoulement. [Https://f2school.com/wp-content/uploads/2020/04/Bassin-versant-Cours-01.pdf] (Consulté le 24/08/2021 à 11h00')

Le relief se détermine lui aussi au moyen d'indices ou de caractéristiques suivants :

✓ **La courbe hypsométrique**

La courbe hypsométrique fournit une vue synthétique de la pente du bassin, donc du relief. Cette courbe représente la répartition de la surface du bassin versant en fonction de son altitude. Elle porte en abscisse la surface (ou le pourcentage de surface) du bassin qui se trouve au-dessus (ou au-dessous) de l'altitude représentée en ordonnée. Elle exprime ainsi la superficie du bassin ou le pourcentage de superficie, au-delà d'une certaine altitude. [Https://f2school.com/wp-content/uploads/2020/04/Bassin-versant-Cours-01.pdf] (Consulté le 24/08/2021 à 10h00').

- ✓ **Les altitudes caractéristiques**
- **Les altitudes maximales et minimale**

Elles sont obtenues directement à partir de cartes topographiques. L'altitude maximale représente le point le plus élevé du bassin tandis que l'altitude minimale considère le point le plus bas, généralement à l'exutoire. [https://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre2/main.html].(visité le 26/08/2021)

- **L'altitude moyenne**

L'altitude moyenne se déduit directement de la courbe hypsométrique ou de la lecture d'une carte topographique, On peut la définir comme suit :

$$H_{moy} = \sum \frac{A_i . h_i}{A} \quad \textbf{(I-3)}$$

Avec :

H_{moy} : altitude moyenne du bassin [m]

A_i : aire comprise entre deux courbes de niveau [km^2]

h_i: altitude moyenne entre deux courbes de niveau [m]

A : superficie totale du bassin versant [km^2]

- **L'altitude médiane**

L'altitude médiane correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 50% de la surface totale du bassin, sur la courbe hypsométrique. Cette grandeur se rapproche de l'altitude moyenne dans le cas où la courbe hypsométrique du bassin concerné présente une pente régulière

- **La pente moyenne du bassin versant**

La pente moyenne est une caractéristique importante qui renseigne sur la topographie du bassin. Elle est considérée comme une variable indépendante. Elle donne une bonne indication sur le temps de parcours du ruissellement direct, donc sur le temps de concentration tc et influence directement le débit de pointe lors d'une averse.

Une valeur approchée de la pente moyenne est alors donnée par la relation suivante :

$$i_m = \frac{D.L}{A} \quad \textbf{(I-4)}$$

Où :

i_m : pente moyenne[m/km ou ‰],

L : longueur totale de courbes de niveau [km],

D : équidistance entre deux courbes de niveau [m],

A : surface du bassin versant [km^2],

I.1.3.2. Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique se définit comme l'ensemble des cours d'eau naturels ou artificiels, permanents ou temporaires, qui participent à l'écoulement. Le réseau hydrographique est sans doute une des caractéristiques les plus importantes du bassin. Le réseau hydrographique peut prendre une multitude de formes. La différenciation du réseau hydrographique d'un bassin est due à quatre facteurs principaux tels que la géologie, le climat, la pente du terrain et la présence humaine. [Https://f2school.com/wp-content/uploads/2020/04/Bassin-versant-Cours-01.pdf] (Consulté le 29/08/2021 à 10h00')

Les paramètres descriptifs utilisés pour définir le réseau hydrographique sont :

- ✓ **La topologie : structure du réseau et ordre des cours d'eau**
- ✓ **Les longueurs et les pentes caractéristiques du réseau**
- **Les longueurs caractéristiques**

Un bassin versant se caractérise principalement par deux longueurs : la longueur du bassin versant et la longueur du cours d'eau principal

- **Le profil longitudinal du cours d'eau**

Le profil en longitudinal du cours d'eau est la représentation graphique de la variation altimétrique du fond du cours d'eau en fonction de la distance à l'émissaire. Le profil en long d'un cours d'eau permet de définir sa pente moyenne.

- **La pente moyenne d'un cours d'eau**

La pente moyenne du cours d'eau détermine la vitesse avec laquelle l'eau se rend à l'exutoire du bassin donc le temps de concentration.

La méthode la plus fréquemment utilisée pour calculer la pente longitudinale du cours d'eau consiste à diviser la différence d'altitude entre les points extrêmes du profil par la longueur totale du cours d'eau.

$$P_{moy} = \frac{\Delta H_{max}}{L} \quad \textbf{(I-5)}$$

Où :

P_{moy} : pente moyenne du cours d'eau [m/km] ;

DH_{max} : dénivellation maximale de la rivière [m] (différence d'altitude entre le point le plus éloigné et l'émissaire) ;

L : longueur du cours d'eau principal [km],

I.1.3.3. Caractéristiques agro-pédo-géologiques

a. La couverture végétale

L'activité végétative et le type de sol sont intimement liés et leurs actions combinées influencent singulièrement l'écoulement en surface. Le couvert végétal retient, selon sa densité, sa nature et l'importance de la précipitation, une proportion variable de l'eau atmosphérique. Cette eau d'interception est en partie soustraite à l'écoulement.

b. Le type du sol

Le type du sol intervient sur la rapidité de montée des crues et sur leur volume. En effet, le taux d'infiltration, le taux d'humidité, la capacité de rétention, les pertes initiales sont fonction du type de sol et de son épaisseur.

I.1.4. Inondation

L'inondation est une submersion, rapide ou lente, d'une zone habituellement hors eau. Le risque d'inondation est la conséquence de deux composantes : l'eau qui peut sortir de son lit habituel d'écoulement et l'homme qui s'installe dans l'espace alluvial pour y planter toutes sortes de constructions, d'équipements et d'activités. [Https://fr.wikipedia.org/wiki/Inondation] (Consulté le 30/08/2021)

Les inondations de plaine, la rivière sort de son lit mineur lentement et peut inonder la plaine pendant une période relativement longue. La rivière occupe son lit moyen et éventuellement son lit majeur.

L'occupation des zones inondables par les bâtiments (cas de la ville de Gatumba, commune Mutimbuzi, la nappe phréatique est près de la surface. Le ruissellement pluvial urbain (les crues rapides des bassins périurbains), l'imperméabilisation du sol (bâtiments, voiries, parkings,) limitent l'infiltration des pluies et accentue le ruissellement, ce qui occasionnent souvent la saturation et le refoulement du réseau d'assainissement des eaux pluviales.

I.1.5. Transport solide

Le transport solide est le phénomène qui permet le déplacement d'une masse solide composée d'éléments granulaires (sédiments fins, sables, galets,) sous l'action de l'écoulement de l'eau. Ce transport a lieu sur les versants (érosion des sols) et dans le réseau hydrographique (thalwegs, rivières et fleuves) (OLIVEROS, décembre1996 p. 10). Il s'effectue selon trois modes, fonction de la taille des particules :

- Suspension (transport sur de longues distances dans la masse de l'écoulement) :
- Saltation (mode intermédiaire, sauts sur de courtes distances) ;
- Charriage (déplacement des particules au contact du fond)

Dans la pratique, on ne retient généralement que les transports par suspension et par charriage. Il est en effet difficile de déterminer une limite objective, dans le cas d'écoulements réels et en présence d'un contexte granulométrique naturel (souvent hétérogène), à la distance du saut d'une particule en delà de laquelle le charriage de fond ferait place à la saltation.

Plusieurs chercheurs ont proposé des formules permettant d'évaluer le transport solide. Par exemple :

- La formule de Fournier (1990) qui s'exprime par la relation suivante :

$$E = \frac{1}{36}\left(\frac{P_{x^2}}{P_a}\right)^{2,65}\left(\frac{H^2}{S}\right)^{0,46} \quad \textbf{(I-6)}$$

Avec

- E : Apport solide annuel moyen spécifique t/km^2/an
- Px : Pluviométrie mensuelle moyenne du mois le plus pluvieux (mm)
- Pa : Pluviométrie moyenne annuelle (mm)
- S : Superficie du bassin versant (km^2)
- H : dénivelée moyenne (mm)

- La formule de GRAVILOVIC

Selon cette formule, la production annuelle des sédiments est évaluée par la relation suivante :

$$D = TxPx\pi x\sqrt{Z^3} \quad \textbf{(I-7)}$$

Où :

D : Production moyenne annuelle de sédiments en suspension et par charriage ($m^3/km^2/an$) ;

P : Pluie moyenne annuelle en mm ;

$T = \sqrt{\frac{t_0}{10} + 1}$ avec t_0 : la température moyenne annuelle en °C ;

Z : Coefficient d'érosion.

I.2. Modélisation hydrologique et modélisation hydraulique

I.2.1. Modélisation hydrologique

L'hydrologie joue un rôle capital dans le domaine de l'ingénieur et des sciences environnementales. Elle concerne aussi bien les mécanismes d'écoulement des eaux dans les systèmes naturels (bassin versant) ou anthropisés (zones industrielles ou urbanisées) que le dimensionnement des ouvrages utiles à l'exploitation et à la gestion des eaux. Elle permet également de mieux comprendre et simuler le comportement dynamique des eaux dans les zones où elles répandent et de mieux saisir les impacts des aménagements hydrauliques sur l''environnement.

Les principales étapes de modélisation hydrologique sont :

- Fonction de production
- Fonction de transfert

I.2.1.1. Fonction de production

Connaissant la pluie totale ou la pluie globale, on ne peut directement aborder la détermination d'un hydrogramme de ruissellement puisque la totalité ne participe pas à l'écoulement. Donc il faut déterminer la fraction de la pluie totale qui va effectivement participer au ruissellement. Cette fraction s'appelle la pluie nette et sa détermination fait appel à la fonction de production.

Il existe plusieurs méthodes permettant le passage d'une pluie brute à une pluie nette, pour ce travail, la méthode SCS a été choisie pour déterminer la pluie nette.

L'hypothèse principale de la méthode SCS est que le rapport des pertes réelles sur les quantités d'eau ruisselées est égal au rapport des pertes maximales potentielles sur le ruissellement maximum potentiel. *(Musy, et al., 1998 p. 70)*

Ceci peut s'écrire simplement comme suit :

$$\frac{Pn}{P-Pn-I_a} = \frac{P-I_a}{S} \qquad \textbf{(I-8)}$$

Avec :

P=Précipitation totale (Pluie brute)

Ia= Pertes initiales avant submersion

Pn=Pluie nette (Précipitation participant au ruissellement Q)

P-Pn-I_a=Pertes additionnelles. Ce sont les précipitations infiltrées après le début du ruissellement

P-Ia=Ruissellement maximum potentiel

S=Pertes maximales potentielles

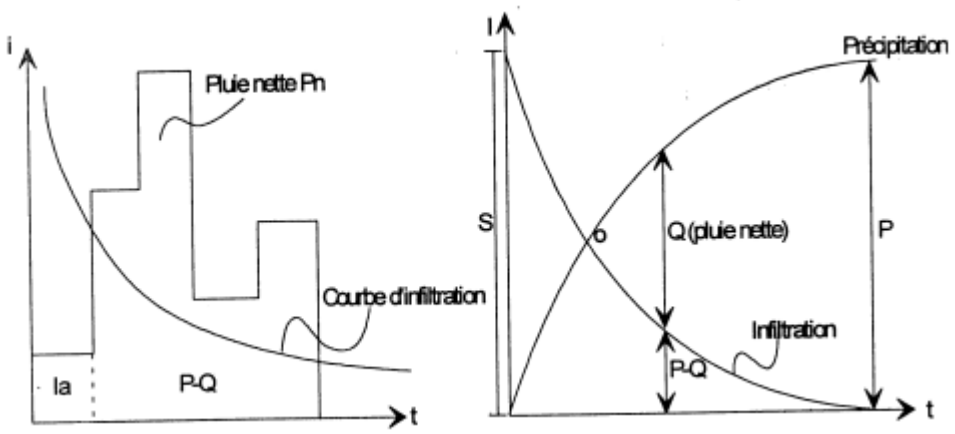


Figure I-3 : Modèle des pluies nettes de NRCS (SCS)

La pluie nette Pn est calculée par la relation suivante :

$$Pn = Q = \frac{(P-I_a)^2}{P-I_a+S} \quad \textbf{(I-9)}$$

$$Pn = \frac{(P-I_a)^2}{P-I_a+S} \quad \textbf{(I-10)}$$

Le SCS a aussi proposé une relation empirique supplémentaire liant les pertes initiales aux pertes maximales potentielles :

$$I_a = 0{,}2.S \quad \textbf{(I-11)}$$

La relation de la pluie nette devient :

$$Pn = \frac{(P-0{,}2.S)^2}{P+0{,}8S} \quad \textbf{(I-12)}$$

S est déterminé en fonction du **Curve Number** qui traduit la texture du sol et l'occupation du sol du bassin versant :

$$S = 25{,}4(\frac{1000}{CN} - 10) \quad \textbf{(I-13)}$$

Le curve number est un paramètre sans dimension indiquant la caractéristique de réponse au ruissellement d'un bassin versant. Ce paramètre est lié à l'utilisation des terres, au traitement des terres, aux conditions hydrologiques, au groupe de sols hydrologiques et aux conditions d'humidité du sol antérieures dans le bassin versant. Il est normé tel que :0<CN<100. Il existe plusieurs paramètres CN suivant les conditions antécédentes d'humidité (Ven Te Chow, et al. p. 149), on a :

- Conditions normales : $CN(II) = \frac{25400}{S+254}$ **(I-14)**

- Conditions sèches : $CN(I) = \frac{4,2CN(II)}{10-0,058CN(II)}$ **(I-15)**

- Conditions humides : $CN(III) = \frac{23CN(II)}{10+0,13CN(II)}$ **(I-16)**

Plusieurs auteurs ont donné les valeurs de CN (II) en fonction de la couverture du sol et des groupes hydrologiques.

Sur la base des relations précédentes, on peut établir le taux d'infiltration cumulative F :

$$F = P - I_a - Q \quad \textbf{(I-17)}$$

Ainsi:

$$Pn = P - I_a - F \quad \textbf{(I-18)}$$

En introduisant (I-7) dans (I.6) on aura :

$$F = \frac{S.(P-I_a)}{P-I_a+S} \quad \textbf{(I-19)}$$

a. Pluie de projet

Quand on a une liste des données historiques des précipitations, on a recours à une analyse fréquentielle pour estimer les hauteurs ou les intensités des précipitations correspondant à une période de retour donnée. La formule générale d'estimation d'un quartile hydrologique X_T (intensité, hauteur, débit, etc.) d'une période de retour T donnée s'écrit :

$$X_T = \mu + K_T\sigma \quad \textbf{(I-20)}$$

Avec $\mathbf{K_T}$ un facteur de fréquence qui dépend de la période de retour et de la loi de distribution utilisée, **μ** et **σ** respectivement la moyenne et l'écart-type de la série enregistrée.

Les lois de distribution utilisées dans ce travail sont :

- Loi normale :

  Le facteur de fréquence K_T de la loi normale est calculé par l'expression suivante :

  $$K_T = Z_T = LOI.NORMALE.STANDARD.INVERSE.N(F(T)) \quad \textbf{(I-21)}$$

  Où : F(T) : probabilité de non dépassement ; Z_T : Variable réduite

- Loi de Pearson III :

  Le facteur de fréquence de la loi de Pearson III est déterminé comme suit :

$$K_T = \frac{2}{C_s}\left\{\left[\frac{C_S}{6}\left(Z_T - \frac{C_S}{6}\right) + 1\right]^3 - 1\right\} \quad \textbf{(I-22)}$$

Où : Cs est le coefficient d'asymétrie; $Cs = \frac{n}{(n-1).(n-2)} . \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\mu)^3}{\sigma^3}$ **(I-23)**

- Loi de Gumbel :

  Le facteur de fréquence K_T de la loi de Gumbel est calculé par l'expression suivante :

$$K_T = \frac{\sqrt{6}}{\pi}.(0{,}5772 + ln\left[ln(\frac{T}{T-1})\right] \quad \textbf{(I-24)}$$

b. Hyétogramme de projet

Après avoir trouvé la hauteur maximale des précipitations du projet, sa répartition temporelle reste indispensable notamment dans les études des inondations. Plusieurs techniques sont développées pour déterminer l'hyétogramme de projet à savoir : méthode du NRCS (SCS), la méthode de l'hyétogramme triangulaire, la méthode de Huff, la méthode ABM (Alternative Block Method) et la méthode de la pluie de Chicago.

Dans ce projet, la hauteur maximale des précipitations est répartie suivant la méthode du NRCS (SCS) [distribution du type IA] dont les développements des principes se situe dans le livre de Musy ,1998.

Le tableau suivant donne la distribution d'une pluie de 24h et 6h selon la méthode SCS.

Tableau I-1 : Distribution des précipitations par la méthode SCS

Précipitation de 24heures							**Précipitation de 6heures**		
		P_t/P_{24}							
Heure	**t/24**	**Type I**	**Type IA**	**Type II**	**Type III**		**Heure**	**t/6**	**P_t/P_6**
0	0	0	0	0	0		0	0.	0
2,0	0,083	0,035	0,050	0,022	0,020		0,60	0,10	0,04
4,0	0,167	0,076	0,116	0,048	0,043		1,20	0,20	0,10
6,0	0,250	0,125	0,206	0,080	0,072		1,50	0,25	0,14
7,0	0,292	0,156	0,268	0,098	0,089		1,80	0,30	0,19
8,0	0,333	0,194	0,425	0,120	0,115		2,10	0,35	0,31
8,5	0,354	0,219	0,480	0,133	0,130		2,28	0,38	0,44
9,0	0,375	0,254	0,520	0,147	0,148		2,40	0,40	0,53
9,5	0,396	0,303	0,550	0,163	0,167		2,52	0,42	0,60
9,75	0,406	0,362	0,564	0,172	0,178		2,64	0,44	0,63
10,0	0,417	0,515	0,577	0,181	0,189		2,76	0,46	0,66
10,5	0,438	0,583	0,601	0,204	0,216		3,00	0,50	0,70
11,0	0,459	0,624	0,624	0,235	0,250		3,30	0,55	0,75
11,5	0,479	0,654	0,645	0,283	0,298		3,60	0,60	0,79
11,75	0,489	0,669	0,655	0,357	0,339		3,90	0,65	0,83
12,0	0,500	0,682	0,664	0,663	0,500		4,20	0,70	0,86
12,5	0,521	0,706	0,683	0,735	0,702		4,50	0,75	0,89
13,0	0,542	0,727	0,701	0,772	0,751		4,80	0,80	0,91
13,5	0,563	0,748	0,719	0,799	0,785		5,40	0,90	0,96
14,0	0,583	0,767	0,736	0,820	0,811		6,00	1,0	1,00
16,0	0,667	0,830	0,800	0,880	0,886				
20,0	0,833	0,926	0,906	0,952	0,957				
24,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000				

Source :(U. S. Dept. Of Agriculture. Soil Conservation Service. 1973, 1986)

I.2.1.2. Fonction de transfert

Le résultat de la fonction de transfert est la détermination de l'hydrogramme de ruissellement. Proposée par L.K Shermann (1932) vers 1932, l'hydrogramme unitaire permet de déterminer un hydrogramme de ruissellement lorsque seules les précipitations sont connues. Elle donne une contribution importante à l'étude du phénomène de l'écoulement de surface car elle sert de base aux fonctions de transfert les plus couramment utilisées.

a. Hydrogramme unitaire

L'hydrogramme unitaire (HU) d'un bassin versant est l'hydrogramme de ruissellement direct résultant d'une pluie nette, uniforme et constante, d'une durée de référence D, suffisamment longue pour générer un écoulement sur l'ensemble du bassin. (Musy, et al., 1998)

Les Caractéristiques d'un hydrogramme unitaire sont :

- Temps de base t_b : durée totale de l'hydrogramme.
- Temps de montée t_p: temps entre le début et la pointe de l'hydrogramme.
- Temps de concentration t_c: temps entre la fin de la pluie nette et la fin de l'hydrogramme.
- Lag: temps entre le centre de gravité de l'averse et la pointe de l'hydrogramme.

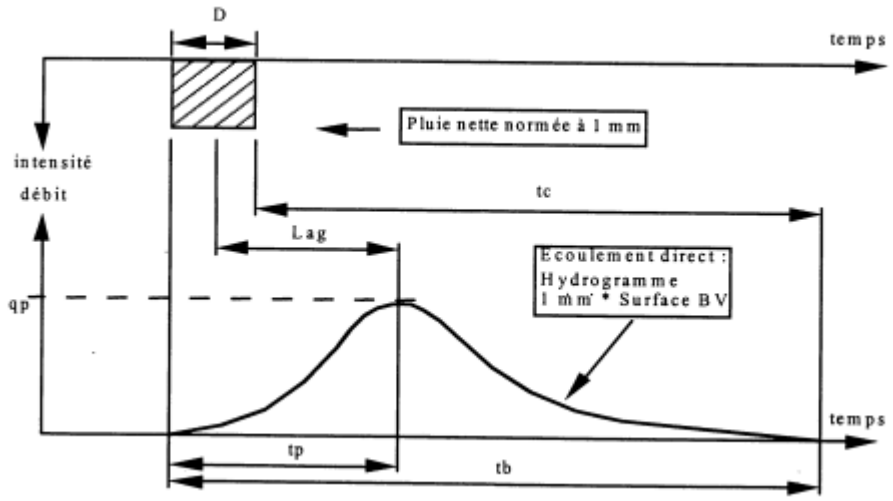


Figure I-4 : Caractéristique de l'hydrogramme unitaire

Source : (Musy, et al., 1998)

Les expressions mathématiques sont données dans le tableau I-2 ci -dessous.

Tableau I-2 : Paramètres de l'hydrogramme unitaire

Paramètres de l'averse unitaire	Durée de référence D ou temps unitaire t_u	Temps de montée t_p	Débit de pointe q_p
Expression mathématique	$D = t_u = \frac{2}{15} t_c$	$t_p = \frac{2}{3} t_c$	$q_p = (\frac{0{,}75}{360} * A)/t_p$ A : Superficie du bassin en ha ; tp : temps de montée en sec

b. Hydrogramme unitaire synthétique

Le Soil Conservation Service (SCS) a effectué la synthèse d'un grand nombre d'HU identifiés sur des bassins versants de tailles et de régions différentes des Etats-Unis (Soil Conservation Service, 1975).

Pour pouvoir comparer ces HU, il faut ramener les ordonnées et les abscisses à des grandeurs adimensionnelles, en divisant les débits par le débit de pointe q_p et le temps par le temps de montée t_p.

Tableau I-3 : Coordonnées de l'hydrogramme unitaire synthétique du NRCS

t/t_p	q/q_p	t/t_p	q/q_p	t/t_p	q/q_p
0,0	0,00	1,1	0,99	2,4	0,147
0,1	0,03	1,2	0,93	2,6	0,107
0,2	0,10	1,3	0,86	2,8	0,077
0,3	0,19	1,4	0,78	3,0	0,055
0,4	0,31	1,5	0,68	3,2	0,040
0,5	0,47	1,6	0,56	3,4	0,029
0,6	0,66	1,7	0,46	3,6	0,021
0,7	0,82	1,8	0,39	3,8	0,015
0,8	0,93	1,9	0,33	4,0	0,011
0,9	0,99	2,0	0,28	4,5	0,005
1,0	1,00	2,2	0,207	5,0	0,000

Source : (Musy, et al., 1998 p. 130)

I.2.2. Modélisation hydraulique

I.2.2.1. Fonction d'acheminement

La fonction de production et la fonction de transfert nous permettent de déterminer successivement la pluie qui participe au ruissellement à partir d'une pluie totale et l'hydrogramme de ruissellement à l'entrée d'un point considéré. Il reste donc à déterminer si la crue caractérisée par cet hydrogramme ne risque de causer des dégâts en aval du point considéré.

Donc on cherche à caractériser comment se comporte la crue lorsque celle-ci est acheminé vers l'aval par le biais d'un canal. La fonction d'acheminement va ainsi nous permettre d'analyser le comportement de la crue lors de son déplacement ; ce qui se traduit par le calcul d'un hydrogramme acheminé. Ensuite on évaluera l'effet du laminage par une retenue.

La fonction d'acheminement décrit la propagation des crues dans le réseau hydrographique. L'hydrogramme de crue constitue l'entrée du système et l'hydrogramme acheminé sa sortie.

Dans le présent travail, nous nous sommes bornés sur l'effet de laminage par une retenue.

I.2.2.2. Laminage de la crue

L'objectif du laminage de l'hydrogramme de crue est la rétention momentanée du volume de crue et la réduction du débit de pointe de l'hydrogramme. Le laminage d'une crue est provoqué par la propagation de l'hydrogramme correspondant dans un bassin équipé d'une section de contrôle (orifice et/ou déversoir) (Musy, et al., 1998)

Le laminage de la crue de projet repose sur deux démarches complémentaires :

1°) La transformation de la pluie de projet en hydrogramme de crue permet d'établir la crue de projet ;
2°) L'hydrogramme de crue est laminé en utilisant les lois de l'hydraulique.

Dans le présent travail, la méthode de la **courbe d'indication de stockage** a été retenue pour le laminage des crues.
Cette méthode se base sur l'équation de continuité globale :

$$\frac{dS}{dt} = I - O \qquad \textbf{(I-25)}$$

$$S = X.b.\left(\frac{I}{a}\right)^{m/n} + (1-X).b.\left(\frac{O}{a}\right)^{m/n} \qquad \textbf{(I-26)}$$

Avec S le stockage dans la retenue, I le débit entrant et O le débit sortant, a, n les caractéristiques de vidange des sections, b,m les caractéristiques de volume du canal et X un facteur de pondération.

L'équation de continuité peut être discrétisée pour exprimer le débit sortant par itération et s'écrit :

$$\int_{S_j}^{S_{j+1}} dS = \int_{j..\Delta t}^{(j+1).\Delta t} I(t).dt - \int_{j.\Delta t}^{(j+1).\Delta t} O(t).dt \qquad \textbf{(I-27)}$$

$$\Rightarrow \quad S_{j+1} - S_j = \frac{I_j + I_{j+1}}{2}.\Delta t - \frac{O_j + O_{j+1}}{2}.\Delta t \qquad \textbf{(I-28)}$$

d'où :

$$2\frac{S_{j+1}}{\Delta t} - 2\frac{S_j}{\Delta t} = \left(I_j + I_{j+1}\right) - (O_j + O_{j+1}) \quad \textbf{(I-29)}$$

Finalement :

$$2(\frac{S_{j+1}}{\Delta t} + O_{j+1}) = \left(I_j + I_{(j+1)}\right) + (2\frac{S_j}{\Delta t} - O_j) \quad \textbf{(I-30)}$$

I.3. Ressources en eau au Burundi

Le Burundi possède des ressources en eau de surface relativement abondantes, en raison des fortes précipitations dont la plus grande partie tombe entre le mois de Novembre et d'Avril et du stockage dans les marais et les lacs. En moyenne les précipitations annuelles s'élèvent à 1274 mm. Ces eaux de pluies alimentent les cours d'eau dont le réseau est dense dans la plupart des régions, à l'exception des plaines de l'Imbo, Bugesera et une partie de Moso qui ont peu de sources. Toutefois, elles sont traversées par des rivières provenant des hautes altitudes où les précipitations sont abondantes.

Par contre, les sources en profondeur sont plus abondantes dans les régions naturelles de l'Imbo et le Kumoso. La région de Bugesera est la plus défavorisée en ce qui concerne les ressources totales en eau souterraines. (FAO, 2005)

I.3.1. Gestion intégrée des ressources en eaux

La gestion intégrée des ressources en eau est un concept logique et séduisant. Sa base est que les nombreuses différentes utilisations des ressources en eau sont interdépendantes.

La gestion intégrée des ressources en eau est donc un processus systématique pour le développement durable, l'attribution et le suivi de l'utilisation des ressources en eau dans le contexte des objectifs sociaux, économiques et environnementaux.

Les principales utilisations des ressources en eau du Burundi sont l'irrigation, l'usage domestique, l'élevage et l'industrie (GISHINGE, Mars,2006).

Dans le présent travail nous nous sommes limités sur l'irrigation et la pisciculture.

I.3.2. Eau et irrigation

L'irrigation est l'opération consistant à apporter artificiellement de l'eau à des végétaux cultivés pour en augmenter la production, et permettre leur développement normal en cas de déficit d'eau induit par un déficit pluviométrique, un drainage excessif ou une baisse de nappe, en particulier dans les zones arides (Ahmed Skhiri, 2019).

Donc cette opération consiste à apporter à la plante l'eau nécessaire, au complément de la pluviométrie, quand c'est nécessaire et en quantité nécessaire.

Selon une enquête réalisée en 1978-1979 par le Département du génie rural, le potentiel des terres irrigables au Burundi est très important. La superficie est estimée à 215 000 ha, dont 75 000 ha de plaines dans l'Imbo (ouest) et la dépression du Moso, 20 000 ha de bas-fonds au pied des collines et 120 000 ha de marais selon l'inventaire des surfaces marécageuses dressé par le même département en 1984 (FAO, 2005).

La méthode d'irrigation actuellement pratiquée est l'irrigation de surface (irrigation par bassins, rigoles, sillons ou ados) avec prélèvement des eaux des rivières résultant du ruissellement et de l'infiltration des eaux de pluies. Cette méthode facile correspond bien aux besoins des agriculteurs n'ayant que peu ou pas de connaissances en irrigation.

Les projets d'irrigation avec des barrages en dérivation, d'une superficie totale de 21 430 ha, sont réalisés dans les plaines de l'Imbo et de Moso-Sud, ainsi que dans les marais d'altitude où se pratique la riziculture. Ces projets consistent en :

- cultures maraîchères et de café à l'Imbo-Nord: 1 300 ha;
- riziculture dans la plaine de l'Imbo-Centre: 4 050 ha;
- riziculture au Moso: 160 ha;
- canne à sucre au Moso (Sosumo): 1 450 ha;
- riziculture d'altitude: 14 470 ha. (FAO, 2005)

En effet, les superficies indiquées ci-dessus sont très faibles vis-à-vis des potentialités existantes.

I.3.2.1. Besoins en eau d'irrigation

Selon Doorenbos et Pruitt (1976) : « Le besoin en eau d'une culture est la hauteur d'eau en mm, nécessaire pour compenser l'évapotranspiration d'une culture en bon état sanitaire, établit dans un champ de grande superficie, dans des conditions de sol non limitantes du point de vue de la disponibilité de l'eau et de la fertilité, et conduisant au rendement cultural potentiel dans des conditions climatiques données ».

L'estimation des besoins en eau d'une façon simple, réaliste et la plus précise possible, permet d'assurer un optimum de consommation en eau pour une production de qualité et une bonne rentabilité.

L'objectif de cette estimation des besoins en eau dans le cadre de notre étude est de prévoir la quantité d'eau globale nécessaire pour toute la période de végétation, qui servira au dimensionnement du barrage d'accumulation.

Le besoin en eau des cultures dépend de plusieurs paramètres que l'on peut regrouper en trois catégories, chacune représentée par un paramètre global. (Voir le tableau I-4)

Tableau I-4 : Caractéristiques dont dépend le calcul des besoins en eau des cultures

Paramètres	Composantes	Synthétisé
Climatiques	Température et l'humidité de l'air, vent, ensoleillement…	L'ETP
Pédologiques	Texture, structure (infiltrabilité), physico-chimie du sol, disponibilité de l'eau de surface	Le potentiel Hydrique
Biologiques	Caractéristiques propres au végétal	Le coefficient de culture (Kc)

La demande en eau est fonction des données climatiques et météorologiques et exprimée à travers l'évaporation réelle (ETM) combinaison de l'ETP et des kc. Les ressources en eau sont la pluviométrie, la réserve en eau du sol et les doses d'irrigation (Ahmed Skhiri, 2019).

$$\sum Apports = \sum Sorties \qquad \textbf{(I-31)}$$

$$I = Pu = ETc + D \pm \Delta S \qquad \textbf{(I-32)}$$

D'où $I = ETc - Pu \pm \Delta S$ **(I-33)**

Où :

- Pu : Précipitation utile ;
- I : Irrigation ;
- D : Drainage ;
- ETc : évapotranspiration potentielle d'une culture
- ΔS : Stock d'eau dans la zone racinaire

Si l'eau d'irrigation est de bonne qualité, D=0 et si les irrigations sont régulières ΔS=0.Dans ce cas :

$$I = ETc - Pu \quad \textbf{(I-34)}$$

D'où $I = Kc\ x\ ETo - Pu$ **(I-35)**

$$B_{nets} = Kc\ x\ ETo - Pu \quad \textbf{(I-36)}$$

Pour calculer les besoins bruts en eau d'irrigation il faut tenir compte de l'efficience globale (EG) d'irrigation (réseau et parcelle)

$$B_{bruts} = \frac{KcxETo - Pu}{EG} \quad \textbf{(I-37)}$$

$$EG = EpxEr \quad \textbf{(I-38)}$$

Où

- EG : efficience globale ;
- Ep : efficience parcelle ;
- Er : efficience réseau

L'efficience réseau est de l'ordre de 0,95 tandis que l'efficience à la parcelle dépend du système d'irrigation utilisé.

- Irrigation de surface ou par gravité : Ep≈40 à 65% ;
- Irrigation par aspersion : Ep≈70 à 85% ;
- Irrigation localisée ou micro-irrigation : Ep≈80 à 90%. (Ahmed Skhiri, 2019)

Pour évaluer la quantité d'eau nécessaire pour l'irrigation, il faut donc faire un bilan hydrique, égal à la différence ressource-demande.

I.3.3. Pisciculture

La pisciculture est l'une des branches de l'aquaculture, spécialisée dans l'élevage de poissons. La pisciculture se fait en eau douce comme en mer, dans des enceintes en dur (bassins) ou dans des cages flottantes. [https://wikimemoires.net/2019/12/la-pisciculture-origine-diffusion-et-sortes-detangs/] (Consulté le 30/10/2021).

La majorité du poisson consommé dans le monde provient de l'élevage, et 90 % du poisson d'élevage est produit en Asie. Les espèces les plus élevées sont les carpes, suivies du tilapia, des salmonidés et des siluriformes.

Il existe plusieurs types de production piscicole. Parlons quelques-uns :

a) Les systèmes de production piscicole extensifs

Ils sont basés sur la productivité naturelle de l'environnement ou de la structure d'élevage des poissons, sans ou avec très peu d'apports d'intrants. On entend généralement des élevages installés dans des bassins ou des étendues d'eau de moyenne ou de grande dimension.

La nourriture est tout simplement fournie par la productivité naturelle du plan d'eau, que l'on favorise très peu ou légèrement. Les apports extérieurs sont limités, les coûts restent faibles, le capital investi est réduit, les quantités de poisson produites par unité de surface sont modestes.

b) Les systèmes de production piscicole semi-intensifs

Ils reposent sur l'utilisation d'une fertilisation ou sur l'emploi d'une alimentation complémentaire, sachant qu'une part importante de l'alimentation du poisson est fournie in situ par l'aliment naturel.

c) Les systèmes intensifs et super intensifs

Dans ce système, tous les besoins nutritionnels des poissons sont satisfaits par l'apport exogène d'aliments complets, avec pas ou très peu d'apports nutritionnels issus de la productivité naturelle du bassin ou du plan d'eau dans lequel le poisson est élevé (lac, rivière).

Au Burundi, la pisciculture a été introduite au début des années 50ans par l'administration coloniale.

Cette pisciculture était caractérisée par l'utilisation extensive et la création de vaste étangs individuels de 0,25 à 0,50 ha. La vulgarisation reposait sur un système d'écloseries pour la distribution des alevins aux éleveurs. Différentes sortes de Tilapia étaient à la base de toute production. On estimait à 352 le nombre d'étangs construits au Burundi. En 1966, on restait avec un seul étang en service. [https://www.fao.org/3/AC591F/AC591F04.htm] (Consulté le 20/10/2021 à 15h00')

Le manque d'autosuffisance, et donc la dépendance excessive sur la vulgarisation pour des apports tels que matériaux de construction, alimentation, alevins et les conseils pratiques, étaient la cause de ce déclin.

Dans nos jours on essaie de former les gens afin de pratiquer la pisciculture familiale intégrée et les systèmes de production semi-intensifs (rendement d'environ 1tonne/ha) permettant d'augmenter les revenus et améliorer la nutrition des ménages dans la localité.

I.4. Etudes déjà faites

Plusieurs auteurs ont traité les causes et la gestion des inondations des rivières traversant la ville de Bujumbura et ils ont proposé des solutions. Selon (Avit NSENGIYUMVA ,2014), une mise en place du barrage en terre, régulateur de débit et les murs anti- crues ont été proposé sur la rivière Mutimbuzi afin d'atténuer le risque d'inondation de l'Aéroport International Melchior NDANDAYE et la zone de Buterere. Selon (Landry BWIRABUCIZA FAKAGE,2020) ; il a proposé les techniques de réduction et ralentissement de ruissellement à différentes échelles à savoir le reboisement et les rétentions collinaires par des fossés antiérosifs dans la commune Isare et les rétentions des eaux de toitures dans les parcelles dans la zone périurbaine urbaine de Kinama ;le curage régulier et fréquent de la rivière canalisée et du bassin de détention .Toutes ces techniques sont proposées pour atténuer le risque d'inondation dans le bassin versant de la rivière Gasenyi.

Du côté irrigation, le rapport de la FAO de 2005 affirme qu'au Burundi, la méthode d'irrigation pratiquée est l'irrigation de surface (irrigation par bassins, rigoles, sillons ou ados) avec prélèvement des eaux des rivières résultant du ruissellement et de l'infiltration des eaux de pluies. Ainsi les projets d'irrigation avec des barrages en dérivation, d'une superficie totale de 21 430 ha, sont réalisés dans les plaines de l'Imbo et de Moso-Sud, ainsi que dans les marais d'altitude où se pratique la riziculture.

CHAPITRE II : PRESENTATION ET CARACTERISATION HYDROLOGIQUE ET HYDRAULIQUE DE LA ZONE D'ETUDE

II.1. Description de la zone d'étude

II.1.1. Situation géographique et administrative

Le bassin versant de la rivière Mutimbuzi se situe au nord de la ville de Bujumbura entre 3°12'00" et 3°24'30" de latitude Sud et 29°19'00" et 29°34'00" de longitude Est. La rivière Mutimbuzi est l'une des rivières se jetant dans le lac Tanganyika. Par ses trois (3) principaux affluents dont Muzazi, Murago et Gikoma ; elle prend la source dans la Province de Muramvya, Commune Muramvya, Colline Kavya. La zone d'étude est présentée sur la figure II-1.

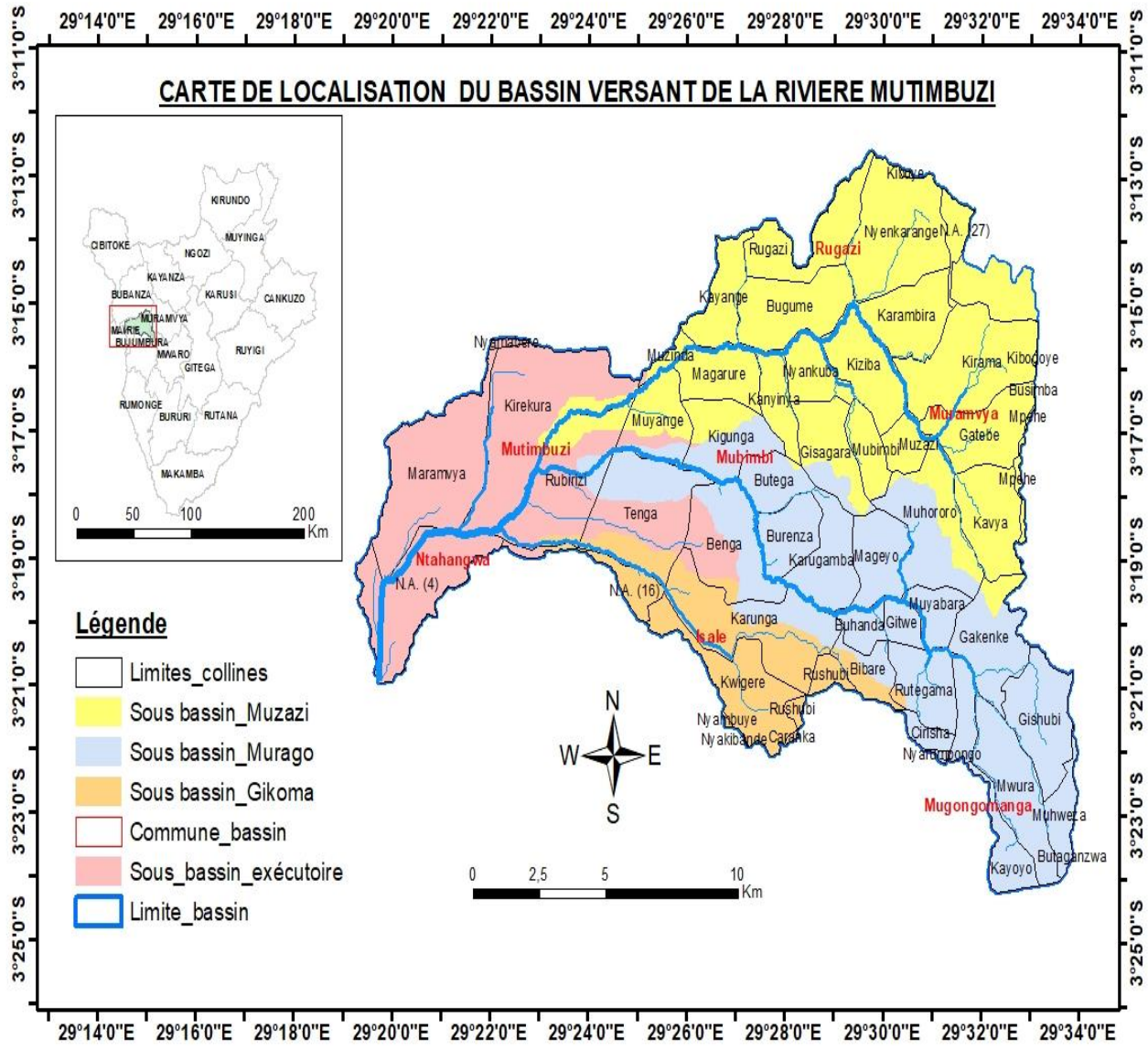


Figure II-1 : Localisation géographique de la zone d'étude

II.1.2. Climat

Au point de vue climatique, la zone d'étude couvre 3 régions écoclimatiques dont (i) la plaine de l'Imbo, (ii) contrefort de Mumirwa et (iii) Crête Congo-Nil. Son climat est influencé par l'altitude qui varie entre 759 m et 2505 m. Il est caractérisé par une alternance de la saison pluvieuse qui s'étend généralement du mois d'Octobre à Mai et de la saison sèche qui va de Juin à Septembre. (Ministère de l'Eau, 2010)

Tableau II-1 : Répartition de la pluviométrie et température de la zone d'étude

Régions éco climatiques	Altitude (en mètre)	Température moyenne annuelle (°C)	Pluie moyenne annuelle (en mm)
Plaine de l'IMBO	800 - 1100	Sup. à 23 °C	800-1100
Contrefort de MUMIRWA	1000 – 1700	18°C – 28°C	1100 - 1900
Crête Congo-Nil	1700 - 2500	14°C -15°C	1300 – 2000

Source :(MINATTE, 2005 cité par Ministère de l'eau, de l'Environnement, de l'Aménagement du Territoire et de l'urbanisme)

II.1.3. Géomorphologie et lithologie

Du point de vue géomorphologique, le bassin versant de Mutimbuzi est formé d'un massif montagneux (crête Congo-Nil) dans sa partie amont avec de fortes pentes et au milieu, il est formé par les contreforts de Mumirwa. La partie aval est formé par les vallées encaissées en forme de V à faible pente (plaine de l'Imbo), partie qui est la plus exposée aux risques d'inondations.

Du point de vue lithologique, on trouve des quartzites, des amphiboles, des schistes, des métaquartzites, etc à dominance argileuse. La plaine de l'Imbo quant à elle, est dominée par des dépôts alluvionnaires composés par des vertisols (combinaison des argiles et des matières organiques). [http://www.abctaxa.be/burundi/biodiversity/presentation-du-burundi/aspects-physiques-du-burundi/geologie-et-pedologie-du-burundi/] (Consulté le 25/10/2021 à 9h00').

II.1.4. Hydrographie de la zone d'étude

Le bassin versant faisant objet de notre étude est dominé par la rivière Mutimbuzi. La rivière Mutimbuzi a trois principaux affluents Muzazi, Murago et Gikoma. La rivière Murago est l'affluent principal de la rivière Mutimbuzi.

Cette rivière, de même que ses affluents se caractérisent par un courant fort pendant les saisons pluvieuses et faible pendant les saisons sèches voir même sec vers le mois de Juillet.

II.2. Situation hydrologique de la zone d'étude

Dans le bassin versant de la rivière Mutimbuzi, on a déjà enregistré des inondations importantes. (MUHIGIRWA, 2011)

Quelques cas d'inondation déjà enregistrés :

	Endroits touchés	
Années	Zone Buterere	Aéroport international Melchior NDANDAYE
2002	Oui	Oui
11 Mai, 2009	Oui	Non
Décembre 2010	Non	Oui
20 Mars, 2011	Oui	Non
30 Avril,2018	Oui	Non

Durant notre visite, nous avons trouvé des digues anti-crues en terre construites le long des berges des rivières Muzazi et Mutimbuzi, jusqu'au niveau du lac. Mais ces digues sont fortement dégradées. Sur la crête de 3 m de largeur et sur les talus aval et amont, les paysans ont installé des cultures vivrières diverses et la piste qui longeait la digue n'est pas du tout entretenue. Du fait que les rivières ne sont plus recalibrées et dragués pour élargir la section et créer des pentes non érosives au fond, pendant les crues elles sortent de leurs lits, attaquent les berges et provoquent des cassures des digues (NEPAD&PDDAA, Mars 2006). Tout cela a occasionné les inondations du 30 Avril 2018. En ce temps-là la digue a cédé sur sa rive gauche et a causé des dégâts énormes. C'était dans zone Buterere précisément dans le quartier Kiyange.

La figure suivante illustre quelques dégâts causés par les inondations de la rivière Mutimbuzi en 2018.



Figure II-2: Dégâts causés par la rivière Mutimbuzi en 2018

Source : https://www.iwacu-burundi.org/la-riviere-mutimbuzi-cree-des-degats-dans-la-zone-de-buterere/

Cette source affirme que plus de 300 maisons ont étés détruites, d'autres inondées et beaucoup de champs dévastés par ces eaux débordées de la rivière Mutimbuzi.

La situation était très grave. Si c'était la rive droite qui a cédé, ça serait le tour de l'Aéroport International Melchior NDANDAYE.

Selon nos enquêtes réalisées sur terrain, le BV de la rivière Mutimbuzi gènere un volume très important d'éléments granulaires (sédiments fins, sables, galets,). Cela est dû à sa grande superficie et à son relief. Actuellement un curage régulier est indispensable à l'endroit voisin de l'Aéroport International Melchior NDANDAYE pour le protéger contre l'inondation.

Au moment de notre visite, nous avons rencontré des coopératives chargées de faire le curage dans la rivière Mutimbuzi.

La figure suivante montre les travaux de curage effectués sur la rivière Mutimbuzi sur la RN5.



Figure II-3 : Photos prises sur terrain des travaux de curage sur la rivière Mutimbuzi

Tous ces défis énoncés ci-haut démontrent qu'il y a une exigence d'amener une étude permettant d'atténuer le risque d'inondation de l'Aéroport International Melchior NDANDAYE.

II.3. Situation hydraulique de la zone d'étude

Dans la plaine de l'Imbo sur la rivière Mutimbuzi et ses affluents, on trouve des ouvrages hydrauliques qui sont des micro-barrages de la SRDI de types déversoir, à seuil épais (PRASAB), 1999) ainsi que les ponts.

a) Ouvrages hydroagricoles :
   - Deux barrages déversoir sur Muzazi ;
   - Un barrage déversoir sur Murago ;
   - Un barrage déversoir sur Gikoma ;
   - Une prise d'eau sur Muzazi.



Barrage déversoir sur Murago



Barrage déversoir sur Gikoma



Barrage déversoir sur Muzazi à Kirekura



Réservoir déversoir sur Muzazi à Muzinda



Prise d'eau sur Muzazi à Kiyange

Figure II-4 : Photos prises sur terrain de prises d'eau existant sur la rivière Mutimbuzi et ses affluents

Les caractéristiques de ces micro-barrages sont :

- La longueur de leur seuil varie entre 3 m et 20 m ;
- Leur hauteur est comprise entre 1,5 à 4 m maximum ;
- Dessableurs latéraux ou frontaux avec un ou deux compartiments et dont les longueurs varient de 20 à 40 m suivant le cas ;

- Vannes de captage et de chasse au niveau du seuil du barrage et vanne de chasse au niveau du dessableur ;
- Début du canal tête morte bétonné.

b) Les ponts :

- Deux ponts sur Mutimbuzi (RN4, RN5) ;
- Un pont sur Mutimbuzi reliant zone Buterere de la Commune Ntahangwa et zone Maramvya de la Commune Mutimbuzi et un pont sur RN9 ;
- Un pont sur Murago (RN9) ;
- Un pont sur Gikoma (RN9).



Pont effondré sur Mutimbuzi reliant Buterere et Maramvya

Pont récemment effondré sur Murago RN9

Pont sur Gikoma (RN9)

Pont sur Mutimbuzi (RN5)

Figure II-5 : Les ponts sur la rivière Muzazi et ses affluents

Les figures ci-dessus montrent que tous ces ouvrages sont en mauvais état et il y a même ceux qui sont détruits complétement (ex : Prise d'eau sur Muzazi et le pont sur Muzazi reliant la zone de Buterere et la zone de Maramvya).

Comme observation, la SRDI n'ont pas conservé tous les documents et les plans conceptuels des ouvrages réalisés, et cela crée des difficultés pour retrouver les caractéristiques initiales de ces ouvrages, ainsi que des données de base qui ont servi dans leur conception et exécution.

A ces ouvrages hydrauliques, il faut y ajouter les digues de protection contre les inondations des périmètres rizicoles.

II.4. Situation hydroagricole de la zone d'étude

Le Burundi est un pays dont la principale activité économique est l'agriculture. De ce fait on trouve pas mal des périmètres irrigués dans la plaine de l'Imbo. Aussi dans le BV de la rivière Mutimbuzi, on trouve des périmètres irrigués sous le nom Est-Mpanda. Ces périmètres occupent environ 2095ha et sont gérés par la SRDI. Dans ces périmètres, la culture la plus pratiquée est le riz avec un rendement moyen de 5 ha/par saison suite au manque d'eau.

Tableau II-2 : Caractéristiques des périmètres irrigués de l'Est Mpanda

Nom du périmètre	Superficie en ha	Potentiel d'irrigation
1. Kidwebezi	83	Muzazi
2. Nyamabere	200	Muzazi
3. Kabamba	269	Muzazi
4. Mubone	236	Gikoma
5. Maramvya	171	Muzazi
6. Kiyange	200	Gikoma
7. Rubira	164	Muzazi
8. Rubirizi	162	Murago
9. Bugoma	144	Muzazi
Total	**1629**	
10.Hors-périmètres de la SRDI	457,5	Muzazi
11.Hors-périmètres de la SRDI	8.5	Gikoma
Total	**466**	

Source : (*NEPAD&PDDAA, Mars 2006*) *&SRDI*

Suite aux insuffisances d'eau, l'irrigation de tous ces périmètres en même temps est pratiquement impossible. Plusieurs problèmes sont évoqués au moment de notre visite par les agriculteurs de la localité. Par exemple :

- Pratique de tour d'eau ;
- Décalage de semis ;
- Diminution de récolte escompté ;
- Conflits. Etc

D'où la nécessité d'évaluer les besoins en eau d'irrigation de ces périmètres afin de proposer la solution pour atténuer tous ces problèmes cités ci-haut.

CHAPITRE III : TRAITEMENT DES DONNEES ET ANALYSES DES RESULTATS

III.1. Traitement des données topographiques

Ce traitement est indispensable dans le présent travail car il permet de dégager les caractéristiques de base d'un bassin versant. Ces caractéristiques sont de grande importance dans l'étude hydrologique d'un bassin versant.

III.1.1. Délimitation du bassin et réseau hydrographique

La délimitation du BV et des cours d'eau est indispensable à toute étude comme la nôtre dans le sens qu'elle permet la connaissance des caractéristiques géométriques du BV telles que la superficie, le périmètre, la compacité, la pente, la longueur du plus long talweg, etc.

Les données du modèle numérique de terrain (MNT) trouvé dans le bureau de centralisation des données "Géomatique" et traitées dans le logiciel ArcGis10.3, nous a conduit à la réalisation des cartes respectives : la carte des surfaces du BV et du SBV de la rivière Mutimbuzi, sa carte hypsométrique, sa carte topographique, sa courbe hypsométrique, son réseau hydrographique ainsi que le profil en long de son cours d'eau principal.

Les figures qui suivent (III-1, III-2, III-3, III-4, III-5 et III-6) illustrent respectivement les cartes citées ci-haut.

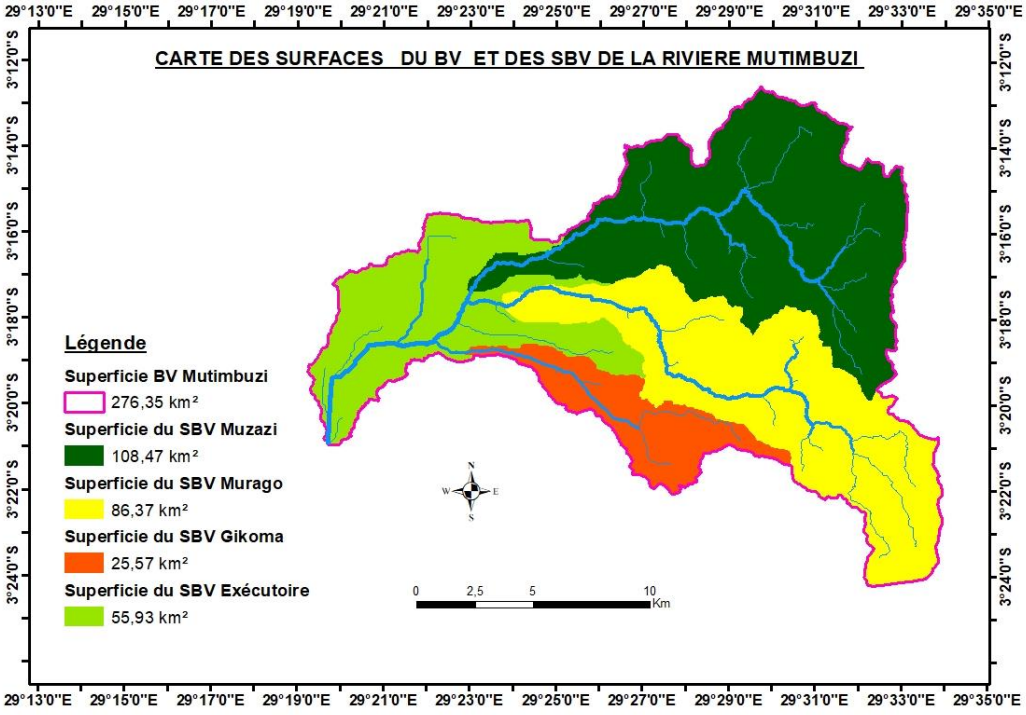


Figure III-1 : Surface du BV de la rivière Mutimbuzi

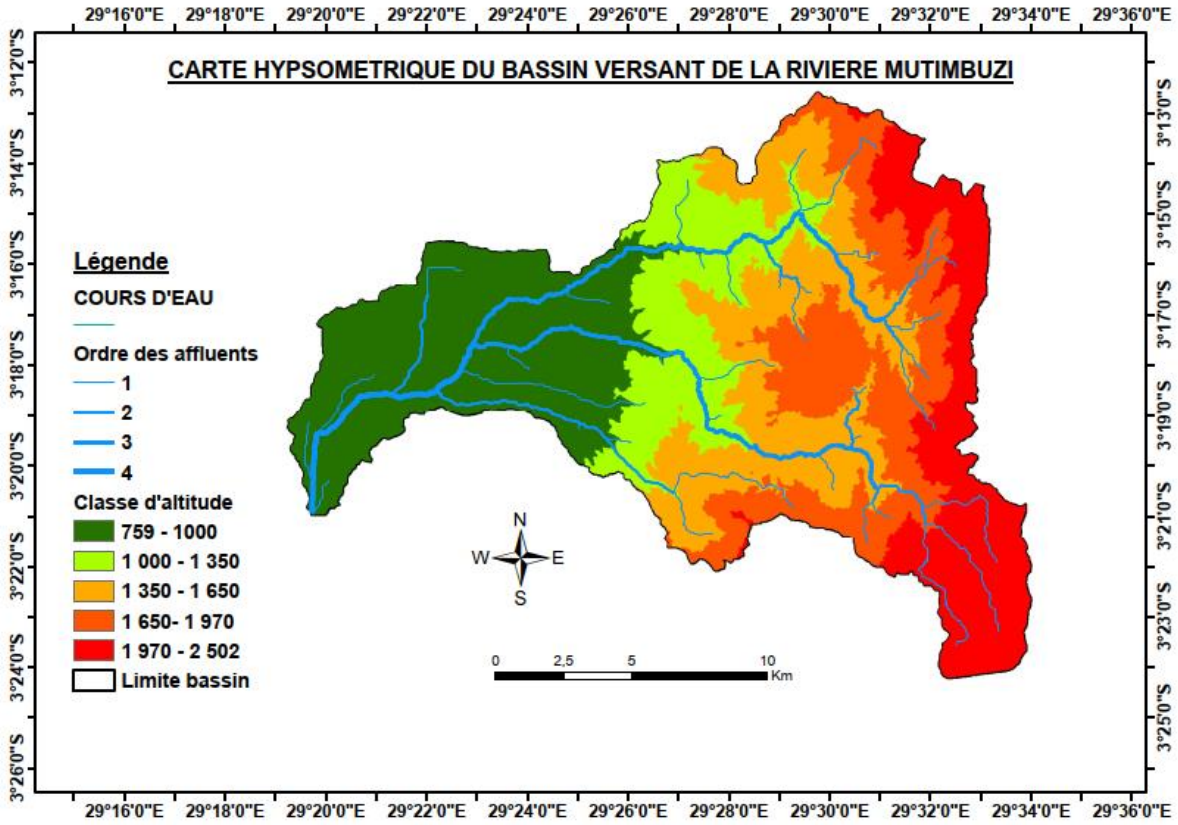


Figure III-2 : Relief de la zone d'étude

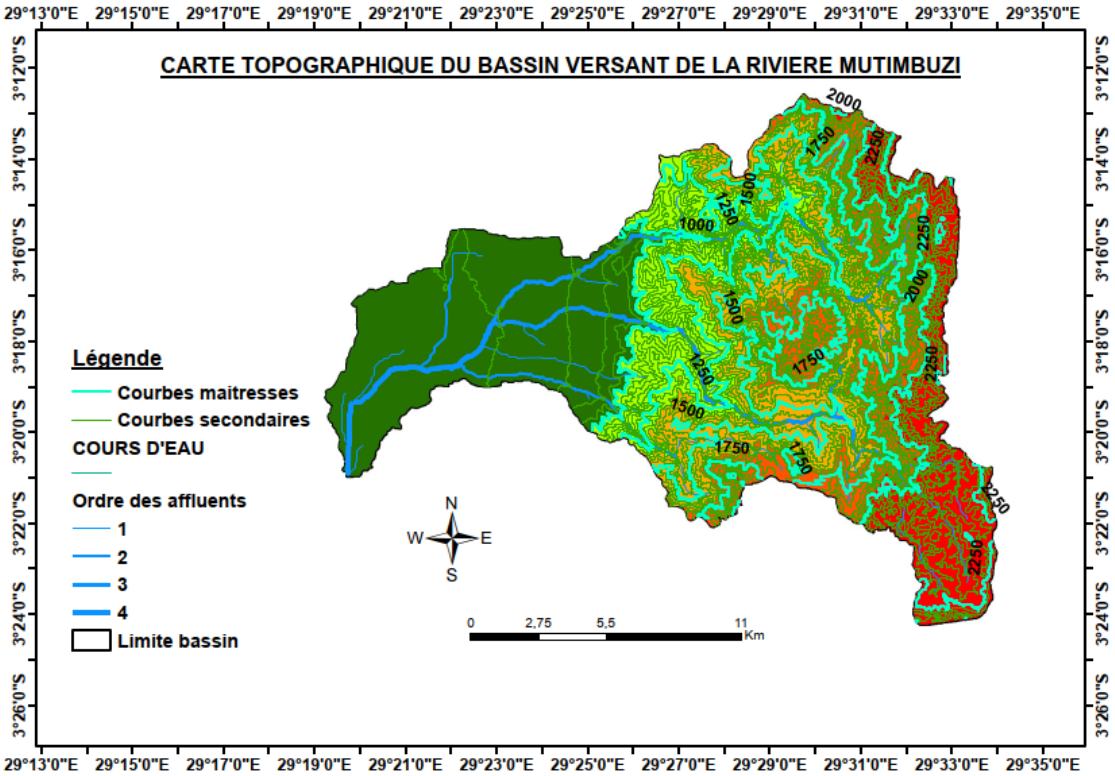


Figure III-3 : Carte topographique de la zone d'étude

Pour avoir la courbe hypsométrique, il faut la répartition de la superficie en fonction des altitudes. Le tableau qui suit donne la répartition de la superficie du BV Mutimbuzi en fonction des altitudes.

Tableau III-1 : Répartition de la superficie du BV Mutimbuzi en fonction des altitudes

Altitude	Surface en km	% de surface
759	276,34	100,00
1000	202,40	73,24
1350	159,61	57,76
1650	98,85	35,77
1970	46,06	16,67
2502	0,00	0,00

Courbe hypsométrique

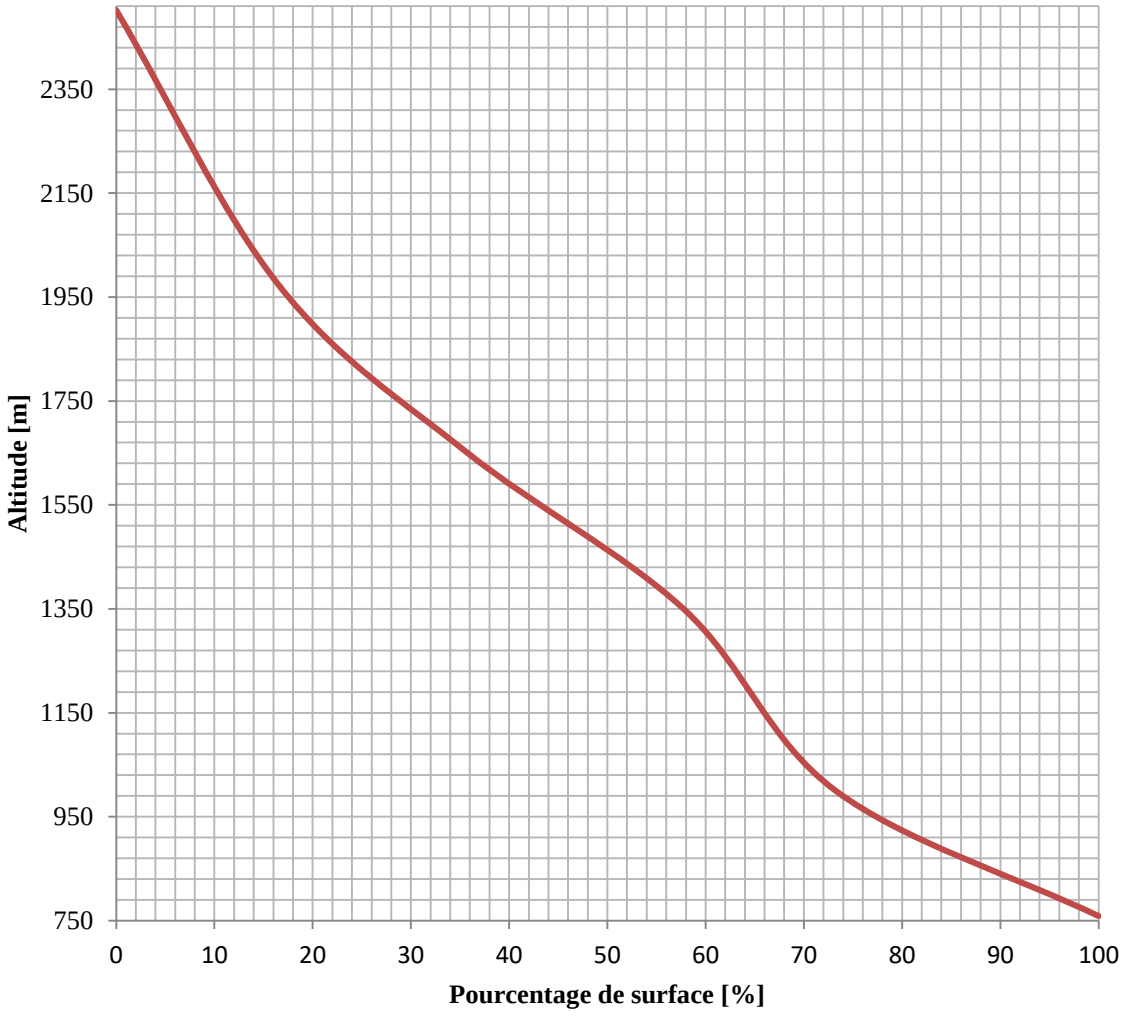


Figure III-4 : Courbe hypsométrique du bassin versant de la rivière Mutimbuzi

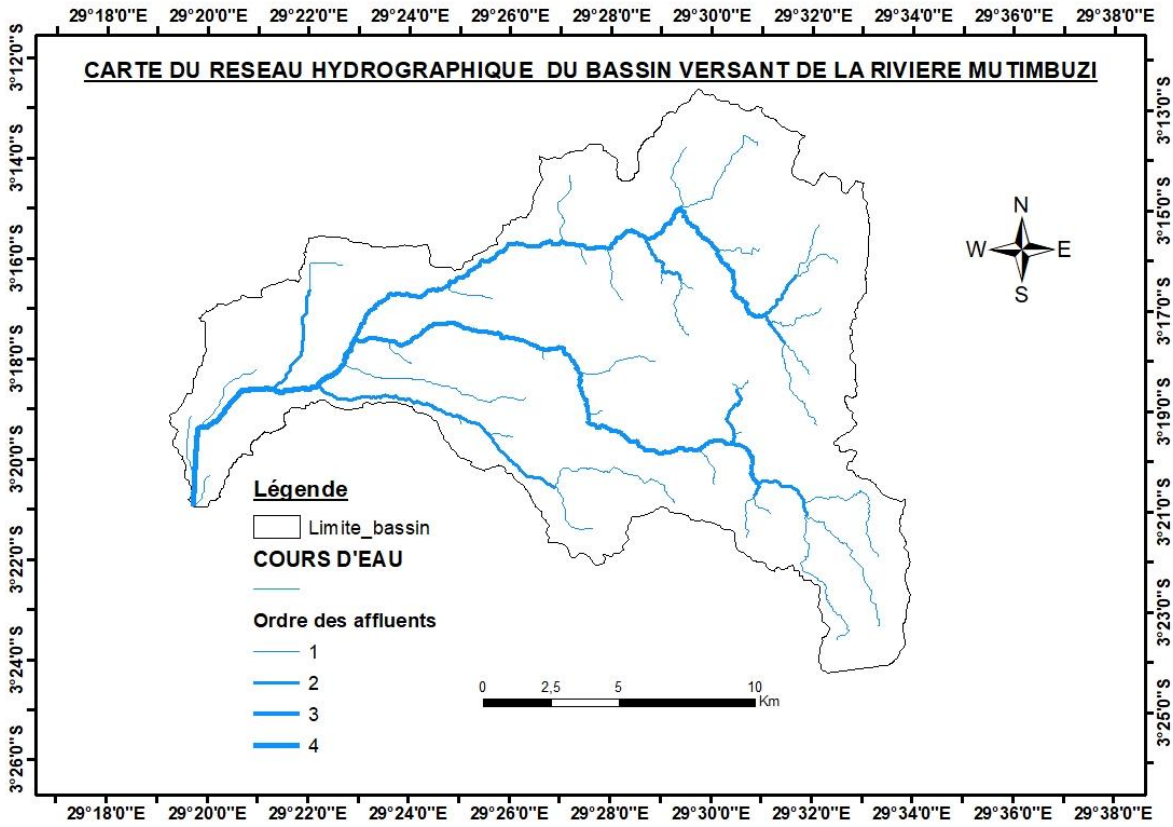


Figure III-5 : Réseau hydrographique de la zone d'étude

Pour tracer le profil en long d'un cours d'eau, il faut les données de l'amont vers l'aval montrant les distances (abscisses) et leurs altitudes (ordonnées). Le tableau III-2 donne les abscisses et les ordonnées utilisées pour créer le profil en long du cours d'eau principal du BV Mutimbuzi.

Tableau III-2 : Abscisses et ordonnées du cours d'eau principal pour le profil en long

Numéro	Distance [m]	Altitude[m]		Numéro	Distance [m]	Altitude [m]
1	0,00	2007,52		22	19445,08	897,60
2	1007,76	1883,22		23	20360,05	876,32
3	2003,74	1634,70		24	21290,52	864,00
4	3005,64	1577,97		25	22160,75	844,82
5	4004,01	1546,39		26	23065,91	833,18
6	4900,98	1526,44		27	23962,60	822,00
7	5787,24	1505,30		28	24885,49	813,00
8	6682,60	1459,34		29	25796,03	803,08
9	7584,60	1413,60		30	26690,08	796,00
10	8511,59	1355,08		31	27600,00	791,47
11	9409,40	1280,50		32	28523,61	789,60
12	10321,67	1247,16		33	29449,32	786,47
13	11204,51	1212,90		34	30388,28	782,07
14	12121,54	1172,87		35	31326,53	779,41
15	13031,55	1116,11		36	32257,51	776,00
16	13942,16	1050,87		37	33234,30	772,00
17	14846,08	1023,78		38	34213,79	770,00
18	15771,16	992,47		39	35136,29	766,78
19	16674,13	962,00		40	36098,41	765,47
20	17576,86	936,00		41	37067,52	763,00
21	18495,22	915,50		42	37439,34	759,00

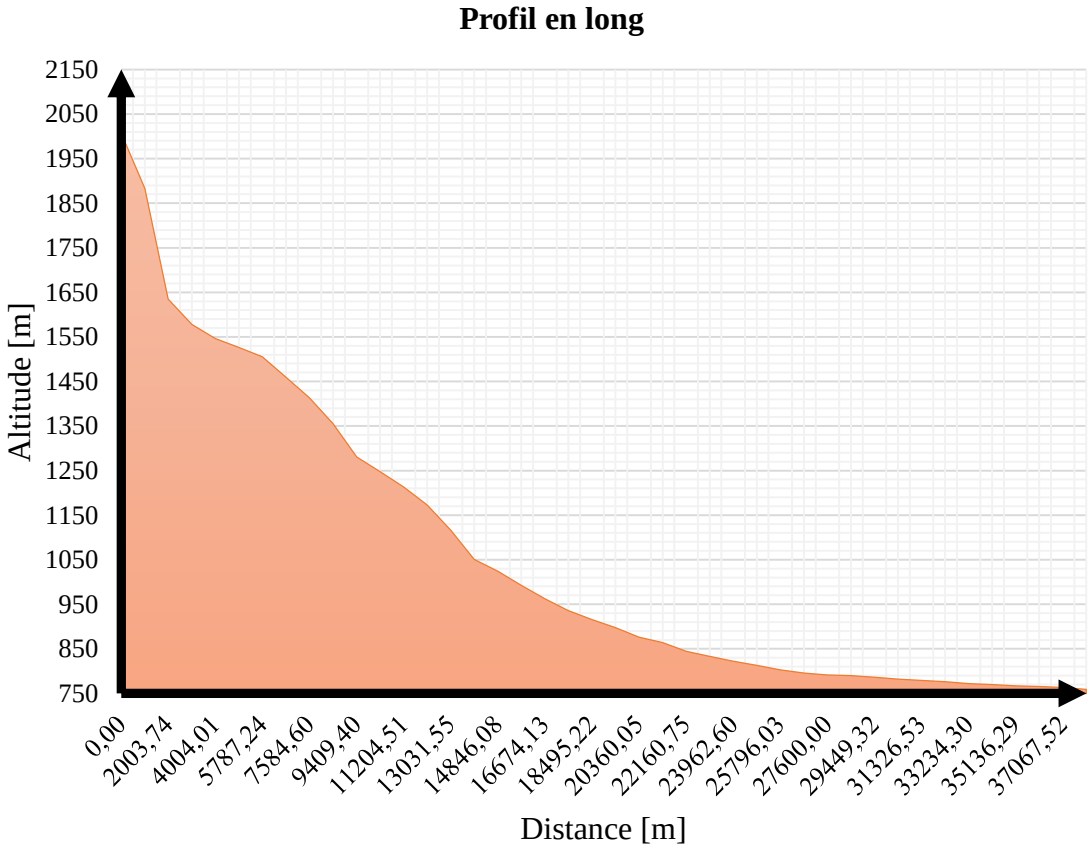


Figure III-6 : Profil en long du cours d'eau principal du BV Mutimbuzi

III.2. Données du sol

- ✓ **La couverture végétale**

La couverture végétale de notre zone d'étude a été trouvé à base des donnés téléchargées gratuitement, sur le lien https://data.isric.org/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/2a7d2fb8-e0db-4a4b-9661-4809865aacc (Téléchargé le 25/8/2021 à 10h).

Après traitement de ces données dans le logiciel ArcGis 10.3, la carte illustrant l'occupation du sol du BV Mutimbuzi a été produite.

La figure III-7 montre l'occupation du sol du BV Mutimbuzi.

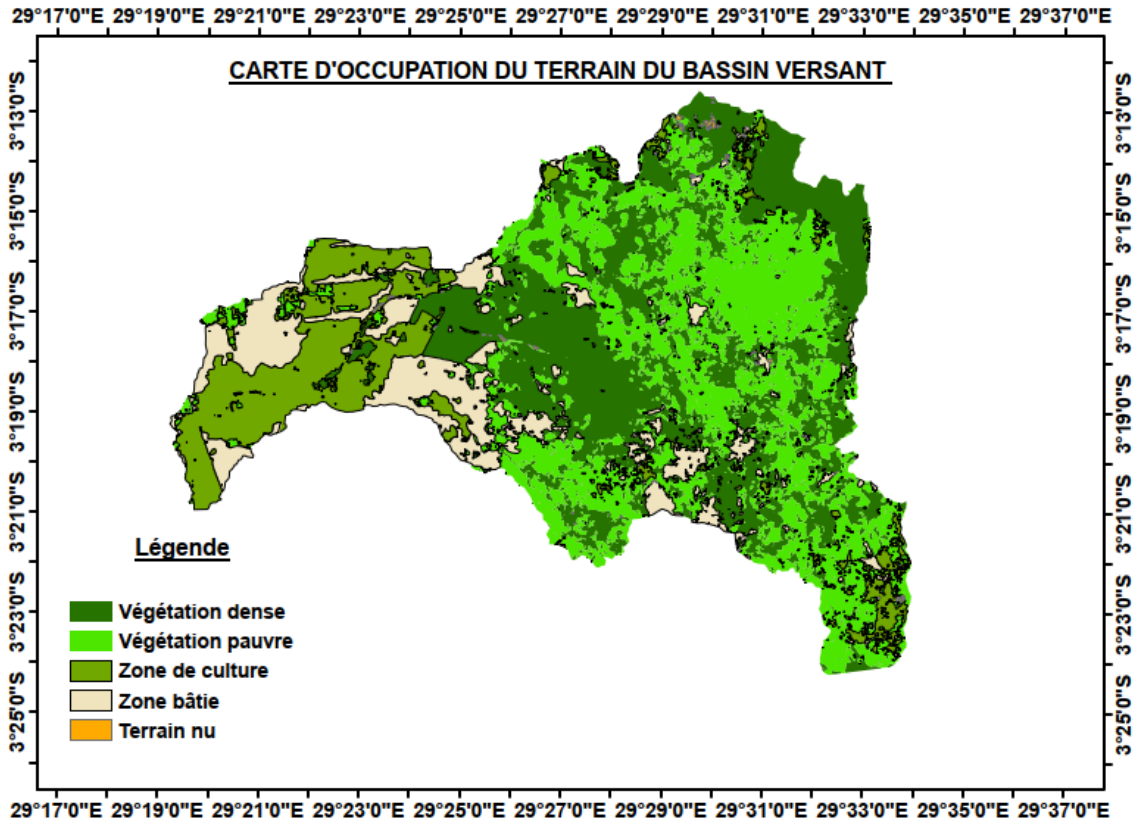


Figure III-7 : Occupation du terrain de la zone d'étude

A partir de la carte d'occupation du sol, il est possible d'avoir la superficie occupée par chaque activité végétative. Le tableau III-3 montre la superficie occupée par chaque activité.

Tableau III-3 : Occupation du sol de la zone d'étude

Occupation du sol	Superficie en %
Végétation dense	37,79%
Végétation pauvre	34,51%
Zone de culture	15,18%
Zone bâtie	12,37%
Terrain nu	0,14%

- ✓ **Le type du sol**

Dans le présent travail, le type de sol a été établi en fonction des données téléchargées gratuitement sur le lien https://livingatlas.arcgis.com/landcover/ (Téléchargé le 25/8/2021 à 13h). Ces données se trouvent dans base des données Africa Soil Profiles établie par le projet de cartographie des propriétés des sols de l'Afrique.

Ces données contiennent un ensemble des fichiers raster de six intervalles de profondeurs (0 – 5 cm, 5 – 15 cm, 15 – 30 cm, 30 – 60 cm, 60 – 100 cm et 100 – 200 cm. Six types des sols (argile, argile sableuse, limon argileux, limon argilo-sableux, terreau, limon sableux) réparties en quatre groupes pédologiques de sol (HSG), à savoir A, B en petite portion, C en moyenne portion et D en grande portion, ont été identifiées dans la zone d'étude.

Les figures suivantes (III-8 et III-9) montrent la répartition des différents types du sol dans le BV Mutimbuzi suivant les différentes couches.

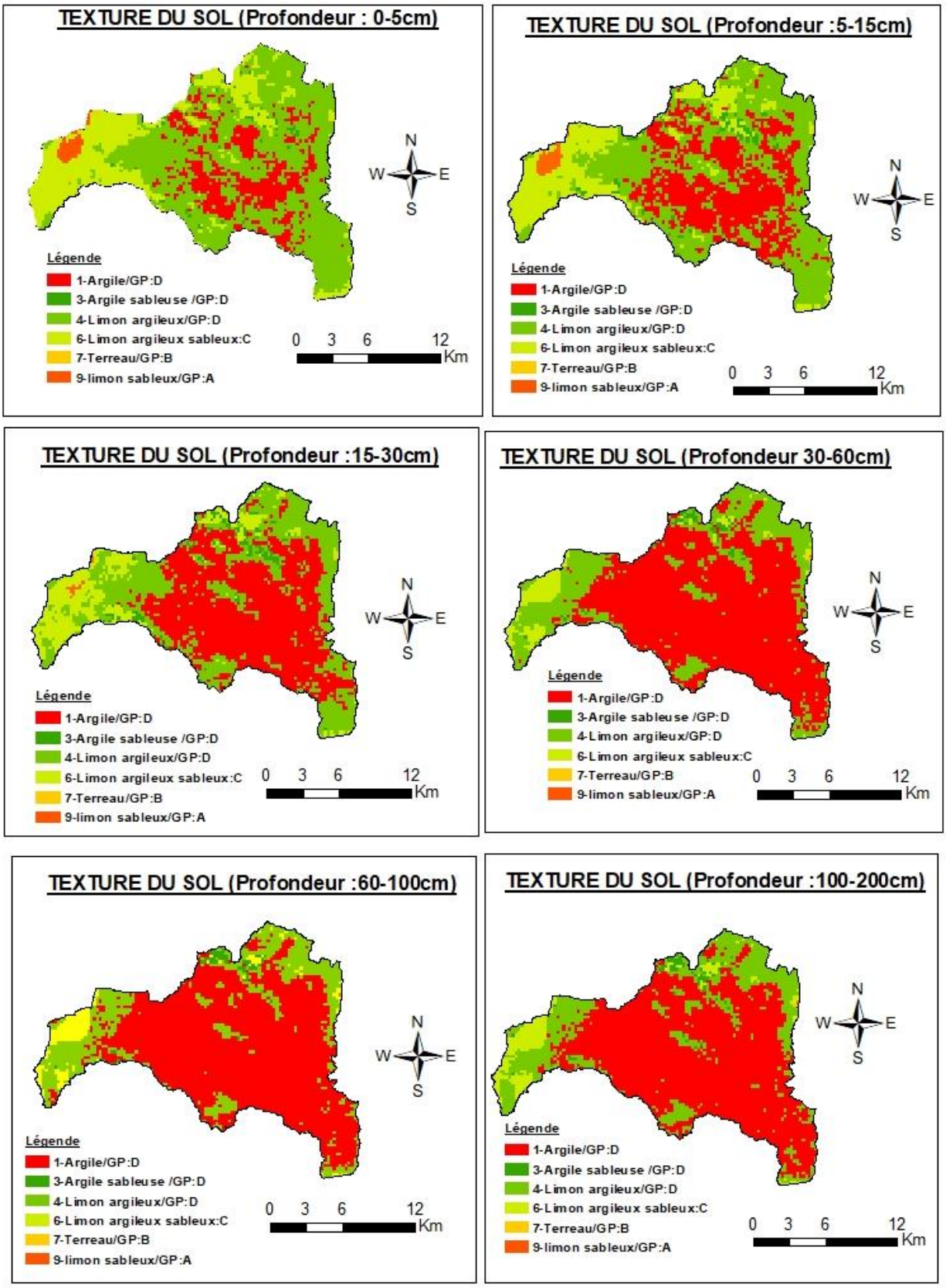


Figure III-8 : Type de sol de la zone d'étude

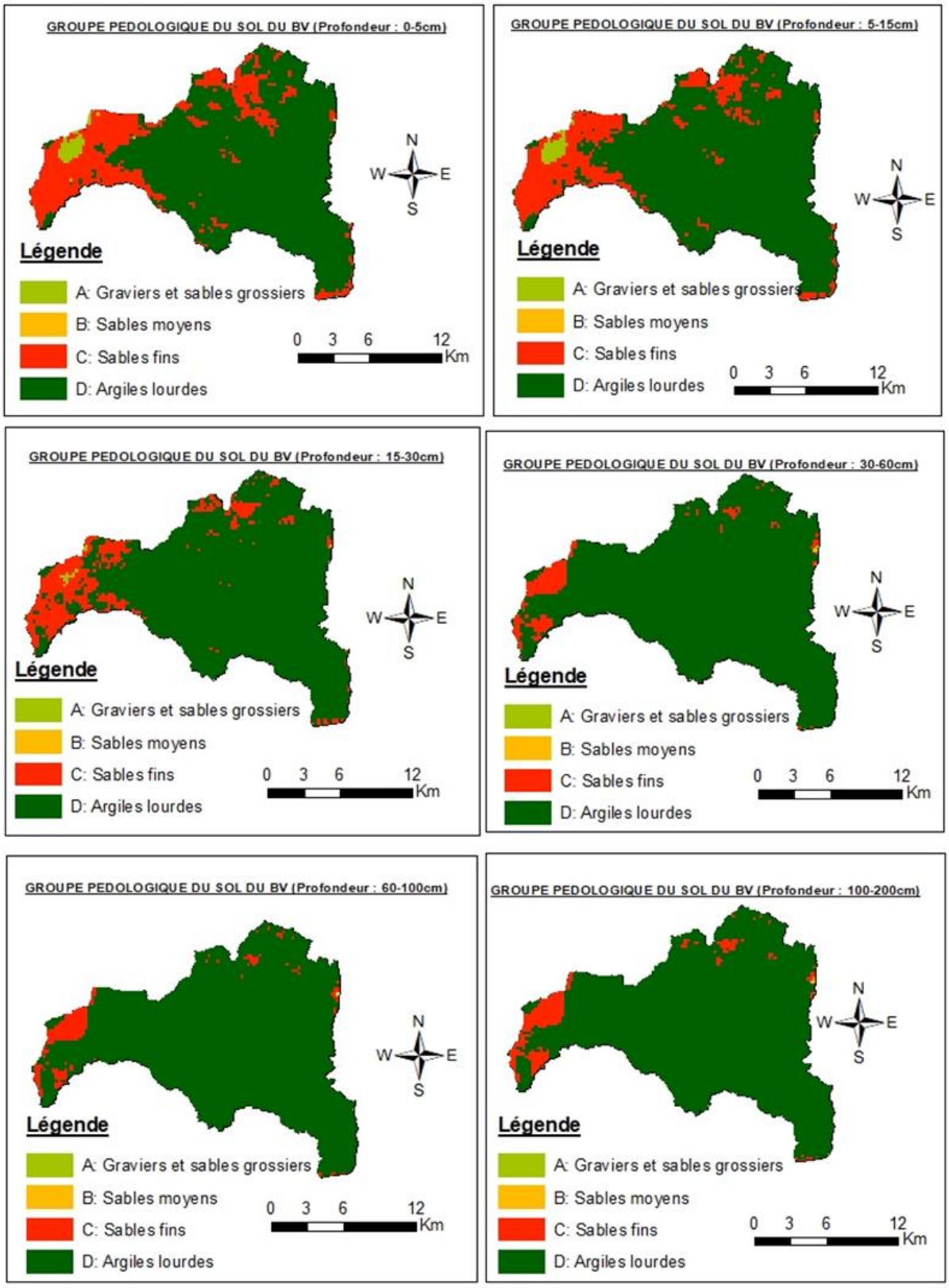


Figure III-9 : Groupes pédologiques de la zone d'étude

Pour la suite les type des sols et les groupes pédologiques identifiées à une profondeur de 0-5cm ont été utilisées.

La figure suivante montre la répartition des groupes pédologiques dans le BV Mutimbuzi à une profondeur de 0-5cm.

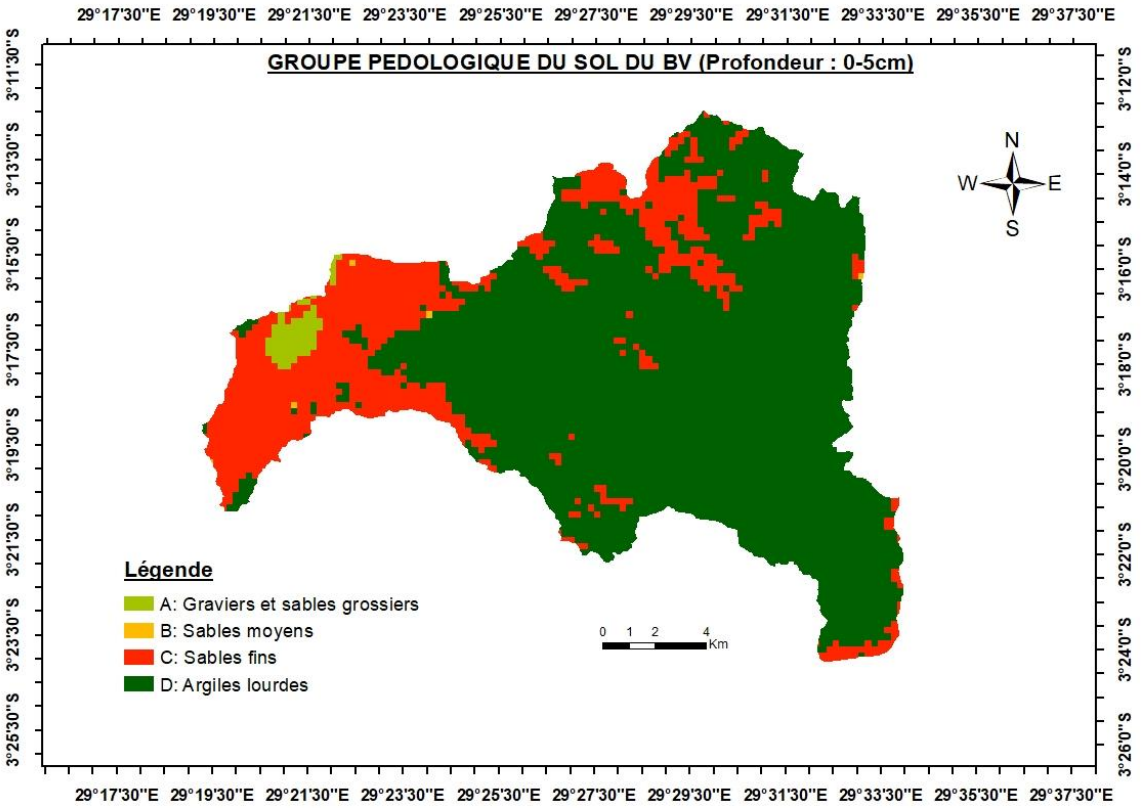


Figure III-10 : Groupes pédologiques de la zone d'étude à une profondeur de 0-5cm

A partir de la carte des groupes pédologiques du BV Mutimbuzi, il est possible d'avoir la superficie occupée par chaque groupe. Le tableau III-4 montre la superficie occupée par chaque groupe.

Tableau III-4 : Groupes pédologiques du BV Mutimbuzi à une profondeur de 0-5cm

Groupe hydrologique du sol	A	B	C	D
Surface en pourcentage	3,5%	1,5%	23%	72%

En fonction de l'occupation du sol et des groupes pédologiques du BV Mutimbuzi illustrés ci - dessus, on en déduit le paramètre CN (II) du BV Mutimbuzi présenté dans le tableau III-5.

Tableau III-5 : Curve number CN (II)

Superficie totale du bassin en km²					276,35	**A**	**B**	**C**	**D**
		% de superficie des groupes				3,5%	1,5%	23%	72%
		Superficie des groupes en km²				9,67	4,15	63,56	198,97
Occupation du sol	% de superficie	**CN (II) A**	**CN (II) B**	**CN (II) C**	**CN (II) D**				
Végétation dense	37,79%	32	58	72	79	116,98	90,87	1 729,59	5 940,78
Végétation pauvre	34,51%	43	65	76	82	143,53	92,98	1 667,01	5 630,44
Zone de culture	15,18%	39	61	74	80	57,28	38,40	714,22	2 417,10
Zone bâtie	12,37%	59	74	82	86	70,62	37,96	644,95	2 117,46
Terrain nu	0,14%	77	86	91	94	1,02	0,49	7,94	25,67
Total	100%					389,42	260,69	4 763,71	16 131,44
				CN(II) par groupe		40,26	62,89	74,95	81,07
				CN (II) pondérée		**78**			

Source :(TR-55, June 1986 p. 17)

Le CN (II) pondérée du bassin versant est obtenue avec l'expression suivante :

$$CN(II)_{moy} = \frac{\sum A_i CN(II)_i}{\sum A_i} \qquad \textbf{(III-1)}$$

- Conditions normales : $CN(II) = 78$
- Conditions sèches : $CN(I) = \frac{4{,}2CN(II)}{10-0{,}058CN(II)} = \frac{4{,}2*78}{10-0.058*78} = 60$
- Conditions humides : $CN(III) = \frac{23CN(II)}{10+0{,}13CN(II)} = \frac{23*78}{10+0.13*78} = 89$

Dans le présent travail le curve number correspondant aux conditions sèches a été utilisé.

III.3. Temps de concentration du bassin versant de Mutimbuzi

Le temps de concentration est le temps écoulé entre le début d'une précipitation et l'atteinte du débit maximal à l'exutoire du bassin versant. Il correspond au temps nécessaire pour permettre à l'eau de ruisseler du point le plus reculé du bassin versant jusqu'à l'exutoire.

Il existe de nombreuses formules empiriques pour calculer le temps de concentration d'un bassin. Le présent travail a abordé les formules suivantes :

Auteurs	**Formules**	**Valeurs (min)**
Giandotti	$t_c = \frac{4,A^{0,5}+1,5,l}{0,8,h^{0,5}}$ A : Surface du bassin versant (km2) ; L : longueur du cours d'eau principal (km) ; h : différence entre l'altitude moyenne du bassin et celle à l'exutoire (m) ; t_c : temps de concentration (heures),	354
Kirpich	$t_c = 0,0195,\frac{L^{0,77}}{S^{0,385}}$ L : longueur du cours d'eau principal (m); S : pente du cours d'eau principal (%) tc : temps de concentration (min)	239
Ventoura	$t_c = 76,3,\frac{\sqrt{A}}{\sqrt{I}}$ tc : temps de concentration (min) ; A : superficie u bassin versant (km^2) ; I : pente moyenne du bassin (%),	222

D'après ces trois formules différentes, on voit que le temps de concentration de notre bassin versant varie entre 200min et 360 min ; prenons **le temps de concentration tc=300min**

III.4. Caractéristiques du bassin versant de la rivière Mutimbuzi

En résumé, les caractéristiques du BV Mutimbuzi sont présentées dans le tableau suivant :

Caractéristiques	**Symboles**	**Valeur**	**Unité**
Surface	A	276,35	km²
Périmètre	P	110,26	km
Compacité de Gravelius	Kc	1,86	
Longueur du rectangle équivalent	L	49,55	km
Largeur du rectangle équivalent	l	5,58	km
Altitude maximale	Altmax	2502	m
Altitude minimale	Altmin	759	m
Altitude moyenne	Hmoy	1465,60	m
Altitude médiane	Altmed	1460,00	m
Pente moyenne du bassin versant	Pmoy	0,33	m/m
Altitude (cours d'eau principal)		2007,52	m
Altitude (exécutoire)		759,00	m
Longueur du cours d'eau	L	37439,34	m
ΔHmax	km	1248,52	m
Différence entre l'altitude moyenne du bassin et celle de l'exécutoire		706,60	m
Pente moyenne d'un cours d'eau	I	33,35	m/km
Temps de concentration		300	min
Curve number	CN		
Conditions normales	CN (II)	78	
Conditions sèches	CN (I)	60	
Conditions humides	CN (III)	89	

III.5. Traitement des données climatiques et évaluation des crues afférentes

III.5.1. Analyse climatologique

Pour cette étude, nous nous sommes servis des données climatiques de la station météorologique de l'Aéroport International Melchior NDANDAYE de Bujumbura. Ces données émanant de l'IGEBU sont les précipitations journalières P_{24} (mm) [1991-2020] soit 30ans, les températures maximales et minimales journalières (°C) [1991-1999 ;2010-2020] soit 20ans et les humidités relatives maximales et minimales journalières (%) [1996-2020] soit 25ans. Le temps des précipitations est estimé à 24heures d'où l'appellation P_{24}. Mais en réalité au Burundi c'est rare de trouver dans une localité une pluie qui dure 24heures. Donc dans la suite nous n'avons pas considérée une averse de 24h.

Le traitement en Excel de toutes ces données citées ci-haut, nous a permis de dégager les précipitations journalières maximales annuelles, les précipitations moyennes décadaires (pendant 10jours), les précipitations moyennes mensuelles, températures maximales et minimales moyennes mensuelles et moyennes décadaires, humidités relatives maximales et minimales moyennes mensuelles et moyennes décadaires.

Les tableaux suivants (III-6, III-7, III-8, III-9, III-10 et III-111) montrent respectivement les données dégagées sauf les précipitations moyennes décadaires qui sont présentés dans l'annexe 1.

Tableau III-6 : Hauteurs maximales annuelles des précipitations entre les années (1991-2020)

Date	Hmax (mm)	Date	Hmax (mm)
18/12/1991	61,70	04/08/2006	31,30
02/05/1992	46,70	13/01/2007	63,00
07/02/1993	50,70	04/06/2008	79,80
07/01/1994	59,50	12/04/2009	71,50
23/02/1995	43,40	27/03/2010	52,90
02/10/1996	40,30	18/03/2011	56,30
18/10/1997	32,10	10/12/2012	55,50
07/03/1998	60,70	11/04/2013	60,20
29/12/1999	71,20	09/02/2014	80,00
16/11/2000	77,00	10/12/2015	48,50
08/06/2001	49,80	07/04/2016	47,50
22/01/2002	39,40	17/02/2017	50,80
30/10/2003	29,40	02/04/2018	60,50
31/03/2004	64,80	27/12/2019	60,50
14/03/2005	58,40	18/12/2020	54,30

Tableau III-7 : Précipitations moyennes mensuelles de la station Buja-Aéroport

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moyenne annuelle
Précipitations moyennes mensuelles (mm)	97,4	94,2	109,1	95,0	45,0	11,8	4,9	8,4	31,6	66,1	84,1	105,6	753,1

Tableau III-8 : Variation de la température maximale et minimale moyenne mensuelle de la station Buja-Aéroport

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Temp max [°c]	30,36	30,66	30,21	29,85	30,35	28,56	30,10	31,33	31,81	30,90	30,06	30,12
Temp min [°c]	19,69	19,55	18,93	19,54	19,01	16,73	16,55	17,07	18,53	18,70	18,80	19,18

Tableau III-9 : Variation de la température maximale et minimale (moyenne décadaire) de la station Buja-Aéroport

Mois	**Décades**	**Temp max[°c]**	**Temp min[°c]**	**Mois**	**Décades**	**Temp max[°c]**	**Temp min[°c]**
Janvier	I	30,32	19,92	Juillet	I	29,92	16,56
	II	30,06	19,66		II	29,94	16,29
	III	30,66	19,50		III	30,41	16,79
Février	I	29,47	19,63	Août	I	30,88	16,89
	II	28,77	19,64		II	31,31	17,12
	III	28,89	19,36		III	31,74	17,20
Mars	I	30,51	19,50	Septembre	I	31,17	18,53
	II	30,36	19,14		II	32,03	18,41
	III	29,79	19,34		III	32,24	18,65
Avril	I	29,69	19,31	Octobre	I	31,68	18,70
	II	29,69	19,58		II	30,90	18,77
	III	30,15	19,73		III	30,18	18,64
Mai	I	29,97	19,80	Novembre	I	30,41	18,87
	II	30,45	19,59		II	30,17	18,97
	III	30,59	18,94		III	29,89	18,84
Juin	I	29,60	17,57	Décembre	I	29,91	18,79
	II	27,95	16,66		II	30,06	19,27
	III	28,16	15,99		III	30,38	19,49

- Humidités relatives maximales et minimales moyennes mensuelles et moyennes décadaires

Tableau III-10 : Variation de l'humidité relative maximale et minimale (moyenne mensuelle) de la station Buja-Aéroport

	J	**F**	**M**	**A**	**M**	**J**	**J**	**A**	**S**	**O**	**N**	**D**
HRmax **[%]**	92,36	92,60	92,32	93,98	90,21	87,25	83,23	81,40	81,17	86,68	90,83	91,88
HRmin **[%]**	57,11	55,54	57,22	56,39	52,73	48,17	44,87	43,26	42,87	48,59	56,38	57,45

Tableau III-11 : Variation de l'humidité relative maximale et minimale (moyenne décadaire) de la station Buja-Aéroport

Mois	Décades	HRmax[%]	HRmin[%]	Mois	Décades	HRmax[%]	HRmin[%]
Janvier	I	93,14	57,93	Juillet	I	85,70	45,33
	II	91,49	57,77		II	83,08	44,40
	III	92,40	55,82		III	81,13	44,88
Février	I	92,07	55,76	Août	I	82,00	45,05
	II	93,58	56,38		II	81,48	43,64
	III	92,08	54,23		III	80,76	41,26
Mars	I	92,04	56,59	Septembre	I	80,46	42,42
	II	92,67	57,69		II	82,31	42,57
	III	92,25	57,43		III	80,45	43,61
Avril	I	93,71	55,70	Octobre	I	85,56	47,05
	II	94,29	57,95		II	86,57	48,38
	III	93,96	55,55		III	87,36	50,19
Mai	I	91,44	54,27	Novembre	I	89,57	54,56
	II	90,35	53,18		II	91,00	57,26
	III	89,24	50,92		III	90,84	57,46
Juin	I	88,20	48,80	Décembre	I	91,85	58,13
	II	87,19	47,74		II	90,82	56,98
	III	86,36	47,92		III	91,03	57,23

III.5.2. Analyse fréquentielle des précipitations

C'est une méthode statistique de prédiction consistant à étudier les événements passés, caractéristiques d'un processus donné (hydrologique ou autre), afin d'en définir les probabilités d'apparition future. L'analyse fréquentielle est utilisée, en particulier, pour estimer l'ampleur de l'événement temporel X_T auquel est associé une période de retour T (quartile de période de retour T ou de probabilité au dépassement P = 1/T). L'estimation X_T de la valeur du quantile s'obtient en ajustant une loi de probabilité F (T) à un échantillon de n observations. Pour estimer la probabilité d'apparition d'un évènement hydrométéorologique, on dispose d'une série de débits ou de série pluviométrique sur une période d'observation Pobs. (Dègla Herve KOUMASSI, et al., 2014).

D'après les formules développées au point I.2.1.1 (a) et les hauteurs maximales de précipitations (cfr Tableau III-6), les hauteurs maximales trouvées selon les périodes de retour sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau III-12 : Hauteurs maximales des précipitations selon les périodes de retour

				Loi normale	Pearson III		Gumbel		
T	P(T) (Probabilité d'apparition)	F(T) (Probabilité de non dépassement)	Z(T) (Variable réduite)	H(mm)	K(T)	Hmax (mm)	K(T)	H(mm)	Hmoy (mm)
2	0,50	0,50	0	55,26	0,01	55,37	- 0,16	53,06	54,56
5	0,20	0,80	0,84	66,51	0,84	66,54	0,72	64,88	65,98
10	0,10	0,90	1,28	72,40	1,28	72,32	1,30	72,70	72,47
15	0,07	0,93	1,50	75,33	1,49	75,18	1,63	77,12	75,88
20	0,05	0,95	1,64	77,25	1,63	77,05	1,87	80,21	78,17
25	0,04	0,96	1,75	78,67	1,73	78,43	2,04	82,59	79,89
30	0,03	0,97	1,83	79,78	1,81	79,50	2,19	84,53	81,27
35	0,03	0,97	1,90	80,70	1,88	80,39	2,31	86,16	82,41
40	0,03	0,98	1,96	81,47	1,94	81,14	2,42	87,57	83,39
45	0,02	0,98	2,01	82,14	1,98	81,78	2,51	88,81	84,24
50	0,02	0,98	2,05	82,72	2,03	82,35	2,59	89,92	85,00
100	0,01	0,99	2,33	86,37	2,29	85,85	3,14	97,20	89,81
1000	0,00	1,00	3,09	96,58	3,02	95,59	4,94	121,26	104,48

Dans la suite on a considéré la hauteur maximale moyenne de trois lois correspond à une période de retour de 2ans,5ans,10ans,25ans, 50ans et 100ans.

Ainsi dans l'analyse fréquentielle des précipitations, on en a tiré par méthode de Gumbel les précipitations moyennes décadaires correspondant à l'année humide, l'année moyenne et l'année sèche.

Tableau III-13 : Précipitations moyennes décadaires (année humide, année moyenne, année sèche)

		Précipitations (mm)		
Mois	**Decade**	**Année humide**	**Année moyenne**	**Année sèche**
Janvier	**I**	58,28	31,53	11,64
	II	48,86	26,27	9,49
	III	45,60	26,92	13,03
Février	**I**	58,62	31,66	11,61
	II	53,58	33,50	18,57
	III	34,44	18,61	6,85
Mars	**I**	57,90	33,90	16,06
	II	50,86	29,88	14,28
	III	55,88	32,61	15,32
Avril	**I**	49,07	30,91	17,42
	II	54,91	30,97	13,18
	III	41,50	21,56	6,75
Mai	**I**	39,61	19,58	4,70
	II	26,11	10,96	0,00
	III	16,52	5,92	0,00
Juin	**I**	19,93	3,66	0,00
	II	5,05	1,16	0,00
	III	10,43	1,60	0,00
Juillet	**I**	9,48	0,97	0,00
	II	0,63	0,01	0,00
	III	6,51	1,29	0,00
Août	**I**	7,56	1,67	0,00
	II	4,26	0,69	0,00
	III	9,80	3,05	0,00
Septembre	**I**	19,58	7,39	0,00
	II	20,22	9,45	1,45
	III	22,33	9,08	0,00
Octobre	**I**	37,06	20,01	7,34
	II	30,39	16,66	6,46
	III	38,09	20,43	7,30
Novembre	**I**	37,08	22,26	11,25
	II	51,34	28,87	12,17
	III	40,21	22,93	10,09
Décembre	**I**	56,84	30,77	11,40
	II	50,24	28,53	12,40
	III	64,93	36,18	14,81

- L'année humide a une probabilité d'apparition P(x) de 20%, sa probabilité de non dépassement F(x) est de 80% ;
- L'année moyenne a une probabilité d'apparition P(x) de 50%, sa probabilité de non dépassement F(x) est de 50% ;
- L'année sèche a une probabilité d'apparition P(x) de 80%, sa probabilité de non dépassement F(x) est de 20% ;

III.5.3. Evaluation des crues fréquentielles

Les données hydrologiques que nous avons dans cette étude sont les débits jaugés journaliers de la rivière Mutimbuzi d'une période de 5ans, [1989-1990] et [2009-2011]. Néanmoins ces données sont de loin fiables car il y a des données manquantes.

Après analyse et traitement de ces données hydrologiques, on a pu déduire les débits moyens mensuels de la rivière Mutimbuzi. Pour trouver les débits moyens mensuels de ses affluents (rivière Muzazi, rivière Murago et rivière Gikoma), le principe de transposition des débits dit méthode du rapport des superficies a été utilisé.
La formule suivante donne l'expression mathématique de la méthode du rapport des superficies.

$$Q_1 = \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^b * Q_2 \qquad \textbf{(III-2)}$$

Où : Q représente le débit, A est superficie des bassins, b est le facteur de correction régional du rapport des superficies ; pour notre étude b=1 et les indices 1 et 2 sont respectivement bassin jaugé et bassin non jaugé.

Le tableau suivant montre les débits moyens mensuels de la rivière Mutimbuzi et ses affluents.

Tableau III-14: Débits moyens mensuels de la rivière Mutimbuzi et ses affluents

	Q(m^3)			
Mois	**Mutimbuzi**	**Muzazi**	**Murago**	**Gikoma**
Janvier	6,68	2,62	2,09	0,62
Février	5,00	1,96	1,56	0,46
Mars	7,97	3,30	2,49	0,89
Avril	7,01	2,92	2,19	0,80
Mai	5,89	2,48	1,84	0,70
Juin	5,30	2,25	1,66	0,64
Juillet	1,04	0,41	0,33	0,10
Août	3,23	1,27	1,01	0,30
Septembre	4,84	2,07	1,51	0,60
Octobre	5,94	2,50	1,86	0,70
Novembre	5,29	2,25	1,65	0,64
Décembre	7,82	3,24	2,44	0,88
Débit moyen annuel	**5,50**	**2,27**	**1,72**	**0,61**

Dans la suite ces données sont considérées comme les apports mensuels de la rivière Mutimbuzi et ses affluents pendant une année sèche.

A titre comparatifs, ces résultats font référence aux résultats donnés dans le nouveau partenariat pour le développement de l'Afrique (NEPAD) et le programme détaillé pour le développement de l'Agriculture africaine (PDDAA)qui donnent les débits de quelques rivières traversant la plaine de l'Imbo.

Tableau III-15 : Débits de quelques rivières traversant la plaine de l'Imbo

Nom de la rivière	**Débit d'étiage minimum annuel (m^3/sec)**	**Débit moyen annuel (m^3/sec)**	**Crue décennale(m^3/sec)**	**Crue centenaire (m^3/sec)**
Kajeke	0,19	0,51	66	101
Mpanda (à Gatura)	2,56	6,37	82	130
Musenyi	0,36	0,92	56	86
Muzazi	1,47	2,10	90	141
Murago	0,75	1,47	70	109
Gikoma	0,29	0,76	32	49
Mutimbuzi	2,89	4,72	192	299

Source : (NEPAD&PDDAA, Mars 2006)

Suite au manque des données hydrologiques de plusieurs années, il est impossible de dégager les crues fréquentielles à base des débits jaugés. Dans le présent travail, nous nous sommes servis de la méthode Soil Conservation Service (SCS) pour la détermination des crues fréquentielles. Cette méthode colle bien avec les données disponibles (précipitations et caractéristiques du BV).

Pour trouver les crues fréquentielles à base des précipitations et des caractéristiques du bassin versant, il faut fixer un exutoire. L'exutoire de la rivière Mutimbuzi s'est fixé à un point proche du Lac Tanganyika ayant comme coordonnées [3°20'57.02"S ; 29°19'43.26"E]. Concernant les affluents nous avons utilisé le principe de transposition des débits dit méthode du rapport des superficies.

III.5.3.1. Calcul de la hauteur de la pluie nette

Selon la méthode SCS développée dans le point I.2.1.1., on a la hauteur de la pluie nette estimée comme suit :

$$\mathrm{Pn} = \frac{(\mathrm{P} - 0{,}2.\,\mathrm{S})^2}{\mathrm{P} + 0{,}8\mathrm{S}}$$

Donc partant de la pluie totale des périodes de retour considérée et des conditions d'humidité antérieures , on aura les hauteurs de la pluie nette suivantes :

Tableau III-16 : Hauteur de la pluie nette

Période de retour	2ans	5ans	10ans	25ans	50ans	100ans
Pluie totale P (mm)	54,56	65,98	72,47	79,89	85,00	89,81
Pluie nette Pn (mm)	2,25	5,12	7,17	9,84	11,86	13,89
Pertes initiales Ia (mm)	33,87	33,87	33,87	33,87	33,87	33,87
Infiltration cumulée F (mm)	18,44	26,99	31,44	36,19	39,27	42,05

Plus la hauteur de la pluie totale est grande plus la hauteur nette est grande. Si la hauteur de la pluie nette est grande, la crue sera aussi grande.

III.5.3.2. Répartition de la hauteur de la pluie nette

Pour avoir la répartition de la hauteur de la pluie nette, il faut d'abord la répartition de la pluie totale. Comme c'est indiqué dans le point II.2.1., la répartition de la pluie totale est faite avec la méthode SCS pour la précipitation du type IA.

Dans cette étude nous avons considérée, une durée de pluie de 320min soit 5h20min avec un pas de temps de 10min.

Tableau III-17:Répartition de la pluie totale ; T=100ans

Temps (min)	**t/tr**	**Pt/P**	**Pluie cumulée (mm)**	**Pluie partielle (mm)**
0	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,03	0,02	1,69	1,69
20	0,06	0,04	3,38	1,69
30	0,09	0,06	5,25	1,87
40	0,13	0,08	7,45	2,21
50	0,16	0,11	9,66	2,21
60	0,19	0,14	12,41	2,75
70	0,22	0,17	15,46	3,04
80	0,25	0,21	18,50	3,04
90	0,28	0,25	22,64	4,14
100	0,31	0,35	31,12	8,48
110	0,34	0,45	40,70	9,58
120	0,38	0,52	46,70	6,00
130	0,41	0,56	50,65	3,95

Temps (min)	t/tr	Pt/P	Pluie cumulée (mm)	Pluie partielle (mm)
140	0,44	0,60	53,97	3,32
150	0,47	0,63	56,96	2,98
160	0,50	0,66	59,63	2,67
170	0,53	0,69	62,13	2,50
180	0,56	0,72	64,57	2,44
190	0,59	0,74	66,83	2,26
200	0,63	0,77	68,97	2,14
210	0,66	0,79	71,11	2,14
220	0,69	0,81	73,02	1,91
230	0,72	0,83	74,81	1,79
240	0,75	0,85	76,61	1,79
250	0,78	0,87	78,40	1,79
260	0,81	0,89	80,19	1,79
270	0,84	0,91	81,91	1,72
280	0,88	0,93	83,49	1,58
290	0,91	0,95	85,07	1,58
300	0,94	0,96	86,65	1,58
310	0,97	0,98	88,23	1,58
320	1,00	1,00	89,81	1,58

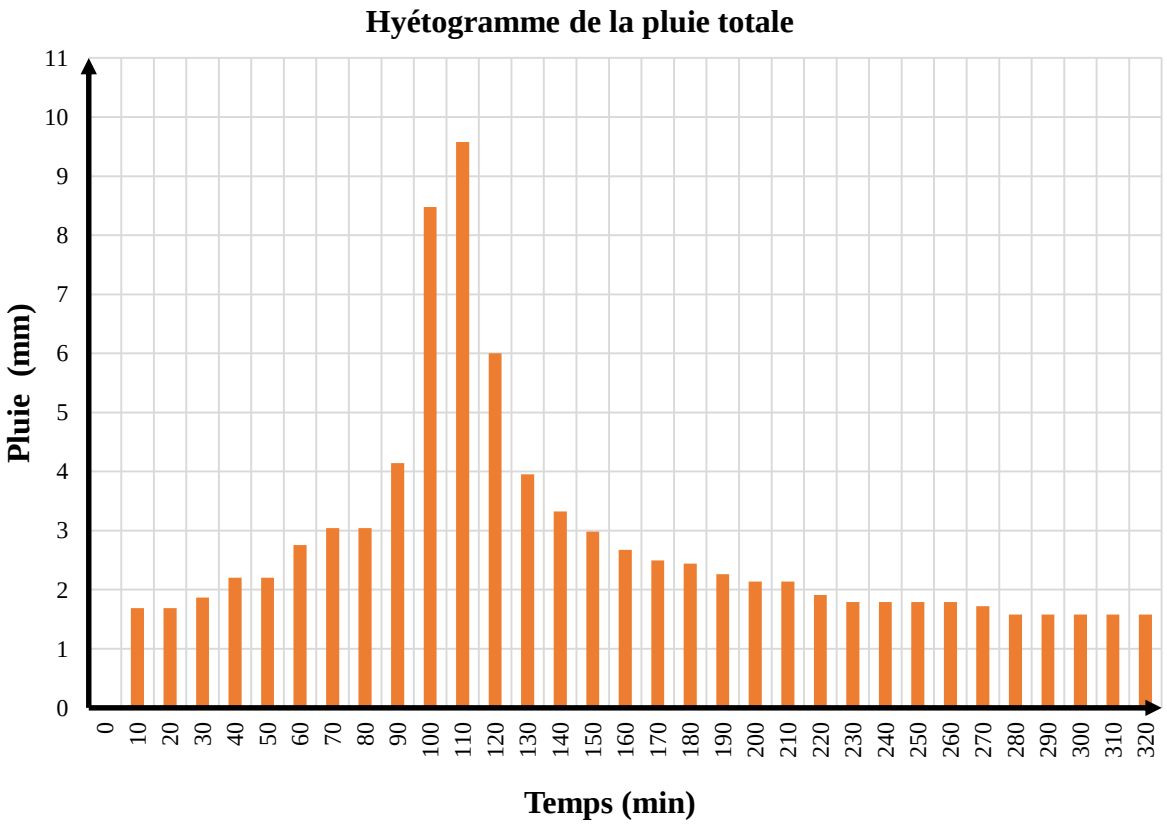


Figure III-11 : Répartition de la pluie totale ; T=100ans

A partir de la pluie totale partielle et la hauteur totale de la pluie nette, on en déduit la répartition de la pluie nette.

La répartition de la pluie nette pour une période de retour de 100 est présentée dans le tableau III-18 et figure III-12 ci-dessous.

Tableau III-18 : Répartition de la pluie nette ; T=100ans

Temps (min)	Pluie totale partielle (mm) Pp	Pluie totale cumulée (mm) P	Pertes initiales cumulées	Infiltration cumulée (mm) F	Pluie nette cumulée (mm) Pn	Pluie nette partielle (mm)Pnp	Pluie totale-Pluie nette (mm) Pnp-Qp	HU
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
10	1,69	1,69	1,69	0,00	0,00	0,00	1,69	
20	1,69	3,38	3,38	0,00	0,00	0,00	1,69	
30	1,87	5,25	5,25	0,00	0,00	0,00	1,87	
40	2,21	7,45	7,45	0,00	0,00	0,00	2,21	0,00
50	2,21	9,66	9,66	0,00	0,00	0,00	2,21	
60	2,75	12,41	12,41	0,00	0,00	0,00	2,75	
70	3,04	15,46	15,46	0,00	0,00	0,00	3,04	
80	3,04	18,50	18,50	0,00	0,00	0,00	3,04	0,00
90	4,14	22,64	22,64	0,00	0,00	0,00	4,14	
100	8,48	31,12	31,12	0,00	0,00	0,00	8,48	
110	9,58	40,70	33,87	6,57	0,26	0,26	9,31	
120	6,00	46,70	33,87	11,93	0,90	0,64	5,36	0,90
130	3,95	50,65	33,87	15,27	1,51	0,61	3,34	
140	3,32	53,97	33,87	17,97	2,13	0,62	2,70	
150	2,98	56,96	33,87	20,32	2,77	0,64	2,35	
160	2,67	59,63	33,87	22,36	3,40	0,63	2,04	2,50
170	2,50	62,13	33,87	24,22	4,04	0,64	1,86	
180	2,44	64,57	33,87	25,99	4,71	0,67	1,77	
190	2,26	66,83	33,87	27,60	5,37	0,66	1,60	
200	2,14	68,97	33,87	29,08	6,03	0,66	1,48	2,63
210	2,14	71,11	33,87	30,53	6,71	0,69	1,45	
220	1,91	73,02	33,87	31,80	7,35	0,64	1,27	
230	1,79	74,81	33,87	32,97	7,97	0,62	1,17	
240	1,79	76,61	33,87	34,13	8,61	0,64	1,15	2,59
250	1,79	78,40	33,87	35,26	9,27	0,66	1,13	
260	1,79	80,19	33,87	36,37	9,95	0,68	1,11	
270	1,72	81,91	33,87	37,42	10,62	0,67	1,05	
280	1,58	83,49	33,87	38,38	11,25	0,63	0,95	2,63
290	1,58	85,07	33,87	39,31	11,89	0,64	0,94	
300	1,58	86,65	33,87	40,24	12,54	0,65	0,92	
310	1,58	88,23	33,87	41,15	13,21	0,67	0,91	
320	1,58	89,81	33,87	42,05	13,89	0,68	0,90	2,65

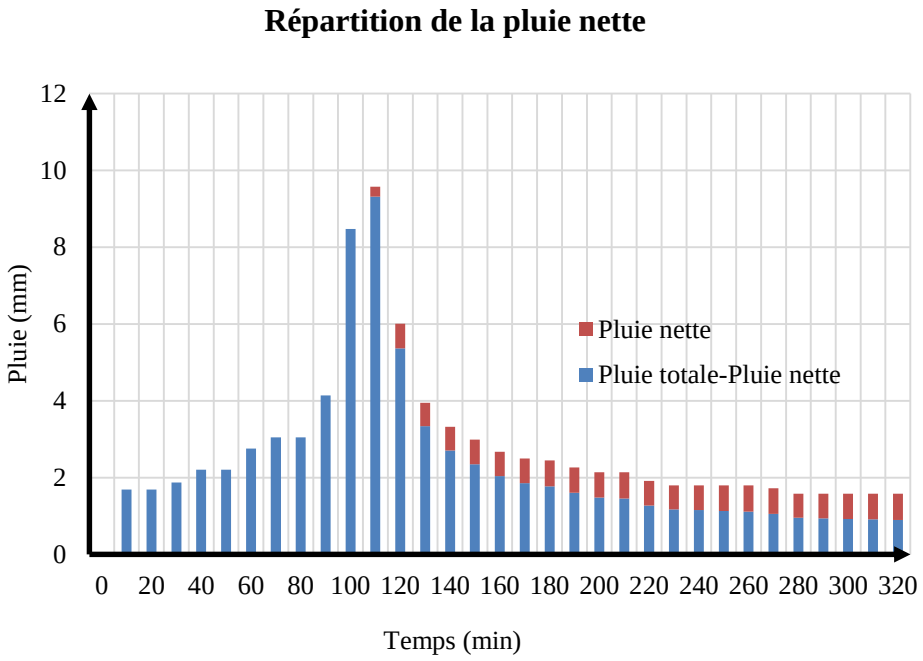


Figure III-12 : Répartition de la pluie nette ; T=100ans

III.5.3.3. Hydrogramme unitaire

Tableau III-19 : Valeurs des paramètres de l'hydrogramme unitaire

Paramètres de l'averse unitaire	Durée de référence D ou temps unitaire t_u	Temps de montée t_p	Débit de pointe q_p
Expression mathématique	$D = t_u = \frac{2}{15} t_c$	$t_p = \frac{2}{3} t_c$	$q_p = (\frac{0{,}75}{360} * A)/t_p$ A : Superficie du bassin en ha ; tp : temps de montée en sec
Valeur	40 min	200 min	17,27 m^3/s

Les paramètres de l'hydrogramme unitaire sont les mêmes pour toutes les conditions antécédentes d'humidité et les périodes de retour. Ces paramètres sont en fonction de la superficie du bassin versant et du temps de concentration.

D'après le débit de pointe de l'hydrogramme unitaire (voir tableau III-19) et le tableau I-3, on déduit les valeurs de l'hydrogramme unitaire.

Tableau III-20:Calcul de l'hydrogramme unitaire

T(min)	T/TP	Q/QP	Q(m3/s) pour Hn=1mm
0	0,00	0,000	0,00
20	0,10	0,030	0,52
40	0,20	0,100	1,73
60	0,30	0,190	3,28
80	0,40	0,310	5,35
100	0,50	0,470	8,12
120	0,60	0,660	11,40
140	0,70	0,820	14,16
160	0,80	0,930	16,06
180	0,90	0,990	17,10
200	1,00	1,000	17,27
220	1,10	0,990	17,10
240	1,20	0,930	16,06
260	1,30	0,860	14,85
280	1,40	0,780	13,47
300	1,50	0,680	11,74
320	1,60	0,560	9,67
340	1,70	0,460	7,95
360	1,80	0,390	6,74
380	1,90	0,330	5,70
400	2,00	0,280	4,84
440	2,20	0,207	3,58
480	2,40	0,147	2,54
520	2,60	0,107	1,85
560	2,80	0,077	1,33
600	3,00	0,055	0,95
640	3,20	0,040	0,69
680	3,40	0,029	0,50
720	3,60	0,021	0,36
760	3,80	0,015	0,26
800	4,00	0,011	0,19
900	4,50	0,005	0,09
1000	5,00	0,000	0,00

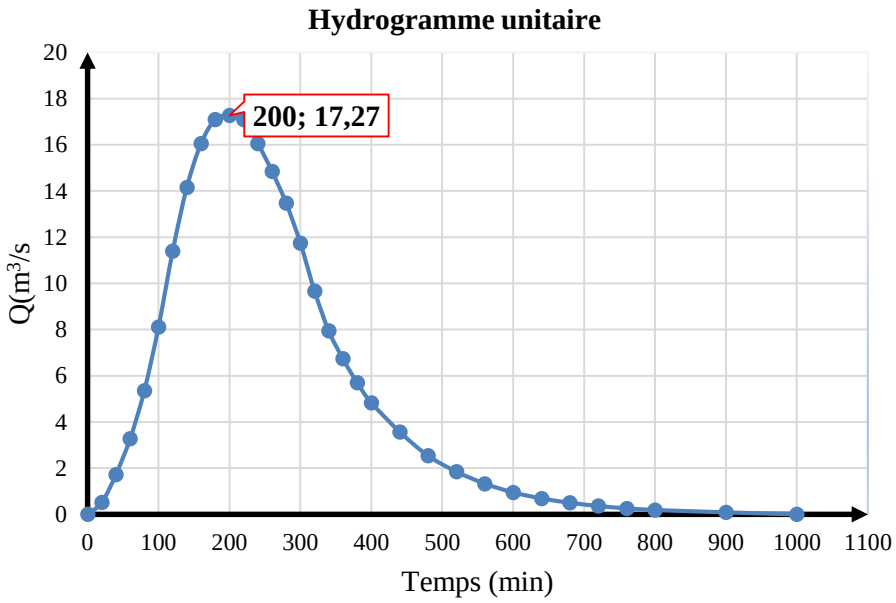


Figure III-13 : Hydrogramme unitaire

III.5.3.4. Hydrogramme des crues

En multipliant l'hydrogramme unitaire par la hauteur de pluie nette, on trouve l'hydrogramme réel des débits des crues tout en appliquant le principe de linéarité et de superposition de l'hydrogramme unitaire.

Suivant les périodes de retour, on a trouvé les débits de pointe suivants :

Tableau III-21 : Résultats des débits de crues

Période de retour	2ans	5ans	10ans	25ans	50ans	100ans
Débit des crues (m^3/s)	41,42	84,13	113,92	151,73	179,81	207,72

Suivant le temps de l'averse de 320min avec le temps unitaire de 40min, on trouve 8 parties d'averse dont leur hauteur est trouvée à partir de la répartition de la pluie nette.

Les tableau (III-22, III-23, III-24) et la figure III-14 montrent les détails de l'hydrogramme des crues pour une période de retour de 100ans. Les détails des hydrogrammes des crues pour une période de retour de 5 ans et 50ans sont présentés dans l'annexe 2.

Tableau III-22 : Répartition de la pluie nette/période de retour de 100ans

hu1	hu2	hu3	hu4	hu5	hu6	hu7	hu8	Pluie nette totale
0,00	0,00	0,90	2,50	2,63	2,59	2,63	2,65	13,89

Tableau III-23 : Résultats de calcul de l'hydrogramme de crues ; T=100ans

Q(m3//s)	**T(min)**	**Q(hu1)**	**Q(hu2)**	**Q(hu3)**	**Q(hu4)**	**Q(hu5)**	**Q(hu6)**	**Q(hu7)**	**Q(hu8)**	**Qo**	**Q résultant**
0,00	0	0								5,5	5,50
0,52	20	0								5,5	5,50
1,73	40	0	0							5,5	5,50
3,28	60	0	0							5,5	5,50
5,35	80	0	0	0,00						5,5	5,50
8,12	100	0	0	0,47						5,5	5,97
11,40	120	0	0	1,56	0,00					5,5	7,06
14,16	140	0	0	2,97	1,29					5,5	9,76
16,06	160	0	0	4,84	4,32	0,00				5,5	14,66
17,10	180	0	0	7,34	8,20	1,36				5,5	22,40
17,27	200	0	0	10,31	13,38	4,53	0,00			5,5	33,72
17,10	220	0	0	12,80	20,28	8,62	1,34			5,5	48,54
16,06	240	0	0	14,52	28,48	14,06	4,46	0,00		5,5	67,03
14,85	260	0	0	15,46	35,39	21,31	8,48	1,36		5,5	87,51
13,47	280	0	0	15,62	40,14	29,93	13,84	4,55	0,00	5,5	109,57
11,74	300	0	0	15,46	42,73	37,19	20,99	8,64	1,37	5,5	131,87
9,67	320	0	0	14,52	43,16	42,17	29,47	14,10	4,57	5,5	153,49
7,95	340	0	0	13,43	42,73	44,89	36,61	21,37	8,68	5,5	173,22
6,74	360	0	0	12,18	40,14	45,35	41,52	30,01	14,17	5,5	188,86
5,70	380	0	0	10,62	37,11	44,89	44,20	37,29	21,48	5,5	201,09
4,84	400	0	0	8,74	33,66	42,17	44,65	42,29	30,16	5,5	207,18
3,58	420	0	0	7,18	29,35	39,00	44,20	45,02	37,47	5,5	207,72
2,54	440	0	0	6,09	24,17	35,37	41,52	45,47	42,50	5,5	200,62
1,85	460	0	0	5,15	19,85	30,84	38,40	45,02	45,24	5,5	189,99
1,33	480	0	0	4,37	16,83	25,39	34,83	42,29	45,69	5,5	174,91
0,95	500	0	0	3,23	14,24	20,86	30,36	39,11	45,24	5,5	158,54
0,69	520	0	0	2,30	12,08	17,69	25,00	35,47	42,50	5,5	140,53
0,50	540	0	0	1,67	8,93	14,96	20,54	30,92	39,30	5,5	121,82
0,36	560	0	0	1,20	6,34	12,70	17,41	25,46	35,64	5,5	104,26
0,26	580	0	0	0,86	4,62	9,39	14,73	20,92	31,07	5,5	87,09
0,19	600	0	0	0,62	3,32	6,67	12,50	17,73	25,59	5,5	71,94
0,09	620	0	0	0,45	2,37	4,85	9,24	15,01	21,02	5,5	58,45
0,00	640	0	0	0,33	1,73	3,49	6,56	12,73	17,82	5,5	48,16
	660		0	0,23	1,25	2,49	4,78	9,41	15,08	5,5	38,75
	680		0	0,17	0,91	1,81	3,44	6,68	12,79	5,5	31,31
	700			0,08	0,65	1,32	2,46	4,87	9,46	5,5	24,32
	720			0,00	0,47	0,95	1,79	3,50	6,72	5,5	18,93
	740				0,22	0,68	1,29	2,50	4,89	5,5	15,08
	760				0,00	0,50	0,94	1,82	3,52	5,5	12,27
	780					0,23	0,67	1,32	2,51	5,5	10,23
	800					0,00	0,49	0,95	1,83	5,5	8,77
	820						0,22	0,68	1,33	5,5	7,73
	840						0,00	0,50	0,96	5,5	6,96
	860							0,23	0,69	5,5	6,41

Q(m3//s)	T(min)	Q(hu1)	Q(hu2)	Q(hu3)	Q(hu4)	Q(hu5)	Q(hu6)	Q(hu7)	Q(hu8)	Qo	Q résultant
	880							0,00	0,50	5,5	6,00
	900								0,23	5,5	5,73
	920								0,00	5,5	5,50
	940									5,5	5,50
	960									5,5	5,50
	980									5,5	5,50

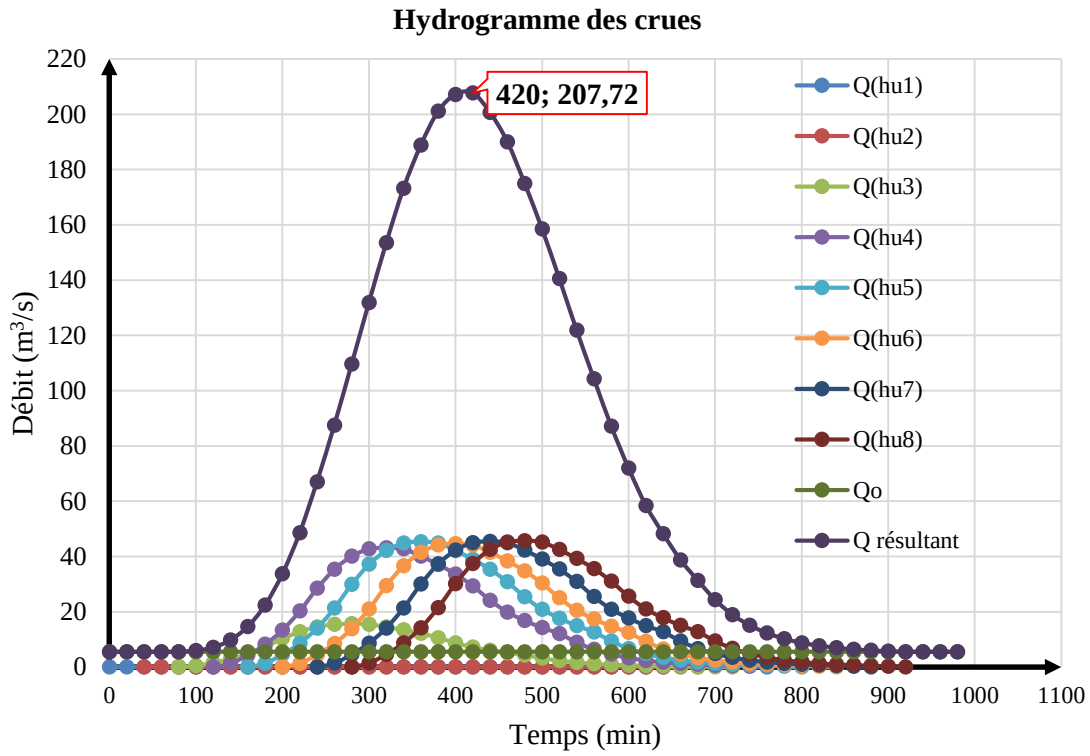


Figure III-14 : Hydrogramme des crues ; T=100ans

L'hydrogramme des crues pour une averse de période de retour de 100ans est illustré ci-dessus (voir figure III-14). Le débit de pointe est estimé à **207,72 m ^{3}/s** qui se produisent autour de 420 minutes soit en une durée de 7h.

Par le principe de transposition des débits, on déduit les résultats de l'hydrogramme des crues des affluents de la rivière Mutimbuzi pour une période de retour de 100ans. Ces résultats sont présentés dans le tableau III.24.

Tableau III-24 : Résultats de l'hydrogrammme des crues (Rivière Mutimbuzi, Muzazi, Murago, Gikoma) ; T=100ans

	Q(m^3/s)			
Temps (min)	**Mutimbuzi**	**Muzazi**	**Murago**	**Gikoma**
0	5,50	2,16	1,72	0,51
20	5,50	2,16	1,72	0,51
40	5,50	2,16	1,72	0,51
60	5,50	2,16	1,72	0,51
80	5,50	2,16	1,72	0,51
100	5,97	2,34	1,87	0,55
120	7,06	2,77	2,21	0,65
140	9,76	3,83	3,05	0,90
160	14,66	5,75	4,58	1,36
180	22,40	8,79	7,00	2,07
200	33,72	13,24	10,54	3,12
220	48,54	19,05	15,17	4,49
240	67,03	26,31	20,95	6,20
260	87,51	34,35	27,35	8,10
280	109,57	43,01	34,24	10,14
300	131,87	51,76	41,21	12,21
320	153,49	60,25	47,97	14,21
340	173,22	67,99	54,14	16,03
360	188,86	74,13	59,03	17,48
380	201,09	78,93	62,85	18,61
400	207,18	81,32	64,75	19,18
420	207,72	81,53	64,92	19,23
440	200,62	78,75	62,70	18,57
460	189,99	74,57	59,38	17,59
480	174,91	68,65	54,67	16,19
500	158,54	62,23	49,55	14,67
520	140,53	55,16	43,92	13,01
540	121,82	47,82	38,07	11,28
560	104,26	40,92	32,59	9,65
580	87,09	34,18	27,22	8,06
600	71,94	28,24	22,48	6,66
620	58,45	22,94	18,27	5,41
640	48,16	18,90	15,05	4,46
660	38,75	15,21	12,11	3,59
680	31,31	12,29	9,79	2,90
700	24,32	9,55	7,60	2,25
720	18,93	7,43	5,92	1,75
740	15,08	5,92	4,71	1,40
760	12,27	4,82	3,84	1,14
780	10,23	4,01	3,20	0,95
800	8,77	3,44	2,74	0,81
820	7,73	3,03	2,42	0,72
840	6,96	2,73	2,18	0,64
860	6,41	2,52	2,00	0,59

880	6,00	2,36	1,88	0,56
900	5,73	2,25	1,79	0,53
920	5,50	2,16	1,72	0,51
940	5,50	2,16	1,72	0,51
960	5,50	2,16	1,72	0,51
980	5,50	2,16	1,72	0,51

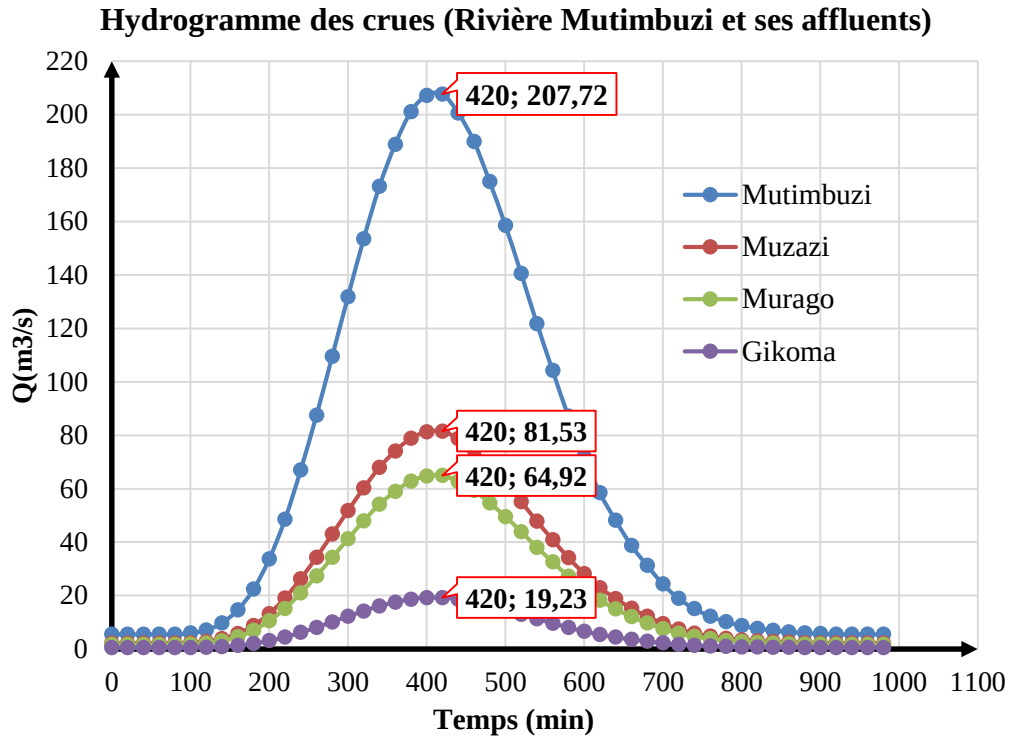


Figure III-15: Hydrogramme des crues de la rivière Mutimbuzi et ses affluents

III.6. Analyse hydroagricole

D'après les données du tableau II.2, on déduit les périmètres à irriguer pour chaque rivière. La superficie totale des périmètres à irriguer pour notre zone d'étude est de 2095ha.

Tableau III-25 : Périmètres irrigués par chaque rivière

Potentiel d'irrigation	**Superficie en ha**
Muzazi	1488,5
Murago	170,5
Gikoma	436
Total	**2095**

Comme on l'a déjà dit dans le point II.4, il se manifeste une carence d'eau pour pouvoir irriguer toute la superficie en même temps. Il faut donc évaluer les besoins en d'irrigation de ces périmètres afin de proposer une solution.

III.6.1. Calcul des besoins en eau des cultures

Les besoins nets sont calculés dans le logiciel Aquacrop. L'aquacrop est modèle de simulation des cultures développé par la FAO pour répondre aux problèmes de sécurité alimentaire et évaluer l'effet de l'environnement de la production agricole.

Voici les données d'entrée/sortie et paramètres du logiciel aquacrop

Fichiers des données d'entrée

- Fichier climat ;
- Fichiers température, ETo et pluviométrie ;
- Fichier CO2 ;
- Fichier culture ;
- Fichier irrigation (*.IRR) ;
- Fichier gestion de parcelle (*.MAN) ;
- Fichier profil de sol (*.SOL) ;
- Fichier eaux souterraines (*.GWT) ;
- Fichier conditions initiales (*.SW0) ;
- Fichier conditions hors-saison (*.OFF) ;
- Fichier simulation unique de projet (*.PRO) ;
- Fichier simulation projets multiples (*.PRM) ;
- Fichier observations de terrain (*.OBS).

Fichiers paramètres de configuration du programme

- Fichiers données de sortie ;
- Développement et production de la culture ;
- Bilan Sol-Eau ;
- Teneur en eau du sol (profile et zone racinaire) ;
- Salinité du sol (profil et zone racinaire) ;
- Teneur en eau du sol (compartiments) ;
- Salinité du sol (compartiments) ;
- Besoin net en irrigation ;
- Sortie saisonnière.

A un pas de temps journalier, le modèle simule le bilan d'eau du sol. La quantité d'eau stockée dans la zone racinaire est simulée en comptabilisant les flux d'eau entrant et sortant à ses frontières. L'épuisement de la réserve en eau dans la zone racinaire détermine la magnitude d'une série de coefficients de stress en eau (Ks), affectant : (a) l'expansion de la canopée verte (CC), (b) la conductance stomatique et par conséquence la transpiration (Tr) par unité de CC, (c) la sénescence et le déclin de la canopée, (d) l'indice de récolte et (e) le taux d'enracinement dans la zone racinaire.

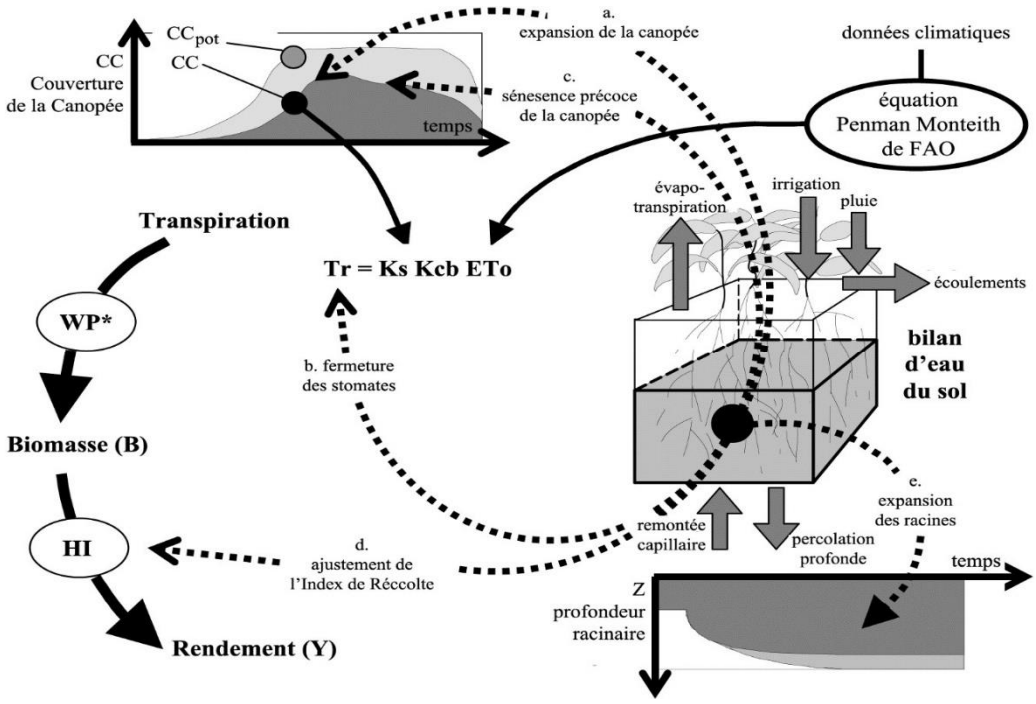


Figure III-16 : Schéma de calcul d'AquaCrop

Source : Manuel de l'aquacrop

CC est la couverture de canopée simulée, CCp la couverture potentielle de canopée, Ks le coefficient de stress en eau, Kcb le coefficient de culture, ETo l'évapotranspiration de référence, WP* la productivité de l'eau pour une culture normalisée, et HI l'indice de récolte

Pour notre étude,

Les données d'entrées sont :

- Fichier climat : données climatiques pour l'année sèche (Précipitations, température max et température min, humidité relative max et humidité relative min) ;

- Fichiers ETo : [données de la station de l'aéroport Melchior NDADAYE : altitude 783m ; Latitude Sud 3°19min] ;
- Fichier CO2 : données standard ;
- Fichier culture : Rotation des cultures (Riz -Riz) ; (Riz-Riz-Polyculture) ;
- Fichier irrigation (*.IRR) : Capacité au champ ; diguettes 50cm ; Gestion des mauvaises herbes : modérée ;
- Fichier profil de sol (*.SOL) : 3 couches (Argile sableuse :0.3m ; Limon argilo –sableux :0.7m ; Limon argileux : 0.9m) ;
- Fichier eaux souterraines (*.GWT) : Aquifère :4m ;
- Fichier conditions initiales (*.SW0) ;
- Fichier simulation unique de projet (*.PRO) : Rotation des cultures (2 cultures et 3 cultures).

Les données de sortie sont :

- Besoins net en irrigation

Afin de minimiser les besoins, on a essayé de varier les périodes de cultures. Plusieurs variantes ont été faites :

Tableau III-26 : Besoins en eau d'irrigation suivant différents calendriers

	Calendrier du Ministère	**Calendrier du terrain**	**Calendrier proposé**
Riz-riz	Mi-Juillet→Mi-Nov Mi-Déc→ Mi-Avril 553,8mm-416mm 969,8mm	Déb Octobre→Fin Janv. Déb Mars→ Fin Juin 428,5mm - 464,7mm 893,2mm	Début Novembre→Fin Fév. Mi-Mars→Mi-Juillet 451,7mm - 454mm 905,7mm
Riz-riz-Polyculture		Déb Octobre→Fin Janv. Mi-Février→ Mi- Juin Début Juillet-Fin Août 451,7mm-445,5mm-274,1mm 1171,3 mm	Début Novembre→Fin Fév. Mi-Mars→Mi-Juillet Début Août-Fin Septembre 428,5mm-464,7mm-294,7mm 1187,9 mm

D'après les résultats ci-dessus, on retient le calendrier de (Début Octobre→ Fin Janvier- Début Mars→ Fin Juin pour la rotation de deux cultures (riz-riz) et le calendrier de (Début Octobre→ Fin Janvier- Mi-Février→ Mi- Juin-Début Juillet-Fin Août) pour la rotation de trois cultures (riz-riz-polyculture). Ces calendriers sont retenus car ils demandent moins d'eau par rapport aux autres.

Les figures suivantes (III-17 et III-18) montrent les résultats des besoins en eau d'irrigation donnés par le logiciel Aquacrop pour deux calendriers retenus. Les résultats des autres calendriers sont présentés dans l'annexe 3.

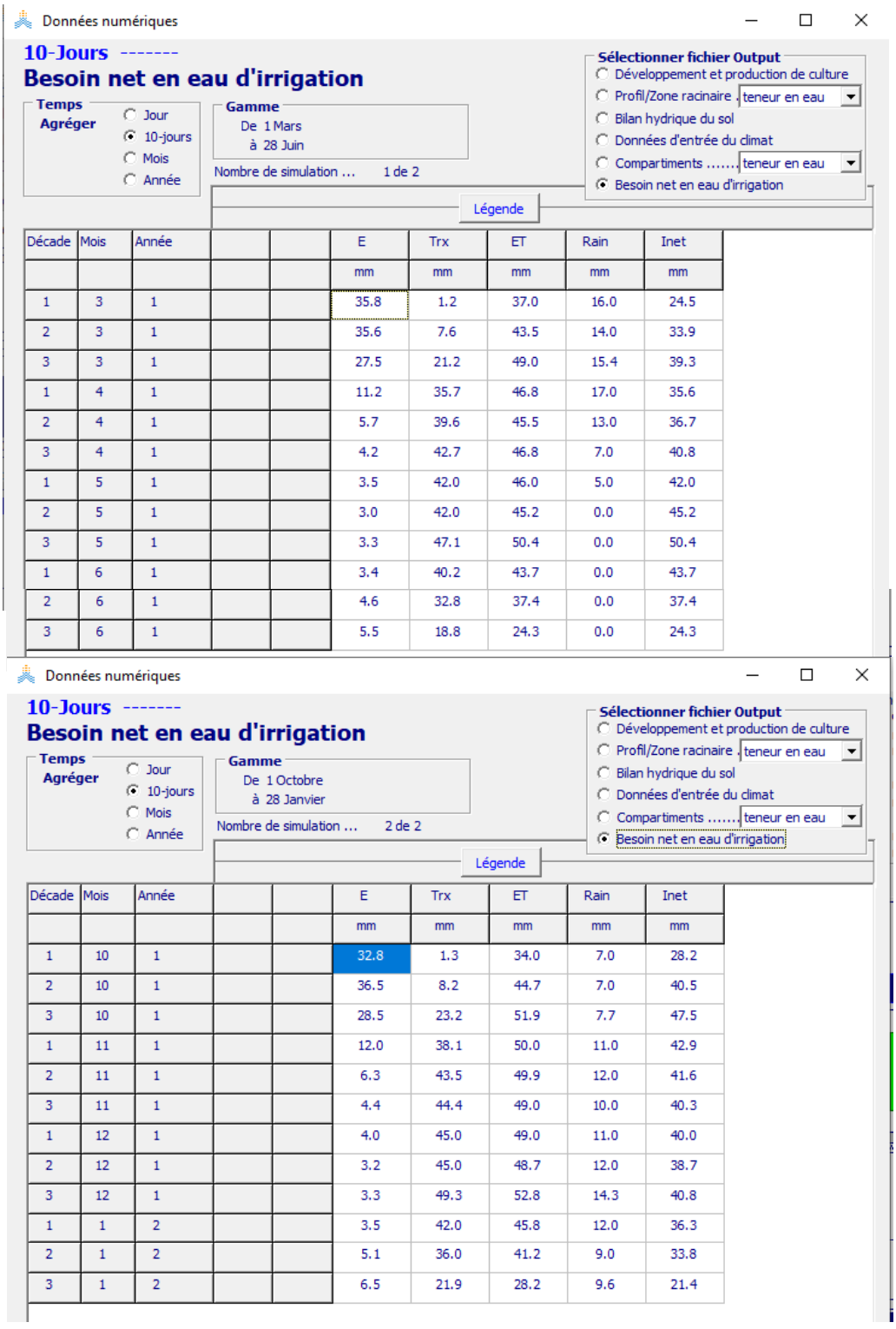


Figure III-17: Besoins nets selon le calendrier du terrain [Riz-riz] (Début Octobre → Fin Janvier ; Début Mars→ Fin Juin)

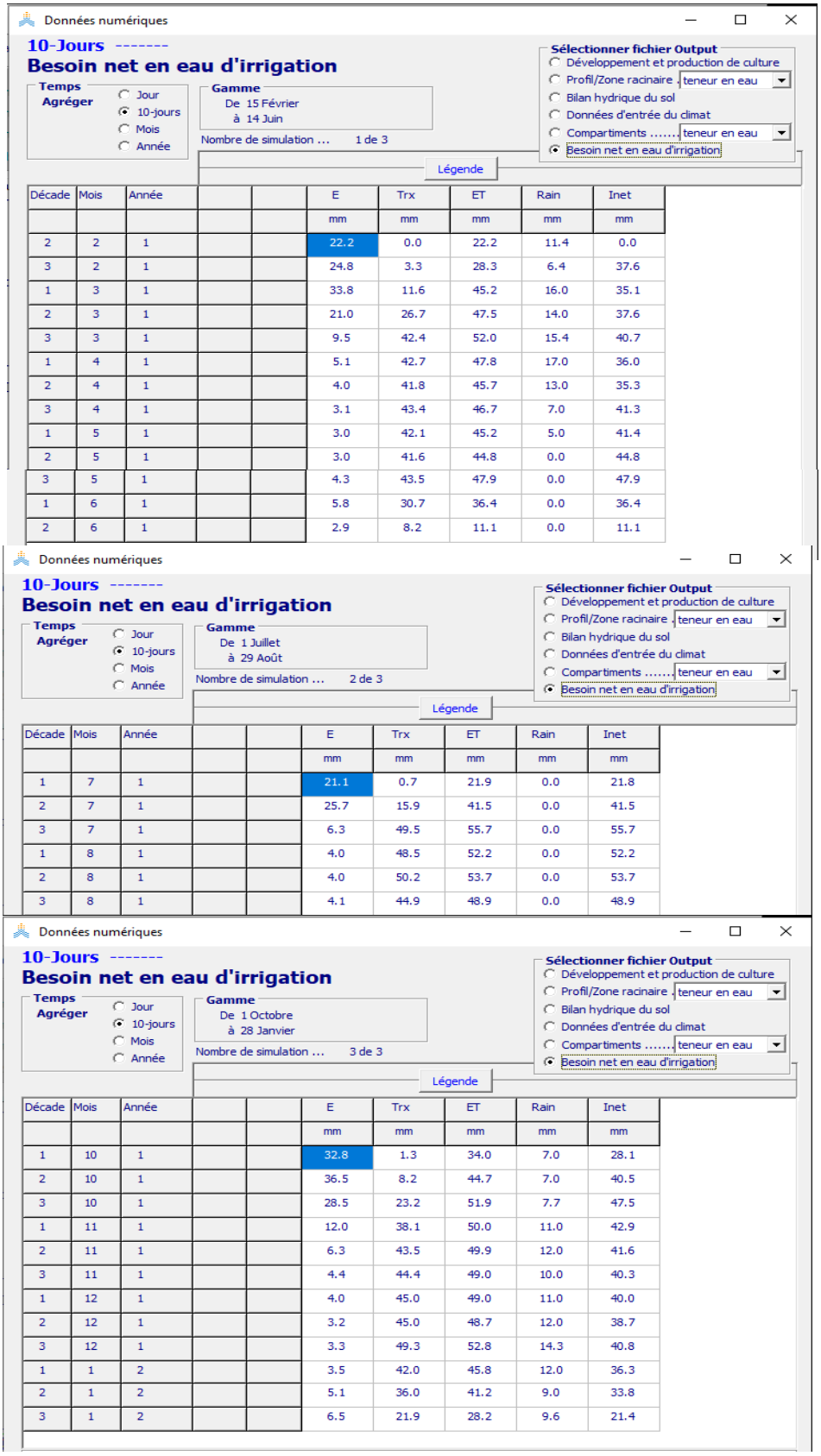


Figure III-18 : Besoins nets *[Riz-riz-Polyculture] (Début Octobre →Fin Janvier ; Mi-Février→ Mi- Juin ; Début Juillet-Fin Août)*

A partir des besoins en eau d'irrigation trouvés dans le logiciel Aquacrop, il possible de déduire les débits mensuels de projets.

En considérant l'efficience de 60%, les tableaux III-27 et III-28 donnent les résultats des débits de projets mensuels trouvés.

Tableau III-27 : Besoins en eau d'irrigation et les débits de projet pour deux cultures

					Débit projet décadaire (m^3/s)			**Débit projet mensuel (m^3/s)**		
Mois	**Décades**	**Besoins nets BN (mm)**	**Besoins bruts BB (mm)**	**Débit projet (l/S.ha)**	**Muzazi (1488,5ha)**	**Murago (170,5ha)**	**Gikoma (436ha)**	**Muzazi (1488,5ha)**	**Murago (170,5ha)**	**Gikoma (436ha)**
Janvier	**I**	36,30	60,50	2,10	3,13	0,36	0,92	3,33	0,36	0,92
	II	33,80	56,33	1,96	2,91	0,33	0,85			
	III	21,40	35,67	1,24	1,84	0,21	0,54			
Février	**I**	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	II	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
	III	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
Mars	**I**	24,50	40,83	1,42	2,11	0,24	0,62	3,39	0,39	0,99
	II	33,90	56,50	1,96	2,92	0,33	0,86			
	III	39,30	65,50	2,27	3,39	0,39	0,99			
Avril	**I**	35,60	59,33	2,06	3,07	0,35	0,90	3,51	0,40	1,03
	II	36,70	61,17	2,12	3,16	0,36	0,93			
	III	40,80	68,00	2,36	3,51	0,40	1,03			
Mai	**I**	42,00	70,00	2,43	3,62	0,41	1,06	4,34	0,50	1,27
	II	45,20	75,33	2,62	3,89	0,45	1,14			
	III	50,40	84,00	2,92	4,34	0,50	1,27			
Juin	**I**	43,70	72,83	2,53	3,76	0,43	1,10	3,76	0,43	1,10
	II	37,40	62,33	2,16	3,22	0,37	0,94			
	III	24,30	40,50	1,41	2,09	0,24	0,61			
Juillet	**I**	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	II	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
	III	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
Août	**I**	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	II	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
	III	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
Septembre	**I**	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	II	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
	III	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
Octobre	**I**	28,20	47,00	1,63	2,43	0,28	0,71	4,09	0,47	1,20
	II	40,50	67,50	2,34	3,49	0,40	1,02			
	III	47,50	79,17	2,75	4,09	0,47	1,20			
Novembre	**I**	42,90	71,50	2,48	3,70	0,42	1,08	3,70	0,42	1,08
	II	41,60	69,33	2,41	3,58	0,41	1,05			
	III	40,30	67,17	2,33	3,47	0,40	1,02			
Décembre	**I**	40,00	66,67	2,31	3,45	0,39	1,01	3,51	0,40	1,03
	II	38,70	64,50	2,24	3,33	0,38	0,98			
	III	40,80	68,00	2,36	3,51	0,40	1,03			

Tableau III-28 : Besoins en eau d'irrigation et les débits mensuels d'irrigation [riz-riz-polyculture] (Début Octobre →Fin Janvier ; Mi-Février→ Mi- Juin ; Début Juillet-Fin Août)

					Débit projet décadaire (m^3/s)			Débit projet mensuel (m^3/s)		
Mois	**Décades**	**Besoins nets BN (mm)**	**Besoins bruts BB (mm)**	**Débit projet (l/S.ha)**	**Muzazi (1488,5ha)**	**Murago (170,5ha)**	**Gikoma (436ha)**	**Muzazi (1488,5ha)**	**Murago (170,5ha)**	**Gikoma (436ha)**
Janvier	**I**	36,30	60,50	2,10	3,13	0,36	0,92	3,13	0,36	0,92
	II	33,80	56,33	1,96	2,91	0,33	0,85			
	III	21,40	35,67	1,24	1,84	0,21	0,54			
Février	**I**	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,24	0,37	0,95
	II	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
	III	37,60	62,67	2,18	3,24	0,37	0,95			
Mars	**I**	35,10	58,50	2,03	3,02	0,35	0,89	3,51	0,4	1,03
	II	37,60	62,67	2,18	3,24	0,37	0,95			
	III	40,70	67,83	2,36	3,51	0,40	1,03			
Avril	**I**	36,00	60,00	2,08	3,10	0,36	0,91	3,56	0,41	1,04
	II	35,30	58,83	2,04	3,04	0,35	0,89			
	III	41,30	68,83	2,39	3,56	0,41	1,04			
Mai	**I**	41,40	69,00	2,40	3,57	0,41	1,04	4,13	0,47	1,21
	II	44,80	74,67	2,59	3,86	0,44	1,13			
	III	47,90	79,83	2,77	4,13	0,47	1,21			
Juin	**I**	36,40	60,67	2,11	3,14	0,36	0,92	3,14	0,36	0,92
	II	11,10	18,50	0,64	0,96	0,11	0,28			
	III	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
Juillet	**I**	21,80	36,33	1,26	1,88	0,22	0,55	4,80	0,55	1,41
	II	41,50	69,17	2,40	3,57	0,41	1,05			
	III	55,70	92,83	3,22	4,80	0,55	1,41			
Août	**I**	52,20	87,00	3,02	4,50	0,52	1,32	4,63	0,53	1,35
	II	53,70	89,50	3,11	4,63	0,53	1,35			
	III	48,90	81,50	2,83	4,21	0,48	1,23			
Septembre	**I**	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	II	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
	III	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
Octobre	**I**	28,10	46,83	1,63	2,42	0,28	0,71	4,09	0,47	1,20
	II	40,50	67,50	2,34	3,49	0,40	1,02			
	III	47,50	79,17	2,75	4,09	0,47	1,20			
Novembre	**I**	42,90	71,50	2,48	3,70	0,42	1,08	3,70	0,42	1,08
	II	41,60	69,33	2,41	3,58	0,41	1,05			
	III	40,30	67,17	2,33	3,47	0,40	1,02			
Décembre	**I**	40,00	66,67	2,31	3,45	0,39	1,01	3,51	0,40	1,03
	II	38,70	64,50	2,24	3,33	0,38	0,98			
	III	40,80	68,00	2,36	3,51	0,40	1,03			

Connaissant le débit de projet (besoins) et le débit de la rivière (apports), on établit le bilan hydrique.

III.6.2. Bilan hydrique

Le bilan hydrique consiste à faire la comparaison entre les apports (ressources en eau) et les besoins en eau des cultures. L'objectif du bilan hydrique est de connaître et suivre l'évolution de la réserve en eau facilement utilisable par la culture. Il s'agit, au fil du temps, de vérifier que cette réserve répondre au besoin en eau de la culture qui est variable en fonction de son stade.

Les tableaux et les figures ci-dessous montrent les résultats du bilan hydrique de la rivière Muzazi, Gikoma et Murago pour rotation de deux cultures (riz-riz).

Tableau III-29 : Bilan hydrique de la rivière Muzazi avec rotation des cultures (riz-riz)

Mois	Apports [m^3/s]	Besoins [m^3/s]	Apports [m^3]	Besoins [m^3]	Bilan hydrique [m^3]	Déficit [m^3]	Surplus [m^3]
Janvier	2,62	3,13	7 018 245,28	8 375 045,25	-2 409 536,76	-2 409 536,76	0,00
Février	1,96	0,00	4 747 569,73	0,00	4 035 434,27	0,00	4 035 434,27
Mars	3,30	3,39	8 837 984,95	9 067 197,75	-1 554 910,54	-1 554 910,54	0,00
Avril	2,92	3,51	7 579 584,27	9 109 620,00	-2 666 973,37	-2 666 973,37	0,00
Mai	2,48	4,34	6 654 627,12	11 628 162,00	-5 971 728,94	-5 971 728,94	0,00
Juin	2,25	3,76	5 839 581,46	9 757 117,50	-4 793 473,26	-4 793 473,26	0,00
Juillet	0,41	0,00	1 093 781,37	0,00	929 714,16	0,00	929 714,16
Août	1,27	0,00	3 390 697,25	0,00	2 882 092,66	0,00	2 882 092,66
Septembre	2,07	0,00	5 374 352,33	0,00	4 568 199,48	0,00	4 568 199,48
Octobre	2,50	4,09	6 707 609,40	10 959 081,25	-5 257 613,26	-5 257 613,26	0,00
Novembre	2,25	3,70	5 832 636,67	9 578 497,50	-4 620 756,33	-4 620 756,33	0,00
Décembre	3,24	3,51	8 683 235,93	9 413 274,00	-2 032 523,46	-2 032 523,46	0,00
				£	**-16 892 075,35**	**-29 307 515,92**	**12 415 440,57**

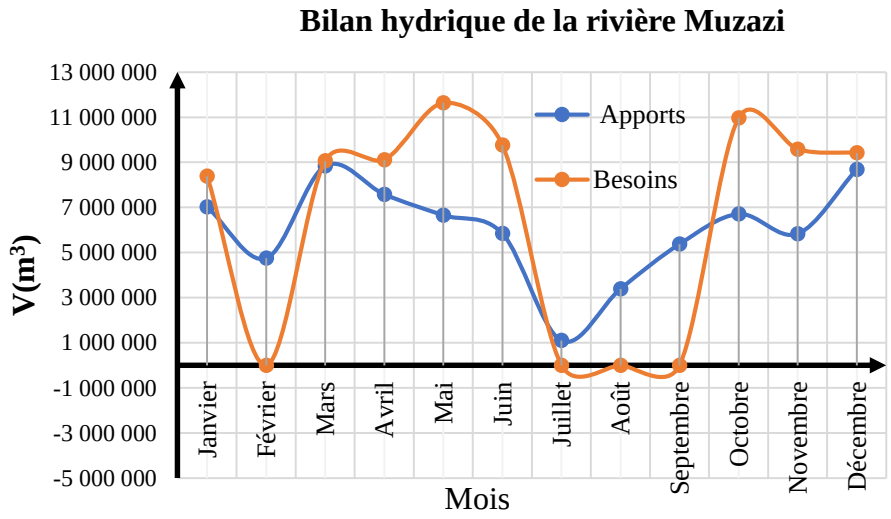


Figure III-19 : Bilan hydrique de la rivière Muzazi avec rotation des cultures (riz-riz)

Tableau III-30 : Bilan hydrique de la rivière Murago avec rotation des cultures (riz-riz)

Mois	Apports [m^3/s]	Besoins [m^3/s]	Apports [m^3]	Besoins [m^3]	Bilan hydrique [m^3]	Déficit [m^3]	Surplus [m^3]
Janvier	2,09	0,36	5 588 327,14	959 318,25	3 790 759,82	0,00	3 790 759,82
Février	1,56	0,00	3 780 285,77	0,00	3 213 242,91	0,00	3 213 242,91
Mars	2,49	0,39	6 670 351,78	1 038 600,75	4 631 198,26	0,00	4 631 198,26
Avril	2,19	0,40	5 680 178,68	1 043 460,00	3 784 691,88	0,00	3 784 691,88
Mai	1,84	0,50	4 931 837,76	1 331 946,00	2 860 116,10	0,00	2 860 116,10
Juin	1,66	0,43	4 294 689,21	1 117 627,50	2 532 858,33	0,00	2 532 858,33
Juillet	0,33	0,00	870 931,10	0,00	740 291,44	0,00	740 291,44
Août	1,01	0,00	2 699 866,52	0,00	2 294 886,54	0,00	2 294 886,54
Septembre	1,51	0,00	3 924 247,24	0,00	3 335 610,16	0,00	3 335 610,16
Octobre	1,86	0,47	4 974 025,28	1 255 306,25	2 972 615,24	0,00	2 972 615,24
Novembre	1,65	0,42	4 289 159,38	1 097 167,50	2 548 617,97	0,00	2 548 617,97
Décembre	2,44	0,40	6 547 131,78	1 078 242,00	4 486 820,02	0,00	4 486 820,02
				£	**37 191 708,66**	**0,00**	**37 191 708,66**

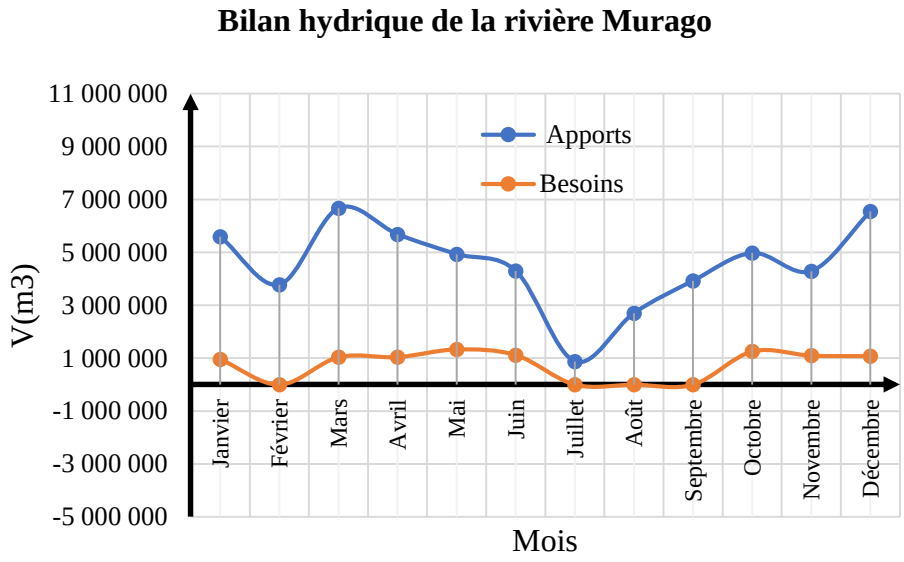


Figure III-20 : Bilan hydrique de la rivière Murago avec rotation des cultures (riz-riz)

Tableau III-31 : Bilan hydrique de la rivière Gikoma avec rotation des cultures (riz-riz)

Mois	Apports [m^3/s]	Besoins [m^3/s]	Apports [m^3]	Besoins [m^3]	Bilan hydrique [m^3]	Déficit [m^3]	Surplus [m^3]
Janvier	0,62	0,92	1 655 081,72	2 453 154,00	-1 046 334,54	-1 046 334,54	0,00
Février	0,46	0,00	1 119 598,36	0,00	951 658,60	0,00	951 658,60
Mars	0,89	0,99	2 382 434,70	2 655 894,00	-630 824,51	-630 824,51	0,00
Avril	0,80	1,03	2 076 051,90	2 668 320,00	-903 675,88	-903 675,88	0,00
Mai	0,70	1,27	1 867 543,09	3 406 032,00	-1 818 620,38	-1 818 620,38	0,00
Juin	0,64	1,10	1 665 714,74	2 857 980,00	-1 442 122,47	-1 442 122,47	0,00
Juillet	0,10	0,00	257 941,62	0,00	219 250,38	0,00	219 250,38
Août	0,30	0,00	799 613,12	0,00	679 671,16	0,00	679 671,16
Septembre	0,60	0,00	1 556 001,81	0,00	1 322 601,54	0,00	1 322 601,54
Octobre	0,70	1,20	1 880 037,66	3 210 050,00	-1 612 017,99	-1 612 017,99	0,00
Novembre	0,64	1,08	1 664 076,98	2 805 660,00	-1 391 194,57	-1 391 194,57	0,00
Décembre	0,88	1,03	2 345 940,92	2 757 264,00	-763 214,22	-763 214,22	0,00
				Σ	**-6 434 822,87**	**-9 608 004,54**	**3 173 181,68**

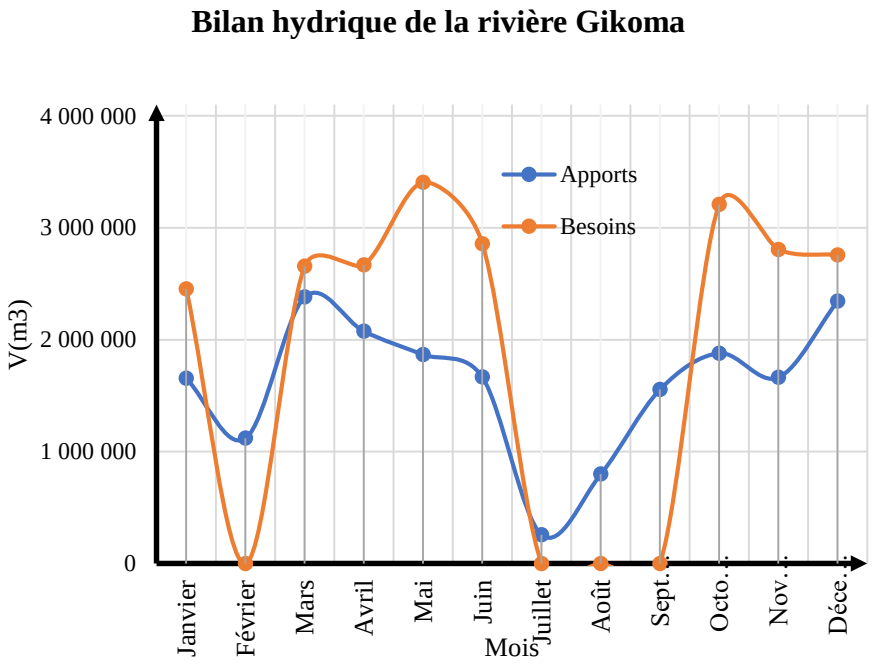


Figure III-21 : Bilan hydrique de la rivière Gikoma avec rotation des cultures (riz-riz)

En résumé, les résultats des bilans hydriques de trois affluents de la rivière Mutimbuzi avec rotation de deux cultures (riz-riz) sont présentés dans le tableau III-32 et figure III-22 ci-dessous.

Tableau III-32 : Bilan hydrique annuel avec rotation des cultures [riz-riz] (Muzazi, Murago,Gikoma)

Rivière	Superficies à irriguer	Apport annuel	Besoins annuel	Bilan hydrique
Muzazi	1488,5	60 995 919,90	77 887 995,25	- 16 892 075,35
Murago	170,5	46 113 376,91	8 921 668,25	37 191 708,66
Gikoma	436	16 379 531,13	22 814 354,00	- 6 434 822,87

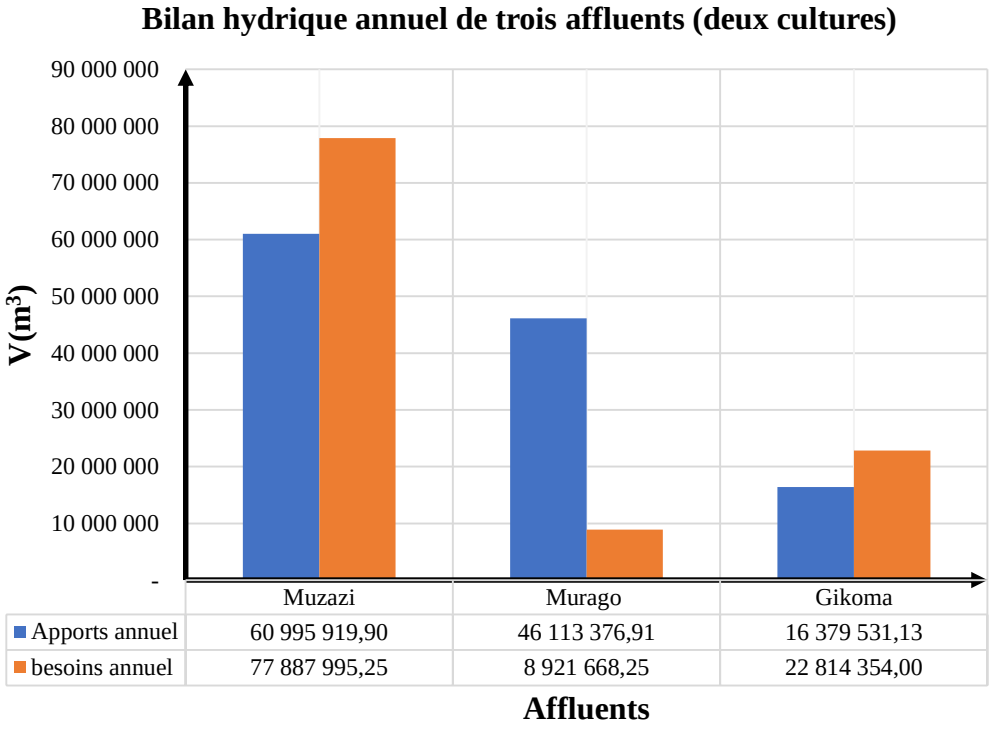


Figure III-22 : Bilan hydrique annuel avec rotation des cultures [riz-riz] (Muzazi, Murago,Gikoma)

Les résultats montrent que les apports sont en quantité insuffisante par rapport aux besoins pour la rivière Muzazi et la rivière Gikoma. Mais pour la rivière Murago les apports sont en excès.

Après l'évaluation du bilan hydrique de la rivière Muzazi, Murago et Gikoma pour deux cultures (riz-riz), nous avons ensuite évalué le bilan hydrique de ces rivières pour trois cultures (riz-riz-polyculture).

Les tableaux et les figures suivants montrent les résultats des bilans hydriques trouvés pour trois cultures.

Tableau III-33 : Bilan hydrique de la rivière Muzazi avec rotation des cultures (riz-riz-polyculture)

Mois	Apports [m^3/s]	Besoins [m^3/s]	Apports [m^3]	Besoins [m^3]	Bilan hydrique [m^3]	Déficit [m^3]	Surplus [m^3]
Janvier	2,62	3,13	7 018 245,28	8 375 045,25	-2 409 536,76	-2 409 536,76	0,00
Février	1,96	3,24	4 747 569,73	7 835 464,00	-3 800 029,73	-3 800 029,73	0,00
Mars	3,30	3,51	8 837 984,95	9 390 202,25	-1 877 915,04	-1 877 915,04	0,00
Avril	2,92	3,56	7 579 584,27	9 221 257,50	-2 778 610,87	-2 778 610,87	0,00
Mai	2,48	4,13	6 654 627,12	11 051 368,25	-5 394 935,19	-5 394 935,19	0,00
Juin	2,25	3,14	5 839 581,46	8 127 210,00	-3 163 565,76	-3 163 565,76	0,00
Juillet	0,41	4,80	1 093 781,37	12 850 964,75	-11 921 250,59	-11 921 250,59	0,00
Août	1,27	4,63	3 390 697,25	12 389 529,75	-9 507 437,09	-9 507 437,09	0,00
Septembre	2,07	0,00	5 374 352,33	0,00	4 568 199,48	0,00	4 568 199,48
Octobre	2,50	4,09	6 707 609,40	10 959 081,25	-5 257 613,26	-5 257 613,26	0,00
Novembre	2,25	3,70	5 832 636,67	9 578 497,50	-4 620 756,33	-4 620 756,33	0,00
Décembre	3,24	3,51	8 683 235,93	9 413 274,00	-2 032 523,46	-2 032 523,46	0,00
				Σ	**-48 195 974,60**	**-52 764 174,07**	**4 568 199,48**

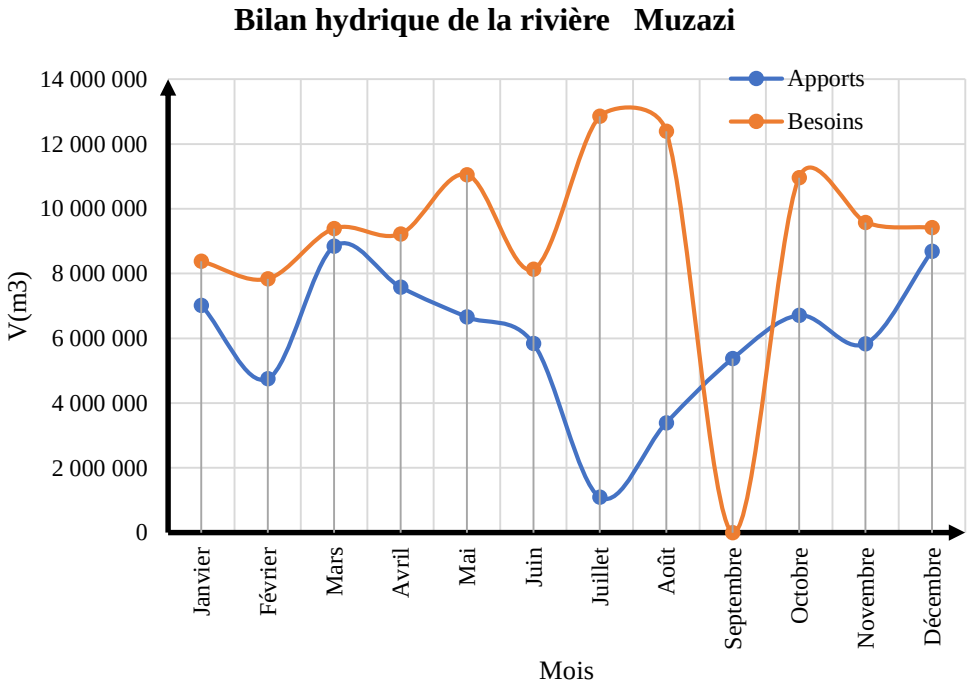


Figure III-23 : Bilan hydrique de la rivière Muzazi avec rotation des cultures [riz-riz-polyculture]

Tableau III-34 : Bilan hydrique de la rivière Murago avec rotation des cultures (riz-riz-polyculture)

Mois	Apports [m^3/s]	Besoins [m^3/s]	Apports [m^3]	Besoins [m^3]	Bilan hydrique [m^3]	Déficit [m^3]	Surplus [m^3]
Janvier	2,09	0,36	5 588 327,14	959 318,25	3 790 759,82	0,00	3 790 759,82
Février	1,56	0,37	3 780 285,77	897 512,00	2 315 730,91	0,00	2 315 730,91
Mars	2,49	0,40	6 670 351,78	1 075 599,25	4 594 199,76	0,00	4 594 199,76
Avril	2,19	0,41	5 680 178,68	1 056 247,50	3 771 904,38	0,00	3 771 904,38
Mai	1,84	0,47	4 931 837,76	1 265 877,25	2 926 184,85	0,00	2 926 184,85
Juin	1,66	0,36	4 294 689,21	930 930,00	2 719 555,83	0,00	2 719 555,83
Juillet	0,33	0,55	870 931,10	1 472 011,75	-731 720,31	-731 720,31	0,00
Août	1,01	0,53	2 699 866,52	1 419 156,75	875 729,79	0,00	875 729,79
Septembre	1,51	0,00	3 924 247,24	0,00	3 335 610,16	0,00	3 335 610,16
Octobre	1,86	0,47	4 974 025,28	1 255 306,25	2 972 615,24	0,00	2 972 615,24
Novembre	1,65	0,42	4 289 159,38	1 097 167,50	2 548 617,97	0,00	2 548 617,97
Décembre	2,44	0,40	6 547 131,78	1 078 242,00	4 486 820,02	0,00	4 486 820,02
				Σ	**33 606 008,41**	**-731 720,31**	**34 337 728,72**

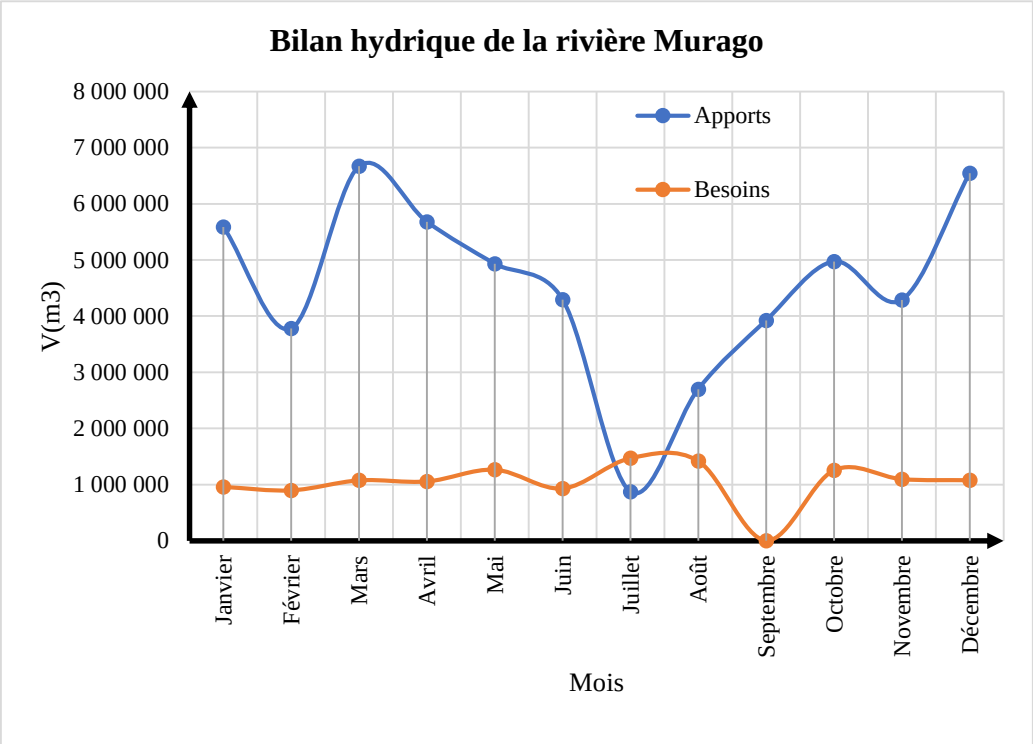


Figure III-24 : Bilan hydrique de la rivière Murago avec rotation des cultures [riz-riz-polyculture]

Tableau III-35 : Bilan hydrique de la rivière Gikoma avec rotation des cultures (riz-riz-polyculture)

Mois	Apports [m^3/s]	Besoins [m^3/s]	Apports [m^3]	Besoins [m^3]	Bilan hydrique [m^3]	Déficit [m^3]	Surplus [m^3]
Janvier	0,62	0,92	1 655 081,72	2 453 154,00	-1 046 334,54	-1 046 334,54	0,00
Février	0,46	0,95	1 119 598,36	2 295 104,00	-1 343 445,40	-1 343 445,40	0,00
Mars	0,89	1,03	2 382 434,70	2 750 506,00	-725 436,51	-725 436,51	0,00
Avril	0,80	1,04	2 076 051,90	2 701 020,00	-936 375,88	-936 375,88	0,00
Mai	0,70	1,21	1 867 543,09	3 237 082,00	-1 649 670,38	-1 649 670,38	0,00
Juin	0,64	0,92	1 665 714,74	2 380 560,00	-964 702,47	-964 702,47	0,00
Juillet	0,10	1,41	257 941,62	3 764 206,00	-3 544 955,62	-3 544 955,62	0,00
Août	0,30	1,35	799 613,12	3 629 046,00	-2 949 374,84	-2 949 374,84	0,00
Septembre	0,60	0,00	1 556 001,81	0,00	1 322 601,54	0,00	1 322 601,54
Octobre	0,70	1,20	1 880 037,66	3 210 050,00	-1 612 017,99	-1 612 017,99	0,00
Novembre	0,64	1,08	1 664 076,98	2 805 660,00	-1 391 194,57	-1 391 194,57	0,00
Décembre	0,88	1,03	2 345 940,92	2 757 264,00	-763 214,22	-763 214,22	0,00
				£	**-15 604 120,87**	**-16 926 722,41**	**1 322 601,54**

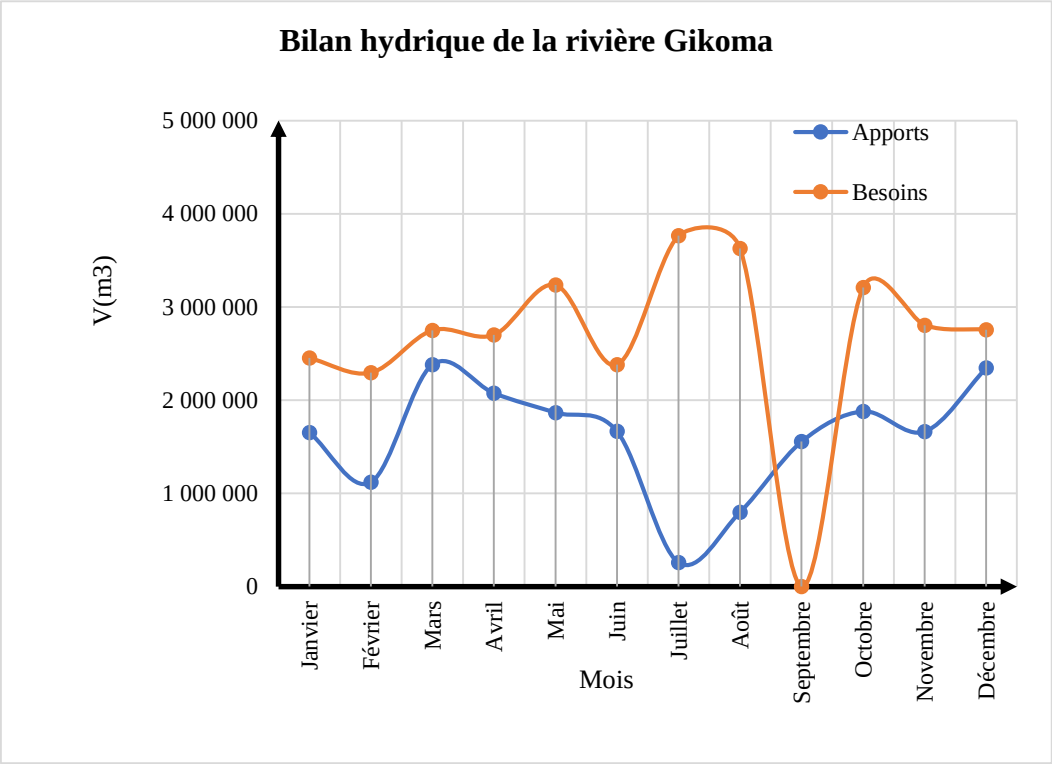


Figure III-25 : Bilan hydrique de la rivière Gikoma avec rotation des cultures [riz-riz-polyculture]

En bref, les résultats des bilans hydriques de trois affluents de la rivière Mutimbuzi avec rotation de trois cultures (riz-riz-polyculture) sont présentés dans le tableau III-36 et figure III-26 ci-dessous :

Tableau III-36 : Bilan hydrique annuel avec rotation des cultures [riz-riz-polyculture] (Muzazi, Murago,Gikoma)

Rivière	Superficies à irriguer	Apport annuel	Besoins annuel	Bilan hydrique
Muzazi	1488,5	60 995 919,90	109 191 894,50	- 48 195 974,60
Murago	170,5	46 113 376,91	11 883 834,00	34 229 542,91
Gikoma	436	16 379 531,13	31 983 652,00	- 15 604 120,87

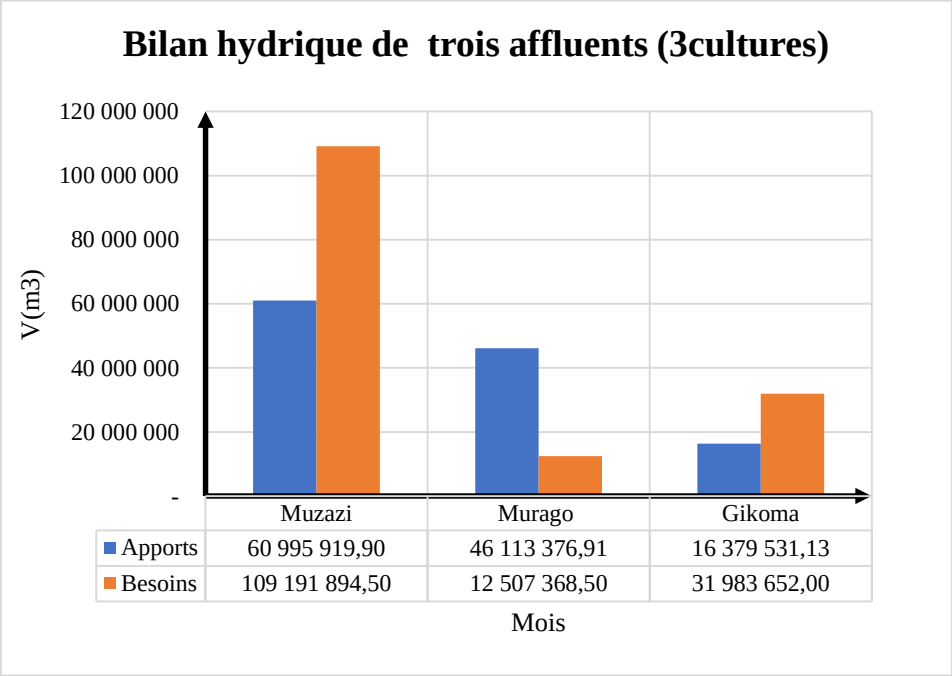


Figure III-26 : Bilan hydrique annuel avec rotation des trois cultures (Muzazi, Murago, Gikoma)

Les résultats montrent que les apports sont en quantité insuffisante par rapport aux besoins pour la rivière Muzazi et la rivière Gikoma. Mais pour la rivière Murago les apports sont en excès. Le constant est le même que pour la rotation de deux cultures.

III.6.3. Choix des cultures

Les résultats des bilans hydriques pour la rotation des cultures (riz-riz) et (riz-riz-polyculture), montrent que les apports sont inférieurs aux besoins pour la rivière Muzazi et la rivière Gikoma contrairement à la rivière Murago où ils sont en excès. Ainsi pour mieux utiliser ces apports disponibles il faut faire le stockage.

En comparant les résultats des bilans hydriques de ces rivières pour la rotation de deux cultures et de trois cultures (fig. III-22, fig.III-26), on constate que les besoins pour la rotation de trois cultures sont supérieurs aux besoins pour la rotation de deux cultures.

Donc il est indispensable de déterminer les périmètres pouvant être irrigués par les apports disponibles de la rivière Muzazi, Gikoma et Murago.

Les périmètres irrigués par les eaux de la rivière Muzazi et Gikoma sont diminués. Ceux irrigués par la rivière Murago sont augmentés. Mais pour satisfaire les besoins des cultures pendant toute la période des cultures il faut construire les barrages d'accumulation. Ces barrages permettront d'emmagasiner l'eau en excès pour l'utilisation ultérieure.

Le tableau suivant donne les résultats des périmètres pouvant être irrigués par les apports disponibles des rivières Muzazi, Murago et Gikoma.

Tableau III-37 : Résultats des périmètres irrigables avec les apports disponibles

Rivière	**Périmètres à irriguer [ha](Avant)**	**Périmètres à irriguer [ha] (Après)**	**Apport annuel [m^3]**	**Besoins annuels [m^3]**	**Bilan hydrique [m^3]**	**Volume à stocker[m^3]**
Rotation des cultures (riz-riz)						
Muzazi	1488,5	1165,6793	60 995 919,90	60 995 919,46	0,44	12 835 986,60
Murago	170,5	881,2624	46 113 376,91	46 113 376,45	0,46	9 885 620,21
Gikoma	436	313,0255	16 379 531,13	16 379 530,92	0,21	3 305 932,36
Total	**2095**	**2359,9673**				
Rotation des cultures (riz-riz-polyculture)						
Muzazi	1488,5	831,4942	60 995 919,90	60 995 919,30	0,61	11 959 719,39
Murago	170,5	628,6159	46 113 376,91	46 113 376,58	0,33	8 994 770,93
Gikoma	436	223,2852	16 379 531,13	16 379 530,95	0,18	3 249 689,05
Total	**2 095**	**1683,3953**				

Les résultats ci-dessus montrent qu'en pratiquant la double riziculture, à ce qui existe, il faut un ajout d'environ 250ha soit 13%. Au contraire en appliquant la rotation de trois cultures (riz-riz-polyculture), il faut une diminution d'environ 400ha soit 20%. Mais on a essayé de garder toute la superficie en diminuant la superficie du riz et le remplacer par la polyculture pour la 2ème saison.

Le tableau suivant montre la répartition de la superficie pendant la deuxième saison.

Culture	**Superficies à irriguer (ha)**
Riz (1ère saison)	2095
Arachide (2ème saison)	1394,2341
Riz (2ème saison)	700,7659
Haricot (3ème saison)	2095

Evaluons le revenu de 3 variantes :

Pour un rendement de riz et des arachides d'environ 7,5/ha et 1,5t/ha, avec 900FBU/kg de riz et 2000FBU/kg des arachides, une analyse superficielle des revenus est récapitulé dans le tableau III-38 .

Tableau III-38 : Résultats des revenus pour chaque pratique de rotation des cultures

Variante	**Rotation des cultures**	**Périmètres irrigués (ha)**	**Rendement (t/ha)**	**P.U/kg**	**P.T**	**Pourcentage**
I	**Riz-riz**	**2359,9673**	**7,5**	**900**	**31 859 558 010**	**100%**
II	**Riz-riz-polyculture**	**1963,9610**				
	Riz	1 963,9610	7,5	900	22 725 836 145	
	Polyculture	1 963,9610	1,5	2 000	5 050 185 810	
	Total				**27 776 021 955**	**87%**
III	**Riz-riz&polyculture-polyculture**	**2095**				
	Riz (1ère saison)	2095	7,5	900	14 141 250 000	
	Riz (2ème saison)	700,7659	7,5	900	4 730 169 825	
	Polyculture (2ème saison)	1394,2341	1,5	2000	4 182 702 300	
	Polyculture 3ème saison	2095	1,5	2000	6 285 000 000	
	Total				**29 339 122 125**	**92%**

Les résultats montrent que les variantes vont en diminuant I, III, II. Cela est expliqué du fait que les ressources en eau ne sont pas disponibles pour faire trois cultures par an, donc il y a une diminution de la superficie (voir le tableau III.37).

La variante (I) (riz-riz) est adoptée car ça permet d'accumuler une grande quantité des eaux. Néanmoins, les variantes II et III sont aussi recommandées par rapport aux années humides et moyennes. Cela permettant de varier les cultures donc pratiquer trois saisons par an.

Les volumes d'eau à stocker pour satisfaire les besoins en eaux d'irrigation pour la rivière Muzazi, Murago et Gikoma sont données dans le tableaux III-39.

Tableau III-39 : Volume à stocker pour Muzazi ,Murago et Gikoma

Rotation des cultures (Riz-riz)		
Rivière	**Périmètres à irriguer [ha]**	**Volume à stocker[m^3]**
Muzazi	1165,6793	12 835 986,60
Murago	881,2624	9 885 620,21
Gikoma	313,0255	3 305 932,36
Total	**2359,9673**	

CHAPITRE IV : MODELE DE GESTION INTEGREE DE LA RIVIERE MUTIMBUZI

IV.1. Introduction

Les résultats trouvés montrent que plus la hauteur des précipitations est importante plus la crue est grande. Ainsi le bilan hydrique montre que les apports des rivières Muzazi, Murago et Gikoma ne peuvent satisfaire les besoins en eau d'irrigation sans avoir un stock qui servira le stockage d'eau pendant les mois où on a un excès d'eau et l'utiliser pendant les mois où on enregistre les déficits.

Comme s'est déjà montré dans la présentation de la zone d'étude, actuellement on enregistre plusieurs problèmes causés par la gestion des eaux de ces rivières. Les ponts et les barrages déversoirs de la SRDI se sont détruits. Pour l'irrigation, on pratique le tour d'eau. Mais cette pratique cause pas mal des problèmes à savoir les conflits, les corruptions, les décalages des semis et les faibles rendements.

Donc pour palier à ces problèmes cités ci-haut, un modèle permettant de gérer les apports afin de satisfaire les besoins en eau d'irrigation durant toute l'année et permettant d'atténuer les crues sera mise en place.
Il faut construire un barrage d'accumulation sur la rivière Muzazi, Murago et Gikoma ayant comme rôle d'accumulation pour irrigation et d'écrêteur des crues.
Un barrage est un ouvrage d'art construit au flanc d'un cours d'eau et destiné à réguler le débit et/ou à stocker de l'eau, notamment pour le contrôle des crues, l'irrigation, l'industrie, l'hydroélectricité, la pisciculture, une réserve d'eau potable.

Pour cette étude le barrage est destiné à stocker l'eau pour l'irrigation, écrêter les crues ainsi que l'élevage des poissons.

IV.2. Critères de choix du site d'emplacement du barrage d'accumulation

Le choix du site d'implantation d'un barrage dépend plusieurs facteurs :

- La topographie et apports du bassin versant ;
- La morphologie de la vallée ;
- La géologie et conditions de fondations ;
- Les matériaux disponibles ;
- Crues et ouvrages hydrauliques ;
- Critères économiques.

Pour cette étude nous nous sommes bornés sur la topographie du bassin versant. Donc nous avons regardé l'endroit qui donne un volume de retenu grand avec une hauteur abordable et une surface inondée moins grande.

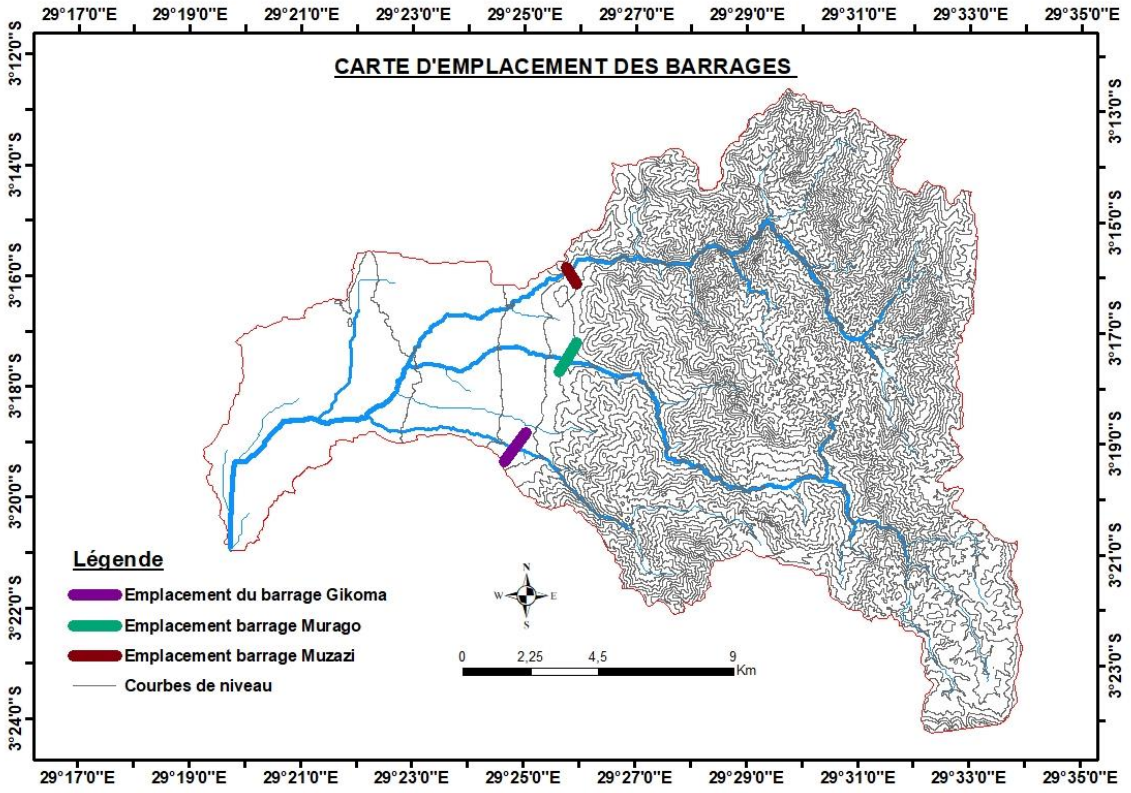


Figure IV-1 : Emplacement des barrages sur Muzazi, Murago et Gikoma

IV.3. Relation entre hauteur du barrage, volume retenu et surface inondée

Suivant la topographie des points d'emplacement des barrages, on a trouvé les résultats suivants :

Tableau IV-1 : Volume retenu et surface inondée en fonction de la hauteur

Barragge Muzazi			**Barrage Murago**			**Barrage Gikoma**		
Hauteur (m)	Volume (m3)	Surface Inondé (m²)	Hauteur (m)	Volume (m3)	Surface Inondé (m²)	Hauteur (m)	Volume (m3)	Surface Inondé (m²)
0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
7	520 461,61	87 493,65	4	271 723,85	75 281,27	2	11 348,01	6 191,41
10	1 382 940,66	165 154,49	8	1 593 035,46	185 922,67	4	116 564,47	43 223,02
12	2 368 245,18	238 117,12	11	2 904 632,99	254 003,05	6	492 673,14	107 001,76
16	5 544 071,43	411 325,45	13	4 333 907,88	320 572,62	8	1 253 378,13	201 456,88
20	10 529 371,76	608 041,87	15	6 091 897,16	388 973,08	9	2 272 587,07	309 753,68
21	11 747 184,14	644 218,17	17	8 198 125,77	462 000,50	10	2 957 252,76	371 173,08
22	13 034 370,95	681 887,26						

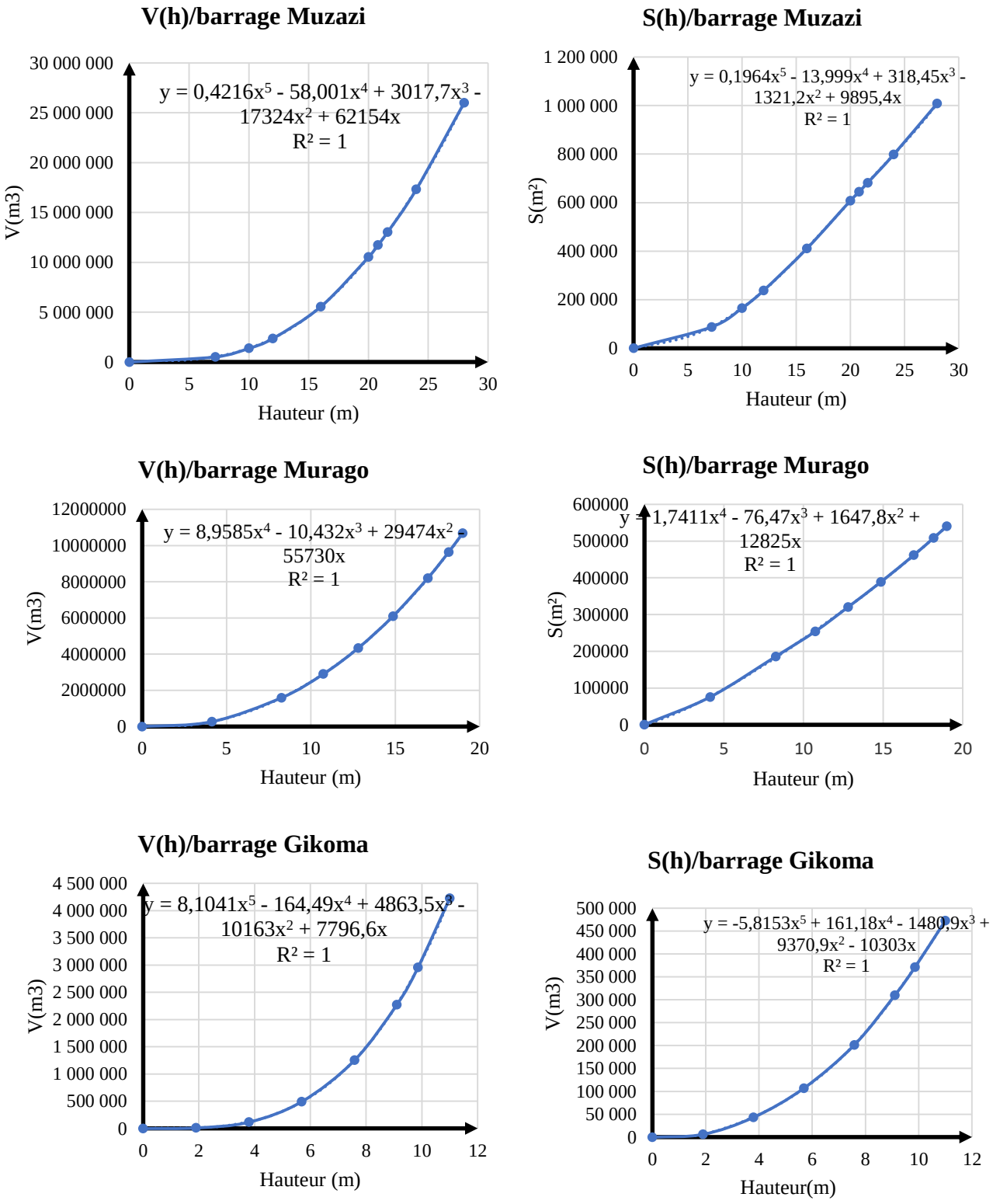


Figure IV-2 : Volume retenu et surface inondée en fonction de la hauteur

La topographie du site exige :

- une hauteur d'environ 21 ,5 m pour avoir un volume de 12 835 986,60 m^3 et une surface inondée de 683 898 ,4 m^2 sur Muzazi ;
- une hauteur d'environ 18,40m pour avoir un volume de 9 885 620,21 m^3 et une surface inondée de 512 834,56 m^2 sur Gikoma ;
- une hauteur d'environ 10,30 m pour avoir un volume de 3 305 932,36 m^3 et une surface inondée de 399 622,08 m^2.

Ainsi, ces graphiques ci-dessus montrent que si la hauteur augmente, le volume d'eau retenu dans le barrage augmente mêmement pour la surface inondée.

Ces mesures des hauteurs et surfaces inondées sont données à titre indicatif car ces paramètres dépendent de plusieurs facteurs que nous n'avons pas traités dans cette étude.

IV.4. Calcul de l'apport solide en suspension

Plusieurs chercheurs suggèrent le développement théorique des équations décrivant des sédiments qui se font dans des rivières et qui se déposent au fond de celles-ci. Compte tenu des données disponibles, dans cette étude on a utilisé la formule de Fournier développé au point I.1.5. Le tableau suivant montre les résultats de l'apport solide de la rivière Mutimbuzi et ses affluents calculés avec la formule de Fournier.

Rivière Mutimbuzi	**S(km^2)**	**Px(mm)**	**Pa (mm)**	**H(m)**	**E(t/km^2/an)**	**V(m^3) /an**
BV Mutimbuzi	276,35	109,07	753,11	1465,5	2 567,52	262 789,97
SBS Muzazi	108,47					103 147,56
SBS Murago	86,37					82 131,97
SBS Gikoma	25,58					24 324,83

IV.5. Laminage des crues

L'effet de laminage de crue dépend de la forme de l'hydrogramme de la crue entrant dans la retenue, de la capacité d'évacuation du déversoir.

Le barrage proposé dans ce travail va stocker l'eau pour l'irrigation et écrêter les crues. Pour obtenir un hydrogramme sortant du barrage, la méthode de **courbe d'indication de stockage** développée dans le point II.2.2.2 a été employée.

Dans ce présent travail le laminage des crues pour les périodes de retour (2ans, 5ans, 10ans, 25ans,50ans et 100) a été effectué pour la rivière Muzazi, Murago et Gikoma. Mais on a présenté ces détails pour une période de retour de 100ans.

IV.5.1. Calcul du débit entrant

L'hydrogramme du débit entrant I a été trouvé au point III.2.3 dans le tableau III-24.

IV.5.2. Relation rétention -Débit sortant

Le débit sortant est le débit passant par le déversoir donné par :

$$Qs = 0{,}71 * b * \sqrt{g} * h^{\frac{3}{2}} \qquad \textbf{(IV-1)}$$

Dans cette étude, on a supposé b=2,8m

Débit entrant I=Qe ; débit sortant O=Qs

Les résultats de la relation rétention -débit sortant pour les barrages de la rivière Muzazi , Murago et Gikoma sont présentés respectivement dans les tableaux IV-2, IV-3 et IV-4.

Tableau IV-2 : Résultats de calcul de la relation rétention -débit pour le barrage Muzazi

h	z	V	S	2S/Δt	2S/Δt - Qs	2S/Δt + Qs	Qs
0,00	21,50	12 862 795,17	0,00	-	0,00	0,00	0,00
0,10	21,60	13 028 048,85	165 253,67	275,42	275,23	275,62	0,20
0,20	21,70	13 194 469,41	331 674,24	552,79	552,23	553,35	0,56
0,30	21,80	13 362 056,70	499 261,53	832,10	831,08	833,13	1,02
0,40	21,90	13 530 810,51	668 015,33	1 113,36	1 111,78	1 114,93	1,58
0,50	22,00	13 700 730,60	837 935,42	1 396,56	1 394,36	1 398,76	2,20
0,60	22,10	13 871 816,71	1 009 021,53	1 681,70	1 678,81	1 684,60	2,89
0,70	22,20	14 044 068,55	1 181 273,38	1 968,79	1 965,14	1 972,44	3,65
0,80	22,30	14 217 485,81	1 354 690,64	2 257,82	2 253,36	2 262,27	4,46
0,90	22,40	14 392 068,15	1 529 272,98	2 548,79	2 543,47	2 554,10	5,32
1,00	22,50	14 567 815,20	1 705 020,02	2 841,70	2 835,47	2 847,93	6,23
1,10	22,60	14 744 726,55	1 881 931,37	3 136,55	3 129,37	3 143,74	7,18
1,20	22,70	14 922 801,79	2 060 006,62	3 433,34	3 425,16	3 441,53	8,19
1,30	22,80	15 102 040,47	2 239 245,30	3 732,08	3 722,85	3 741,30	9,23
1,40	22,90	15 282 442,13	2 419 646,96	4 032,74	4 022,43	4 043,06	10,31
1,50	23,00	15 464 006,27	2 601 211,09	4 335,35	4 323,91	4 346,79	11,44
1,60	23,10	15 646 732,37	2 783 937,19	4 639,90	4 627,29	4 652,50	12,60
1,70	23,20	15 830 619,89	2 967 824,71	4 946,37	4 932,57	4 960,18	13,80
1,80	23,30	16 015 668,27	3 152 873,09	5 254,79	5 239,75	5 269,83	15,04

h	z	V	S	2S/Δt	2S/Δt - Qs	2S/Δt + Qs	Qs
1,90	23,40	16 201 876,92	3 339 081,75	5 565,14	5 548,83	5 581,44	16,31
2,00	23,50	16 389 245,25	3 526 450,08	5 877,42	5 859,81	5 895,03	17,61
2,10	23,60	16 577 772,62	3 714 977,44	6 191,63	6 172,68	6 210,58	18,95
2,20	23,70	16 767 458,38	3 904 663,21	6 507,77	6 487,45	6 528,09	20,32
2,30	23,80	16 958 301,88	4 095 506,71	6 825,84	6 804,13	6 847,56	21,72
2,40	23,90	17 150 302,42	4 287 507,25	7 145,85	7 122,69	7 169,00	23,15
2,50	24,00	17 343 459,30	4 480 664,13	7 467,77	7 443,16	7 492,39	24,61
2,60	24,10	17 537 771,80	4 674 976,63	7 791,63	7 765,52	7 817,73	26,10
2,70	24,20	17 733 239,17	4 870 444,00	8 117,41	8 089,78	8 145,03	27,62
2,80	24,30	17 929 860,67	5 067 065,49	8 445,11	8 415,94	8 474,28	29,17
2,90	24,40	18 127 635,50	5 264 840,33	8 774,73	8 743,98	8 805,48	30,75
3,00	24,50	18 326 562,89	5 463 767,72	9 106,28	9 073,93	9 138,63	32,35
3,10	24,60	18 526 642,03	5 663 846,85	9 439,74	9 405,76	9 473,73	33,99
3,20	24,70	18 727 872,09	5 865 076,91	9 775,13	9 739,49	9 810,77	35,64
3,30	24,80	18 930 252,24	6 067 457,06	10 112,43	10 075,10	10 149,76	37,33
3,40	24,90	19 133 781,62	6 270 986,45	10 451,64	10 412,61	10 490,68	39,04
3,50	25,00	19 338 459,38	6 475 664,20	10 792,77	10 752,00	10 833,54	40,77
3,60	25,10	19 544 284,62	6 681 489,45	11 135,82	11 093,28	11 178,35	42,53
3,70	25,20	19 751 256,48	6 888 461,30	11 480,77	11 436,45	11 525,08	44,32
3,80	25,30	19 959 374,03	7 096 578,86	11 827,63	11 781,51	11 873,76	46,12
3,90	25,40	20 168 636,37	7 305 841,20	12 176,40	12 128,45	12 224,36	47,96

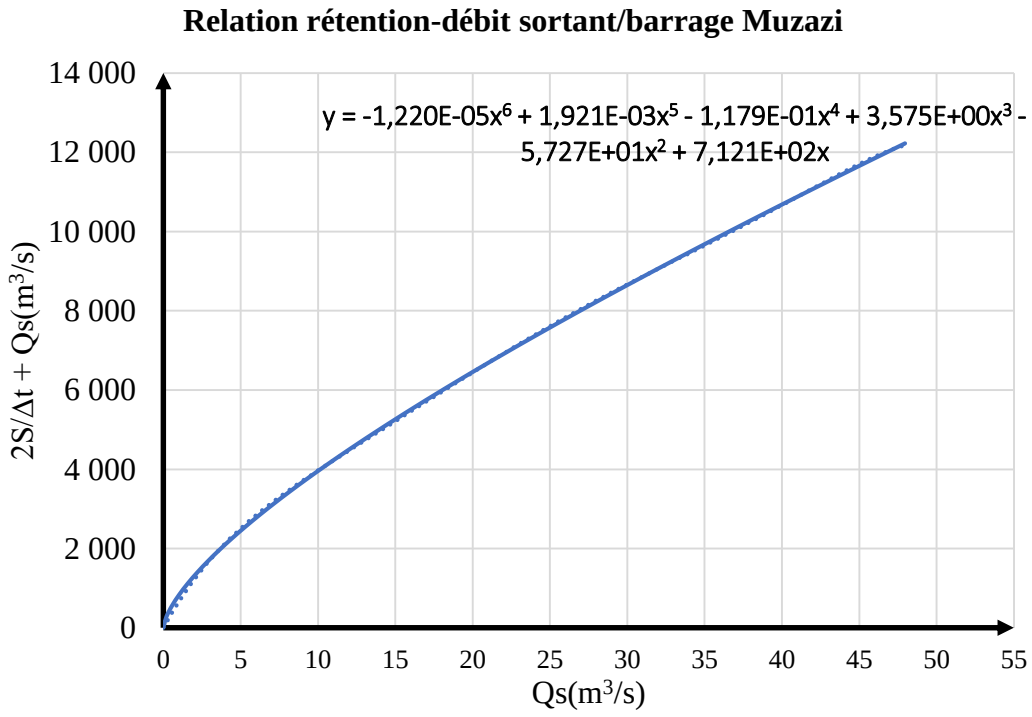


Figure IV-3 : Relation rétention-débit sortant / barrage Muzazi

Tableau IV-3 : Résultats de calcul de la relation rétention -débit pour le barrage Murago

h	z	V	S	2S/Dt	2S/Dt - Qs	2S/Dt + Qs	Qs
0,00	18,40	9 915 148,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,10	18,50	10 039 774,45	124 626,18	207,71	207,51	207,91	0,20
0,20	18,60	10 165 346,45	250 198,18	417,00	416,44	417,55	0,56
0,30	18,70	10 291 868,21	376 719,94	627,87	626,84	628,89	1,02
0,40	18,80	10 419 343,67	504 195,40	840,33	838,75	841,90	1,58
0,50	18,90	10 547 776,80	632 628,53	1054,38	1 052,18	1 056,58	2,20
0,60	19,00	10 677 171,59	762 023,32	1270,04	1 267,15	1 272,93	2,89
0,70	19,10	10 807 532,05	892 383,78	1487,31	1 483,66	1 490,95	3,65
0,80	19,20	10 938 862,22	1 023 713,95	1706,19	1 701,73	1 710,65	4,46
0,90	19,30	11 071 166,14	1 156 017,88	1926,70	1 921,38	1 932,01	5,32
1,00	19,40	11 204 447,90	1 289 299,64	2148,83	2 142,61	2 155,06	6,23
1,10	19,50	11 338 711,60	1 423 563,33	2372,61	2 365,42	2 379,79	7,18
1,20	19,60	11 473 961,35	1 558 813,08	2598,02	2 589,84	2 606,21	8,19
1,30	19,70	11 610 201,29	1 695 053,02	2825,09	2 815,86	2 834,32	9,23
1,40	19,80	11 747 435,58	1 832 287,32	3053,81	3 043,50	3 064,13	10,31
1,50	19,90	11 885 668,42	1 970 520,15	3284,20	3 272,76	3 295,64	11,44
1,60	20,00	12 024 904,00	2 109 755,73	3516,26	3 503,66	3 528,86	12,60
1,70	20,10	12 165 146,55	2 249 998,28	3750,00	3 736,20	3 763,80	13,80
1,80	20,20	12 306 400,32	2 391 252,06	3985,42	3 970,38	4 000,46	15,04
1,90	20,30	12 448 669,58	2 533 521,32	4222,54	4 206,23	4 238,84	16,31
2,00	20,40	12 591 958,63	2 676 810,36	4461,35	4 443,74	4 478,96	17,61
2,10	20,50	12 736 271,76	2 821 123,49	4701,87	4 682,92	4 720,82	18,95
2,20	20,60	12 881 613,32	2 966 465,06	4944,11	4 923,79	4 964,43	20,32
2,30	20,70	13 027 987,67	3 112 839,40	5188,07	5 166,35	5 209,78	21,72
2,40	20,80	13 175 399,18	3 260 250,91	5433,75	5 410,60	5 456,90	23,15
2,50	20,90	13 323 852,24	3 408 703,97	5681,17	5 656,56	5 705,79	24,61
2,60	21,00	13 473 351,29	3 558 203,02	5930,34	5 904,23	5 956,44	26,10
2,70	21,10	13 623 900,75	3 708 752,49	6181,25	6 153,63	6 208,88	27,62
2,80	21,20	13 775 505,10	3 860 356,84	6433,93	6 404,75	6 463,10	29,17
2,90	21,30	13 928 168,82	4 013 020,56	6688,37	6 657,62	6 719,12	30,75
3,00	21,40	14 081 896,42	4 166 748,15	6944,58	6 912,23	6 976,93	32,35
3,10	21,50	14 236 692,42	4 321 544,15	7202,57	7 168,59	7 236,56	33,99
3,20	21,60	14 392 561,37	4 477 413,10	7462,36	7 426,71	7 498,00	35,64
3,30	21,70	14 549 507,85	4 634 359,58	7723,93	7 686,61	7 761,26	37,33
3,40	21,80	14 707 536,44	4 792 388,17	7987,31	7 948,28	8 026,35	39,04
3,50	21,90	14 866 651,76	4 951 503,49	8252,51	8 211,73	8 293,28	40,77
3,60	22,00	15 026 858,44	5 111 710,17	8519,52	8 476,99	8 562,05	42,53
3,70	22,10	15 188 161,15	5 273 012,88	8788,35	8 744,04	8 832,67	44,32
3,80	22,20	15 350 564,55	5 435 416,28	9059,03	9 012,90	9 105,15	46,12
3,90	22,30	15 514 073,35	5 598 925,09	9331,54	9 283,59	9 379,50	47,96

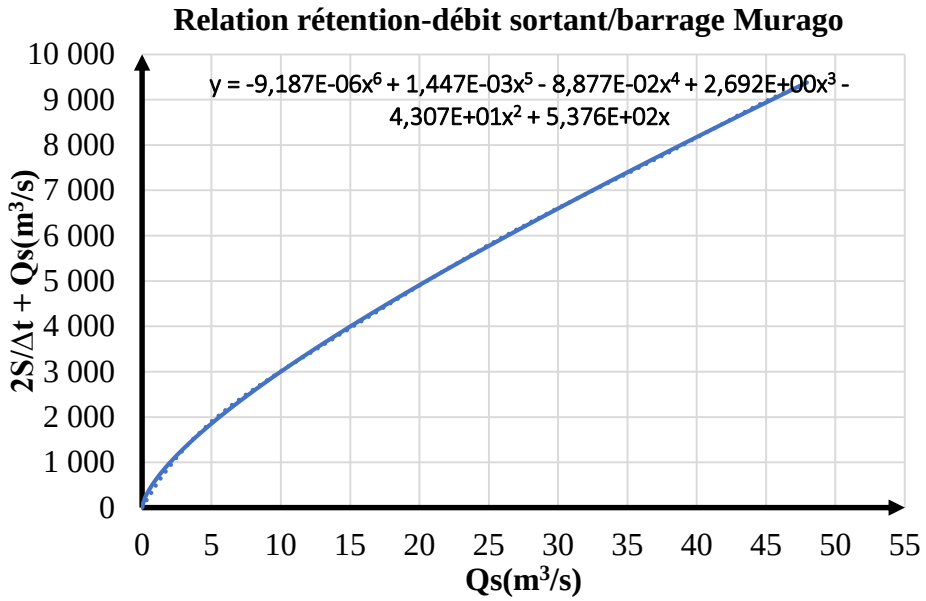


Figure IV-4 : Relation rétention-débit sortant / barrage Murago

Tableau IV-4 : Résultats de calcul de la relation rétention -débit pour le barrage Gikoma

h	z	V	S	2S/Δt	2S/Δt - Qs	2S/Δt + Qs	Qs
0,00	10,30	3 404 727,94	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,10	10,40	3 514 317,96	109 590,02	182,65	182,45	182,85	0,20
0,20	10,50	3 626 427,85	221 699,91	369,50	368,94	370,06	0,56
0,30	10,60	3 741 098,63	336 370,70	560,62	559,59	561,64	1,02
0,40	10,70	3 858 371,97	453 644,04	756,07	754,50	757,65	1,58
0,50	10,80	3 978 290,15	573 562,21	955,94	953,74	958,14	2,20
0,60	10,90	4 100 896,10	696 168,17	1160,28	1 157,39	1 163,17	2,89
0,70	11,00	4 226 233,42	821 505,48	1369,18	1 365,53	1 372,82	3,65
0,80	11,10	4 354 346,36	949 618,43	1582,70	1 578,24	1 587,15	4,46
0,90	11,20	4 485 279,86	1 080 551,92	1800,92	1 795,60	1 806,24	5,32
1,00	11,30	4 619 079,52	1 214 351,59	2023,92	2 017,69	2 030,15	6,23
1,10	11,40	4 755 791,67	1 351 063,73	2251,77	2 244,59	2 258,96	7,18
1,20	11,50	4 895 463,31	1 490 735,37	2484,56	2 476,37	2 492,74	8,19
1,30	11,60	5 038 142,18	1 633 414,24	2722,36	2 713,13	2 731,59	9,23
1,40	11,70	5 183 876,72	1 779 148,78	2965,25	2 954,93	2 975,56	10,31
1,50	11,80	5 332 716,12	1 927 988,18	3213,31	3 201,87	3 224,75	11,44
1,60	11,90	5 484 710,31	2 079 982,37	3466,64	3 454,04	3 479,24	12,60
1,70	12,00	5 639 909,97	2 235 182,04	3725,30	3 711,50	3 739,10	13,80
1,80	12,10	5 798 366,55	2 393 638,61	3989,40	3 974,36	4 004,43	15,04
1,90	12,20	5 960 132,25	2 555 404,32	4259,01	4 242,70	4 275,31	16,31
2,00	12,30	6 125 260,09	2 720 532,15	4534,22	4 516,61	4 551,83	17,61
2,10	12,40	6 293 803,84	2 889 075,90	4815,13	4 796,18	4 834,08	18,95
2,20	12,50	6 465 818,10	3 061 090,16	5101,82	5 081,50	5 122,14	20,32

h	z	V	S	2S/Δt	2S/Δt - Qs	2S/Δt + Qs	Qs
2,30	12,60	6 641 358,26	3 236 630,33	5394,38	5 372,66	5 416,10	21,72
2,40	12,70	6 820 480,57	3 415 752,63	5692,92	5 669,77	5 716,07	23,15
2,50	12,80	7 003 242,05	3 598 514,12	5997,52	5 972,91	6 022,14	24,61
2,60	12,90	7 189 700,62	3 784 972,69	6308,29	6 282,18	6 334,39	26,10
2,70	13,00	7 379 915,01	3 975 187,08	6625,31	6 597,69	6 652,94	27,62
2,80	13,10	7 573 944,83	4 169 216,89	6948,69	6 919,52	6 977,87	29,17
2,90	13,20	7 771 850,55	4 367 122,61	7278,54	7 247,79	7 309,29	30,75
3,00	13,30	7 973 693,51	4 568 965,58	7614,94	7 582,59	7 647,30	32,35
3,10	13,40	8 179 535,98	4 774 808,04	7958,01	7 924,03	7 992,00	33,99
3,20	13,50	8 389 441,07	4 984 713,13	8307,86	8 272,21	8 343,50	35,64
3,30	13,60	8 603 472,84	5 198 744,91	8664,57	8 627,25	8 701,90	37,33
3,40	13,70	8 821 696,26	5 416 968,33	9028,28	8 989,24	9 067,32	39,04
3,50	13,80	9 044 177,22	5 639 449,29	9399,08	9 358,31	9 439,85	40,77
3,60	13,90	9 270 982,56	5 866 254,62	9777,09	9 734,56	9 819,62	42,53
3,70	14,00	9 502 180,04	6 097 452,10	10162,42	10 118,10	10 206,74	44,32
3,80	14,10	9 737 838,41	6 333 110,47	10555,18	10 509,06	10 601,31	46,12
3,90	14,20	9 978 027,36	6 573 299,43	10955,50	10 907,54	11 003,46	47,96

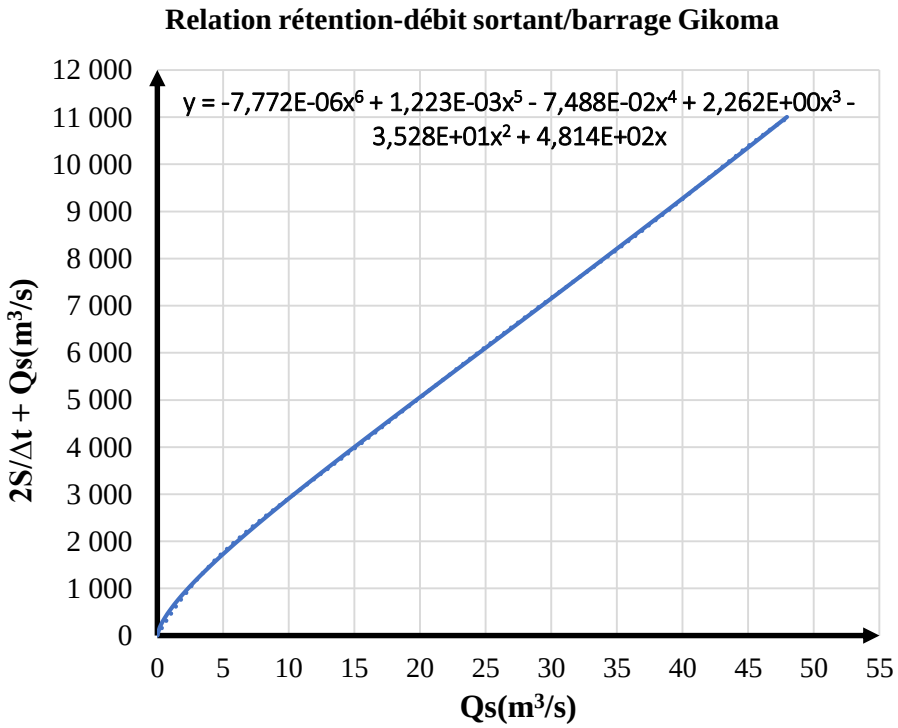


Figure IV-5 : Relation rétention-débit sortant / barrage Gikoma

IV.5.3. Calcul du débit sortant

Les résultats de calcul du débit sortant pour les barrages de la rivière Muzazi, Murago et Gikoma sont présentés respectivement dans les tableaux IV-5, IV-6 et IV-7.

Tableau IV-5 : Résultats de calcul du débit sortant /barrages Muzazi

Temps	$Q_{e,i}$	$Q_{e,i+1}$	$Q_{e,i} + Q_{e,i+1}$	$2S_i/\Delta t - Q_{s,i}$	$2S_i/\Delta t + Q_{s,i}$	$Q_{s,i}$	**hd**
0	2,16	2,16	4,32			0,00	0,00
20	2,16	2,16	4,32	0,00		0,00	0,00
40	2,16	2,16	4,32	4,30	4,32	0,01	0,01
60	2,16	2,16	4,32	8,58	8,62	0,02	0,02
80	2,16	2,34	4,50	12,85	12,89	0,02	0,02
100	2,34	2,77	5,11	17,29	17,35	0,03	0,03
120	2,77	3,83	6,60	22,33	22,41	0,04	0,03
140	3,83	5,75	9,58	28,83	28,93	0,05	0,04
160	5,75	8,79	14,54	38,30	38,42	0,06	0,05
180	8,79	13,24	22,03	52,68	52,84	0,08	0,05
200	13,24	19,05	32,29	74,49	74,71	0,11	0,07
220	19,05	26,31	45,36	106,46	106,78	0,16	0,09
240	26,31	34,35	60,66	151,38	151,82	0,22	0,11
260	34,35	43,01	77,36	211,42	212,04	0,31	0,14
280	43,01	51,76	94,77	287,93	288,77	0,42	0,17
300	51,76	60,25	112,00	381,56	382,70	0,57	0,20
320	60,25	67,99	128,23	492,08	493,56	0,74	0,24
340	67,99	74,13	142,12	618,44	620,32	0,94	0,28
360	74,13	78,93	153,06	758,20	760,56	1,18	0,33
380	78,93	81,32	160,25	908,38	911,26	1,44	0,38
400	81,32	81,53	162,85	1065,19	1068,63	1,72	0,42
420	81,53	78,75	160,28	1224,00	1228,04	2,02	0,47
440	78,75	74,57	153,32	1379,63	1384,27	2,32	0,52
460	74,57	68,65	143,23	1527,69	1532,95	2,63	0,56
480	68,65	62,23	130,88	1665,08	1670,92	2,92	0,60
500	62,23	55,16	117,39	1789,56	1795,96	3,20	0,64
520	55,16	47,82	102,98	1900,03	1906,95	3,46	0,68
540	47,82	40,92	88,74	1995,63	2003,01	3,69	0,71
560	40,92	34,18	75,11	2076,61	2084,37	3,88	0,73
580	34,18	28,24	62,42	2143,61	2151,71	4,05	0,75
600	28,24	22,94	51,18	2197,65	2206,03	4,19	0,77
620	22,94	18,90	41,84	2240,23	2248,83	4,30	0,78
640	18,90	15,21	34,11	2273,29	2282,07	4,39	0,79
660	15,21	12,29	27,50	2298,49	2307,41	4,46	0,80
680	12,29	9,55	21,83	2316,97	2325,99	4,51	0,81
700	9,55	7,43	16,98	2329,72	2338,80	4,54	0,81
720	7,43	5,92	13,35	2337,58	2346,70	4,56	0,81
740	5,92	4,82	10,74	2341,79	2350,93	4,57	0,81
760	4,82	4,01	8,83	2343,36	2352,52	4,58	0,81
780	4,01	3,44	7,46	2343,04	2352,20	4,58	0,81
800	3,44	3,03	6,48	2341,36	2350,50	4,57	0,81
820	3,03	2,73	5,77	2338,71	2347,83	4,56	0,81
840	2,73	2,52	5,25	2335,36	2344,48	4,56	0,81
860	2,52	2,36	4,87	2331,51	2340,61	4,55	0,81
880	2,36	2,25	4,60	2327,32	2336,38	4,53	0,81

Temps	$Q_{e,i}$	$Q_{e,i+1}$	$Q_{e,i} + Q_{e,i+1}$	$2S_i/\Delta t - Q_{s,i}$	$2S_i/\Delta t + Q_{s,i}$	$Q_{s,i}$	hd
900	2,25	2,16	4,41	2322,89	2331,93	4,52	0,81
920	2,16	2,16	4,32	2318,27	2327,29	4,51	0,81
940	2,16	2,16	4,32	2313,59	2322,59	4,50	0,81
960	2,16	2,16	4,32	2308,95	2317,91	4,48	0,80
980	2,16	0,00	2,16	2304,33	2313,27	4,47	0,80

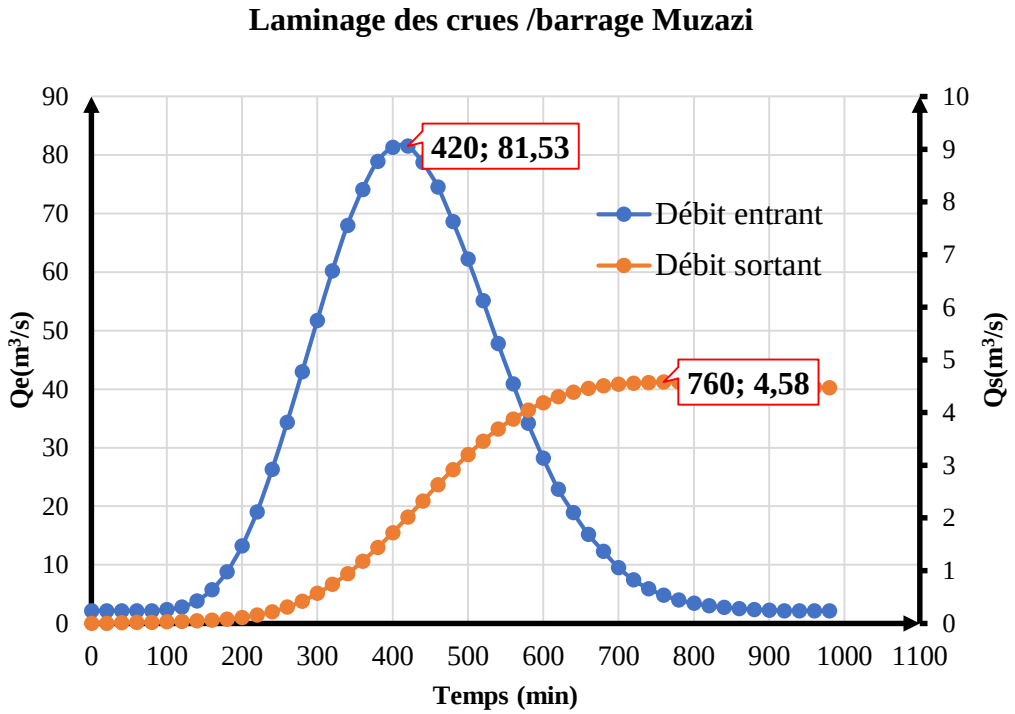


Figure IV-6 : Laminage des crues/barrage Muzazi

Tableau IV-6 : Résultats de calcul du débit sortant /barrage Murago

Temps	$Q_{e,i}$	$Q_{e,i+1}$	$Q_{e,i} + Q_{e,i+1}$	$2S_i/\Delta t - Q_{s,i}$	$2S_i/\Delta t + Q_{s,i}$	$Q_{s,i}$	hd
0	1,72	1,72	3,44			0,00	0,00
20	1,72	1,72	3,44	0,00		0,00	0,00
40	1,72	1,72	3,44	0,00	3,44	0,01	0,00
60	1,72	1,72	3,44	0,00	3,44	0,01	0,00
80	1,72	1,87	3,58	0,00	3,44	0,01	0,00
100	1,87	2,21	4,07	3,56	3,58	0,01	0,01
120	2,21	3,05	5,26	7,60	7,64	0,02	0,02
140	3,05	4,58	7,63	12,79	12,85	0,03	0,03
160	4,58	7,00	11,58	20,35	20,43	0,04	0,03
180	7,00	10,54	17,54	31,81	31,93	0,06	0,05
200	10,54	15,17	25,71	49,15	49,35	0,10	0,06
220	15,17	20,95	36,12	74,56	74,86	0,15	0,08
240	20,95	27,35	48,30	110,26	110,68	0,21	0,10
260	27,35	34,24	61,59	157,94	158,56	0,31	0,14
280	34,24	41,21	75,46	218,67	219,53	0,43	0,17
300	41,21	47,97	89,18	292,97	294,13	0,58	0,21

Temps	**$Q_{e,i}$**	**$Q_{e,i+1}$**	**$Q_{e,i} + Q_{e,i+1}$**	**$2S_i/\Delta t - Q_{s,i}$**	**$2S_i/\Delta t + Q_{s,i}$**	**$Q_{s,i}$**	**hd**
320	47,97	54,14	102,11	380,63	382,15	0,76	0,25
340	54,14	59,03	113,16	480,80	482,74	0,97	0,29
360	59,03	62,85	121,88	591,52	593,96	1,22	0,34
380	62,85	64,75	127,60	710,42	713,40	1,49	0,39
400	64,75	64,92	129,67	834,44	838,02	1,79	0,44
420	64,92	62,70	127,62	959,89	964,11	2,11	0,49
440	62,70	59,38	122,08	1082,65	1087,51	2,43	0,53
460	59,38	54,67	114,05	1199,21	1204,73	2,76	0,58
480	54,67	49,55	104,21	1307,12	1313,26	3,07	0,62
500	49,55	43,92	93,47	1404,61	1411,33	3,36	0,66
520	43,92	38,07	82,00	1490,83	1498,09	3,63	0,70
540	38,07	32,59	70,66	1565,06	1572,82	3,88	0,73
560	32,59	27,22	59,80	1627,56	1635,72	4,08	0,75
580	27,22	22,48	49,70	1678,85	1687,37	4,26	0,78
600	22,48	18,27	40,75	1719,75	1728,55	4,40	0,79
620	18,27	15,05	33,32	1751,48	1760,50	4,51	0,81
640	15,05	12,11	27,16	1775,60	1784,80	4,60	0,82
660	12,11	9,79	21,90	1793,44	1802,76	4,66	0,82
680	9,79	7,60	17,39	1805,92	1815,34	4,71	0,83
700	7,60	5,92	13,52	1813,82	1823,30	4,74	0,83
720	5,92	4,71	10,63	1817,84	1827,34	4,75	0,83
740	4,71	3,84	8,55	1818,97	1828,47	4,75	0,83
760	3,84	3,20	7,03	1818,02	1827,52	4,75	0,83
780	3,20	2,74	5,94	1815,57	1825,05	4,74	0,83
800	2,74	2,42	5,16	1812,05	1821,51	4,73	0,83
820	2,42	2,18	4,59	1807,79	1817,21	4,71	0,83
840	2,18	2,00	4,18	1802,98	1812,38	4,70	0,83
860	2,00	1,88	3,88	1797,80	1807,16	4,68	0,83
880	1,88	1,79	3,67	1792,36	1801,68	4,66	0,82
900	1,79	1,72	3,51	1786,75	1796,03	4,64	0,82
920	1,72	1,72	3,44	1781,02	1790,26	4,62	0,82
940	1,72	1,72	3,44	1775,25	1784,45	4,60	0,82
960	1,72	1,72	3,44	1769,53	1778,69	4,58	0,81
980	1,72	0,00	1,72	1763,85	1772,97	4,56	0,81

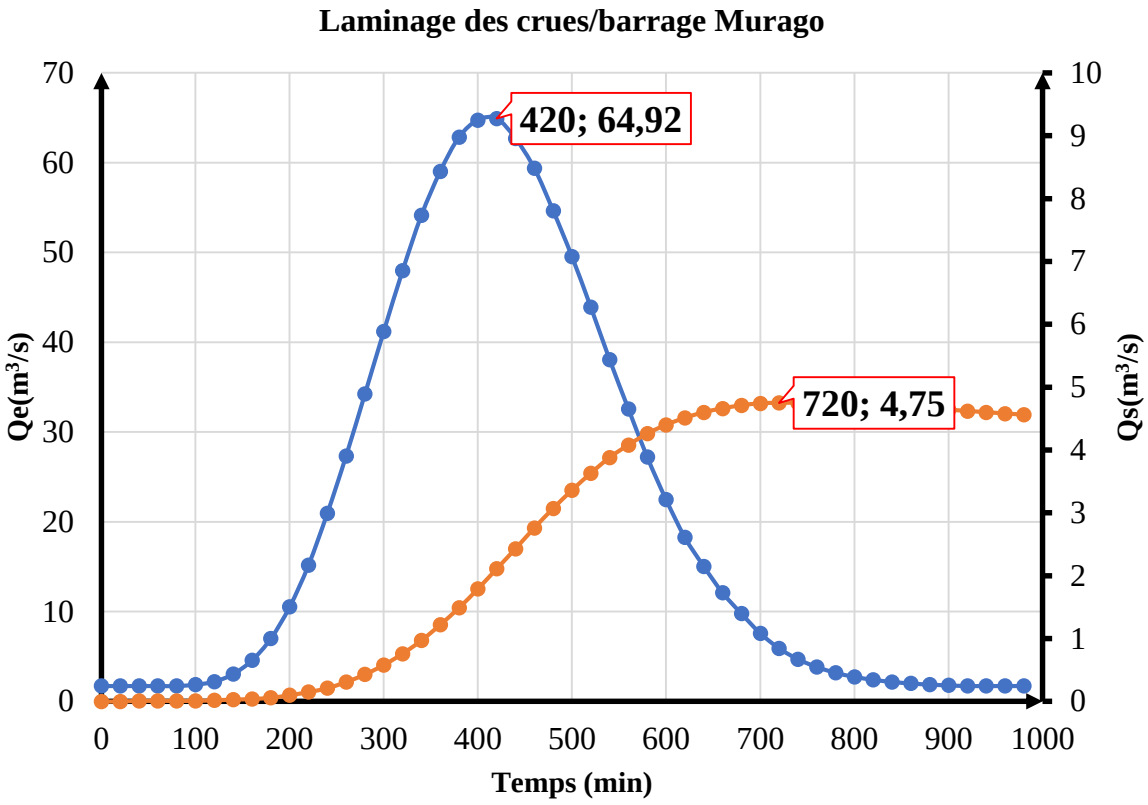


Figure IV-7 : Laminage des crues /barrage Murago

Tableau IV-7 : Résultats de calcul du débit sortant /barrage Gikoma

Temps	$Q_{e,i}$	$Q_{e,i+1}$	$Q_{e,i} + Q_{e,i+1}$	$2S_i/\Delta t - Q_{s,i}$	$2S_i/\Delta t + Q_{s,i}$	$Q_{s,i}$	hd
0	0,51	0,51	1,02	0,00		0,00	0,00
20	0,51	0,51	1,02	0,00		0,00	0,00
40	0,51	0,51	1,02	0,00	1,02	0,01	0,00
60	0,51	0,51	1,02	0,00	1,02	0,01	0,00
80	0,51	0,55	1,06	0,00	1,02	0,01	0,00
100	0,55	0,65	1,21	1,04	1,06	0,01	0,01
120	0,65	0,90	1,56	2,23	2,25	0,01	0,01
140	0,90	1,36	2,26	3,76	3,78	0,01	0,01
160	1,36	2,07	3,43	5,99	6,03	0,02	0,02
180	2,07	3,12	5,19	9,38	9,42	0,02	0,02
200	3,12	4,49	7,61	14,49	14,57	0,04	0,03
220	4,49	6,20	10,70	22,00	22,10	0,05	0,04
240	6,20	8,10	14,30	32,56	32,70	0,07	0,05
260	8,10	10,14	18,24	46,67	46,87	0,10	0,06
280	10,14	12,21	22,35	64,63	64,91	0,14	0,08
300	12,21	14,21	26,41	86,60	86,98	0,19	0,10
320	14,21	16,03	30,24	112,53	113,01	0,24	0,11
340	16,03	17,48	33,52	142,15	142,77	0,31	0,14
360	17,48	18,61	36,10	174,91	175,67	0,38	0,16
380	18,61	19,18	37,79	210,08	211,00	0,46	0,18
400	19,18	19,23	38,40	246,79	247,87	0,54	0,20

Temps	$Q_{e,i}$	$Q_{e,i+1}$	$Q_{e,i} + Q_{e,i+1}$	$2S_i/\Delta t - Q_{s,i}$	$2S_i/\Delta t + Q_{s,i}$	$Q_{s,i}$	**hd**
420	19,23	18,57	37,80	283,96	285,20	0,62	0,21
440	18,57	17,59	36,16	320,34	321,76	0,71	0,24
460	17,59	16,19	33,78	354,91	356,49	0,79	0,25
480	16,19	14,67	30,86	386,97	388,69	0,86	0,27
500	14,67	13,01	27,68	415,97	417,83	0,93	0,28
520	13,01	11,28	24,28	441,68	443,66	0,99	0,29
540	11,28	9,65	20,93	463,86	465,96	1,05	0,31
560	9,65	8,06	17,71	482,61	484,79	1,09	0,31
580	8,06	6,66	14,72	498,06	500,32	1,13	0,32
600	6,66	5,41	12,07	510,46	512,78	1,16	0,33
620	5,41	4,46	9,87	520,15	522,53	1,19	0,33
640	4,46	3,59	8,04	527,62	530,02	1,20	0,33
660	3,59	2,90	6,48	533,22	535,66	1,22	0,34
680	2,90	2,25	5,15	537,25	539,71	1,23	0,34
700	2,25	1,75	4,00	539,94	542,40	1,23	0,34
720	1,75	1,40	3,15	541,46	543,94	1,24	0,34
740	1,40	1,14	2,53	542,13	544,61	1,24	0,34
760	1,14	0,95	2,08	542,18	544,66	1,24	0,34
780	0,95	0,81	1,76	541,78	544,26	1,24	0,34
800	0,81	0,72	1,53	541,06	543,54	1,24	0,34
820	0,72	0,64	1,36	540,13	542,59	1,23	0,34
840	0,64	0,59	1,24	539,03	541,49	1,23	0,34
860	0,59	0,56	1,15	537,81	540,27	1,23	0,34
880	0,56	0,53	1,09	536,50	538,96	1,23	0,34
900	0,53	0,51	1,04	535,14	537,58	1,22	0,34
920	0,51	0,51	1,02	533,74	536,18	1,22	0,34
940	0,51	0,51	1,02	532,32	534,76	1,22	0,34
960	0,51	0,51	1,02	530,92	533,34	1,21	0,34
980	0,51	0,00	0,51	529,52	531,94	1,21	0,34

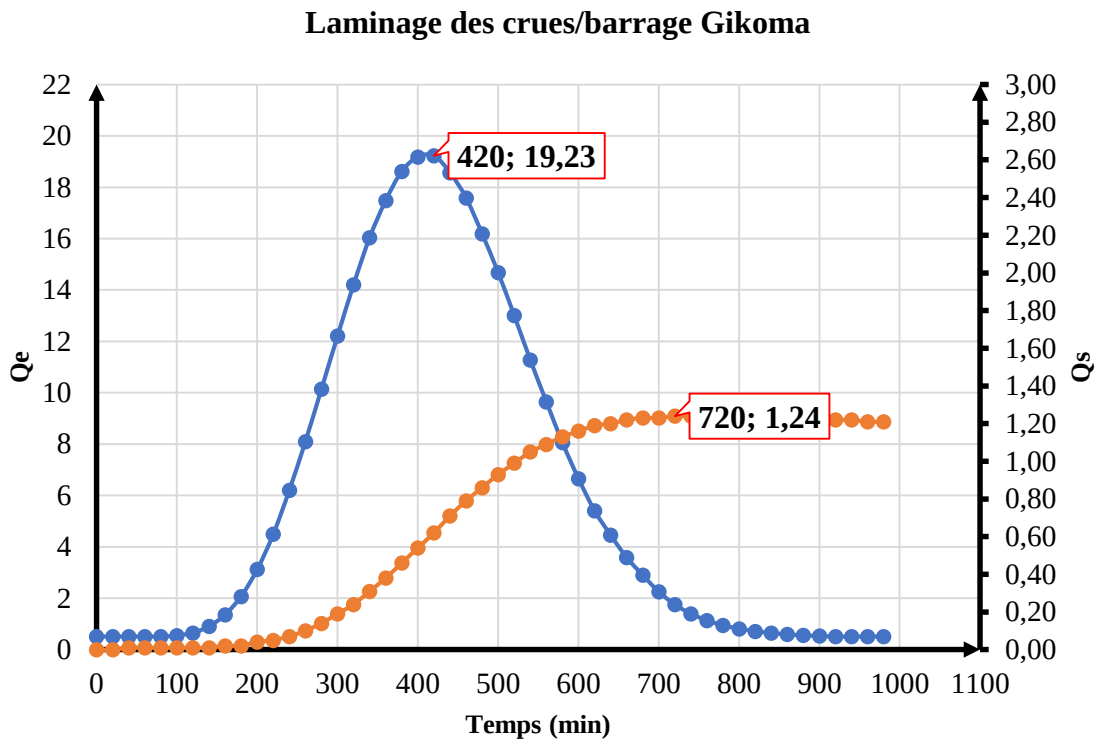


Figure IV-8 : Laminage des crues/ barrage Gikoma

Les résultats de calcul montrent qu'avec la mise en place des barrages sur Muzazi, Murago et Gikoma, on va laminer les débits de pointe comme suit :

Tableau IV-8 : Résultats de laminage des crues pour les barrages (Muzazi , Murago,Gikoma) : T=2ans ; T=5ans ; T=10ans ; T=25ans ; T=50ans ; T=100ans

Période de retour	**Barrage**	**Qe (m^3/s)**	**Qs (m^3/s)**	**Laminage en %**	**Durée (min)**	**Hauteur de Laminage (m)**
T=2ans	Muzazi	16,26	0,82	95%	940	0,26
	Murago	12,94	0,83	94%	960	0,26
	Gikoma	3,83	0,26	93%	840	0,12
Total		**33,04**	**1,91**			
T=5ans	Muzazi	33,02	1,58	95%	980	0,40
	Murago	26,29	1,60	94%	820	0,40
	Gikoma	7,79	0,49	94%	820	0,18
Total		**67,10**	**3,67**			
T=10ans	Muzazi	44,72	2,17	95%	900	0,50
	Murago	35,61	2,22	94%	760	0,50
	Gikoma	10,55	0,65	94%	700	0,22
Total		**90,87**	**5,04**			
T=25ans	Muzazi	59,55	3,03	95%	760	0,62
	Murago	47,42	3,14	93%	760	0,63
	Gikoma	14,04	0,88	94%	720	0,27
Total		**121,02**	**7,05**			

Période de retour	Barrage	Qe (m^3/s)	Qs (m^3/s)	Laminage en %	Durée (min)	Hauteur de Laminage (m)
T=50ans	Muzazi	70,58	3,77	95%	780	0,72
	Murago	56,20	3,90	93%	720	0,73
	Gikoma	16,64	1,06	94%	740	0,31
Total		**143,42**	**8,73**			
T=100ans	Muzazi	81,53	4,58			
	Murago	64,92	4,75	94%	760	0,81
	Gikoma	19,23	1,24	93%	720	0,83
Total		**165,68**	**10,57**	94%	720	0,34

Ces résultats montrent que la mise en place des barrages d'accumulation pour l'irrigation jouera aussi un rôle très important dans le laminage des crues pour les différentes périodes de retour. Ils briseront les débits de pointe à une échelle de plus de 90%.

IV.6. Caractéristiques dimensionnelles des barrages

Pour pouvoir déterminer les caractéristiques dimensionnelles du barrage, nous nous sommes servis du schéma suivant :

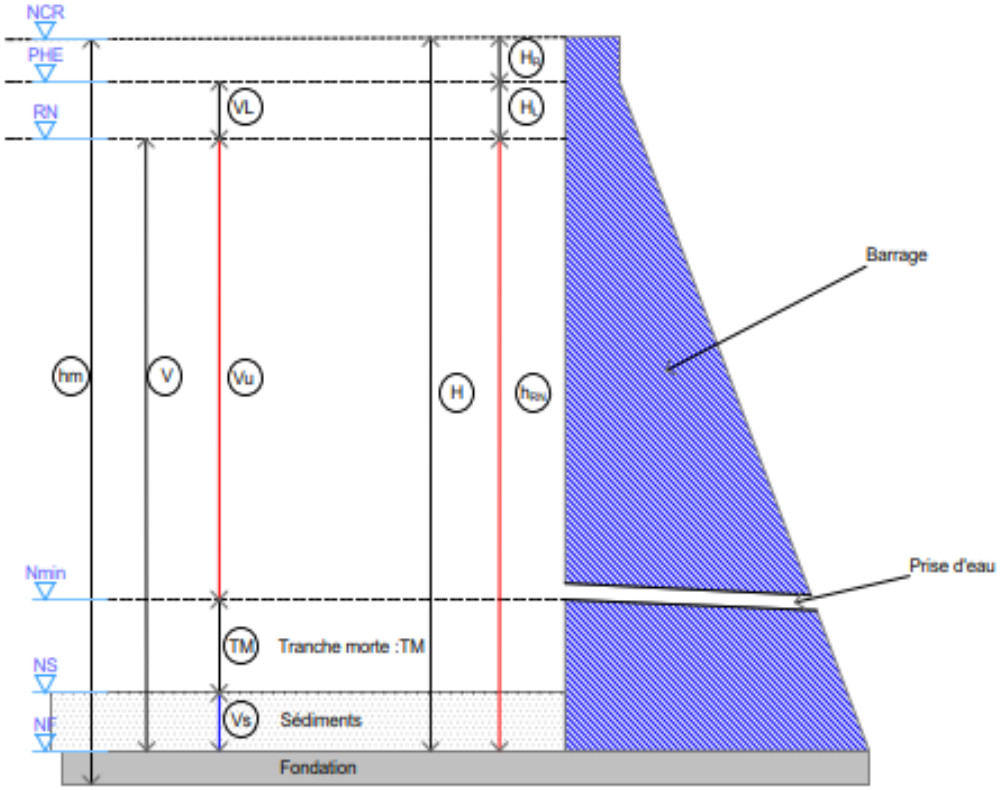


Figure IV-9 : Les différentes hauteurs d'un barrage

Le tableau suivant détaille les termes, définitions et symboles de la figure précédente

Termes	**Définitions**	**Symboles**
Niveau (ou cote) des dépôts solide (m)	Cote correspondante aux dépôts solides dans la retenue	NS
Niveau (ou cote) du lit de l'ouvrage (m)	Cote du point le plus bas du fond du lit du cours d'eau en correspondance avec le parement amont du barrage	NF
Niveau (ou cote) minimal d'exploitation (m)	Cote minimale du niveau de l'eau dans la retenue où l'eau accumulée peut être dérivée par la prise d'eau pour l'utilisation prévue	Nmin
Niveau (ou cote) normal de la retenue (m)	Cote du niveau de l'eau dans la retenue à laquelle commence le déversement dans l'évacuateur de crues.	RN
Niveau (ou cote) des plus hautes eaux (m)	Cote maximale à laquelle peut arriver le niveau de l'eau dans la retenue au cas où se produirait le plus important phénomène de crue prévu	PHE
Niveau (ou cote) de la crête (m)	Cote du plan de la crête du barrage, à l'exclusion des parapets et d'éventuels murs de protection contre le batillage	Ncr
Hauteur de retenue normale (m)	Dénivelée entre le niveau normal de la retenue et celui du lit de l'eau	h_{RN}
Hauteur hors sol (m)	Dénivelée entre le niveau de la crête et celui du lit de l'eau	H
Surélévation de crue (m)	Dénivelée entre le niveau des plus hautes eaux et celui de la retenue normale. Ce sur-remplissage représente la charge maximale exercée sur le déversoir en correspondance de la crue de projet.	H_L
Revanche	Dénivelée entre le niveau de la crête et le niveau des plus hautes eaux	H_R
Hauteur maximale du barrage (m)	Dénivelée existante entre la cote du plan de crête et celle du point le plus bas de la superficie de fondation (à l'exclusion d'éventuelles sous-structures d'étanchéité)	hm
Tranche morte (m^3)	Volume de retenue situé au-dessous du niveau minimal d'exploitation et destiné à l'envasement	Vmin
Volume utile de la retenue (m^3)	Volume d'eau compris entre la cote normale de la retenue et la cote minimale d'exploitation : ce volume comprend la tranche utilisable et celle correspondant aux pertes par évaporation et par infiltration	Vu
Volume de laminage	Volume compris entre la cote des plus hautes eaux et la cote normale de retenue	VL
Volume (ou capacité) totale de retenue (m^3)	Volume total d'eau compris entre la cote normale de la retenue et la cote du lit de l'eau	V

Partant (i) des volumes nécessaires pour satisfaire les besoins en eau des cultures (tableau IV.38) ;(ii) relation entre la hauteur du barrage et le volume retenu au point V.3 ; (iii) volume des apports solides (point V.4) ; (iv) résultats de laminage tableau (V.4), on a trouvé les dimensions suivantes :

Tableau IV-9 : Caractéristiques dimensionnelles des barrages

Barrage	**Hauteur des sédiments (m)**	**Hauteur de la tranche morte (m)**	**Hauteur utile (m)**	**Hauteur des crues (m)**	**Revanche (m)**	**Hauteur du barrage (m)**
Muzazi	1	2,5	21,5	1	1	27
Murago	1	1,6	18,40	1	1	23
Gikoma	0,5	1	10,3	0,7	0,5	13

IV.7. Vérification de la capacité hydraulique du tronçon en aval des barrages

Même si la mise en place des barrages d'accumulation pour l'irrigation a brisé les crues à une échelle très grande. Il reste à vérifier si le tronçon en aval de ces barrages est capable de transiter le débit sortant des barrages jusqu'à l'exécutoire.

La formule adoptée pour déterminer la capacité hydraulique du tronçon en aval des barrages est celle de Manning Strickler qui s'exprime comme suit :

$$Q_c = \frac{1}{n} x S_m x {R_h}^{2/3} x I^{1/2} \qquad \textbf{(IV-2)}$$

Avec :

Qc : débit capable

n :coefficient de rugosité

$S_m = bh + \frac{1}{2} x h^2 x (m_1 + m_2)$: Section mouillée

$\chi = b + hx(\sqrt{1 + {m_1}^2} + \sqrt{1 + {m_2}^2}$: Périmètre mouillé

$R_h = \frac{S_m}{\chi}$: Rayon hydraulique

$\mathrm{v} = \frac{1}{n} x {R_h}^{2/3} x I^{1/2}$

Le débit capable dans différentes sections du tronçon en aval des barrages a été calculée sur la base des coupes transversales dans ces sections, en adoptant une forme régulière qui s'approche au mieux à la configuration du lit de la rivière.

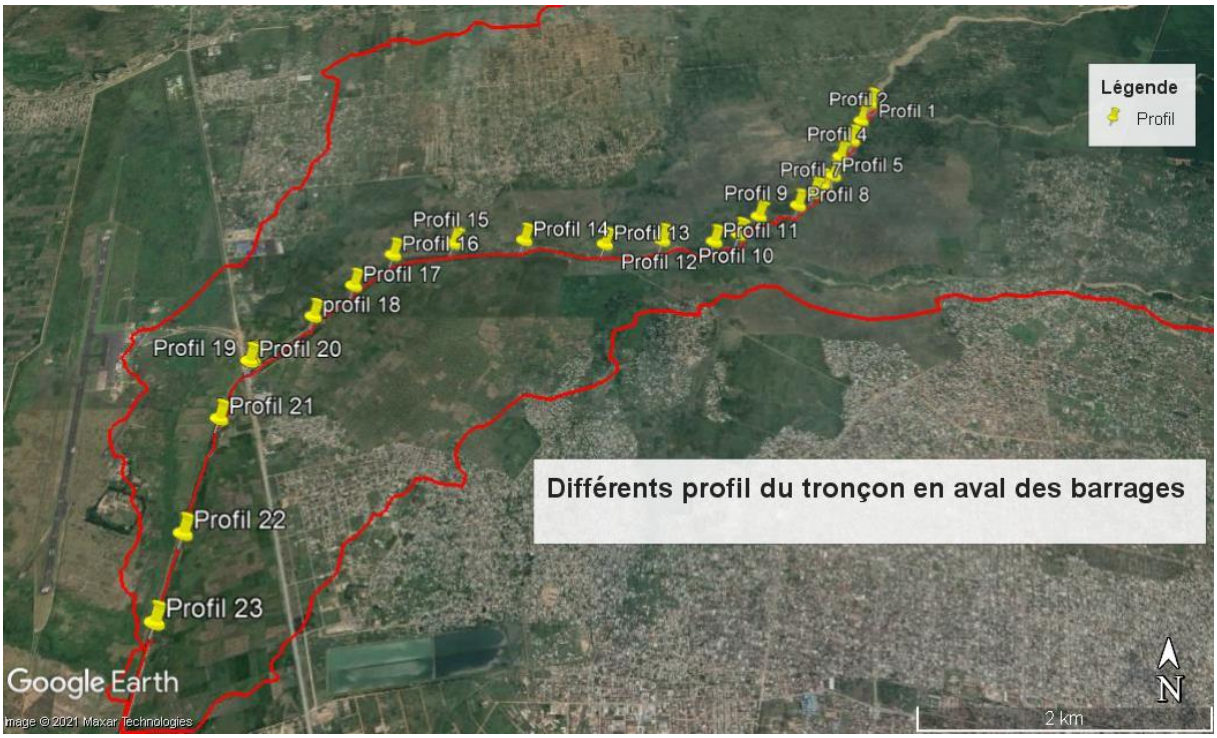


Figure IV-10 : Différentes sections testées en aval des barrages

Par exemple : voici les détails du profil 19

Suivant les levés effectués sur Google Earth, on trouve des données suivant du profil 19 :

Distance	Altitude
0	784
5	784
10	782
15	782
20	782
25	782
30	782
35	784

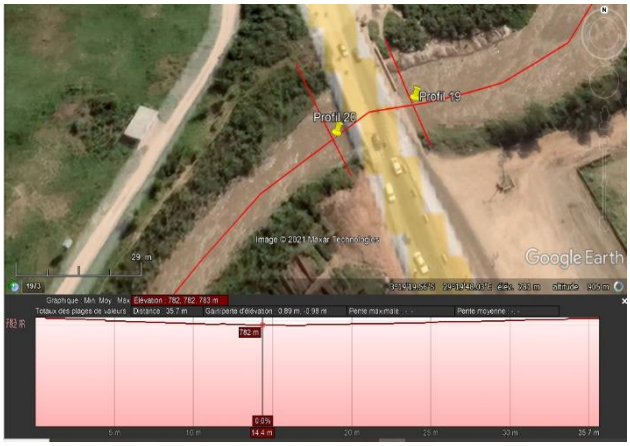


Figure IV-11 : Coupe transversale du profil 19

D'après la coupe transversale du profil 19, on trouve h=2m ; b=20m ; m_1=2,5 ; m_2=2,5 $\Rightarrow$Qc=83,69m^3/s

Tableau IV-10 : Résultats de calcul des débits capable du tronçon en aval des barrages

	h(m)	b(m)	n	I	m_1	m_2	$S_m(m^2)$	χ(m)	Rh (m)	v(m/s)	Q (m^3/s)
Profil 1	4	24,70	0,15	0,033	3,77	6,15	178,18	65,23	2,73	2,37	421,64
Profil 2	1	50,00	0,15	0,033	8,33	4,00	56,17	62,52	0,90	1,13	63,33
Profil 3	1	14,94	0,15	0,033	5,06	5,00	19,97	25,20	0,79	1,04	20,71
Profil 4	1	10,00	0,15	0,033	5,00	10,00	17,50	25,15	0,70	0,95	16,64
Profil 5	1	7,50	0,15	0,033	7,50	7,50	15,00	22,63	0,66	0,92	13,81
Profil 6	1	20,00	0,15	0,033	5,00	5,00	25,00	30,20	0,83	1,07	26,69
Profil 7	1	10,00	0,15	0,033	5,00	5,00	15,00	20,20	0,74	0,99	14,90
Profil 8	1	20,00	0,15	0,033	10,00	10,00	30,00	40,10	0,75	1,00	29,94
Profil 9	1	15,00	0,15	0,033	15,00	9,80	27,40	39,88	0,69	0,94	25,84
Profil 10	2	15,00	0,15	0,033	7,50	6,05	57,10	42,40	1,35	1,48	84,33
Profil 11	1	40,20	0,15	0,033	6,40	9,80	48,30	56,53	0,85	1,09	52,67
Profil 12	2	42,30	0,15	0,033	4,45	13,00	119,50	77,50	1,54	1,62	193,16
Profil 13	1	5,00	0,15	0,033	7,50	7,50	12,50	20,13	0,62	0,88	11,02
Profil 14	2	22,50	0,15	0,033	7,50	7,50	75,00	52,77	1,42	1,53	114,82
Profil 15	1	30,00	0,15	0,033	10,00	10,00	40,00	50,10	0,80	1,04	41,69
Profil 16	1	15,00	0,15	0,033	7,50	7,50	22,50	30,13	0,75	1,00	22,43
Profil 17	1	15,00	0,15	0,033	7,50	7,50	22,50	30,13	0,75	1,00	22,43
Profil 18	1	40,00	0,15	0,033	10,00	10,00	50,00	60,10	0,83	1,07	53,56
Profil 19	2	20,00	0,15	0,033	2,50	2,50	50,00	30,77	1,62	1,67	83,69
Profil 20	2	20,00	0,15	0,033	2,50	2,50	50,00	30,77	1,62	1,67	83,69
Profil 21	1	25,00	0,15	0,033	5,00	5,00	30,00	35,20	0,85	1,09	32,66
Profil 22	1	15,00	0,15	0,033	5,00	5,00	20,00	25,20	0,79	1,04	20,76
Profil 23	1	30,00	0,15	0,033	7,50	7,50	37,50	45,13	0,83	1,07	40,14

Les résultats montrent que le tronçon en aval des barrages est capable de transporter la somme des débits sortant des barrages selon les différentes périodes de retour T=2ans ; T=5ans ; T=10ans ; T=25ans ; T=50ans ;T=100ans.

IV.8. Pratique de la pisciculture dans les barrages d'irrigation

Notre zone d'étude se trouve dans la plaine de l'Imbo où les poissons sont plus consommés par les habitants. Donc afin de valoriser encore les retenus proposés, nous allons semer les alevins des tilapias dans les bassins.

C'est un grand avantage d'utiliser les eaux stockées dans les barrages pour les travaux d'irrigation et pour l'élevage des poissons.

Parmi les systèmes de production cités dans le chapitre I, on a choisi les systèmes de production piscicole semi-intensifs qui donne une production d'environ 1tonne/ha.

Les semences sont estimées à 20 000 à 30 000 alevins /ha.

Une analyse superficielle des revenus est effectuée et a donné le résultat suivant :

Barrage	Surface inondée (ha)	Production (t/ha)	Coût (FBU) /kg de tilapias	Coût total (FBU)
Muzazi	68,39	1	8000	547 120 000
Murago	51,28	1	8000	410 240 000
Gikoma	39,96	1	8000	319 680 000
Total général				**1 277 040 000**

IV.9. Fonctionnement du modèle de gestion

Notre modèle de gestion consiste à accumuler les crues dans les barrages afin de faire l'irrigation et l'élevage des poissons dans le but de la diminution considérable de l'inondation en aval. Schématiquement le modèle de gestion peut être représenté comme suit :

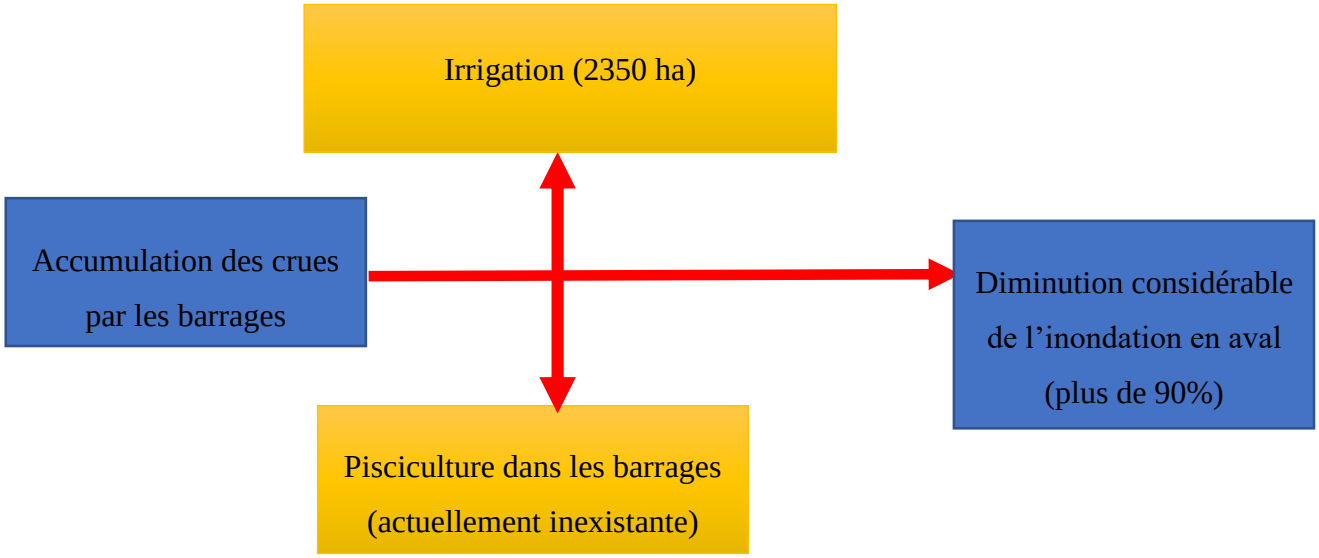


Figure IV-12 : Fonctionnement du modèle proposé

L'estimation des crues a été faite avec la méthode dite hydrogramme unitaire utilisant les caractéristiques du bassin versant et les précipitations caractéristiques du bassin versant. Par manque de données hydrologiques complètes de plusieurs années de la rivière Mutimbuzi, l'unique méthode a été utilisée pour estimer le débit des crues. Les données hydrologiques disponibles nous ont permis d'en déduire les débits moyens mensuels utilisés comme les apports des différentes rivières pendant l'année sèche.

Sur base des apports des rivières et les besoins en eau d'irrigation estimés avec le logiciel Aquacrop, le système de stockage des apports disponibles a été adopté afin de satisfaire les besoins en eau d'irrigation durant toute la période des cultures.

Suivants les apports et les besoins en eau d'irrigation, les barrages d'accumulation proposés ont des capacités suivantes :

- Sur Muzazi : un barrage d'accumulation de 12 835 986,60m^3 ;
- Sur Murago : un barrage d'accumulation de 9 885 620,21m^3 ;
- Sur Gikoma : un barrage d'accumulation de 3 305 932,36m^3.

Avant la mise en place de notre modèle, pour une période de retour de 100ans, les crues étaient estimées à 165,3m^3/s. Par contre les résultats montrent que la mise en place de ces barrages laminera les crues jusqu' à 10,57m^3/s soit une diminution de plus de 90%. Suivant les différentes périodes de retour allant jusqu'à 100ans, les calculs de vérification de la capacité hydraulique du tronçon en aval des barrages montrent que ce tronçon sera capable de transporter le débit sortant pendant les crues.

CHAPITRE V : CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

V.1. Conclusion

L'objectif de ce travail était d'évaluer les inondations causées par la rivière Mutimbuzi et ses affluents afin de proposer des mesures résilientes et durables.

Le travail s'est basé sur la modélisation de la transformation pluie -débit avec la méthode dite méthode de l'hydrogramme unitaire pour calculer les apports hydrologiques. Les défis actuels d'irrigation dans la zone d'étude nous ont poussé à faire le calculer des besoins en eau d'irrigation afin d'estimer la capacité de rétention des barrages. Quant au laminage des crue la modélisation hydraulique a été utilisé.

L'étude montre que dans la saison pluvieuse, la rivière Mutimbuzi et ses affluents sont remplis de courant d'eau fort mais quand il ne pleut pas ils sont presque secs.

Ainsi les apports des rivières Muzazi et Gikoma ne peuvent pas irriguer tous les périmètres qui sont à ses dispositions durant toute la période des cultures d'où les conflits d'eau et les problèmes de gestion de ces eaux qui règnent au niveau de la SRDI.

Les résultats obtenus de cette étude nous ont permis de proposer les solutions suivantes :

- Mise en place des barrages d'accumulation sur les affluents de la rivière Mutimbuzi qui serviront de stocker l'eau pour irrigation pendant la saison pluvieuse et l'utiliser pendant la saison sèche ;
- Varier les saisons culturales et les cultures. Soit cultiver deux fois l'année (riz-ziz), soit 3 fois l'année (riz-riz-polyculture), soit 3fois l'année (riz-[riz-polyculture] - polyculture ;
- Les inondations ont été laminées à plus de 90% ce qui facilitera la diminution du transport solide (affouillements des lits et des berges) ;
- Pratiquer la pisciculture dans les barrages d'accumulation pour encore valoriser l'eau retenue.

V.2. Recommandations

En guide de recommandations, nous suggérons aux personnes physiques ou morales ayant un intérêt à ce sujet ce qui suit :

- ✓ **Au gouvernement**

- De financer le projet afin qu'il soit exécuté ;
- De mettre des dispositifs de contrôle de niveau d'eau dans les rivières traversant la plaine de l'Imbo afin de disponibiliser les données fiables pour les études futures via son institution IGEBU ;
- De changer le calendrier des cultures dans la plaine de l'Imbo ;
- De sensibiliser les gens qui habitent dans les montagnes qui surplombent la plaine de l'Imbo d'appliquer dans leurs techniques culturales, la méthode anti-érosive comme la plantation des haies le long des courbes de niveaux ou autres plantes pouvant servir au ralentissement dynamique des crues qui causent les inondations dans la plaine ;
- De bien organiser les travaux de curage de la rivière Mutimbuzi ou le nettoyage des barrages mise en place afin d'assurer le bon fonctionnement via son institution SRDI ;
- Promouvoir la pisciculture dans les barrages d'accumulation qui est une activité génératrice de revenus.

- ✓ **A la population**

- De changer le comportement surtout au niveau du choix des espaces de construction qui sont parfois des zones à risque pour les inondations ;
- De respecter l'endiguement déjà en mis en place sur la rivière Mutimbuzi pour ne pas provoquer les inondations.

Bibliographie

- [En ligne] https://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre2/main.html.(visité le 25/Juillet/2021)
- [En ligne] https://wikimemoires.net/2019/12/la-pisciculture-origine-diffusion-et-sortes-detangs/).(Visité le 15/11/2021)
- [En ligne] http://www.abctaxa.be/burundi/biodiversity/presentation-du-burundi/aspects-physiques-du-burundi/geologie-et-pedologie-du-burundi/.(visité le 07/10/2021)
- **Ahmed Skhiri.** *Les bases de l'irrigation (Calcul des besoins en eau).*
- **COYNE, BELLIER. 2017.** *Aménagement du barrage du Lac Garrigues.* Montpellier , 2017.
- **Dègla Herve KOUMASSI, A.Eric TCHIBOZO et Expedit VISSIN, Christophe HOUSSOU. 2014.** Analyse fréquentielle des évènements hydro-pluviométriques extrêmes dans le bassin de la Sota au Bénin. 2014.
- **DHV ingénieurs conseils.** *Etude de factibilité de l'Imbo centre. L'irrigation de l'Imbo par les eaux de la Kagunuzi.Ministère du Plan.République du Burundi.* 1979 .
- **FAO. 2005.** *L'irrigation en Afrique en chiffres-Enquête AQUASTAT.* Rome , 2005.
- **GISHINGE, Kasavubu Médard. Mars,2006.** *Analyse contextuelle en matière de gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) au Burundi.* Bujumbura , Mars,2006.
- **HAKIZA, Gaston. 2002.** *Potentialités aquifères de la Plaine de la Rusizi.* Université de Liège , 2002.
- **Marc More II at all, Bernard Thébé, Yann L'Hôte. 1999.** *Acquisition et constitution d'une information hydrologique de base.* Bucarest : H*G*A, 1999. p. 10.
- **Ministère de l'Eau, de l'Environnement, de l'Aménagement du Territoire et de l'Urbanisme. 2010.** *Deuxième Communication Nationale sur les Changements Climatiques "DCNCC".* Bujumbura , 2010.

- **MUHIGIRWA. 2011.** *L'approche de prévention et de gestion des risques naturels au burundi et le droit international de l'environnement.* Institut des Nations Unies pour la Formation et la Recherche, 2011.

- **Musy, André et Higy, Christophe. 1998.** *Hydrologie appliqquée.* Bucarest : H*G*A, 1998. p. 121.

- **NDIKUBWAYO , Ernest. 2019.** *Contribution de la télédetection et des Systèmes d'Information Géographique (SIG) dans l'étude de la dynamique spatio-temporelle de l'environnement urbain et periurbain de la partie Nord de la Mairie de Bujumbura, Burundi.* Liège : Université Catholique de Louvain (UCL), 2019.

- **NEPAD&PDDAA. Mars 2006.** Aménagement des terres et intensifications des cultures dans les marais et la plaine de l'Imbo. Bujumbura , Mars 2006. Vol. IV de V.

- **NIBIGIRA, Léonidas. 2018.** *Etude des risques naturels liés aux interactions entre les mouvements de masse et le réseau hydrographique dans la région des lacs Kivu et Tanganyika.* Liège : Université de Liège, 2018.

- **OLIVEROS, Carlos. décembre1996.** *Transport solides :modèles et conditions d'applications en région PACA.Rapport BRGM R39474.* décembre1996.

- **Organisation, Météorologique Mondiale.** *Guides des pratiques hydrologiques :Acquisition et traitement des données , analyses , prévision et autres application.* Génève .

- **PRASAB), Le programme de réhabilitation du secteur agricole au BURUNDI (. 1999.** E856_Volume 2 (ANNEXE 1 PLAN DE GESTION ENVIRONNEMENTALE (PGŒ). 1999.

- **TR-55, Agriculture United States Departement of. June 1986.** *Urban Hydrology for small watersheds.* June 1986.

- **Ven Te Chow, David R.Maidment et W.Mays, Larry.** *Applied hydrology.*

Annexes

Annexe 1 : Précipitations moyennes décadaires de la Station Aéroport de Bujumbura, période de 1991à 2020

Mois	Janvier			Février			Mars			Avril			Mai			Juin		
Décades	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
1991	26,1	5,5	14,0	34,0	56,3	37,7	49,8	34,5	47,4	24,3	15,3	54,3	17,9	17,0	36,7	0,3	5,2	0,0
1992	17,7	7,6	39,5	35,0	39,7	11,2	21,0	40,8	34,7	24,7	14,7	13,0	73,1	28,4	7,3	0,0	0,3	7,4
1993	23,1	51,7	8,4	82,4	51,3	0,6	55,3	14,1	46,7	18,5	22,9	23,1	49,3	8,6	1,1	0,5	0,0	0,0
1994	109,4	4,1	43,3	-	6,1	5,4	7,6	23,7	27,9	16,9	48,3	43,9	27,5	2,8	5,5	0,0	0,0	0,6
1995	13,2	10,1	6,1	41,3	46,1	53,1	0,3	10,7	9,2	14,0	36,6	54,2	4,6	34,2	12,6	8,2	1,5	0,0
1996	39,9	0,0	76,6	15,4	14,2	13,2	86,2	53,4	38,9	29,7	20,1	31,5	1,1	3,0	3,5	18,5	1,6	0,3
1997	11,5	0,3	7,6	3,3	14,1	1,2	0,0	0,0	0,0	33,9	14,0	42,6	19,1	12,5	0,0	0,0	0,0	0,0
1998	13,3	72,2	20,2	45,2	44,3	25,4	109,1	39,2	69,1	7,3	70,5	1,0	33,3	28,9	31,4	0,0	19,9	0,0
1999	21,9	30,2	13,7	2,8	8,4	2,7	90,3	15,0	41,8	34,8	57,7	0,0	23,8	1,5	0,0	0,0	0,3	0,0
2000	54,8	16,4	31,9	8,4	12,1	16,5	74,1	14,8	60,5	21,8	16,2	4,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2001	33,2	50,9	29,0	47,7	23,2	6,3	38,0	41,3	20,6	71,3	2,0	24,6	9,3	0,0	0,0	49,8	0,0	0,0
2002	26,9	50,1	58,4	35,0	87,1	0,0	35,1	41,8	47,5	33,3	27,3	18,9	32,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2003	31,7	0,0	14,8	3,3	23,5	34,1	24,5	26,8	49,5	36,7	27,1	4,3	5,0	13,3	6,7	1,9	0,0	0,0
2004	29,1	19,9	54,2	5,0	6,5	11,6	57,6	15,7	89,5	27,8	19,2	46,7	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2005	98,7	34,5	62,0	52,5	8,5	0,0	20,9	112,9	12,1	53,0	0,0	17,2	87,3	0,0	43,3	1,1	0,0	0,0
2006	31,3	45,6	10,1	3,9	74,6	42,5	11,4	64,9	34,8	69,6	24,9	16,7	49,8	38,8	0,3	0,6	1,9	0,0
2007	31,2	101,0	10,5	43,4	31,1	7,2	28,1	50,1	8,3	13,3	103,0	33,6	6,4	15,8	0,0	10,2	0,5	0,0
2008	3,2	28,5	67,3	82,4	55,5	28,8	36,6	19,7	15,1	24,2	25,2	19,8	0,0	3,7	19,5	89,2	0,0	0,0
2009	60,8	25,2	39,5	97,2	36,1	15,5	66,4	19,5	98,9	19,5	104,1	9,7	6,1	63,9	16,8	1,6	0,0	0,0
2010	128,1	57,8	24,5	16,6	55,9	51,5	47,0	22,0	86,8	22,3	28,9	12,5	25,5	6,5	1,8	4,4	0,0	0,0
2011	50,7	11,2	13,7	23,6	56,3	8,5	31,6	80,2	61,5	64,6	22,7	29,6	58,6	2,6	3,1	0,0	4,0	29,3
2012	35,5	30,8	2,1	9,7	57,5	29,0	6,6	32,8	4,2	44,0	44,8	15,3	46,1	6,4	1,9	0,0	0,0	46,8
2013	24,3	9,6	57,7	10,5	52,8	2,7	32,8	19,3	33,8	22,8	83,7	6,9	25,6	6,9	5,3	0,0	0,0	0,0
2014	45,0	52,2	15,9	122,4	2,2	35,8	31,9	34,1	14,6	15,4	29,6	10,6	5,5	0,2	0,0	13,8	4,7	0,0
2015	28,1	12,0	36,1	22,9	60,7	52,8	15,1	39,0	0,6	13,2	67,5	19,7	21,9	21,1	0,0	0,1	2,8	0,0
2016	11,5	43,1	59,1	40,7	35,3	34,5	7,8	1,9	21,7	59,2	18,6	1,0	3,8	10,3	13,4	0,0	0,0	0,0
2017	2,3	0,2	35,2	43,0	63,1	17,0	40,2	59,4	20,3	41,9	6,1	6,0	26,1	8,2	0,0	0,0	0,0	0,0
2018	15,0	56,1	14,6	46,3	22,1	52,2	34,2	36,9	55,6	94,3	44,9	99,8	27,5	62,7	1,0	0,0	0,0	3,0
2019	12,3	65,1	13,6	20,3	49,0	39,0	34,8	35,1	30,3	36,3	41,4	30,6	1,0	12,1	25,4	0,0	0,0	9,9
2020	65,2	22,3	32,2	69,2	23,4	10,6	56,4	13,7	26,2	40,1	25,3	66,9	11,3	2,0	0,0	0,2	13,8	0,0
Mois	Juillet			Août			Septembre			Octobre			Novembre			Décembre		
Décades	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
1991	8,0	0,0	0,0	3,6	0,0	0,0	11,9	0,3	1,3	42,1	48,5	20,1	24,9	41,5	13,4	18,3	76,0	16,7
1992	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9,0	5,1	1,6	14,6	14,8	3,6	15,4	50,4	19,0	54,4	6,6	12,6
1993	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,2	8,2	0,0	33,0	20,8	7,1	20,5	33,3	2,5	35,3	24,7	27,0	5,0
1994	0,0	0,0	0,0	0,0	2,5	7,5	0,0	5,7	0,0	23,7	8,1	32,8	11,2	40,7	48,5	23,3	30,3	50,8
1995	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,8	25,3	12,0	29,2	17,9	17,6	19,9	0,0	0,0	0,0
1996	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,2	24,8	14,3	0,0	68,2	30,9	5,9	14,5	12,4	24,7	32,1	34,5	10,4
1997	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,5	1,9	0,0	15,5	55,6	20,7	7,5	3,3	0,0	-	-	-
1998	0,0	3,8	0,0	0,0	0,0	2,0	0,0	13,6	13,7	9,5	2,1	29,5	3,8	19,0	8,4	11,7	31,1	15,0
1999	4,5	0,0	0,0	10,8	0,7	18,8	0,0	29,4	30,7	20,2	27,1	0,9	44,2	52,4	31,7	28,5	32,4	98,7
2000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	2,0	24,5	5,3	10,4	22,2	133,3	48,3	14,3	37,7	110,4
2001	0,0	0,0	7,6	0,0	0,0	0,0	0,0	24,5	37,8	30,2	3,1	34,3	27,2	50,9	4,8	24,6	1,0	49,0
2002	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	0,0	2,8	40,5	13,8	20,6	25,8	16,2	15,1	20,2	26,3	86,8
2003	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	2,5	34,2	13,2	7,2	0,3	19,7	58,4	18,1	36,5	13,4	14,3	15,8	8,2
2004	0,0	0,0	1,5	0,2	1,5	0,0	54,8	0,0	18,8	8,7	19,2	9,2	9,8	11,7	23,9	53,8	70,5	90,4
2005	0,0	0,0	0,0	0,0	4,8	0,0	0,0	0,2	4,0	7,4	1,9	24,2	32,2	32,3	51,6	24,8	4,9	25,3
2006	0,0	0,0	0,9	31,8	0,0	6,3	0,0	23,7	8,6	7,0	5,4	50,6	64,9	44,0	48,2	43,8	35,7	36,5
2007	52,3	0,0	0,0	0,2	6,7	0,0	26,3	3,6	0,0	50,0	8,7	54,1	21,7	33,0	8,7	29,2	23,9	41,5
2008	6,9	0,0	8,2	1,6	0,0	2,0	0,0	23,3	8,6	48,3	21,4	0,0	28,0	26,3	11,9	8,7	10,3	18,2
2009	0,0	0,0	0,0	0,0	3,2	0,3	0,0	3,6	1,4	40,3	22,2	5,1	49,1	45,6	26,5	44,0	1,9	70,5
2010	0,0	0,0	3,7	0,0	0,0	0,0	2,4	37,7	1,1	1,5	15,8	33,6	23,5	52,5	14,8	18,5	18,1	42,4
2011	0,0	0,0	23,6	0,0	0,3	4,3	1,2	22,8	62,1	6,9	33,9	26,7	25,4	30,7	52,8	94,0	92,2	8,6
2012	0,0	0,0	0,0	3,0	0,0	26,5	18,6	13,0	2,0	72,1	33,5	67,1	41,3	2,5	14,3	127,3	64,6	52,7
2013	0,0	0,0	0,0	13,5	0,0	0,0	27,3	36,7	15,4	1,2	4,7	6,5	36,2	10,6	12,7	38,1	57,1	28,0
2014	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	22,5	-	-	-	26,3	37,8	12,3	0,8	32,1	12,3	103,6	50,4	42,3
2015	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,4	5,6	5,7	11,8	26,7	26,0	66,2	29,2	50,9	17,4	52,3	38,0	28,3
2016	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	2,5	17,9	3,6	0,0	1,0	16,2	12,7	24,7	7,0	2,0	13,9
2017	0,0	0,0	0,0	0,0	21,0	0,0	5,7	18,2	1,5	7,5	12,2	8,4	0,0	19,0	6,0	8,4	32,5	9,5
2018	0,0	0,0	21,6	12,0	0,0	4,8	1,8	2,5	0,0	15,6	19,7	6,8	19,9	11,5	81,0	30,5	12,8	56,7
2019	4,3	0,0	0,8	6,2	0,0	0,8	31,8	30,1	9,7	33,6	55,9	44,0	14,9	44,7	64,6	29,9	50,3	97,7
2020	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	22,1	5,0	0,0	34,9	3,2	9,9	8,6	71,4	54,7	30,5	52,6	60,5	78,1

Annexe 2 : Détails de l'hydrogramme des crues pour une période de retour de 5ans et 50ans

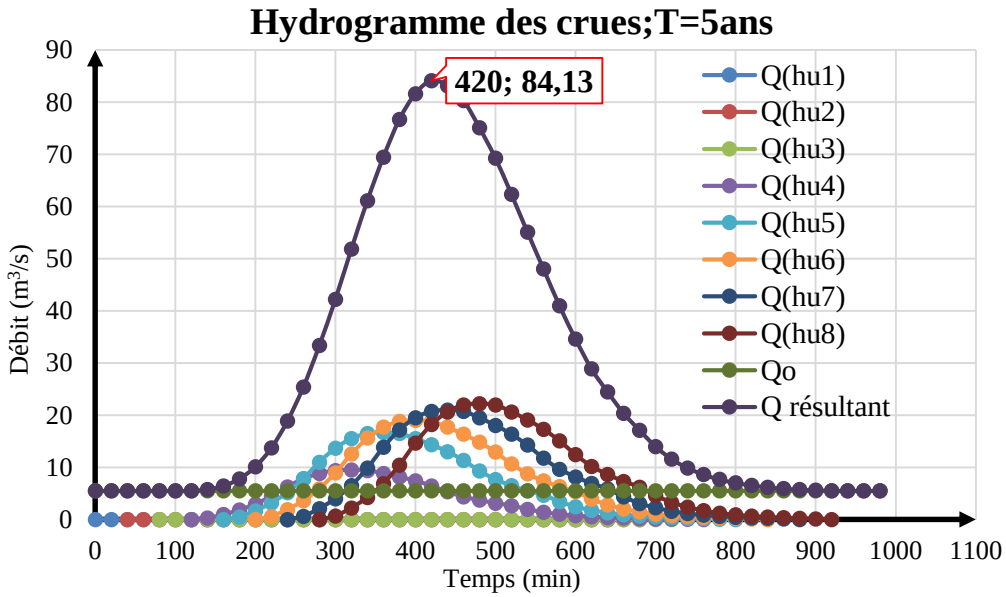
Répartition de la pluie nette/période de retour de 5ans

hu1	hu2	hu3	hu4	hu5	hu6	hu7	hu8	Pluie nette totale
0,00	0,00	0,001	0,55	0,97	1,10	1,21	1,28	5,12

Résultats de calcul de l'hydrogramme de crues ; T=5ans

Q(m3//s)	T(min)	Q(hu1)	Q(hu2)	Q(hu3)	Q(hu4)	Q(hu5)	Q(hu6)	Q(hu7)	Q(hu8)	Qo	Q résultant
0,00	0	0								5,5	5,50
0,52	20	0								5,5	5,50
1,73	40	0	0							5,5	5,50
3,28	60	0	0							5,5	5,50
5,35	80	0	0	0,00						5,5	5,50
8,12	100	0	0	0,00						5,5	5,50
11,40	120	0	0	0,00	0,00					5,5	5,50
14,16	140	0	0	0,00	0,29					5,5	5,79
16,06	160	0	0	0,01	0,95	0,00				5,5	6,46
17,10	180	0	0	0,01	1,81	0,50				5,5	7,82
17,27	200	0	0	0,01	2,95	1,67	0,00			5,5	10,13
17,10	220	0	0	0,02	4,47	3,17	0,57			5,5	13,72
16,06	240	0	0	0,02	6,27	5,17	1,90	0,00		5,5	18,87
14,85	260	0	0	0,02	7,79	7,84	3,62	0,63		5,5	25,40
13,47	280	0	0	0,02	8,84	11,01	5,90	2,10	0,00	5,5	33,37
11,74	300	0	0	0,02	9,41	13,68	8,95	3,99	0,67	5,5	42,21
9,67	320	0	0	0,02	9,50	15,51	12,57	6,50	2,22	5,5	51,82
7,95	340	0	0	0,02	9,41	16,51	15,62	9,86	4,22	5,5	61,13
6,74	360	0	0	0,02	8,84	16,68	17,71	13,84	6,88	5,5	69,47
5,70	380	0	0	0,01	8,17	16,51	18,85	17,20	10,43	5,5	76,68
4,84	400	0	0	0,01	7,41	15,51	19,04	19,51	14,64	5,5	81,63
3,58	420	0	0	0,01	6,46	14,34	18,85	20,76	18,19	5,5	84,13
2,54	440	0	0	0,01	5,32	13,01	17,71	20,97	20,64	5,5	83,16
1,85	460	0	0	0,01	4,37	11,34	16,38	20,76	21,97	5,5	80,33
1,33	480	0	0	0,01	3,71	9,34	14,85	19,51	22,19	5,5	75,10
0,95	500	0	0	0,00	3,14	7,67	12,95	18,04	21,97	5,5	69,27
0,69	520	0	0	0,00	2,66	6,50	10,66	16,36	20,64	5,5	62,33
0,50	540	0	0	0,00	1,97	5,50	8,76	14,26	19,08	5,5	55,08
0,36	560	0	0	0,00	1,40	4,67	7,43	11,75	17,31	5,5	48,05
0,26	580	0	0	0,00	1,02	3,45	6,28	9,65	15,09	5,5	40,99
0,19	600	0	0	0,00	0,73	2,45	5,33	8,18	12,43	5,5	34,62
0,09	620	0	0	0,00	0,52	1,78	3,94	6,92	10,21	5,5	28,88
0,00	640	0	0	0,00	0,38	1,28	2,80	5,87	8,65	5,5	24,49
	660		0	0,00	0,28	0,92	2,04	4,34	7,32	5,5	20,39
	680		0	0,00	0,20	0,67	1,47	3,08	6,21	5,5	17,13
	700			0,00	0,14	0,48	1,05	2,24	4,59	5,5	14,01
	720			0,00	0,10	0,35	0,76	1,61	3,26	5,5	11,59
	740				0,05	0,25	0,55	1,15	2,37	5,5	9,88
	760				0,00	0,18	0,40	0,84	1,71	5,5	8,63

Q(m3//s)	T(min)	Q(hu1)	Q(hu2)	Q(hu3)	Q(hu4)	Q(hu5)	Q(hu6)	Q(hu7)	Q(hu8)	Qo	Q résultant
	780					0,08	0,29	0,61	1,22	5,5	7,70
	800					0,00	0,21	0,44	0,89	5,5	7,04
	820						0,10	0,31	0,64	5,5	6,55
	840						0,00	0,23	0,47	5,5	6,20
	860							0,10	0,33	5,5	5,94
	880							0,00	0,24	5,5	5,74
	900								0,11	5,5	5,61
	920								0,00	5,5	5,50
	940									5,5	5,50
	960									5,5	5,50
	980									5,5	5,50



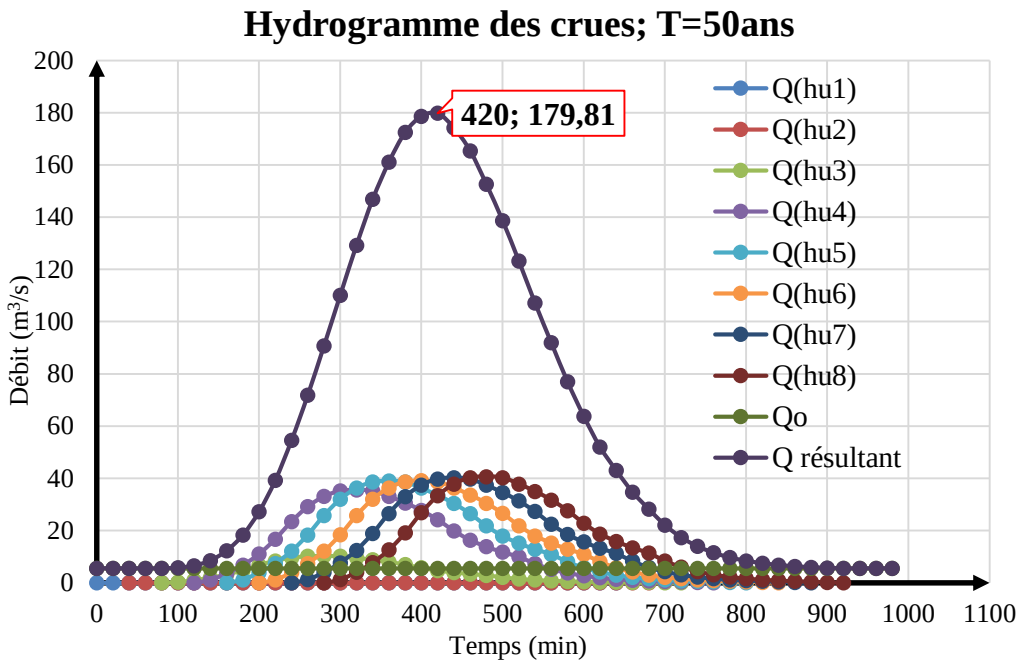
Répartition de la pluie nette/période de retour de 50ans

hu1	hu2	hu3	hu4	hu5	hu6	hu7	hu8	Pluie nette totale
0,00	0,00	0,59	2,06	2,26	2,26	2,33	2,35	11,86

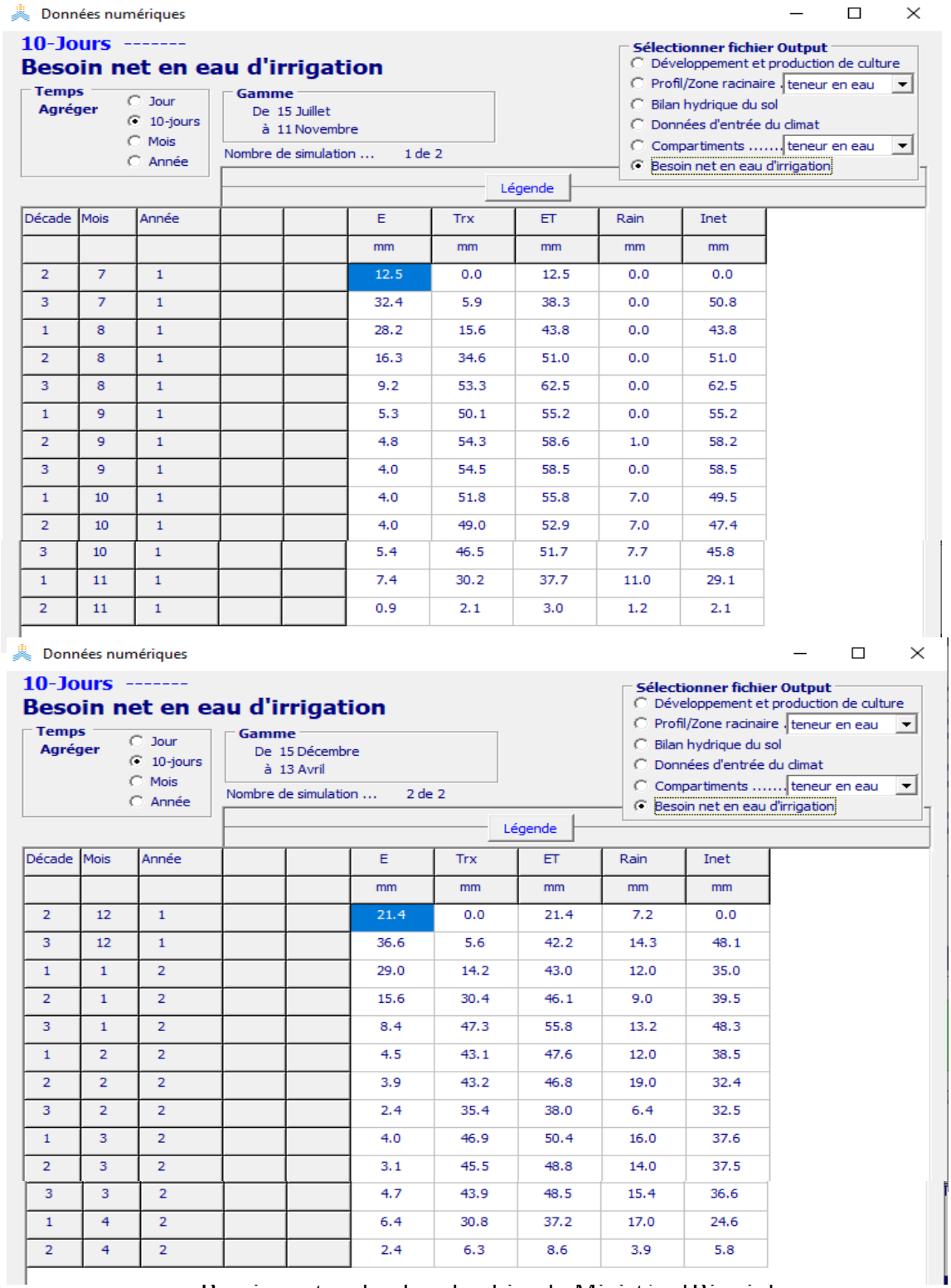
Résultats de calcul de l'hydrogramme de crues ; T=50ans

Q(m3//s)	T(min)	Q(hu1)	Q(hu2)	Q(hu3)	Q(hu4)	Q(hu5)	Q(hu6)	Q(hu7)	Q(hu8)	Qo	Q résultant
0,00	0	0								5,5	5,50
0,52	20	0								5,5	5,50
1,73	40	0	0							5,5	5,50
3,28	60	0	0							5,5	5,50
5,35	80	0	0	0,00						5,5	5,50
8,12	100	0	0	0,31						5,5	5,81
11,40	120	0	0	1,03	0,00					5,5	6,53
14,16	140	0	0	1,95	1,07					5,5	8,52
16,06	160	0	0	3,18	3,56	0,00				5,5	12,24
17,10	180	0	0	4,82	6,76	1,17				5,5	18,26
17,27	200	0	0	6,77	11,03	3,90	0,00			5,5	27,21

Q(m3//s)	T(min)	Q(hu1)	Q(hu2)	Q(hu3)	Q(hu4)	Q(hu5)	Q(hu6)	Q(hu7)	Q(hu8)	Qo	Q résultant
17,10	220	0	0	8,41	16,73	7,42	1,17			5,5	39,23
16,06	240	0	0	9,54	23,49	12,10	3,91	0,00		5,5	54,54
14,85	260	0	0	10,16	29,18	18,35	7,43	1,21		5,5	71,82
13,47	280	0	0	10,26	33,10	25,76	12,11	4,02	0,00	5,5	90,76
11,74	300	0	0	10,16	35,24	32,01	18,37	7,64	1,22	5,5	110,13
9,67	320	0	0	9,54	35,59	36,31	25,79	12,46	4,07	5,5	129,26
7,95	340	0	0	8,83	35,24	38,65	32,05	18,89	7,72	5,5	146,87
6,74	360	0	0	8,00	33,10	39,04	36,34	26,52	12,60	5,5	161,11
5,70	380	0	0	6,98	30,61	38,65	38,69	32,95	19,11	5,5	172,49
4,84	400	0	0	5,75	27,76	36,31	39,08	37,37	26,83	5,5	178,60
3,58	420	0	0	4,72	24,20	33,57	38,69	39,79	33,34	5,5	179,81
2,54	440	0	0	4,00	19,93	30,45	36,34	40,19	37,81	5,5	174,22
1,85	460	0	0	3,39	16,37	26,55	33,61	39,79	40,25	5,5	165,45
1,33	480	0	0	2,87	13,88	21,86	30,48	37,37	40,66	5,5	152,63
0,95	500	0	0	2,12	11,75	17,96	26,57	34,56	40,25	5,5	138,71
0,69	520	0	0	1,51	9,97	15,22	21,88	31,35	37,81	5,5	123,24
0,50	540	0	0	1,10	7,37	12,88	17,98	27,33	34,96	5,5	107,12
0,36	560	0	0	0,79	5,23	10,93	15,24	22,50	31,71	5,5	91,91
0,26	580	0	0	0,56	3,81	8,08	12,90	18,49	27,65	5,5	76,98
0,19	600	0	0	0,41	2,74	5,74	10,94	15,67	22,77	5,5	63,77
0,09	620	0	0	0,30	1,96	4,18	8,09	13,26	18,70	5,5	51,99
0,00	640	0	0	0,22	1,42	3,01	5,74	11,25	15,86	5,5	43,00
	660		0	0,15	1,03	2,15	4,18	8,32	13,42	5,5	34,75
	680		0	0,11	0,75	1,56	3,01	5,91	11,38	5,5	28,22
	700			0,05	0,53	1,13	2,15	4,30	8,42	5,5	22,08
	720			0,00	0,39	0,82	1,56	3,09	5,98	5,5	17,35
	740				0,18	0,59	1,13	2,21	4,35	5,5	13,96
	760				0,00	0,43	0,82	1,61	3,13	5,5	11,49
	780					0,20	0,59	1,17	2,24	5,5	9,68
	800					0,00	0,43	0,84	1,63	5,5	8,40
	820						0,20	0,60	1,18	5,5	7,48
	840						0,00	0,44	0,85	5,5	6,80
	860							0,20	0,61	5,5	6,31
	880							0,00	0,45	5,5	5,95
	900								0,20	5,5	5,70
	920								0,00	5,5	5,50
	940									5,5	5,50
	960									5,5	5,50
	980									5,5	5,50


Hydrogramme des crues; T=50ans
420; 179,81
Q(hu1)
Q(hu2)
Q(hu3)
Q(hu4)
Q(hu5)
Q(hu6)
Q(hu7)
Q(hu8)
Qo
Q résultant
Débit (m3/s)
Temps (min)
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
200
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
1100

Annexe 3 : Résultats de l'Aquacrop / calendriers rejetés



Données numériques

10-Jours -------

Besoin net en eau d'irrigation

Temps Agréger: Jour / 10-jours / Mois / Année

Gamme: De 15 Juillet à 11 Novembre

Nombre de simulation ... 1 de 2

Sélectionner fichier Output: Développement et production de culture; Profil/Zone racinaire teneur en eau; Bilan hydrique du sol; Données d'entrée du climat; Compartiments ..... teneur en eau; Besoin net en eau d'irrigation

Légende

Décade	Mois	Année			E	Trx	ET	Rain	Inet
					mm	mm	mm	mm	mm
2	7	1			12.5	0.0	12.5	0.0	0.0
3	7	1			32.4	5.9	38.3	0.0	50.8
1	8	1			28.2	15.6	43.8	0.0	43.8
2	8	1			16.3	34.6	51.0	0.0	51.0
3	8	1			9.2	53.3	62.5	0.0	62.5
1	9	1			5.3	50.1	55.2	0.0	55.2
2	9	1			4.8	54.3	58.6	1.0	58.2
3	9	1			4.0	54.5	58.5	0.0	58.5
1	10	1			4.0	51.8	55.8	7.0	49.5
2	10	1			4.0	49.0	52.9	7.0	47.4
3	10	1			5.4	46.5	51.7	7.7	45.8
1	11	1			7.4	30.2	37.7	11.0	29.1
2	11	1			0.9	2.1	3.0	1.2	2.1

Données numériques

10-Jours -------

Besoin net en eau d'irrigation

Temps Agréger: Jour / 10-jours / Mois / Année

Gamme: De 15 Décembre à 13 Avril

Nombre de simulation ... 2 de 2

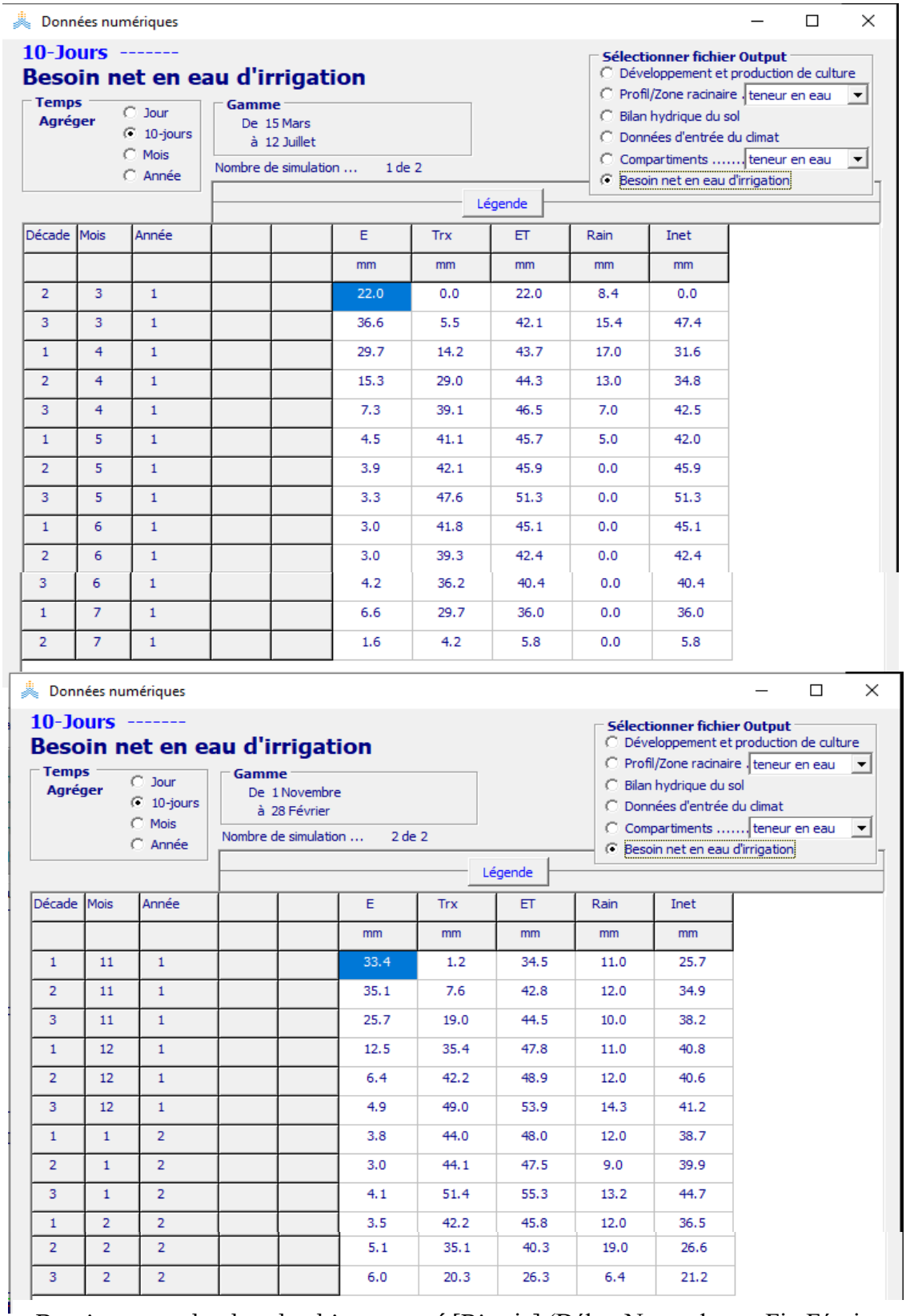
Sélectionner fichier Output: Développement et production de culture; Profil/Zone racinaire teneur en eau; Bilan hydrique du sol; Données d'entrée du climat; Compartiments ..... teneur en eau; Besoin net en eau d'irrigation

Légende

Décade	Mois	Année			E	Trx	ET	Rain	Inet
					mm	mm	mm	mm	mm
2	12	1			21.4	0.0	21.4	7.2	0.0
3	12	1			36.6	5.6	42.2	14.3	48.1
1	1	2			29.0	14.2	43.0	12.0	35.0
2	1	2			15.6	30.4	46.1	9.0	39.5
3	1	2			8.4	47.3	55.8	13.2	48.3
1	2	2			4.5	43.1	47.6	12.0	38.5
2	2	2			3.9	43.2	46.8	19.0	32.4
3	2	2			2.4	35.4	38.0	6.4	32.5
1	3	2			4.0	46.9	50.4	16.0	37.6
2	3	2			3.1	45.5	48.8	14.0	37.5
3	3	2			4.7	43.9	48.5	15.4	36.6
1	4	2			6.4	30.8	37.2	17.0	24.6
2	4	2			2.4	6.3	8.6	3.9	5.8

Besoins nets selon le calendrier du Ministère [Riz-riz]

(Mi-Juillet Mi-Novembre ; Mi-Décembre Mi-Avril)



Données numériques

10-Jours -------

Besoin net en eau d'irrigation

Temps Agréger: Jour / 10-jours / Mois / Année

Gamme: De 15 Mars à 12 Juillet

Nombre de simulation ... 1 de 2

Sélectionner fichier Output: Développement et production de culture; Profil/Zone racinaire (teneur en eau); Bilan hydrique du sol; Données d'entrée du climat; Compartiments ..... (teneur en eau); Besoin net en eau d'irrigation

Légende

Décade	Mois	Année			E	Trx	ET	Rain	Inet
					mm	mm	mm	mm	mm
2	3	1			22.0	0.0	22.0	8.4	0.0
3	3	1			36.6	5.5	42.1	15.4	47.4
1	4	1			29.7	14.2	43.7	17.0	31.6
2	4	1			15.3	29.0	44.3	13.0	34.8
3	4	1			7.3	39.1	46.5	7.0	42.5
1	5	1			4.5	41.1	45.7	5.0	42.0
2	5	1			3.9	42.1	45.9	0.0	45.9
3	5	1			3.3	47.6	51.3	0.0	51.3
1	6	1			3.0	41.8	45.1	0.0	45.1
2	6	1			3.0	39.3	42.4	0.0	42.4
3	6	1			4.2	36.2	40.4	0.0	40.4
1	7	1			6.6	29.7	36.0	0.0	36.0
2	7	1			1.6	4.2	5.8	0.0	5.8

Données numériques

10-Jours -------

Besoin net en eau d'irrigation

Temps Agréger: Jour / 10-jours / Mois / Année

Gamme: De 1 Novembre à 28 Février

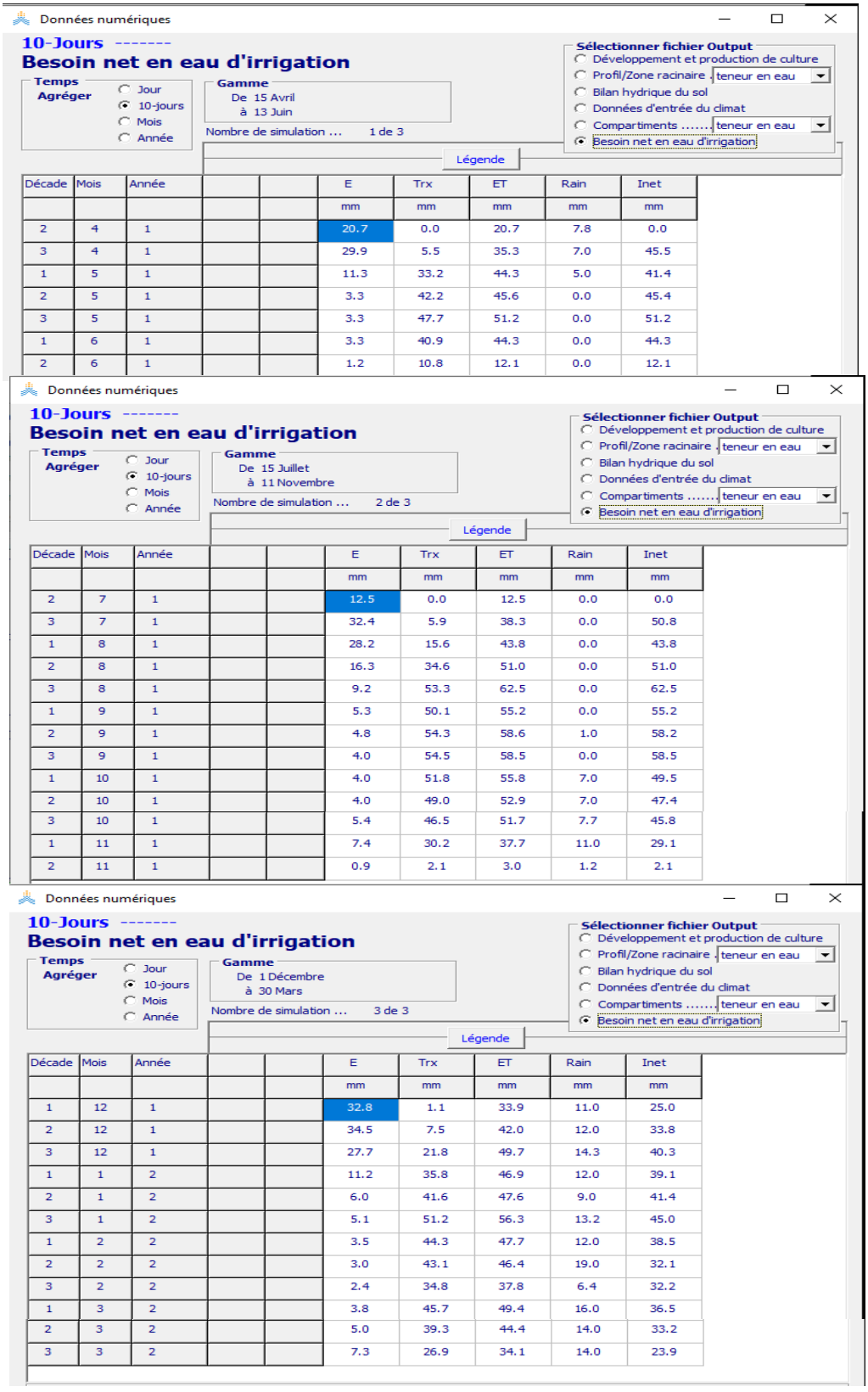
Nombre de simulation ... 2 de 2

Sélectionner fichier Output: Développement et production de culture; Profil/Zone racinaire (teneur en eau); Bilan hydrique du sol; Données d'entrée du climat; Compartiments ..... (teneur en eau); Besoin net en eau d'irrigation

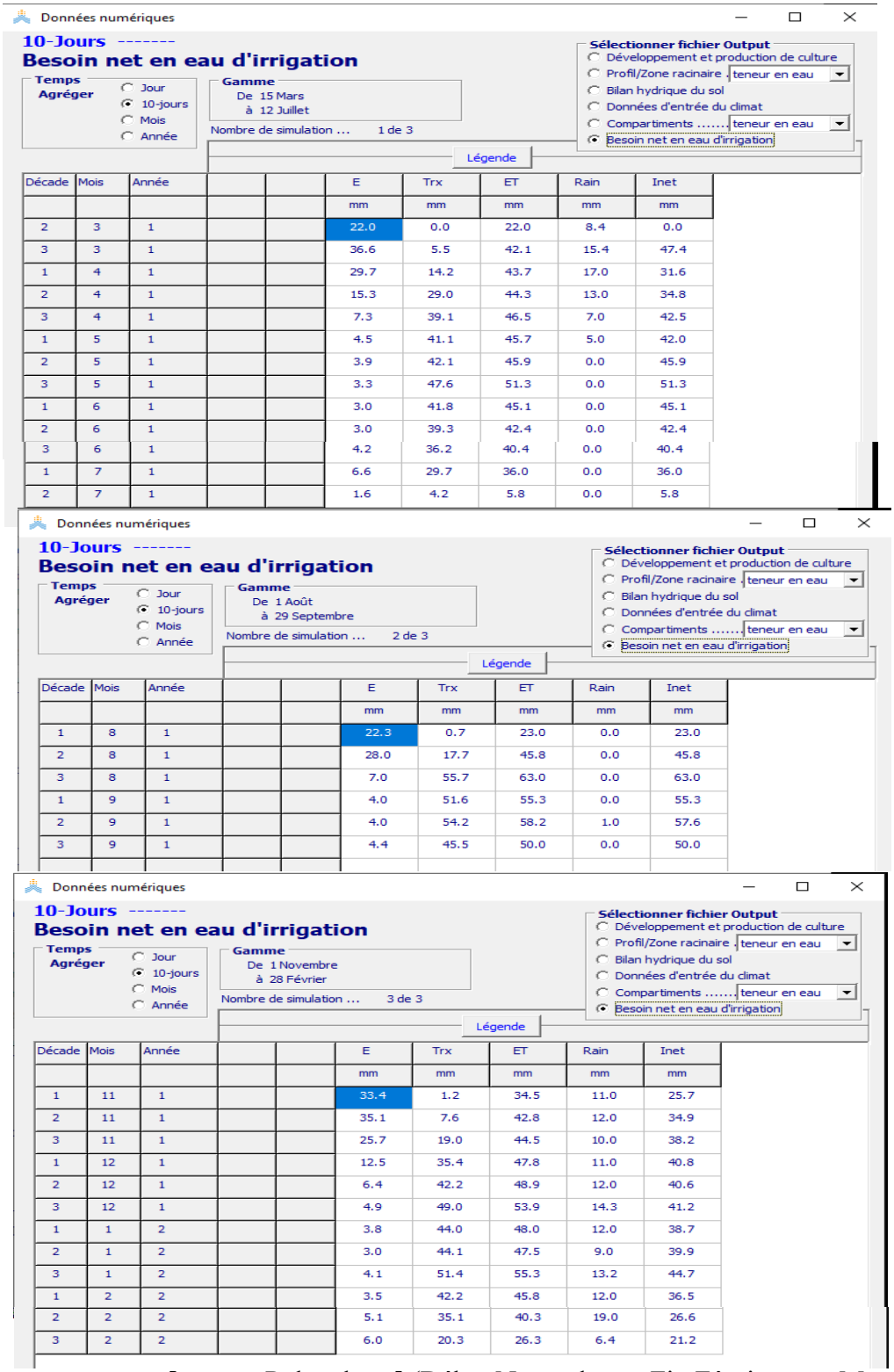
Légende

Décade	Mois	Année			E	Trx	ET	Rain	Inet
					mm	mm	mm	mm	mm
1	11	1			33.4	1.2	34.5	11.0	25.7
2	11	1			35.1	7.6	42.8	12.0	34.9
3	11	1			25.7	19.0	44.5	10.0	38.2
1	12	1			12.5	35.4	47.8	11.0	40.8
2	12	1			6.4	42.2	48.9	12.0	40.6
3	12	1			4.9	49.0	53.9	14.3	41.2
1	1	2			3.8	44.0	48.0	12.0	38.7
2	1	2			3.0	44.1	47.5	9.0	39.9
3	1	2			4.1	51.4	55.3	13.2	44.7
1	2	2			3.5	42.2	45.8	12.0	36.5
2	2	2			5.1	35.1	40.3	19.0	26.6
3	2	2			6.0	20.3	26.3	6.4	21.2

Besoins nets selon le calendrier proposé [Riz-riz] (Début Novembre →Fin Février ; Mi-Mars→ Mi-Juillet)



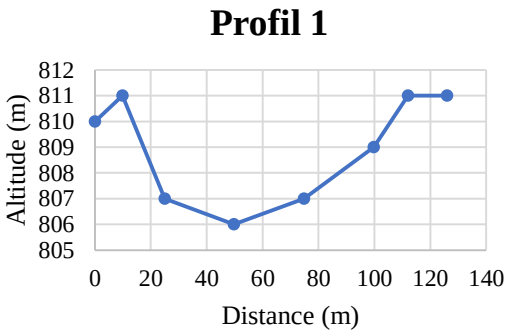
Besoins nets [Riz-riz-Polyculture] (Mi-Juillet →Mi-Novembre ; Début Décembre→ Fin Mars ; Mi-Avril→ Mi-Juin)

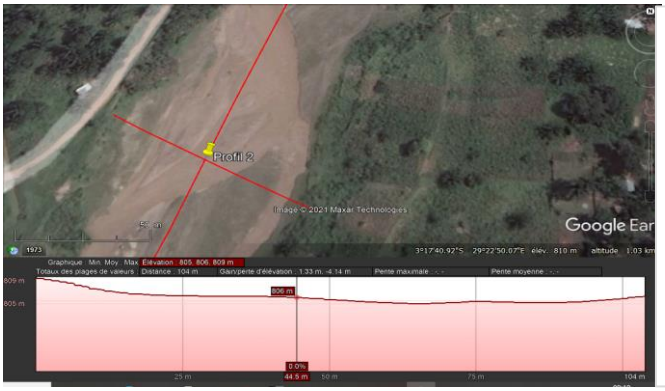


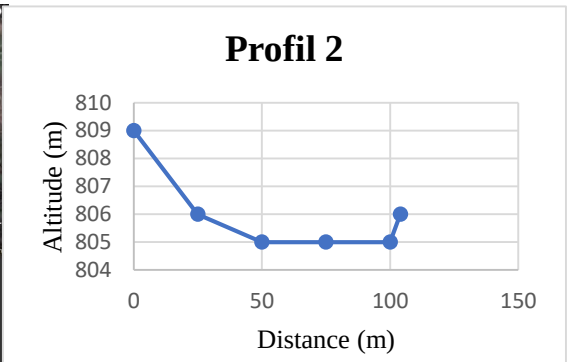
Besoins nets [Riz-riz-Polyculture] (Début Novembre→ Fin Février ; Mi-Mars→ Mi-Juillet ; Début Août →Fin Septembre)

Annexe 4 : Détails des différents profils du tronçon en aval des barrages

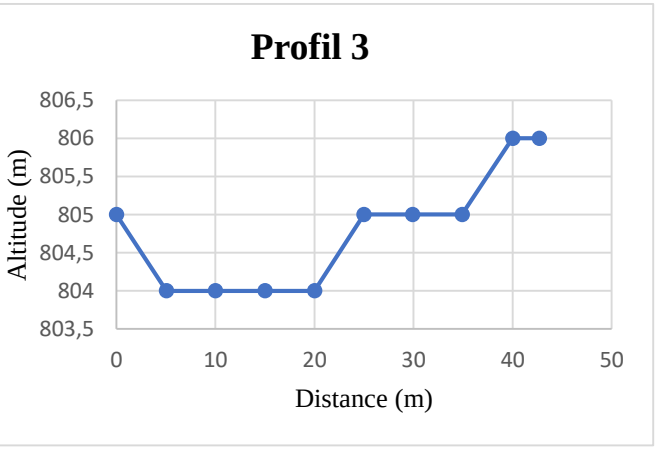




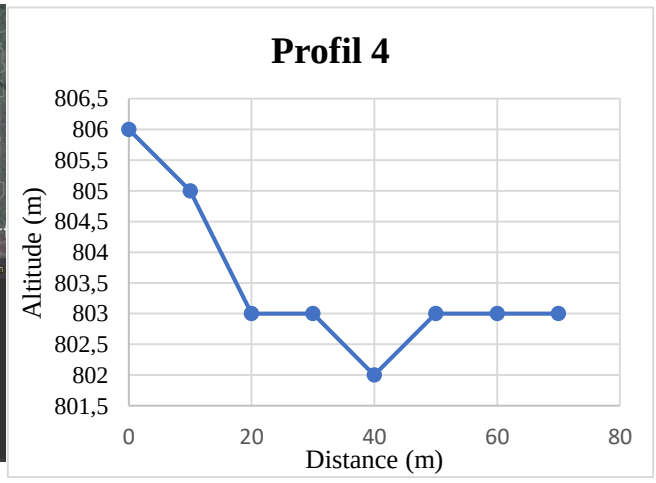




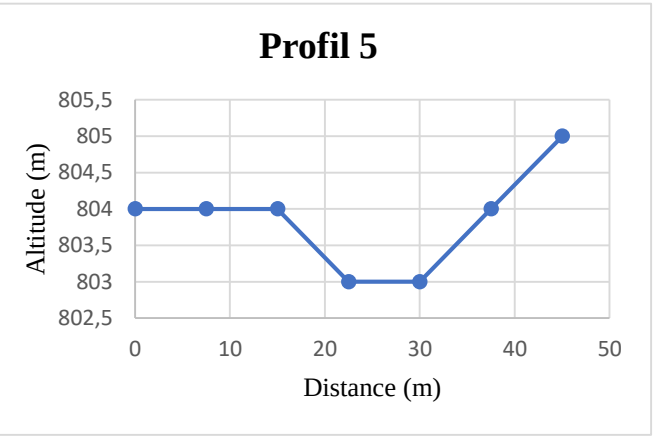


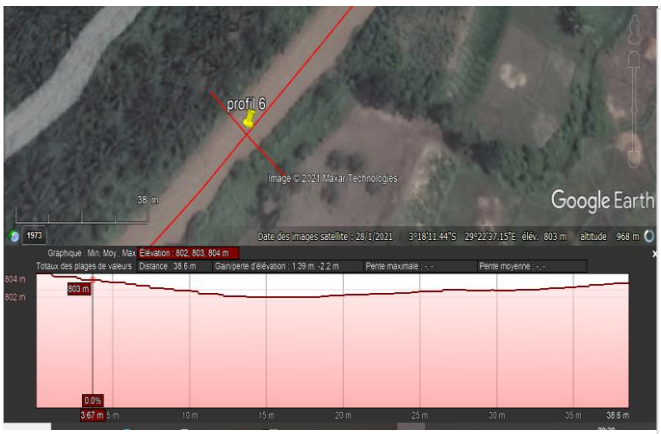


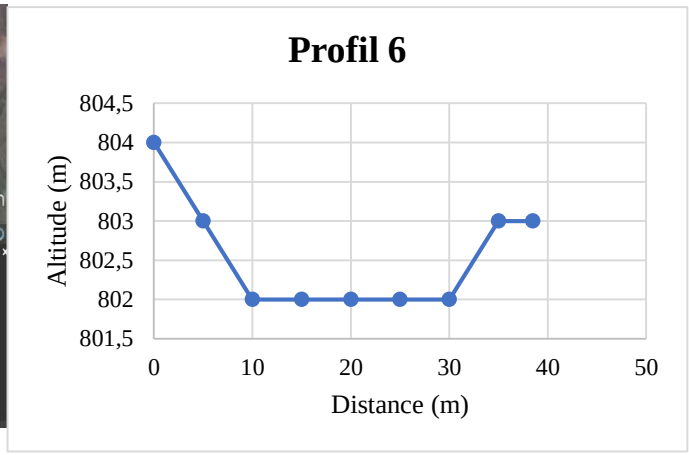




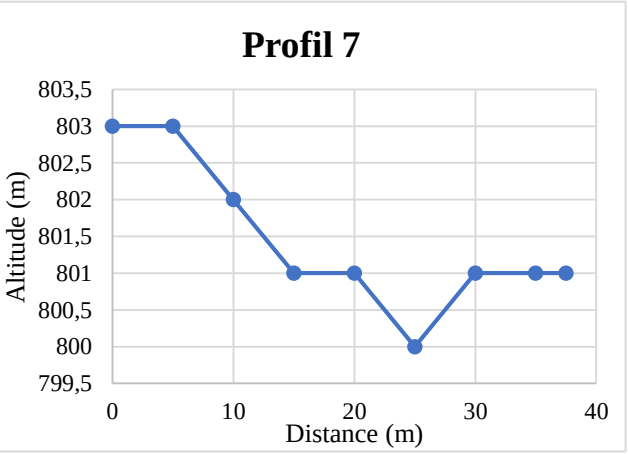

Profil 5
Image © 2021 Maxar Technologies
Google Earth

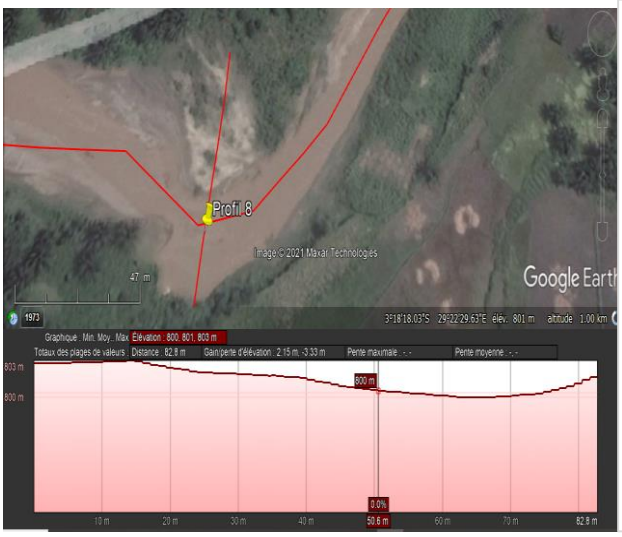

Profil 5
Altitude (m)
805,5
805
804,5
804
803,5
803
802,5
0
10
20
30
40
50
Distance (m)

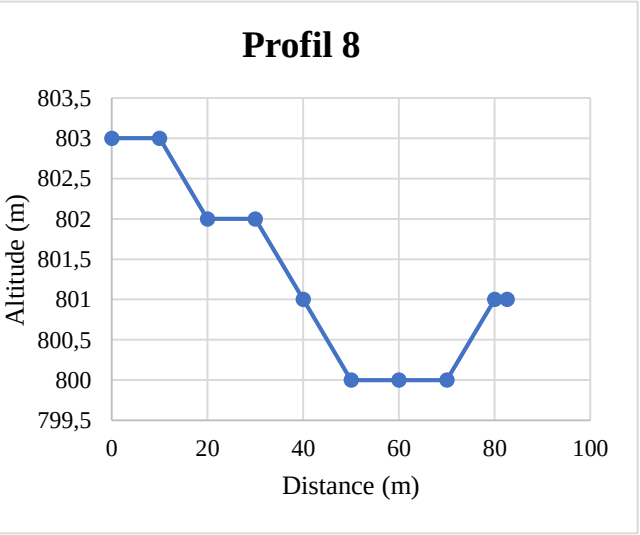

profil 6
Image © 2021 Maxar Technologies
Google Earth


Profil 6
Altitude (m)
804,5
804
803,5
803
802,5
802
801,5
0
10
20
30
40
50
Distance (m)

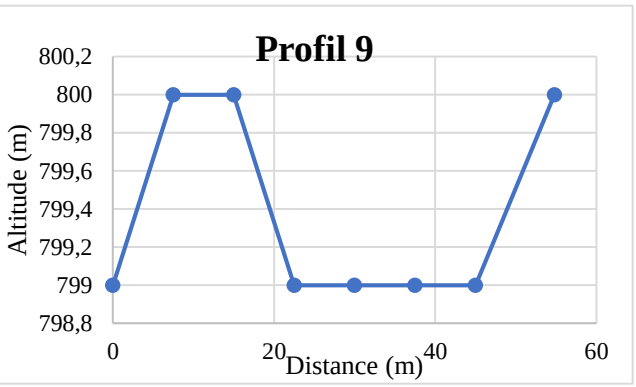

Profil 7
Image © 2021 Maxar Technologies
Google Earth


Profil 7
Altitude (m)
803,5
803
802,5
802
801,5
801
800,5
800
799,5
0
10
20
30
40
Distance (m)

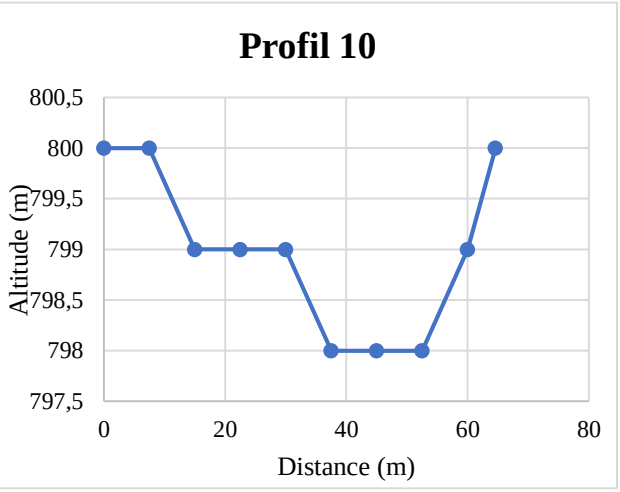

Profil 8
Image © 2021 Maxar Technologies
Google Earth

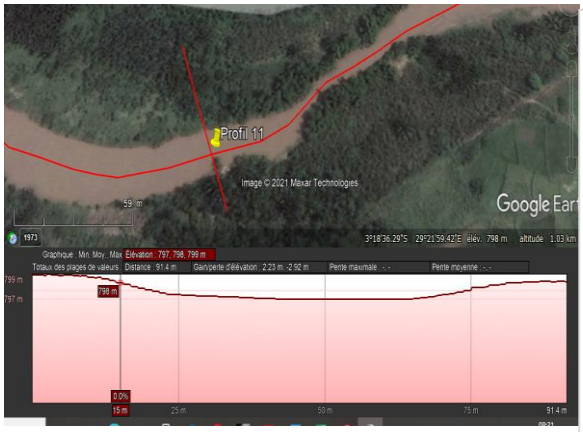

Profil 8
Altitude (m)
803,5
803
802,5
802
801,5
801
800,5
800
799,5
0
20
40
60
80
100
Distance (m)

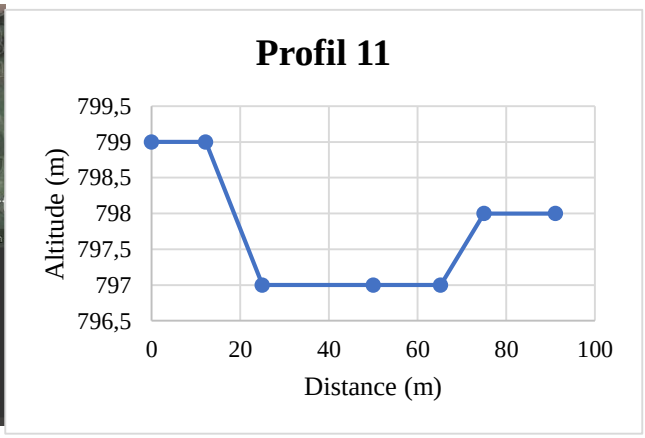

Profil 9
Google Earth

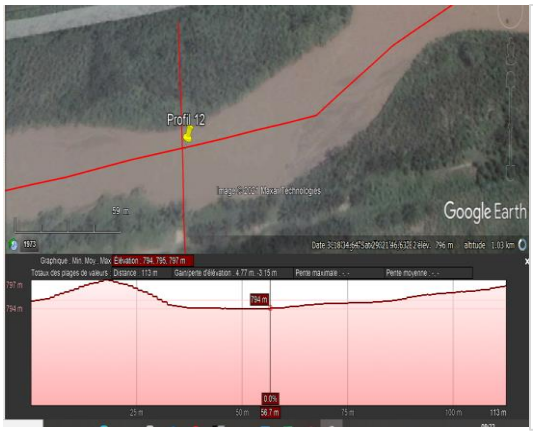

Profil 9
Altitude (m)
800,2
800
799,8
799,6
799,4
799,2
799
798,8
0
20
40
60
Distance (m)

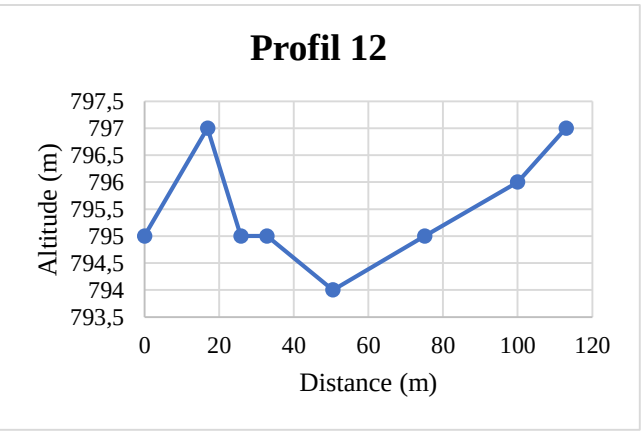

Profil 10
Google Earth


Profil 10
Altitude (m)
800,5
800
799,5
799
798,5
798
797,5
0
20
40
60
80
Distance (m)

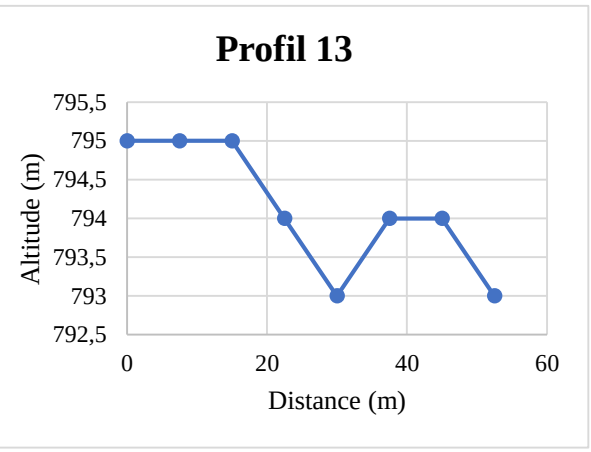

Profil 11
Google Earth

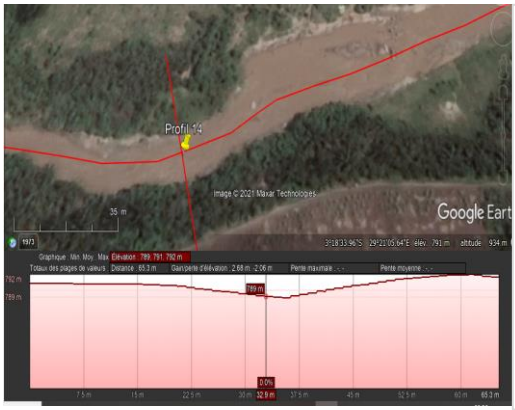

Profil 11
Altitude (m)
799,5
799
798,5
798
797,5
797
796,5
0
20
40
60
80
100
Distance (m)

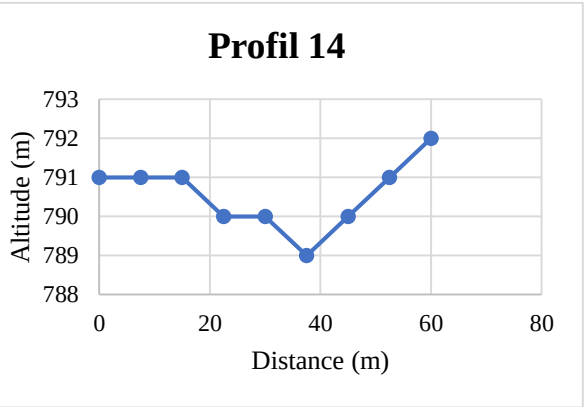

Profil 12
Google Earth


Profil 12
Altitude (m)
797,5
797
796,5
796
795,5
795
794,5
794
793,5
0
20
40
60
80
100
120
Distance (m)

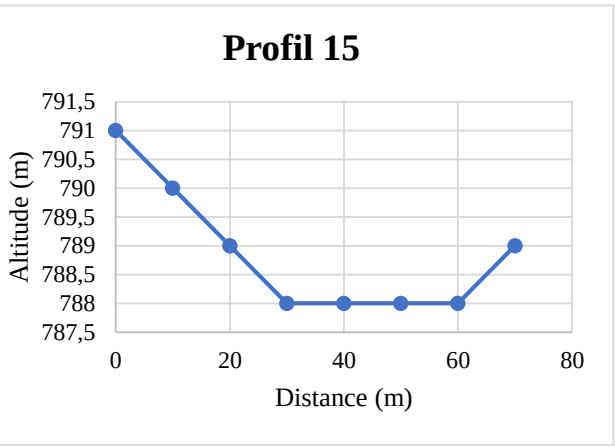

Profil 13
Google Earth


Profil 13
795,5
795
794,5
794
793,5
793
792,5
Altitude (m)
0
20
40
60
Distance (m)

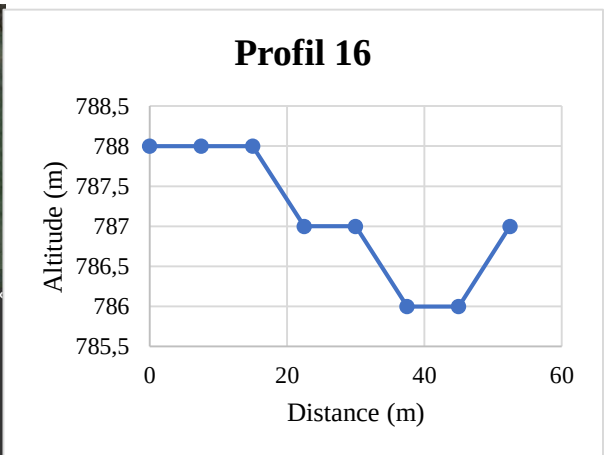

Profil 14
Google Earth


Profil 14
793
792
791
790
789
788
Altitude (m)
0
20
40
60
80
Distance (m)

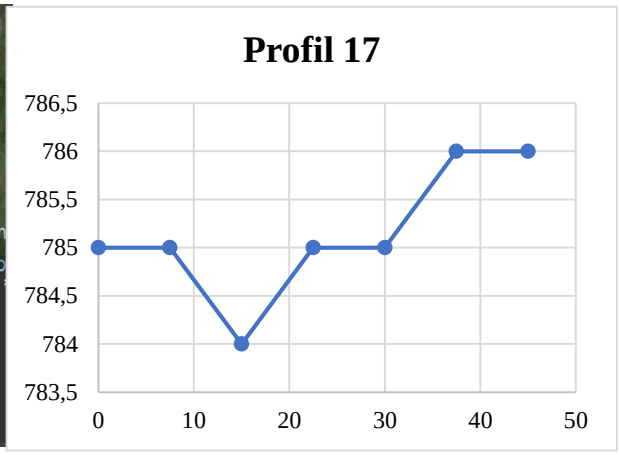

Profil 15
Google Earth


Profil 15
791,5
791
790,5
790
789,5
789
788,5
788
787,5
Altitude (m)
0
20
40
60
80
Distance (m)

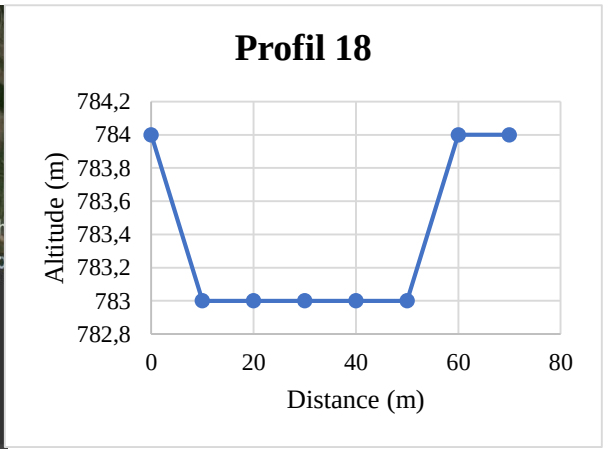

Profil 16
Google Earth


Profil 16
788,5
788
787,5
787
786,5
786
785,5
Altitude (m)
0
20
40
60
Distance (m)

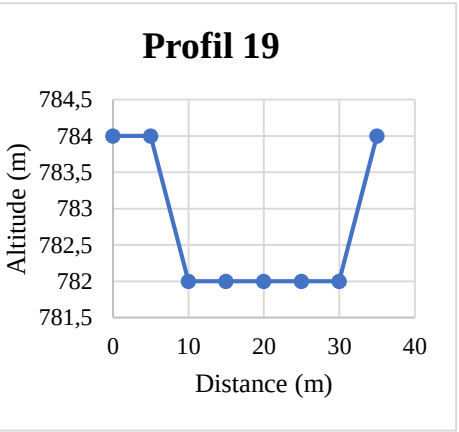

Profil 17
Image © 2021 Maxar Technologies
Google Earth

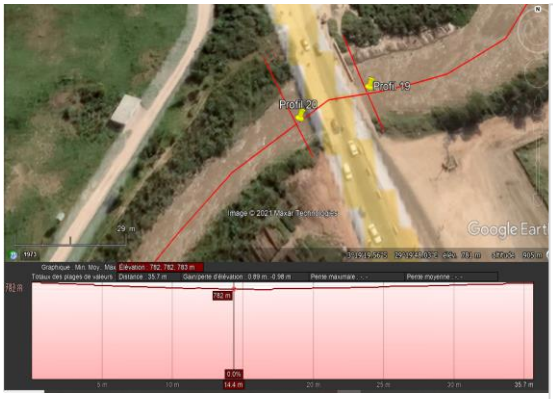

Profil 17
786,5
786
785,5
785
784,5
784
783,5
0
10
20
30
40
50

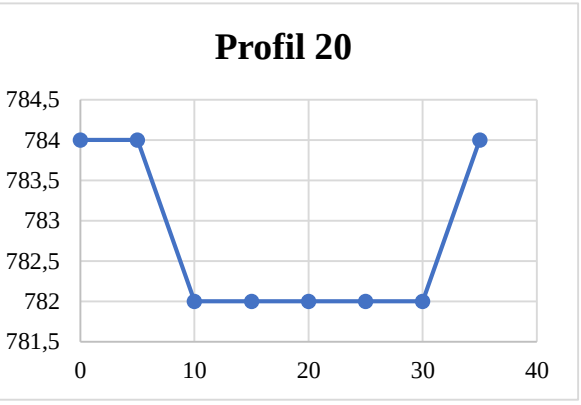

profil 18
Image © 2021 Maxar Technologies
Google Earth


Profil 18
784,2
784
783,8
783,6
783,4
783,2
783
782,8
Altitude (m)
0
20
40
60
80
Distance (m)

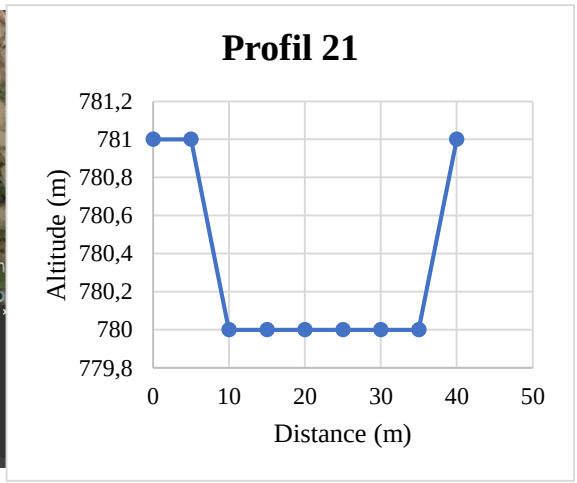

Profil 19
Image © 2021 Maxar Technologies
Google Earth

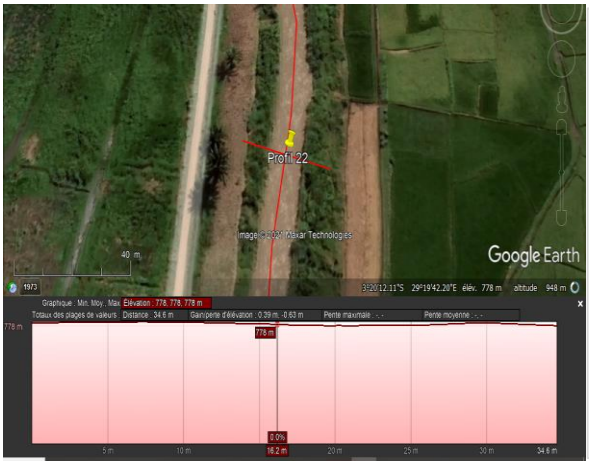

Profil 19
784,5
784
783,5
783
782,5
782
781,5
Altitude (m)
0
10
20
30
40
Distance (m)

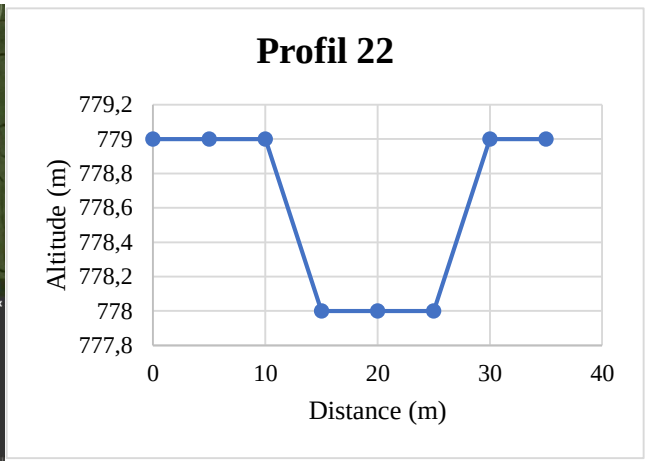

Profil 20
Image © 2021 Maxar Technologies
Google Earth


Profil 20
784,5
784
783,5
783
782,5
782
781,5
0
10
20
30
40


Profil 21
Google Earth


Profil 21
781,2
781
780,8
780,6
780,4
780,2
780
779,8
Altitude (m)
0
10
20
30
40
50
Distance (m)


Profil 22
Google Earth


Profil 22
779,2
779
778,8
778,6
778,4
778,2
778
777,8
Altitude (m)
0
10
20
30
40
Distance (m)